



HAL
open science

Clés de progrès technico-économiques des batteries lithium-ion pour la traction automobile

Gaëtan Patry

► **To cite this version:**

Gaëtan Patry. Clés de progrès technico-économiques des batteries lithium-ion pour la traction automobile. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2014. Français. NNT : 2014ENAM0065 . tel-01127569

HAL Id: tel-01127569

<https://pastel.hal.science/tel-01127569v1>

Submitted on 7 Mar 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.

École doctorale n° 432 : Science des Métiers de l'ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Sciences de l'ingénieur "

présentée et soutenue publiquement par

Gaëtan PATRY

Le 16 décembre 2014

**Clés de progrès technico-économiques des batteries lithium-ion pour la
traction automobile**

Directeur de thèse : **Daniel FROELICH**

Co-encadrement de la thèse : **Sébastien MARTINET**

Jury

M. Rachid YAZAMI, Directeur de recherche CNRS, Nanyang Technological University Singapour

M. Franck AGGERI, Professeur, directeur de l'EMS, MINES ParisTech

M. Patrick JOCHEM, Dr. rer. pol., IIP, Karlsruher Institut für Technologie

M. Farouk TEDJAR, Président Recupyl SA, Professeur associé Grenoble INP

M. Daniel FROELICH, Professeur, LCPI, Arts et Métiers Paris Tech

M. Sébastien MARTINET, HDR, DEHT, CEA LITEN

M. Alex ROMAGNY, Ingénieur, Renault

Président du jury

Rapporteur

Examinateur

Examinateur

Examinateur

Examinateur

Invité

**T
H
È
S
E**

Remerciements

De nombreuses personnes ont contribué à ce travail. Je tiens à les remercier.

Je remercie vivement Rachid Yazami, directeur de recherche CNRS en détachement à la Nanyang Technological University de Singapour et Franck Aggieri, professeur, directeur du département EMS aux MINES ParisTech, qui ont accepté d'être les rapporteurs de cette thèse.

Je souhaite également remercier Farouk Tedjar, président de la société Recupyl et Professeur associé Grenoble INP et Dr. Rer. Pol. Patrick Jochem, directeur du groupe de recherche « Transport et Energie », au sein du Karlsruher Institut für Technologie, d'avoir participé au jury de cette thèse en tant qu'examineurs.

Je remercie bien sur Daniel Froelich, Professeur aux Arts et Métiers ParisTech d'avoir accepté d'assurer le rôle de directeur de cette thèse. De même je remercie Sébastien Martinet, HDR au CEA LITEN, qui a accepté d'en être le co-encadrant, et dont le support m'a été très précieux.

Merci évidemment à Alex Romagny, ingénieur chez Renault, qui a joué le rôle de tuteur entreprise, qui est à l'origine de ce travail, et dont la vision et les idées ont largement guidé cette thèse.

Merci à Catherine Nallet, Christel Laferté, Bénédicte James, Pierre Tran Van, Jérôme Peyrard, Hubert Roch et à tous mes collègues chez Renault, où j'ai pu profiter d'un cadre parfait pour mon travail.

Merci à Améziane Aoussat, de m'avoir accepté au sein du LCPI. Merci à Sabine Féroul pour son aide précieuse, ainsi qu'à l'ensemble des personnes aux Arts Métiers, à Paris comme à Chambéry, ainsi qu'au CEA LITEN qui m'ont aidé pour cette thèse.

Sur une note plus personnelle, je souhaite remercier ma famille qui est géniale. Je remercie aussi les amis : les « 400 g » ENSEEG, les Atzen de Karlsruhe, les copains de l'escrime, les deux myopes et tous les autres.

Et enfin, un très gros merci à Pauline. Et bien plus encore !

« Tout étudiant en chimie, devant n'importe quel manuel, devrait être conscient que dans une de ces pages, peut-être dans une seule ligne, un seul mot, son avenir est écrit en caractères indéchiffrables. »

Primo Levi, Le système périodique

Table des matières

RESUME.....	14
ABREVIATIONS	15
INTRODUCTION.....	16

PLAN DE L'ETUDE.....	18
----------------------	----

CHAPITRE I. L'AUTOMOBILE ET LE STOCKAGE DE L'ENERGIE 20

1	INTRODUCTION	20
2	LA MUTATION DE L'AUTOMOBILE.....	20
3	LE STOCKAGE DE L'ENERGIE : L'ELEMENT CLE DE LA TRACTION ELECTRIQUE	23
3.1	<i>Les technologies de stockage</i>	24
3.2	<i>Critères de sélection</i>	24
4	UNE TECHNOLOGIE A LA FOIS MATURE ET ENCORE MAL MAITRISEE	26
4.1	<i>Une nouveauté à appréhender</i>	26
4.2	<i>Des activités de recherche foisonnantes</i>	27
4.2.1	Publications scientifiques	27
4.2.2	Brevets	29
4.3	<i>Des progrès importants de la technologie</i>	29
4.4	<i>De nombreuses pistes encore à explorer</i>	30
5	LES ACTEURS DU MARCHÉ LITHIUM-ION.....	31
5.1	<i>Les fabricants de batteries lithium-ion</i>	31
5.2	<i>Les fabricants de matières et composants</i>	32
5.3	<i>Les minerais de base</i>	32
5.3.1	Lithium	32
5.3.2	Graphite naturel	33
5.3.3	Cobalt	33
5.3.4	Nickel.....	34
6	CONCLUSION.....	34

CHAPITRE II. ETAT DE L'ART : COMPOSITION D'UNE BATTERIE LITHIUM-ION 35

1	INTRODUCTION	35
2	LA COMPOSITION D'UNE BATTERIE LITHIUM-ION.....	36
2.1	<i>Les composants d'une cellule</i>	37
2.1.1	Matériau actif de l'électrode positive	39
2.1.2	Matériau actif de l'électrode négative	41
2.1.3	Autre matières dans les électrodes	43
2.1.4	Electrolyte.....	44

2.1.5	Séparateur	44
2.1.6	Feuillard collecteur de courant	44
2.1.7	Autres composants	45
2.2	<i>Autres composants d'une batterie lithium-ion</i>	46
2.2.1	Modules	46
2.2.2	Système de gestion de la batterie (BMS)	46
2.2.3	Thermique et connectique.....	47
2.2.4	Bac batterie.....	47
3	COUT DES MATIERES ET COMPOSANTS : ETAT DE L'ART	47
3.1	<i>Matériaux actifs d'électrode positive</i>	47
3.2	<i>Matériaux actifs d'électrode négative</i>	50
3.3	<i>Electrolyte et séparateur</i>	50
3.4	<i>Collecteurs de courant</i>	51
3.5	<i>Liant, solvant du liant et agents conducteurs</i>	51
3.6	<i>Composants de cellule</i>	51
4	CONCLUSION.....	52

CHAPITRE III. ETAT DE L'ART : FABRICATION DES CELLULES . 53

1	INTRODUCTION	53
2	FONCTIONNEMENT GLOBAL D'UNE USINE	53
2.1	<i>Fabrication des électrodes</i>	54
2.2	<i>Fabrication des cellules et autres étapes</i>	55
3	COUT DE FABRICATION : ETAT DE L'ART.....	56
3.1	<i>Investissement et main d'œuvre</i>	56
3.2	<i>Consommations d'énergie</i>	59
4	COUT TOTAL DES CELLULES LITHIUM-ION.....	60
4.1	<i>De la difficulté de comparer les coûts</i>	60
4.2	<i>Littérature</i>	61
4.3	<i>Effets volume</i>	66
5	CONCLUSION.....	66

PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES DE RECHERCHE 67

1	PROBLEMATIQUE	67
2	HYPOTHESE DE RECHERCHE	67

CHAPITRE IV. DEVELOPPEMENT DE MODELES DE COUT 69

1	INTRODUCTION	69
2	DEFINITION DU COUT.....	70
2.1	<i>Coût total</i>	70
2.1.1	Coûts directs.....	70
2.1.2	Coûts indirects	71
2.1.3	Paiement des capitaux investis	71

2.1.4	Garantie.....	71
2.2	<i>Logistique</i>	72
2.3	<i>Tickets d'entrée</i>	72
2.4	<i>Décomposition usuelle de la structure de coût</i>	72
3	MODELISATION DES COUTS AMONT : OCA	73
3.1	<i>Achats de matières et composants</i>	73
3.2	<i>Fabrication</i>	74
3.3	<i>Frais généraux et autres frais</i>	75
3.4	<i>Valeurs des coefficients</i>	76
4	MODELISATION ANALYTIQUE DES COUTS : MAC	79
4.1	<i>Le choix du logiciel</i>	79
4.2	<i>Approche du modèle MAC</i>	80
4.3	<i>Calcul des nouveaux temps de cycle</i>	82
4.4	<i>Utilisation du logiciel</i>	83
4.4.1	Données entrées dans le logiciel.....	83
4.4.2	Frais généraux et autres frais.....	86
5	CONCLUSION.....	87

CHAPITRE V. ETUDE COMPARATIVE DE COUT DE CELLULES .. 88

1	INTRODUCTION	88
2	METHODE DE L'ETUDE.....	88
2.1	<i>Dimensionnement des cellules</i>	89
2.2	<i>Coût des matières et composants</i>	91
3	RESULTATS DE L'ETUDE	92
3.1	<i>Influence du matériau actif de l'électrode positive</i>	92
3.2	<i>Influence de l'épaisseur d'enduction des électrodes sur le coût</i>	94
3.3	<i>Effet de l'épaisseur de l'enduction de l'électrode sur les propriétés de la cellule</i>	96
3.3.1	Puissance de la cellule.....	96
3.3.2	Facilité de fabrication	97
3.3.3	Durabilité	97
3.3.4	Volume et masse	98
3.3.5	Effets d'autres paramètres	98
3.4	<i>Influence de la capacité surfacique d'électrode sur le coût</i>	99
3.5	<i>Sensibilité du modèle au coût des matériaux actifs</i>	100
3.6	<i>Autres facteurs de coût</i>	101
4	COMPARAISON DU MODELE AMONT A LA LITTERATURE	102
5	CONCLUSION.....	103

CHAPITRE VI. DEVELOPPEMENT DE REFERENTIELS SUR LES MATIERES ET LA FABRICATION 104

1	INTRODUCTION	104
---	--------------------	-----

2	REFERENTIEL ACHATS.....	104
2.1	<i>Les défis de l'estimation du coût des matières</i>	105
2.2	<i>Matériaux actifs d'électrode positive</i>	107
2.3	<i>Matériaux actifs d'électrode négative</i>	111
2.4	<i>Electrolyte et séparateur</i>	112
2.5	<i>Autres composants d'une cellule</i>	113
2.6	<i>Organisation du référentiel</i>	113
3	REFERENTIEL FABRICATION.....	114
3.1	<i>Organisation des données dans le référentiel</i>	115
3.2	<i>Graphiques récapitulatifs</i>	116
3.2.1	Fabrication des électrodes	116
3.2.2	Assemblage et formation des cellules	120
4	USINE DE REFERENCE.....	121
4.1	<i>Fabrication des électrodes</i>	122
4.1.1	Description du procédé retenu	122
4.1.2	Comparaison qualitative des données avec la littérature	122
4.2	<i>Assemblage des cellules et formation</i>	123
4.2.1	Description du procédé retenu	123
4.2.2	Comparaison qualitative des données avec la littérature	124
4.3	<i>Frais de fonctionnement et d'entretien</i>	125
4.3.1	Description des frais retenus.....	125
4.3.2	Comparaison avec des données de la littérature.....	126
4.4	<i>Rebuts</i>	126
4.4.1	Rebuts pratiques.....	126
4.4.2	Cascade des rebuts	126
5	CONCLUSION.....	127

CHAPITRE VII. ANALYSE DE L'INCERTITUDE DES RESULTATS¹²⁸

1	INTRODUCTION	128
2	SOURCE D'INCERTITUDE	128
2.1	<i>Variabilité</i>	129
2.2	<i>Imprécision</i>	129
2.3	<i>Incertitude au sens strict</i>	129
3	METHODE MONTE CARLO	130
3.1	<i>Fonction MATLAB</i>	130
3.2	<i>Choix de la distribution</i>	131
3.2.1	Loi uniforme.....	131
3.2.2	Loi normale	132
3.2.3	Loi Beta	132
3.2.4	Optimisation du temps de calcul global	132
4	CADRAGE DE LA METHODE : MATRICES DE CRITERES	133
4.1	<i>Incertitudes sur les données d'entrées achats</i>	133
4.2	<i>Incertitude sur le procédé de fabrication</i>	134

4.3	<i>Détermination de la distribution</i>	135
5	APPLICATION AUX MODELES DE L'ETUDE	136
5.1	<i>Contexte</i>	137
5.2	<i>Modèle amont OCA</i>	137
5.2.1	Achats.....	137
5.2.2	Fabrication.....	140
5.3	<i>Modèle analytique MAC</i>	140
5.3.1	Achats.....	141
5.3.2	Fabrication.....	141
5.4	<i>BatPac</i>	142
5.5	<i>Résultats</i>	142
6	CONCLUSION.....	144

CHAPITRE VIII. EXAMEN ECONOMIQUE DES MATERIAUX PROMETTEURS 145

1	INTRODUCTION	145
2	MODELISATION DU COUT DES MATERIAUX ACTIFS	146
2.1	<i>Modélisation de coût du NMC</i>	146
2.1.1	Procédé de fabrication	146
2.1.2	Coût des précurseurs.....	147
2.1.3	Estimation du coût de fabrication	147
2.2	<i>Application du modèle à d'autres matériaux actifs</i>	149
2.3	<i>Evaluation des incertitudes sur le coût des matériaux</i>	150
3	DIMENSIONNEMENT DES CELLULES	153
3.1	<i>Caractéristiques techniques des composés</i>	153
3.1.1	LMNO	153
3.1.2	Lithium-riche	153
3.1.3	LMFP/C	154
3.1.4	Silicium	154
3.1.5	TNO.....	155
3.2	<i>Dimensionnement de cellules</i>	155
4	RESULTATS DE L'ETUDE	158
4.1	<i>Hypothèses de la modélisation de coût</i>	158
4.2	<i>Résultats</i>	159
4.3	<i>Evaluation des incertitudes sur le coût des cellules</i>	162
5	CONCLUSION.....	163

CONCLUSION 165

<i>Apports scientifiques</i> :	167
<i>Perspectives</i>	167

ANNEXES 169

1	ETAT DE L'ART	169
1.1	<i>Fonctionnement d'une usine</i>	169
1.1.1	Fabrication des électrodes	169
1.1.2	Fabrication des cellules.....	172
1.1.3	Autres étapes de fabrication.....	174
1.2	<i>Consommations d'énergie</i>	175
1.3	<i>Coût des cellules</i>	178
1.4	<i>Effets volume</i>	181
2	REFERENTIEL DE FABRICATION	184
2.1	<i>Organisation globale du fichier</i>	184
2.1.1	Informations à compléter pour les opérations principales	186
2.1.2	Informations à compléter pour les opérations secondaires	186
2.2	<i>Graphiques récapitulatifs</i>	187
2.2.1	Assemblage des cellules.....	187
2.2.2	Formation des cellules	190
3	FONCTION MATLAB D'ANALYSE DES INCERTITUDES.....	190

BIBLIOGRAPHIE..... 196

RESUME.....ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

ABSTRACTERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

Table des figures

Figure 1 : Lohner-Porsche « La Toujours Contente », 1900 (2)	22
Figure 2 : Ventes d'hybrides Toyota dans le monde (3).....	22
Figure 3 : Diagramme de Ragone selon Beeker <i>et al.</i> (4).....	25
Figure 4 : Occurrences sous Scopus par années.	28
Figure 5 : Comparaison des occurrences sous Scopus pour plusieurs technologies.....	28
Figure 6 : Evolution de la densité d'énergie des batteries lithium-ion selon Rohan <i>et al.</i> (6)	30
Figure 7 : Matériaux actifs actuels du lithium-ion selon Tarascon (8)	31
Figure 8 : Classement des risques matières de l'UE (17)	33
Figure 9 : Vue éclatée de la batterie de la Chevrolet volt (19)	35
Figure 10 : Vision éclatée des trois formats de cellules : cylindrique (a), prismatique en emballage rigide (b), prismatique en emballage souple (c) (26)	37
Figure 11 : Schéma de fonctionnement d'une cellule de batterie lithium-ion.....	37
Figure 12 : Composition d'une cellule (source des images : celgard.com; solostocks.fr, jinbao-china.com, monstermarketplace.com, scienceviz.com)	38
Figure 13 : Vue transversale de l'intérieur d'une cellule lithium-ion	39
Figure 14 : Tension en fonction de la capacité selon Amirault <i>et al.</i> (27)	40
Figure 15 : Exemple de cellule prismatique commerciale Hitachi (33)	45
Figure 16 : Vue en coupe schématique de l'intérieur d'une cellule cylindrique (34)	46
Figure 17 : Schéma d'une usine de batteries pour PHEV selon BatPac (47)	54
Figure 18 : Schéma des étapes de fabrication des électrodes selon Brodd (48).	54
Figure 19 : Représentation de la structure d'électrode : les particules de matières sont maintenues par un liant, et des particules conductrices assurent la conduction électronique (49).....	55
Figure 20 : Répartition des coûts de fabrication selon Anderson (50)	58
Figure 21 : Répartition des coûts de fabrication de la batterie selon Rempel <i>et al.</i> (37)	59
Figure 22 : Répartition des coûts de la batterie référence selon Nelson <i>et al.</i> (46)	62
Figure 23 : Prix aux kWh en fonction de trois paramètres selon Rempel <i>et al.</i> (37).....	63
Figure 24 : Cartographie de coût et de performance en fonction de paramètres d'électrode selon Gallagher (40)	64
Figure 25 : Le penseur, Rodin	67
Figure 26 : Quantités de matières pour les cellules de l'étude	77
Figure 27 : Calcul du coût matière avec l'OCA.....	78
Figure 28 : Exemple de calcul du coût total	78
Figure 29 : Exemple de synthèse simplifiée issue du modèle MAC pour l'étude d'une cellule en USD	80
Figure 30 : Vision schématique du principe de calcul de coûts pour le modèle MAC	81
Figure 31 : Exemple de feuille d'achat dans le modèle MAC. En rouge : ensemble des fiches élémentaires de l'étude. En bleu : les données entrées. En vert : résultats calculés par le logiciel.	84
Figure 32 : Exemple de feuille de transformation du modèle MAC. En rouge : ensemble des fiches élémentaires de l'étude. En bleu : les données entrées. En vert : résultats calculés par le logiciel.	85

Figure 33 : Définition de l'épaisseur d'enduction d'électrode	90
Figure 34: Décomposition du coût des cellules pour une épaisseur d'enduction de 50 μm (* l'électrode négative est limitante pour NMC et NCA)	93
Figure 35 : Comparaison de coût de quatre cellules en fonction de l'épaisseur d'enduction (*l'électrode négative est limitante)	95
Figure 36 : Décomposition du coût de la cellule NMC pour deux épaisseurs d'enduction (50 et 100 μm).....	95
Figure 37 : Décomposition du coût de la cellule LMO pour deux épaisseurs d'enduction (50 et 100 μm).....	96
Figure 38 : Masse des cellules (iso-énergie) en fonction de l'épaisseur d'enduction de l'électrode (* l'électrode négative est limitante).....	98
Figure 39 : Comparaison de coût de cellules en fonction de la capacité surfacique (les points correspondent aux épaisseurs d'enduction précédentes, allant de 50 à 100 μm).....	99
Figure 40 : Sensibilité du coût cellule au coût des matériaux actifs (épaisseur d'enduction de 100 μm)	101
Figure 41 : Comparaison des résultats de l'OCA avec les résultats de BatPac (47).....	103
Figure 42 : Répartition des achats d'une cellule de format enveloppe souple pour véhicule électrique (type de cellule équipant par exemple la Nissan Leaf).....	105
Figure 43 : Evolution relative au dollar US des parités principales du marché li-ion	106
Figure 44 : Evolution du cours LME (USD.ton^{-1}) du cobalt (bleu) et du nickel (mauve).....	108
Figure 45 : Extrait simplifié du référentiel achats sur le NMC et le NCA	109
Figure 46 : Extrait simplifié du référentiel achats sur le LMO et le LFP	110
Figure 47 : Vision de coût LTO en 2020 en fonction des volumes selon plusieurs fournisseurs.....	112
Figure 48 : Découpage de la fabrication dans le référentiel : vert=fabrication électrodes, bleu foncé =assemblage cellules, rouge=formation, orange=structure usine et bleu clair=assemblage modules	115
Figure 49 : Fabrication des électrodes, investissements en fonction de la surface d'électrode (fournisseur 1=croix, fourn.2=tiret, fourn.7=carré, fourn.8=rond, BatPac=triangle)	117
Figure 50 : Fabrication des électrodes, investissements en fonction de la capacité de stockage produite (MWh.an^{-1}) (fournisseur 1=croix, fourn.2=tiret, fourn.7=carré, fourn.8=rond, BatPac=triangle)	119
Figure 51 : Fabrication des électrodes, main d'œuvre directe en fonction de la capacité de stockage produite (MWh.an^{-1}) (fournisseur 1=croix, fourn.2=tiret, fourn.7=carré, fourn.8=rond, BatPac = triangle)	120
Figure 52 : Représentation du feuillard enduit de l'électrode négative	122
Figure 53 : Diagramme radar des 5 critères pour le NMC dans un exemple de modélisation	138
Figure 54 : Distribution de coût obtenue pour le NMC	139
Figure 55 : Comparaison des résultats obtenus avec les 3 modèles (OCA, MAC et BatPac).....	143
Figure 56 : Procédé de fabrication du NMC par co-précipitation retenu	147
Figure 57 : Structure de coût de matériaux actifs selon le modèle de l'étude en USD.kg^{-1}	148
Figure 58 : Evolution relative au dollar US des parités principales du marché li-ion	151
Figure 59 : Evaluation des incertitudes sur le coût des matériaux actifs. Distribution normale, la boîte rouge correspond à un intervalle de $\pm\sigma$, les moustaches à $\pm 2\sigma$	152
Figure 60 : Positionnement des matériaux en tension face au graphite et en capacité réversible (@ 1C)	154
Figure 61 : Tension en fonction de la capacité pour le composé graphite silicium étudié.	155

Figure 62 : Densité massique des cellules de l'étude en fonction de l'épaisseur d'enduction de l'électrode et du matériau d'électrode positive considéré	157
Figure 63 : Densité massique des cellules de l'étude avec une négative en graphite ou un composite graphite silicium	158
Figure 64 : Coût rapporté à l'énergie totale en fonction de l'épaisseur d'enduction pour les cellules de l'étude, avec électrode négative en graphite.....	159
Figure 65 : Décomposition du coût des cellules pour une épaisseur d'enduction de 100 μm	161
Figure 66 : Coût à l'énergie en fonction de l'épaisseur d'enduction pour 4 cellules.....	161
Figure 67 : Effet des incertitudes sur le coût des matériaux actifs sur le coût des cellules rapporté à l'énergie. Distribution normale, la boîte rouge correspond à un intervalle de $\pm\sigma$, les moustaches à $\pm 2\sigma$	162
Figure 68 : Analyse de différents scénarios de coût (50).....	179
Figure 69 : Estimation du coût du pack batterie pour PHEV (130)	179
Figure 70 : Découpage de la fabrication dans le référentiel : vert=fabrication électrodes, bleu foncé =assemblage cellules, rouge=formation, orange=structure usine et bleu clair=assemblage modules	185
Figure 71 : Investissement pour l'assemblage des cellules en fonction de la capacité de stockage produite ($\text{MWh}\cdot\text{an}^{-1}$) (fournisseur 1=croix, fourn. 2=tiret ou rond, fourn. 7=carré, BatPac=triangle).....	188
Figure 72 : Investissement pour l'assemblage cellule en fonction du nombre de cellules par an (fournisseur 1=croix, fourn. 2=rond, fourn. 7=carré, BatPac=triangle)	189
Figure 73 : Main d'œuvre directe en fonction de la capacité de stockage produite ($\text{MWh}\cdot\text{an}^{-1}$) (fournisseur 1=croix, fourn. 2=tiret ou rond, fourn. 7=carré, BatPac=triangle).....	190

Table des tableaux

Tableau 1 : Composés chimiques en jeu dans différentes technologies de stockage électrochimique	24
Tableau 2 : Récapitulatif des propriétés des principaux matériaux d'électrode positive	41
Tableau 3 : Points forts et faibles du graphite, du hard carbone et du soft carbone	42
Tableau 4 : Coûts matériaux selon la littérature, en \$.kg ⁻¹ (B = basse, R = référence et H = haute)	48
Tableau 5 : Coût de matériaux selon la littérature en \$.kg ⁻¹	50
Tableau 6 : Coût de l'électrolyte et du séparateur selon la littérature	50
Tableau 7 : Coût du liant, \$.kg ⁻¹ , de l'agent conducteur et du solvant selon la littérature	51
Tableau 8 : Fonctionnement de l'usine de référence de BatPac (35,46)	56
Tableau 9 : Décomposition du coût de fabrication dans BatPac (35,46)	57
Tableau 10 : Décomposition du coût de fabrication de BatPac (46)	62
Tableau 11 : Récapitulatif des données de coût de la littérature (depuis 2012)	65
Tableau 12 : Définition du coût total	70
Tableau 13 : Coefficients de calcul pour l'OCA	76
Tableau 14 : Prix des matières et composants des cellules utilisés pour l'étude OCA	77
Tableau 15 : Inducteur de coûts utilisés dans le modèle MAC	82
Tableau 16 : Epaisseurs des électrodes positive et négative pour un revêtement maximal de 50 µm.	90
Tableau 17 : Prix des matériaux actifs pour le projet Helios (60)	92
Tableau 18 : Prix des matières et composants des cellules	92
Tableau 19 : Plage de variation des données de coût des matériaux	100
Tableau 20 : Données de la littérature pour l'électrolyte et le séparateur	113
Tableau 21 : Comparaison de l'atelier de fabrication des électrodes entre l'usine de référence et les données de BatPac (35)	123
Tableau 22 : Comparaison de l'assemblage des cellules entre l'usine de référence et les données de BatPac (35)	124
Tableau 23 : Comparaison de l'étape de formation entre l'usine de référence et les données de BatPac (35)	125
Tableau 24 : Attribution des notes aux critères pour les achats	134
Tableau 25 : Attribution des notes aux critères pour le procédé de fabrication	135
Tableau 26 : Ecart retenu pour chacun des critères et pour chaque matière de l'étude	139
Tableau 27 : Structure de coût des matériaux actifs de l'étude (cours du 18/10/2012)	149
Tableau 28 : Estimation de coût de matériaux en développement à l'heure actuelle (\$.kg ⁻¹) issues de différentes références bibliographiques	150
Tableau 29 : Quantité de matière (g) pour chacune des cellules de l'étude à une épaisseur d'enduction de 100 µm	156
Tableau 30 : Répartition des rebuts de fabrication en % (35)	175
Tableau 31 : Consommation d'un procédé de fabrication d'une batterie (102)	176
Tableau 32 : Consommations d'énergie selon Sullivan <i>et al.</i> (127)	177
Tableau 33 : Energie primaire consommée par composants (MJ.kWh ⁻¹) (103)	177

Tableau 34 : Etat de l'art coût de pack batterie (131)	180
Tableau 35 : Décomposition de coût de la batterie (136).....	181
Tableau 36 : Coût de pack batterie en fonction des volumes repris par Cheah et al. (130)	184
Tableau 37 : Informations à compléter pour les opérations principales.....	186
Tableau 38 : Description de la machine	186
Tableau 39 : Description de l'opération	187

Résumé

Les véhicules électriques et hybrides présentent des avantages considérables qui les rendent attrayants, mais ont un coût élevé limitant leur succès. Ce travail a pour but de contribuer à la baisse du coût des batteries lithium-ion, inducteur majeur du prix des véhicules électriques, en proposant et en évaluant des pistes d'optimisation. Pour cela, une visibilité fiable et détaillée de la structure de coût de ces batteries est un prérequis. C'est pourquoi une méthodologie de modélisation des coûts des batteries lithium-ion en lien avec la conception technique, ainsi que des référentiels économiques sur le procédé de fabrication et les matières ont été mis au point. La modélisation présentant une part d'incertitude, une méthode innovante d'évaluation de celle-ci a aussi été développée. L'utilisation de ce modèle de coût a permis la détection et l'évaluation de piste de progrès. Ainsi, une piste de progrès notable soulevée dans cette thèse porte sur un paramètre de conception négligé dans la littérature : l'épaisseur d'enduction de l'électrode. Ce modèle a aussi permis de confirmer un point déjà remarqué dans plusieurs publications : le poids considérable des matériaux actifs dans le coût total. Pour comprendre les raisons de ce fait, un modèle de coût de ces composés a été développé et a permis de mettre en lumière des voies de réduction. In fine, ce travail propose pour la première fois une modélisation détaillée jusqu'aux précurseurs des matériaux actifs de la structure de coût des batteries lithium-ion et indique des leviers de réduction. Ceci constitue un résultat remarquable, offrant de nouvelles clés pour l'optimisation technico-économique des batteries lithium-ion pour la traction automobile.

Mots clés : modélisation, coût, lithium-ion, automobile, conception, innovation.

Abréviations

Lithium-riche : Matériau actif pour électrode positive de formule $x\text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot (1-x)\text{LiMO}_2$, avec M métal de transition.

LFP : Matériau actif pour électrode positive de formule LiFePO_4 .

LMO : Matériau actif pour électrode positive de formule LiMn_2O_4 .

LMNO : Matériau actif pour électrode positive de formule $\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$.

LMFP : Matériau actif pour électrode positive de formule $\text{LiFe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{PO}_4$.

MAC (Modèle Analytique de Coût) : Modèle de coût cellule permettant de tester l'influence de nombreux paramètres de fabrication, ainsi que d'effectuer des synthèses détaillées au niveau global ou bien au niveau des étapes du procédé de fabrication.

MOD : Main d'œuvre directe, c'est-à-dire les opérateurs postés sur une ligne de fabrication.

MGV2 : Nom du logiciel interne Renault servant de support au modèle MAC.

NCA : Matériau actif pour électrode positive de formule $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Al}_{1-x-y})\text{O}_2$

NMC : Matériau actif pour électrode positive de formule $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2$

OCA (Outil de Chiffrage Amont) : Modèle de coût permettant d'effectuer des modélisations robustes basées sur 4 paramètres qui seront détaillés.

TNO : Matériau actif pour électrode négative de formule TiNb_2O_7

Introduction

Serpent de mer ou réalité enfin accessible ? C'est en ces termes que la question de la mobilité électrique s'est longtemps posée. Si la voiture électrique « La Jamais contente » fut la première toutes motorisations confondues à passer la barre des 100 km.h⁻¹ en 1899, elle ne fut que l'apogée d'une aventure éphémère, cet échec étant principalement lié aux faibles performances des batteries. Emile Zola parle ainsi de la voiture électrique dans son roman Paris de 1898 : «L'électricité, la reine prévue de demain, n'était pas encore possible, à cause du poids des appareils qu'elle nécessitait. » (1).

Cette sentence resta vraie très longtemps, malgré de nombreuses tentatives de l'infléchir. C'est seulement depuis le début de cette décennie que la voiture électrique est revenue au cœur de l'intérêt du monde automobile, notamment grâce aux batteries lithium-ion, qui permettent un stockage d'énergie assez performant pour relancer la filière. L'alliance Renault Nissan, pionnière de ce marché, a largement contribué à ce retour. Bien lui a pris d'orienter son offre vers ce secteur, puisqu'elle a déjà vendu plus de 175 000 voitures électriques à ce jour, avec des perspectives prometteuses.

La traction automobile électrique et hybride offre des avantages stratégiques face aux challenges actuels de l'automobile. On peut citer la réduction des différents impacts environnementaux, ou la diversification des sources d'énergie primaire, induisant une diminution de la dépendance au pétrole. Si le succès commercial est en train de se matérialiser, plusieurs freins existent encore pour que les parts de marché de ce type de véhicules représentent une portion significative des ventes, et ce sans les diverses incitations consenties par les pouvoirs publics. Le prix encore élevé de ces automobiles et la faible autonomie sont souvent désignés comme les freins principaux à leur achat, et sont en grande partie liés aux moyens de stockage de l'énergie.

La réduction du coût de ce stockage renforcerait donc la réussite commerciale des automobiles électriques et hybrides. C'est pourquoi cette réduction fait l'objet de nombreux efforts de la part de tous les acteurs concernés. Plusieurs études essayent d'éclairer les trajectoires de coûts futurs des batteries de traction pour soutenir et orienter ces efforts. Mais elles présentent des lacunes qui leur donnent un intérêt et un crédit limités. Pourtant une vision économique fiable est un prérequis pour orienter les industriels et les chercheurs vers les solutions techniques optimales et anticiper l'avenir.

Cette vision économique serait utile pour la communauté scientifique, comme pour les industriels. Elle permettrait d'apporter des réponses solides au besoin d'optimisation des batteries lithium-ion et de détecter les voies à privilégier pour atteindre les meilleures solutions techniques. C'est à cette problématique que cette thèse s'attachera à répondre : comment peut-on optimiser d'un point de vue coût les batteries lithium-ion ? Des hypothèses de recherches seront soulevées pour guider ce travail, et des modèles et référentiels adéquats seront mis au point pour apporter des réponses précises et fiables à ces hypothèses.

Au sein de ce mémoire, le contexte à l'origine de cette thèse sera dans un premier temps explicité. Les solutions techniques pour le stockage de l'électricité seront présentées et la supériorité des batteries lithium-ion pour répondre aux problématiques de l'automobile sera montrée. Ensuite un l'état de l'art des données économiques sur les composants, la fabrication et le coût total des batteries lithium-ion sera dressé, et fera apparaître les manques de la littérature sur ce sujet. A partir de ce constat, la problématique de recherche sera présentée, ainsi que les hypothèses de recherche qui seront étudiées pour répondre à cette problématique. Ceci expliquera la valeur ajoutée que cette thèse souhaite apporter à la communauté scientifique.

Par la suite, le développement des outils pour répondre à la problématique sera détaillé. Il s'agit de modèles de coût et de référentiels portant sur les cellules de batteries lithium-ion, ainsi que sur les matériaux constituant ces cellules. La modélisation présentant une part d'incertitude, une méthode innovante d'évaluation de celle-ci sera proposée. Des leviers de réduction des coûts détectés à partir de ces outils seront présentés, et leur intérêt sera quantifié de manière objective.

Ainsi ce travail fournit les outils nécessaires à une compréhension détaillée de la structure de coût des batteries lithium-ion, ainsi que des pistes de progrès repérées comme étant les plus prometteuses pour réduire les coûts. Ceci offrira à la communauté scientifique des outils et des connaissances économiques précieuses dans sa quête d'optimisation des batteries lithium-ion, et aux industriels, la visibilité nécessaire pour améliorer leurs offres en matière de véhicules électriques et hybrides.

PLAN DE L'ETUDE

Le travail de la thèse sera restitué en 8 chapitres, dont un résumé est fourni ici.

Le Chapitre I concernera le lien entre l'automobile et les batteries lithium-ion. Les problématiques actuelles de l'automobile en ce qui concerne les sources d'énergie seront présentées. Puis nous évoquerons les technologies alternatives aux hydrocarbures pour le stockage de l'énergie. Enfin un focus sera fait sur les batteries lithium-ion, notamment sur la recherche dans ce domaine et sur l'état du marché.

Le Chapitre II donnera un aperçu des variantes de cellules lithium-ion qui existent sur le marché. Ensuite la composition de ces cellules ainsi que de la batterie complète sera détaillée. Enfin un état de l'art sur les coûts des matières et des composants des cellules sera proposé.

Le chapitre III présentera un état de l'art de la modélisation du coût des batteries lithium-ion. Dans un premier temps, le procédé de fabrication sera décrit. Ensuite, un état de l'art sur la modélisation du coût de fabrication des cellules sera fait, suivi d'un état de l'art sur le coût total des cellules.

Dans le chapitre IV une définition du coût utilisée dans ce mémoire sera d'abord donnée. Ensuite, le principe et le fonctionnement du modèle amont « OCA » sera décrit, et les données du modèle seront communiquées. Enfin, le principe du modèle analytique « MAC » sera présenté.

Le chapitre V se proposera d'utiliser le modèle amont OCA pour faire une analyse objective du coût de cellules avec différents matériaux, et différentes conceptions de cellule. Cette étude sera aussi utilisée pour comparer les résultats du modèle amont avec un modèle de la littérature.

Dans le chapitre VI les référentiels sur les achats et le procédé de fabrication seront présentés. L'usine de référence qui a été construite à partir de ces bases de données, dans le but de simplifier la modélisation de coût, sera détaillée avec une évaluation des données économiques de celle-ci par rapport à la littérature.

Dans le chapitre VII, une méthode de détermination de l'incertitude associée aux résultats de la modélisation de coût sera proposée. Dans un premier temps les sources d'incertitudes seront définies. Ensuite le fonctionnement de la méthode, basée sur des simulations de

Monte Carlo sera décrit. Enfin un exemple sera donné, et offrira une comparaison des incertitudes calculées avec les deux modèles (MAC et OCA).

Le chapitre VIII montrera les résultats d'une étude du coût des matériaux actifs pour batteries lithium-ion non commerciaux mais prometteurs. Le dimensionnement de systèmes basés sur ces composés sera effectué pour étudier leur influence et ainsi estimer le coût des cellules de batteries lithium-ion à moyen terme à l'aide du modèle OCA.

Chapitre I. L'automobile et le stockage de l'énergie

Ce premier chapitre très général traite du contexte de la thèse. Il commence par évoquer les problématiques actuelles de l'automobile en matière de sources d'énergie. Ensuite il présente les principales technologies alternatives aux hydrocarbures pour le stockage de l'énergie. Enfin une vision générale de la recherche et du marché des batteries lithium-ion est proposée.

1 Introduction

La traction automobile électrique et hybride est un enjeu de société. Ce type de motorisation offre en effet des avantages précieux, notamment une réduction conséquente des différents impacts environnementaux du transport automobile, et la possibilité d'utiliser diverses sources d'énergie primaire pour celui-ci, et donc de diminuer la dépendance au pétrole. Mais plusieurs freins existent à l'heure actuelle pour que ce type de véhicule rencontre un fort succès commercial. Ce chapitre se propose de dresser un panorama sur les raisons qui conduisent les industriels à remettre en cause la traction thermique. De même, le choix des batteries lithium comme solution pour le stockage de l'électricité est succinctement expliqué. Un état du marché de ces batteries, ainsi que des progrès à venir est aussi proposé.

2 La mutation de l'automobile

Le secteur de l'automobile est actuellement dans une phase de transition majeure : le mode de traction des voitures est en train d'évoluer, passant de la motorisation thermique comme unique solution, à un panorama élargi à des motorisations tout ou en partie électriques. Ceci implique un changement de forme de stockage de l'énergie : d'un stockage sous forme de combustible à un stockage entièrement ou en partie sous forme électrochimique (batterie, pile à combustible, supercondensateur) voire mécanique (volant d'inertie, air comprimé).

Pourquoi cette transition ? Si le moteur entièrement thermique est aujourd'hui largement le plus répandu, plusieurs problèmes se posent avec son utilisation. Tout d'abord le

fonctionnement d'un moteur thermique repose sur l'utilisation de pétrole, dont les ressources s'épuisent sans que l'on sache clairement où se trouve la limite des réserves mondiales. S'il reste encore plusieurs décennies avant d'atteindre cette limite, la raréfaction des ressources oblige à faire des récupérations dans des conditions toujours plus difficiles, augmentant ainsi les coûts et la pollution pour extraire et raffiner ce pétrole

Ensuite, les intérêts géopolitiques et stratégiques liés à son approvisionnement créent des situations de dépendance et de compétition vis-à-vis des pays producteurs, qui sont difficilement acceptables pour les pays consommateurs. Les tensions des marchés entraînent par ailleurs des fluctuations imprévisibles de prix, dont beaucoup d'analystes pensent qu'elles vont s'accroître à la hausse.

L'idée devient dominante qu'une tension majeure entre offre et demande surviendra bien avant l'échéance d'épuisement des ressources elles-mêmes : l'offre devrait ainsi passer par un maximum de production mondiale, le « peak oil », alors que la demande risque de se trouver encore dans une tendance de croissance. Ce contexte pousse naturellement à limiter la consommation de produits pétroliers et à rechercher des alternatives énergétiques.

Enfin la préservation de l'environnement est devenue l'une des priorités de notre société. Si la maîtrise des incidences environnementales de l'automobile (appauvrissement en ressources naturelles, contribution au réchauffement climatique, émission de particules nocives, et nuisances sonores) fait l'objet d'efforts et de progrès soutenus chez les constructeurs et industriels de la filière automobile, seuls des changements de technologie peuvent apporter des progrès majeurs.

Pour répondre à toutes ces difficultés soulevées par l'utilisation de véhicules à moteur thermique, l'alternative la plus crédible est l'utilisation d'une motorisation électrique, soit en complément d'une motorisation thermique, dans le cas des véhicules hybrides, soit en seule motorisation pour le véhicule électrique. Si ces véhicules existent depuis le XIX^{ème} siècle (cf. Figure 1, la voiture hybride « la toujours contente », conçue par Ferdinand Porsche en 1900), ils ont été largement marginalisés face aux véhicules thermiques. Mais les challenges de plus en plus relevés auxquels le moteur thermique est confronté, combinés aux progrès réalisés dans la traction électrique, notamment sur la batterie et l'électronique de puissance, rendent l'avènement de ces véhicules très probable.

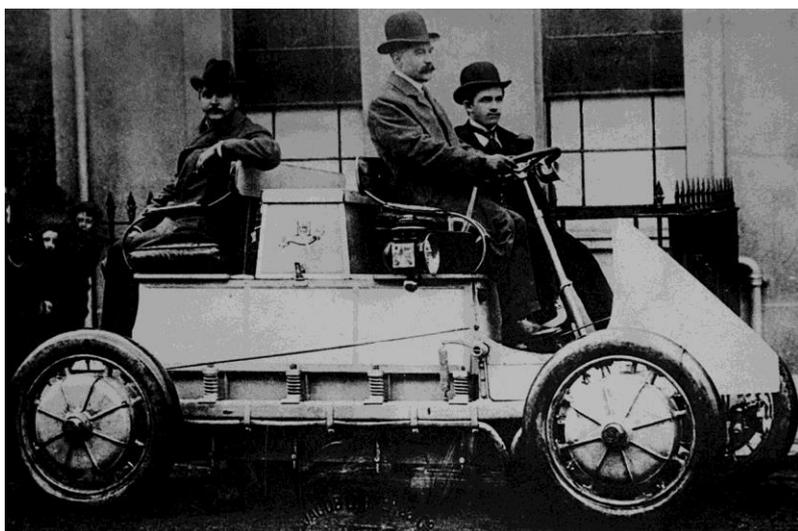


Figure 1 : Lohner-Porsche « La Toujours Contente », 1900 (2)

La Toyota Prius, véhicule hybride apparu en 1997, a symboliquement inauguré cette ère, avec un succès commercial qui ne se dément pas (cf. Figure 2). De nombreux constructeurs se sont engouffrés dans la brèche et proposent désormais dans leur gamme des véhicules hybrides. En ce qui concerne les véhicules tout électriques, l'apparition de véhicules de grande série est plus récente. L'alliance Renault-Nissan est motrice sur ce type de véhicules : la Nissan Leaf et la Renault Kangoo ZE commercialisées depuis 2011, sont ainsi les premières voitures à rentrer dans cette catégorie.

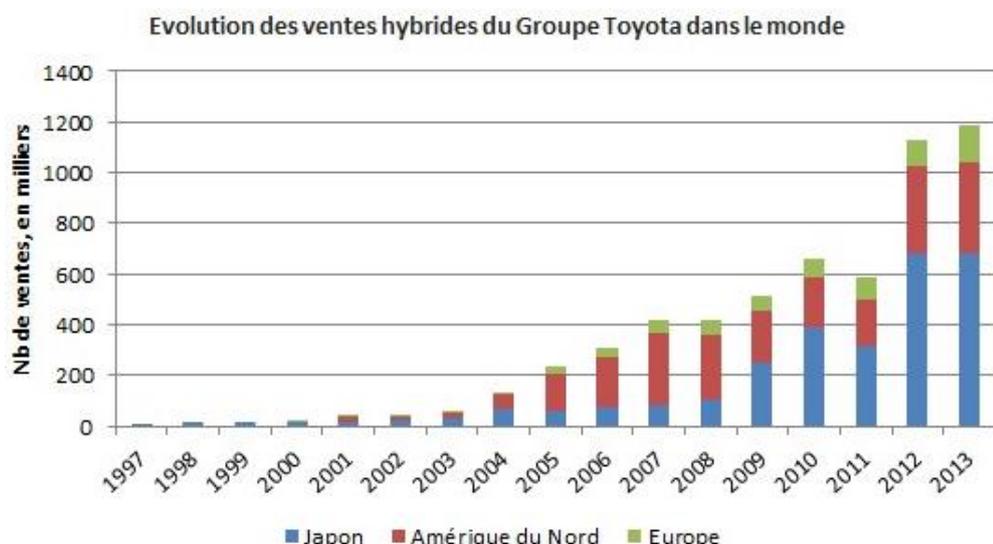


Figure 2 : Ventes d'hybrides Toyota dans le monde (3)

En tant que groupe automobile de dimension mondiale, Renault s'intéresse aux différentes solutions d'électrification des véhicules depuis longtemps. Les choix stratégiques ont mené la marque à mettre l'accent sur le véhicule tout électrique, marché sur lequel Renault et son

allié Nissan sont pionniers. Mais si aucun véhicule hybride n'est pour le moment au catalogue de la marque, ils font eux aussi l'objet d'études depuis de nombreuses années (citons ainsi le concept car hybride Next de 1995).

3 Le stockage de l'énergie : l'élément clé de la traction électrique

Si la palette de moteurs envisageable pour la traction automobile est large, le moteur à combustion et le moteur électrique sont les seuls candidats réalistes à l'heure actuelle. En comparaison avec un moteur à combustion, une machine électrique a de nombreux avantages, notamment un meilleur rendement et un fonctionnement plus silencieux. Mais tous ces avantages sont contrebalancés par le stockage de l'énergie, nettement moins performant. En effet, à l'heure actuelle aucun moyen de stockage ne permet de stocker autant d'énergie, pour un coût faible, et une recharge aussi rapide que les carburants automobiles.

Ceci explique en grande partie pourquoi le moteur à combustion s'est imposé au détriment de la machine électrique sur le marché automobile, notamment lorsque des stations à essence ont été installées entre les centres urbains au début du 20^{ème} siècle. Le moteur à combustion permettait ainsi de parcourir de longues distances, alors que le véhicule électrique devait embarquer d'encombrantes batteries au plomb pour une autonomie limitée, et une recharge longue. Dès lors, la traction entièrement électrique a périclité.

Le renouveau des modes de tractions électrique et hybride est lié à l'apparition de nouvelles technologies de stockage de l'énergie permettant d'envisager son utilisation : les piles à combustibles, les batteries « nickel-hydrure métallique » et « lithium-ion », voire les supercondensateurs.

Nous écartons dès maintenant les piles à combustibles du champ de ce mémoire. Leur intérêt n'est pas contesté, mais elles nécessitent la mise en place d'infrastructures de distribution de l'hydrogène, ce qui rend la comparaison entre les technologies délicate. Nous ne nous intéresserons qu'au stockage direct d'électricité, soit sous forme électrochimique (supercondensateurs et batteries) soit sous forme mécanique (air comprimé et volant d'inertie). Nous allons comparer les différentes technologies existantes, et nous mettrons en

lumière les avantages des batteries lithium-ion qui ont conduit les constructeurs automobiles à s'intéresser massivement à cette technologie, et qui sont au cœur de ce travail.

3.1 Les technologies de stockage

Il existe plusieurs technologies de stockage électrochimique, que l'on différencie soit en fonction de l'élément porteur de charge ou des matériaux d'électrodes. Les grandes familles de batteries avec une maturité suffisante pour être commercialisées actuellement sont présentées dans le Tableau 1 :

Tableau 1 : Composés chimiques en jeu dans différentes technologies de stockage électrochimique

	Porteur de charge	Electrode positive	Electrode négative
Plomb-acide	H ₂ SO ₄	PbO ₂	Pb
Nickel-métal hydrure	Base (KOH)	Ni(OH) ₂	M (Composé intermétallique)
Nickel-zinc	Base	Ni(OH) ₂	Zn
Lithium-ion	Sel de lithium	Composé d'insertion	Composé d'insertion
Lithium-métal	Sel de lithium	Composé d'insertion	Li
Batteries à flux au vanadium	H ₂ SO ₄	(VO ₂) ⁺ /(VO) ²⁺	V ³⁺ /V ²⁺
Nickel Cadmium	Base (KOH)	Ni(OH) ₂	Cadmium
Supercondensateur	KOH, H ₂ SO ₄ , TEABF ₄ , TEMA, SBP ...	Charbon actif	Charbon actif

A ces techniques de stockage électrochimique de l'électricité, s'ajoutent les méthodes de stockage mécanique. Soit par volant d'inertie, dont le principe est de donner de la vitesse à volant tournant autour d'un axe, et de récupérer l'énergie cinétique lors du ralentissement du volant. Ce principe est notamment utilisé en formule 1. Soit sous forme d'air comprimé, solution proposée par PSA sur son prototype « hybrid air ».

3.2 Critères de sélection

Il n'existe pas une technologie de stockage supérieure à toutes les autres dans tous les domaines et pour toutes les applications. La meilleure technologie dépend des besoins : puissance, énergie, durée de vie, coût, sûreté, poids et volume. Un critère de performance répandu est l'énergie rapportée à la masse du système, exprimée en kWh.kg⁻¹. Cet indicateur doit être transposé à une notion de puissance rapportée à la masse dans le cas où c'est la puissance plus que l'énergie, qui est recherchée. En plus de ces indicateurs, les notions de coût, de durée de vie et d'impact environnemental sont aussi importantes. Le diagramme de

Ragone (cf. : Figure 3) permet de faire une première sélection des technologies, en utilisant les indicateurs d'énergie et de puissance rapportés à la masse du système.

Ainsi les véhicules purement électriques, où une forte énergie doit être embarquée pour assurer au véhicule une autonomie suffisante, ne peuvent utiliser que des batteries au lithium (lithium-ion ou lithium métal), qui sont au minimum deux fois plus denses que les autres technologies de stockage électrochimique. Pour les véhicules hybrides, il est par contre plus difficile de statuer. Les batteries au plomb, les supercondensateurs, les batteries nickel-cadmium (interdites en pratique, à cause de la toxicité du cadmium), nickel-hydrure métallique et lithium-ion semblent toutes envisageables selon la Figure 3. Il faut donc rentrer dans les autres aspects techniques d'une part, et voir en fonction des besoins. En effet, en fonction des choix techniques du constructeur, les besoins de puissance et d'énergie ne sont pas les mêmes.

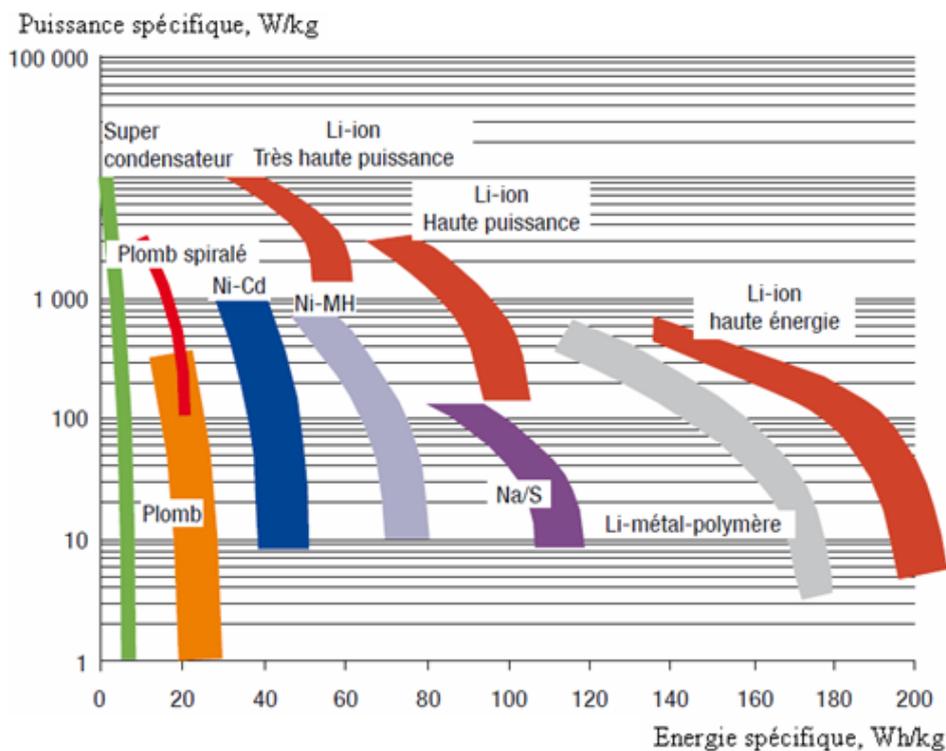


Figure 3 : Diagramme de Ragone selon Beeker *et al.* (4)

La Figure 3 éclaire donc la raison du choix des batteries lithium-ion par Renault et ses concurrents pour alimenter les véhicules électriques. Comme indiqué précédemment, pour les voitures hybrides, le choix n'est pas aussi évident. Les batteries nickel-hydrure métallique sont les plus répandues sur les voitures hybrides en 2014 (hors micro-hybride), mais les progrès réalisés avec les batteries lithium-ion, en font un très bon candidat.

Devant ces avantages en puissance et en énergie, et avec le fort potentiel d'amélioration qu'elles possèdent, les batteries lithium-ion sont maintenant choisies par la plupart des constructeurs automobiles pour équiper leurs véhicules hybrides et électriques. C'est logiquement le choix de Renault, et de son allié Nissan et c'est donc sur ces batteries que la thèse sera centrée, domaine dont on verra qu'il reste à lui seul très large et ouvert.

4 Une technologie à la fois mature et encore mal maîtrisée

4.1 Une nouveauté à appréhender

La création d'un véhicule tout électrique ou hybride est très différente de celle d'un véhicule thermique. La conception de la chaîne de traction présente des aspects nouveaux pour les constructeurs, qui doivent acquérir de nouvelles compétences pour mettre au point ces véhicules.

Les batteries lithium-ion font partie de ces objets inédits dans le domaine de l'automobile. Si les batteries au plomb sont proches dans le principe, des différences très importantes existent : rôle dans le véhicule, fabrication du système, composants, contrôles électronique et thermique de celui-ci. Ces différences sont telles qu'il n'est pas envisageable d'appréhender le problème en extrapolant à partir de l'existant dans ce domaine.

Dans la plupart des véhicules électriques actuellement sur le marché, les batteries lithium-ion utilisées sont différentes de celles utilisées pour les applications portables. Ceci s'explique par la nécessité d'avoir une durabilité supérieure (environ 2 ans pour le portable contre au moins 8 ans pour l'automobile) et par des contraintes de sûreté supplémentaires liées à la taille. Etant récent, le marché des batteries lithium-ion pour automobile est encore en construction, et est promis à un bel avenir. De nouveaux acteurs affichent des ambitions de se positionner sur le domaine et des partenariats se créent, ou se défont régulièrement dans un marché largement dominé par l'Asie (Corée du Sud, Japon, Chine) (5).

En tant que marché stratégique, à fort potentiel de croissance, le marché des batteries fait de plus l'objet de forts investissements de la part des pouvoirs publics de nombreux pays pour développer sur leur territoire des entreprises qu'ils considèrent comme stratégiques. Le marché est donc international, et l'approche économique doit ainsi prendre en compte diverses hypothèses d'organisation industrielle.

Le marché des batteries lithium-ion pour l'automobile est donc en train de se mettre en place. La batterie représente un enjeu stratégique pour les constructeurs, puisque pour un véhicule électrique, elle peut représenter jusqu'à la moitié du prix du véhicule. Il est capital pour eux de maîtriser leurs coûts, s'ils veulent réussir à imposer leurs solutions électriques sur le marché, et à ne pas prendre de retard sur la concurrence.

4.2 Des activités de recherche foisonnantes

4.2.1 Publications scientifiques

Un bon thermomètre pour observer l'effervescence de la recherche sur un sujet scientifique est de suivre le nombre d'articles publiés. Les publications sur les batteries lithium-ion en général augmentent de manière importante depuis dix ans. On peut vérifier ce fait en utilisant les outils mis à disposition des utilisateurs de la base de données scientifique Scopus.

Les mots clés « battery AND « lithium-ion » » ont été utilisés pour cette recherche. Le nombre de résultats obtenus permet de cerner l'étendue actuelle de la recherche mondiale. La recherche effectuée en mai 2014, donne plus de 20 000 occurrences dans Scopus. Les premiers résultats apparaissent à partir des années 70 et le nombre d'occurrences croît nettement depuis les années 2000. On observe une croissance très forte sur les quatre dernières années (*cf.* Figure 4).

Le mot « cost » a été ajouté à cette recherche, afin de voir les publications qui parmi tous ces résultats, ont au moins en partie intégré la notion de coût. Scopus renvoie 1313 occurrences, soit environ 6% des publications précédentes qui s'intéressent à la notion de coût dans le titre, le résumé ou les mots clés. Ceci fait ressortir l'importance de la notion de coût dans le domaine des batteries lithium-ion (attention toutefois, car derrière la notion de coût, ne se cache pas forcément une notion économique). Les résultats de ces deux recherches année par année sont représentés sur la Figure 4.

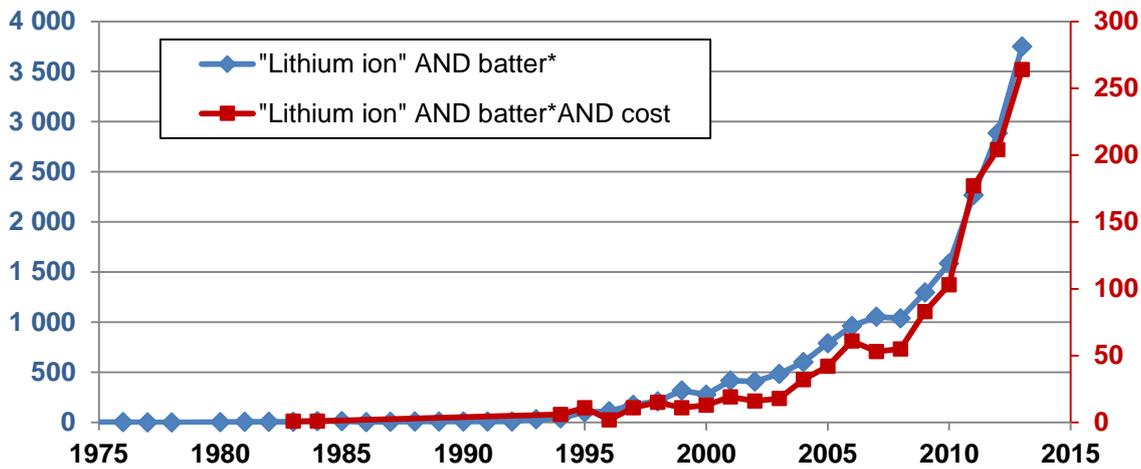


Figure 4 : Occurrences sous Scopus par années.

Selon les résultats, la Chine et les Etats-Unis sont les pays qui publient le plus sur le sujet. La prédominance de ces pays est liée à l'importance des sommes investies dans la recherche sur ces sujets. La France fait bonne figure en occupant la 5^{ème} position derrière le Japon et la Corée du sud, puisque ce classement ne tient pas compte de la taille des pays.

Pour donner des points de repère, cette recherche a été effectuée sur les piles à combustibles PEMFC (Pile à combustible à membrane d'échange de protons), qui sont de potentielles concurrentes pour les batteries lithium-ion dans les applications automobiles. Scopus renvoie 17 566 occurrences. La Figure 5 représente les occurrences obtenues pour chacun des moyens de stockage. Les publications sur les PEMFC dominaient celles sur les batteries lithium-ion au début des années 2000. Mais ces batteries connaissent une augmentation spectaculaire de leurs publications depuis 2010, alors que dans le même temps, les publications sur les PEMFC sont en léger recul.

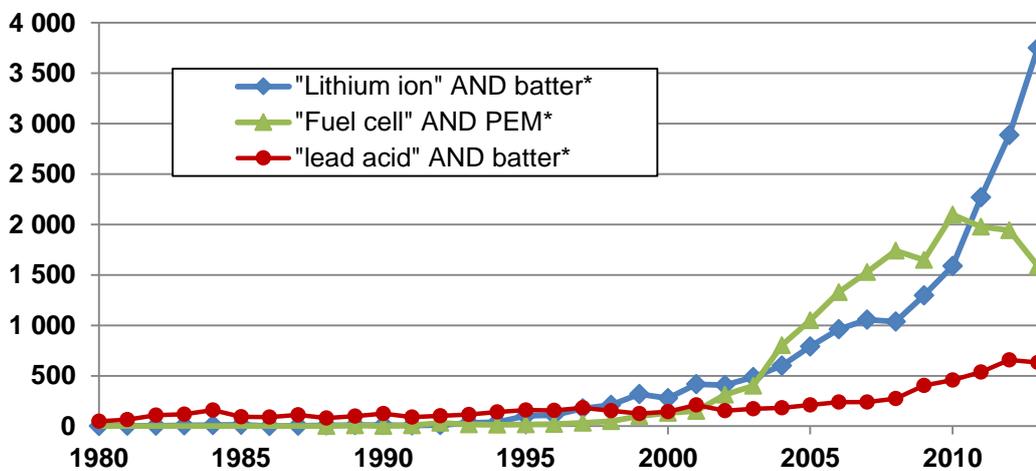


Figure 5 : Comparaison des occurrences sous Scopus pour plusieurs technologies

Les batteries au plomb, qui existent depuis plus d'un siècle, ont elles aussi été reportées sur la figure pour servir de témoin. On remarque une légère croissance des articles sur ce sujet depuis 2007. Cela montre un petit artefact : l'apparition de plus en plus fréquente des articles en ligne et l'amélioration de l'archivage, font probablement augmenter le nombre d'articles répertoriés.

Ce travail montre l'activité dans ce domaine et doit attirer l'attention sur le fait que les choses évoluent. Les technologies évoluent et il est possible que le lithium-ion soit dépassé d'ici quelques années. C'est pourquoi nous essayons au maximum de ne considérer que des données relativement récentes, afin de s'approcher le plus possible de la réalité actuelle du marché des batteries Lithium-ion et d'éviter de tirer des conclusions obsolètes.

4.2.2 Brevets

Une analyse de brevets permet aussi de voir l'activité sur un domaine de recherche donné. Celle-ci a été effectuée à l'aide de la base de données de l'office européen des brevets. On obtient 851 brevets (EP) octroyés en Europe pour une recherche du terme « lithium-ion » dans le titre du brevet, au 12 mai 2014. 89 de ces brevets ont été publiés en 2013, 70 en 2012 et 40 en 2011. La vigueur de la recherche apparaît là encore, le nombre de brevets publiés augmentant de manière importante.

A titre de comparaison, si l'on s'intéresse à la pile à combustible pour comparer l'activité de la recherche, le terme « proton exchange membrane » donne 91 brevets (EP) publiés, dont 5 pour l'année 2013.

4.3 Des progrès importants de la technologie

Depuis la première commercialisation d'une batterie lithium-ion en 1991 par Sony, les progrès sur cette technologie n'ont pas cessé. Ainsi sur le graphique de la Figure 6, représentant l'évolution de la densité d'énergie volumique des accumulateurs commerciaux dans le temps selon Rohan *et al.*, on constate que la densité d'énergie a été quasiment multipliée par trois en vingt ans (6). Ce rythme de croissance est considérable, même s'il est faible en comparaison d'autres domaines, comme par exemple la loi de Moore qui s'applique en électronique (un doublement de la capacité des microprocesseurs tous les deux ans). En termes de densité massique, les meilleures cellules actuelles sont à environ 230 Wh.kg^{-1} au niveau cellule (7).

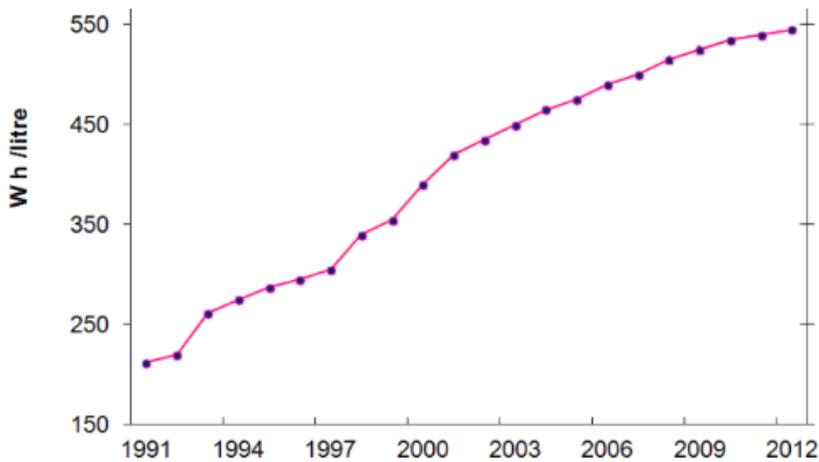


Figure 6 : Evolution de la densité d'énergie des batteries lithium-ion selon Rohan *et al.* (6)

4.4 De nombreuses pistes encore à explorer

Le lithium-ion est donc une technologie assez récente faisant l'objet d'une recherche intensive. Si de nombreux progrès ont déjà été accomplis, le potentiel d'amélioration semble encore important. On peut distinguer trois voies d'amélioration : les matériaux, la conception et la fabrication. Si la densité d'énergie est ce qui est naturellement la priorité, la durée de vie, la sûreté, ou encore l'impact environnemental sont aussi des aspects qui font l'objet d'améliorations.

Il est difficile de dire précisément la limite maximale en densité d'énergie des accumulateurs lithium-ion. Cette limite dépend en effet des matériaux utilisés. Pour un système utilisant les composés actuellement commercialisés (Figure 7), la limite théorique indiquée par un simple calcul, ne prenant que les matériaux actifs de la Figure 7 en compte, est aux alentours de 450 Wh.kg^{-1} (système LiCoO_2 / Graphite).

Il est probable que de nouveaux composés pour le lithium-ion soient découverts à l'avenir, et permettent de repousser les limitations actuelles. Il existe déjà de nombreuses pistes prometteuses qui peuvent permettre d'envisager des densités très supérieures dans les dix prochaines années. Certains de ces matériaux seront étudiés dans le Chapitre VIII. Toute la question est de savoir si le lithium-ion ne sera alors pas dépassé par de nouvelles technologies de stockage.

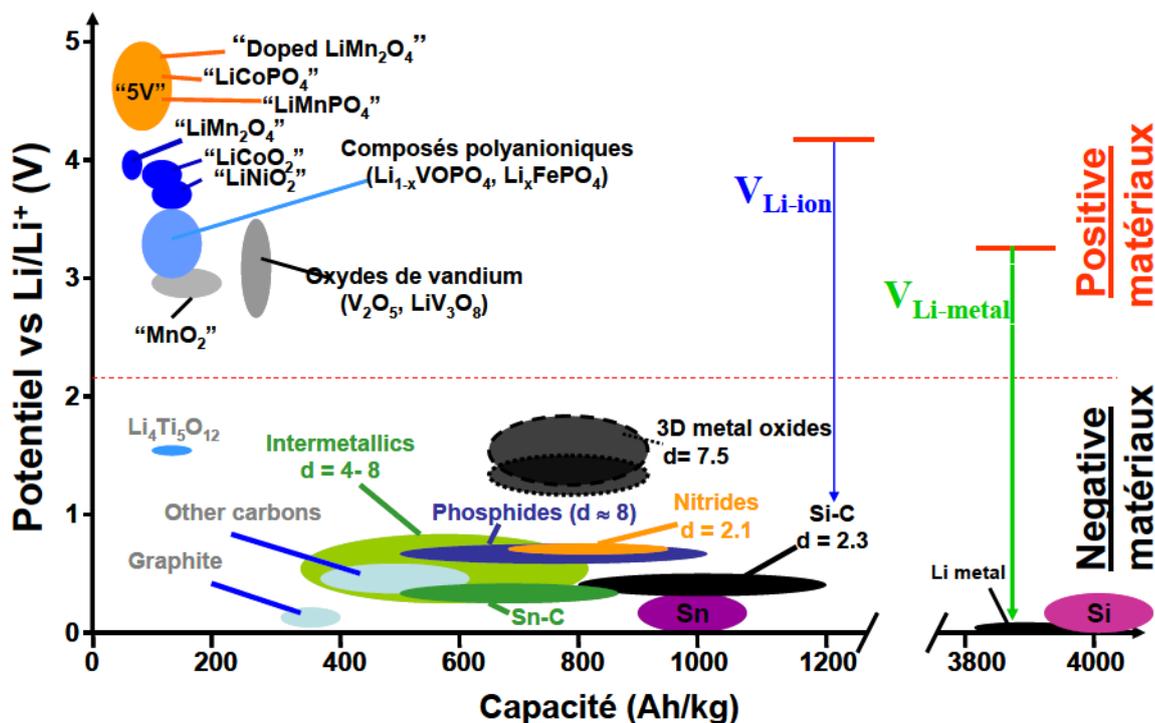


Figure 7 : Matériaux actifs actuels du lithium-ion selon Tarascon (8)

Ainsi le lithium-ion apparaît comme l'une des meilleures alternatives actuelles au carburant pour le stockage d'énergie dans l'automobile. Il peut convenir à la fois pour des batteries de puissance et d'énergie. Son principal avantage est sa forte densité d'énergie en comparaison des autres techniques de stockage de l'électricité. De plus il s'agit d'une technologie relativement récente, avec des pistes de progrès. La recherche dans ce domaine est conséquente. Des progrès importants sont espérés, et cette technologie est partie pour dominer les autres méthodes de stockage d'électricité dans l'automobile au cours de la décennie.

5 Les acteurs du marché lithium-ion

Le but de cette partie est de donner un aperçu synthétique des principaux acteurs de la chaîne de fabrication des batteries lithium-ion. Une description succincte des fournisseurs sera donnée dans un premier temps, puis des fabricants de matières dans un second temps. Enfin l'exploitation minière des métaux à enjeu sera évoquée.

5.1 Les fabricants de batteries lithium-ion

Le tissu de fournisseurs de batteries lithium-ion est important et il évolue très rapidement. Cet aperçu des fabricants ne se veut donc pas exhaustif, et seuls les leaders du marché,

capables d'alimenter les constructeurs automobiles sont présentés. Selon les analystes, les fabricants de batteries qui se détachent du peloton de compétiteurs peuvent légèrement différer. Ainsi en 2013, le cabinet d'analyse Navigant Research a classé LG Chem, Johnson Controls Inc (qui avait une co-entreprise avec Saft jusqu'en 2011) et AESC (co-entreprise Nissan et Nec) comme leaders des ventes de batteries lithium-ion pour véhicules électriques (9).

En 2014, deux analystes du P3 Group ont suggéré que LG Chem, Samsung et Sanyo/Panasonic étaient les leaders de la course, avec une large avance sur le reste de la concurrence pour les cellules automobiles (10). Si ce fait peut-être contesté, il est en tout cas clair que les fabricants Japonais et Coréens dominent le marché. On peut ainsi citer les japonais Hitachi, GS Yuasa, Toshiba et le Coréen SK Innovation, comme autres gros acteurs du marché des batteries lithium-ion pour l'automobile.

Au niveau de la France, deux fabricants sont des acteurs majeurs de ces marchés : Saft et Batscap, qui se positionne sur une variante du lithium-ion, le lithium métallique. Ils réussissent tous les deux avec des stratégies qui leur évitent la confrontation aux géants du secteur. Batscap est le fournisseur unique pour la BlueCar de Bolloré, sa maison mère. Quant à Saft, acteur de premier plan du marché lithium-ion, sa stratégie s'éloigne de la production automobile et s'oriente vers d'autres marchés à plus forte valeur ajoutée.

5.2 Les fabricants de matières et composants

Sur le marché des fournisseurs de matières et composants pour batteries, la situation évolue là encore très rapidement. Devant le potentiel de ce marché, de nouveaux arrivants essayent de rentrer dans la course, notamment les gros groupes internationaux de chimie (11). Les matières des batteries lithium-ion sont principalement produites là où se trouvent les fournisseurs de batteries : en Asie. On observe ainsi des chimistes européens choisir de s'installer dans ces pays, afin de réussir sur ce marché (10). Les matériaux actifs les plus répandus sont : pour la positive, un oxyde de métal de transition lithié (nickel, manganèse, cobalt ou un mélange de ces métaux), et pour la négative, du graphite.

5.3 Les minerais de base

5.3.1 Lithium

Le lithium est évidemment le minerai qui interpelle lorsque l'on parle de batteries lithium-ion. Pourtant, si des craintes ont été émises au début quant à la disponibilité du Lithium,

largement relayées dans les médias (12), celles-ci se sont estompées devant les larges réserves de lithium de la planète (13). De plus ces réserves sont bien réparties. Ainsi les trois pays plus gros producteurs en 2013 sont : le Chili (13,5 MT), l’Australie (13 MT) et la Chine (4 MT) (14).

5.3.2 Graphite naturel

Le graphite naturel est un élément hautement stratégique des batteries lithium-ion. Il a été classé comme matière première critique par l’union européenne (cf. Figure 8). Cette notion de criticité se base sur plusieurs critères : la rareté du minerai, son utilisation dans la fabrication des produits liés aux nouvelles technologies, l’impossibilité ou la grande difficulté à mettre en œuvre des substitutions, et la grande concentration des sources de production (15). Dans le cas du graphite naturel, l’aspect stratégique de la matière, ainsi que la prédominance chinoise sur ce marché, qui représente 77% de la production en 2014, sont les principaux facteurs d’inquiétudes (16).

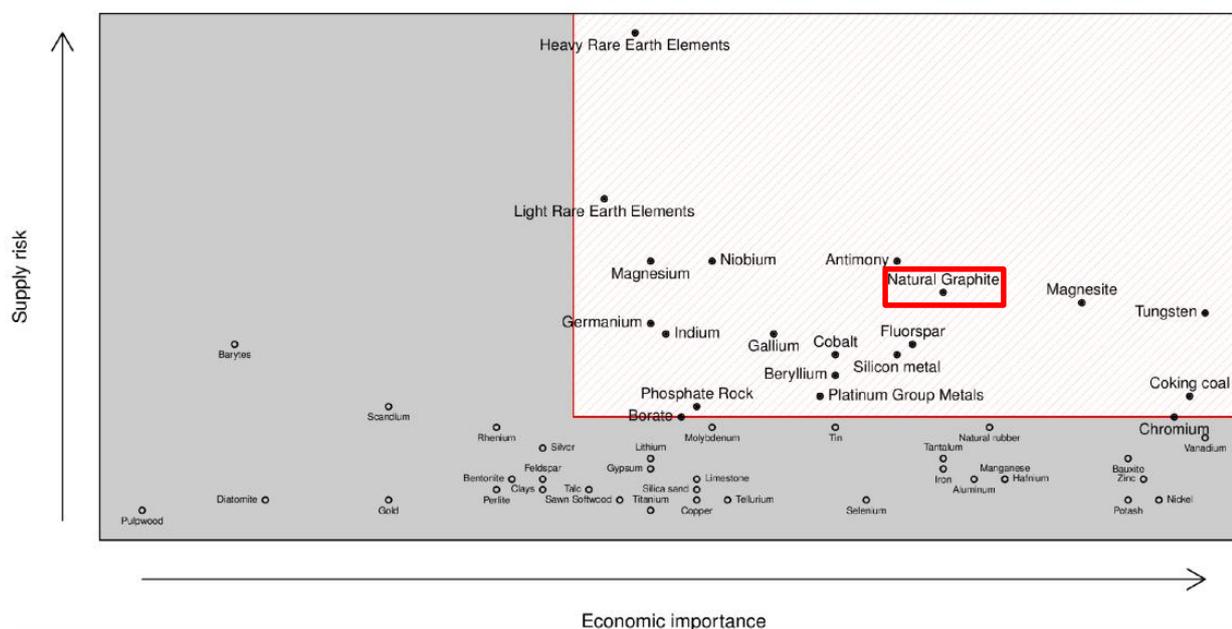


Figure 8 : Classement des risques matières de l'UE (17)

5.3.3 Cobalt

Si il est possible d’utiliser des matériaux d’électrode positive sans cobalt dans les batteries, la présence de celui-ci est très fréquente, et devrait le rester, au regard des avantages compétitifs des matériaux l’utilisant. Pourtant, le cobalt est un métal classé comme critique par l’union européenne, comme le montre la Figure 8. Ceci est notamment lié aux risques de guerre civile en République démocratique du Congo (RDC), qui présentent un risque réel

pour l'approvisionnement de cobalt, dont ce pays d'Afrique centrale assure 40 % de l'offre (15). Le cobalt est coté au London Metal Exchange, et fait l'objet de spéculation, ce qui entraîne une instabilité de son coût.

5.3.4 Nickel

L'utilisation de nickel dans les batteries a des points communs avec celle du cobalt. Son utilisation n'est pas obligatoire mais est très fréquente, son coût est élevé et il est coté au LME. Cependant il n'est pas classé comme critique par l'union européenne.

6 Conclusion

Les batteries lithium-ion représentent une opportunité pour les constructeurs automobiles. En effet, leurs caractéristiques en font la meilleure alternative actuelle au carburant automobile. Elles ont le potentiel pour être la réponse aux challenges qui se posent aux constructeurs automobiles : diminuer toujours plus l'impact environnemental des véhicules, et proposer des solutions face à la raréfaction du pétrole. Si la technologie existe depuis plus de vingt ans, elle n'a eu de cesse de s'améliorer, et les pistes de progrès sont encore nombreuses et prometteuses. Malgré des contraintes encore importantes (temps de recharge, densité d'énergie, coût), la compétitivité de ces batteries a déjà relancé l'intérêt pour les véhicules électriques.

L'Asie apparaît comme le cœur du marché des batteries lithium-ion. Des acteurs Européens occupent tout de même des positions de premier plan, notamment sur les matières, mais ils ont souvent une forte présence en Asie pour cela. En perspective de ce premier chapitre, il est intéressant de faire allusion à l'évocation récurrente dans les médias d'un airbus de l'énergie qui pourrait s'appliquer au stockage de l'énergie (18). Une telle idée pourrait permettre d'avoir un groupe européen suffisamment solide pour se positionner sur le marché concurrentiel des batteries lithium-ion pour l'automobile.

Chapitre II. Etat de l'art :

composition d'une batterie lithium-ion

Dans ce chapitre, les variantes de cellules lithium-ion sont présentées, ensuite la composition de ces cellules ainsi que de la batterie est détaillée. Enfin un état de l'art sur les coûts des matières et des composants des cellules est proposé.

1 Introduction

Une batterie lithium-ion est un système électrochimique complexe, contenant de multiples composants : des cellules, des modules, des éléments de structure, des câblages, de l'électronique de contrôle et éventuellement un système de refroidissement. Un exemple de tous les composants d'une batterie pour automobile, celle de la Chevrolet Volt, est donné sur la Figure 9 ci-dessous.

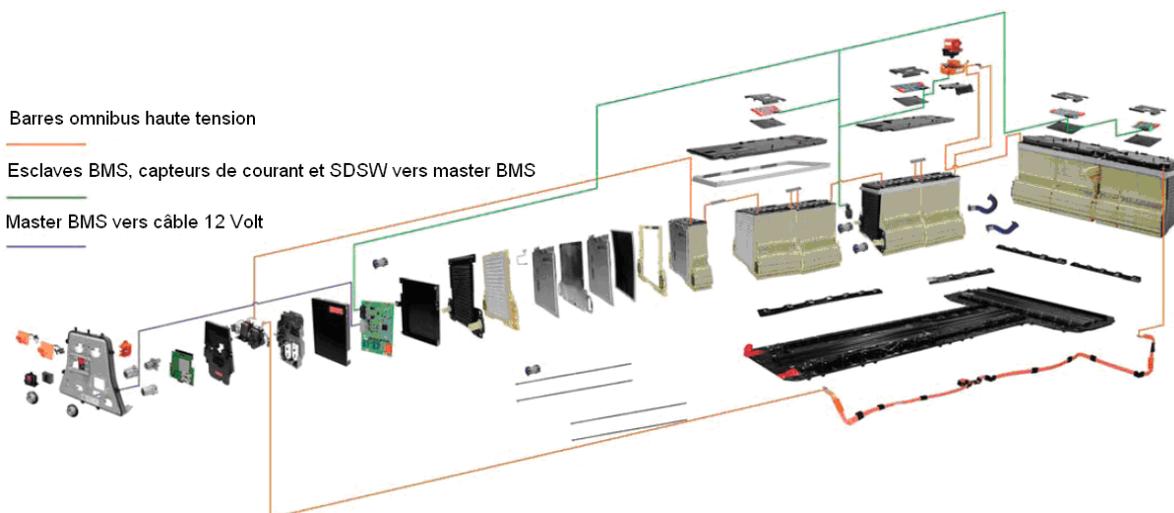


Figure 9 : Vue éclatée de la batterie de la Chevrolet volt (19)

Les cellules sont le cœur du système, où ont lieu les réactions électrochimiques sur lesquelles repose le principe de fonctionnement de la batterie. Elles constituent la spécificité des batteries lithium-ion, et font l'essentiel de l'enjeu technique et économique. C'est pour cela que cette thèse porte principalement sur celles-ci. Dans ce chapitre, les variantes et la

composition des cellules lithium-ion sont présentées, et un état de l'art sur les coûts des matières et des composants des cellules est proposé.

2 La composition d'une batterie lithium-ion

Au sein du véhicule, les batteries servent à stocker l'énergie (provenant du réseau électrique, du générateur électrique de bord ou de récupération d'énergie au freinage) et à restituer cette énergie (au moteur électrique ou au réseau de bord). La taille et la masse de cette batterie vont dépendre du type de véhicule et des choix du constructeur. Un véhicule hybride aura une batterie plus petite qu'un véhicule électrique, le besoin en énergie et l'espace disponible étant moindre pour les véhicules hybrides.

Suivant le type d'application visé, la conception des batteries sera différente. On parle ainsi de batterie d'énergie lorsque la densité d'énergie est privilégiée comme c'est le cas pour le véhicule électrique, où ce critère est prépondérant. La batterie est donc conçue pour stocker un maximum d'énergie dans un encombrement minimum. Au contraire, pour le véhicule hybride on parle de batterie de puissance, car c'est la densité de puissance qui est primordiale. Le dimensionnement de la cellule est fait pour restituer un maximum de puissance dans un encombrement minimum. Ces différences engendrent de fortes disparités de propriétés des batteries lithium-ion, et évidemment de coût.

En plus de cette diversité de typage, la taille, la forme et la capacité des cellules varient en fonction des applications et des fabricants. Une des principales différences porte ainsi sur le contenant de la cellule. Il existe ainsi trois familles de contenant pour les cellules actuelles (20), schématisées sur la Figure 10 : les boîtiers cylindriques, format historique des cellules, les boîtiers prismatiques rigides et les enveloppes souples (ou « pouch »).

Le format en enveloppe souple (ou « pouch cell ») est utilisé notamment par Renault, Ford (EV), General Motors (21), ou Nissan (22). Le format prismatique rigide est utilisé par Volkswagen et BMW (23). Le format cylindrique est utilisé par Tesla (24).

Quant à la capacité des cellules, celle-ci n'est pas non plus standard sur les véhicules électriques actuels, variant par exemple de 3 Ah sur la Tesla Model S à plus de 60 Ah pour les cellules de Samsung SDI dans la BMW i3 et la Fiat 500e (25). Ceci s'explique par le fait que Tesla ait choisi d'utiliser des cellules déjà sur le marché, avec un minimum de développements. Le choix des autres constructeurs automobiles, en concertation avec les fabricants de batteries, a été de développer un produit adapté aux contraintes automobiles.

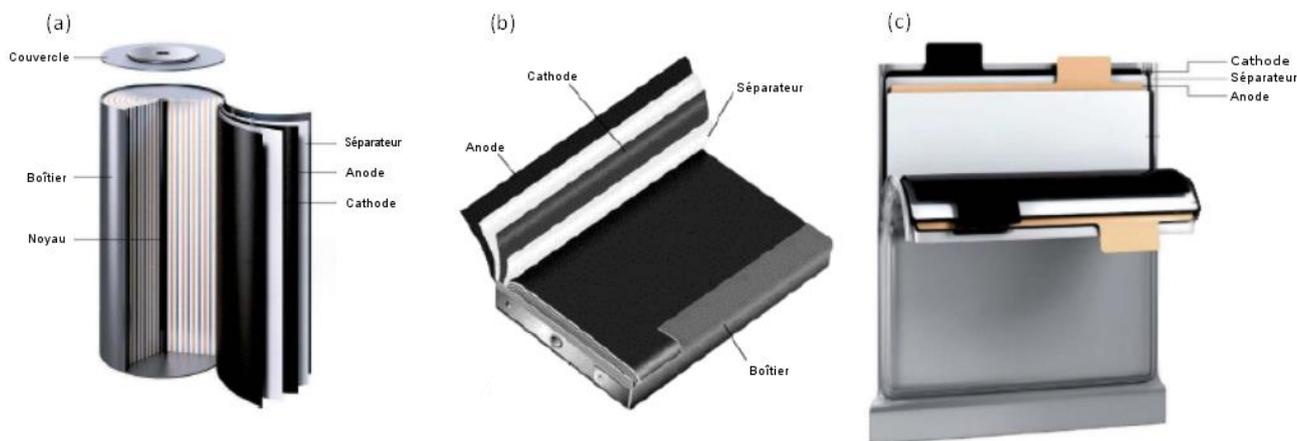


Figure 10 : Vision éclatée des trois formats de cellules : cylindrique (a), prismatique en emballage rigide (b), prismatique en emballage souple (c) (26)

En plus des choix de typage et de contenant, il existe une large palette de choix de matériaux actifs utilisables dans les cellules. Pour toutes ces matériaux, le principe de fonctionnement est le même : des cations lithium partent d'une électrode, pour s'insérer dans une autre et ce de façon réversible. Ce déplacement de charge entraîne un déplacement d'électrons dans le circuit extérieur pour assurer la neutralité électrique, comme l'illustre la Figure 11.

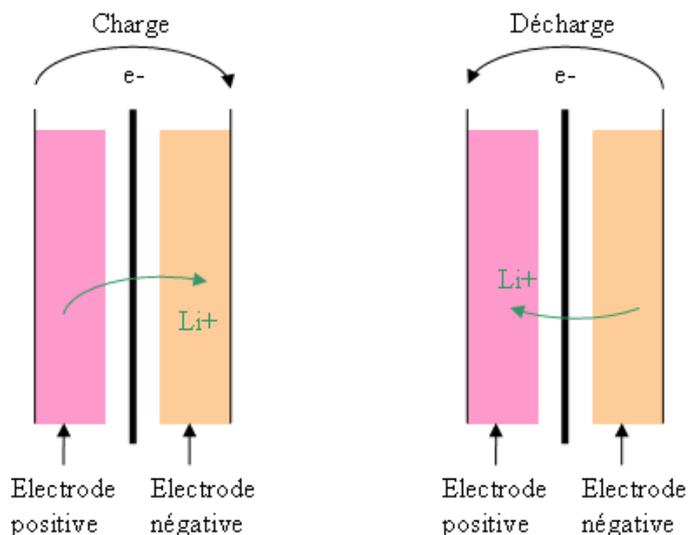


Figure 11 : Schéma de fonctionnement d'une cellule de batterie lithium-ion

2.1 Les composants d'une cellule

Les principaux composants d'une cellule de batterie lithium-ion sont représentés sur la Figure 12 : les matériaux actifs et les collecteurs de courant qui servent à fabriquer les électrodes (à gauche), le séparateur qui sert d'isolant électronique (à gauche), et qui entre dans la composition du faisceau d'électrodes, les clinquants de sortie du courant (au milieu),

l'électrolyte qui sert au transport de charge (à droite), et enfin l'enveloppe de la cellule (au milieu). Tous ces composants seront détaillés dans les paragraphes suivants.

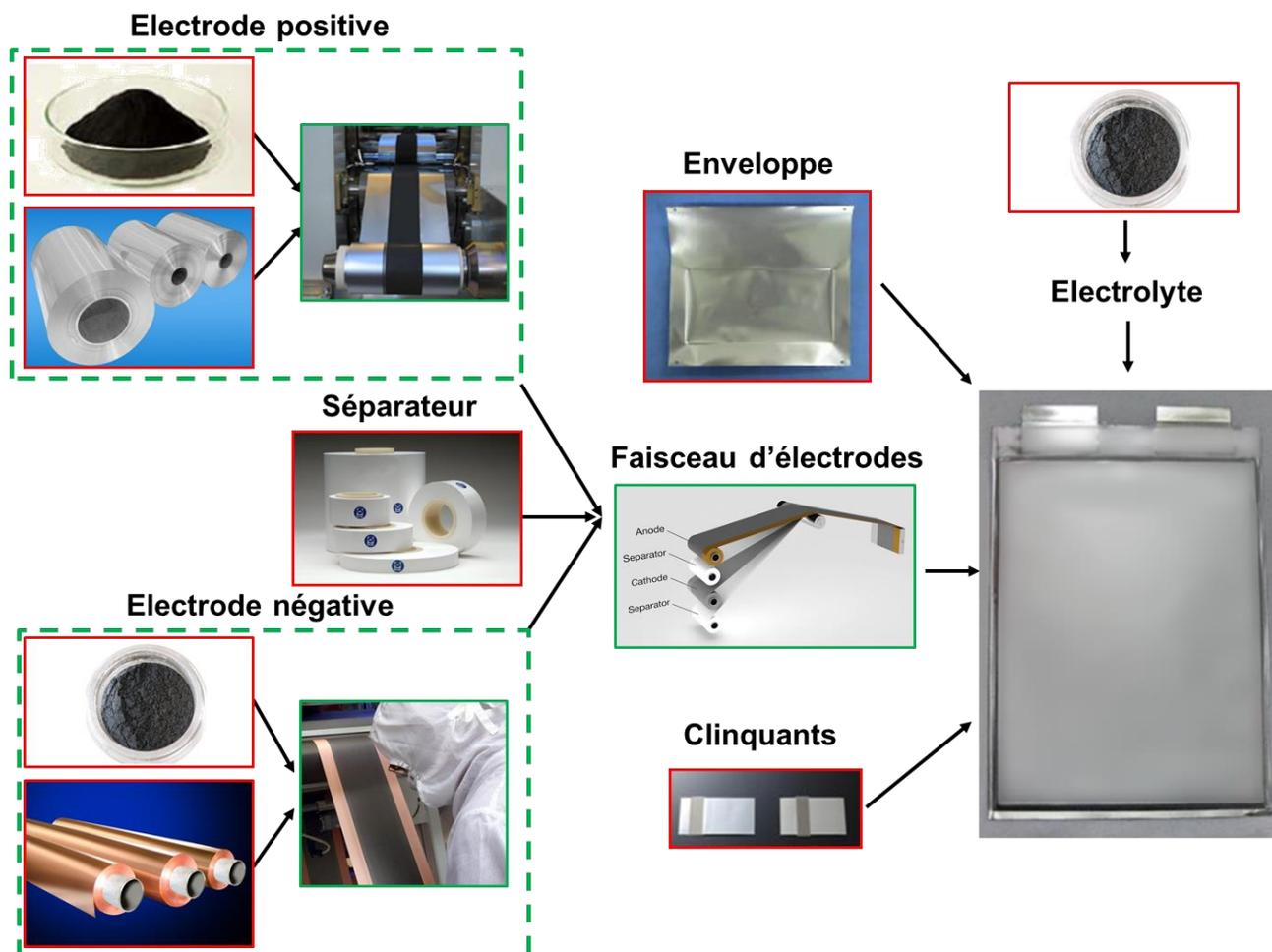


Figure 12 : Composition d'une cellule (source des images : celgard.com; solostocks.fr, jinbao-china.com, monstermarketplace.com, scienceviz.com)

Les matériaux actifs se répartissent en deux catégories, les matériaux pour l'électrode positive et ceux pour l'électrode négative. Dans le cas d'une cellule prismatique « stackée », le motif de base est celui de la Figure 11 répété plusieurs fois en fonction des besoins en énergie. La Figure 13 représente schématiquement cet empilement de couches à l'intérieur d'une cellule lithium-ion. Il se termine de chaque côté par le contenant. L'extrémité du faisceau d'électrode au contact de ce contenant peut-être une électrode ou bien un collecteur de courant, comme c'est le cas sur la figure.

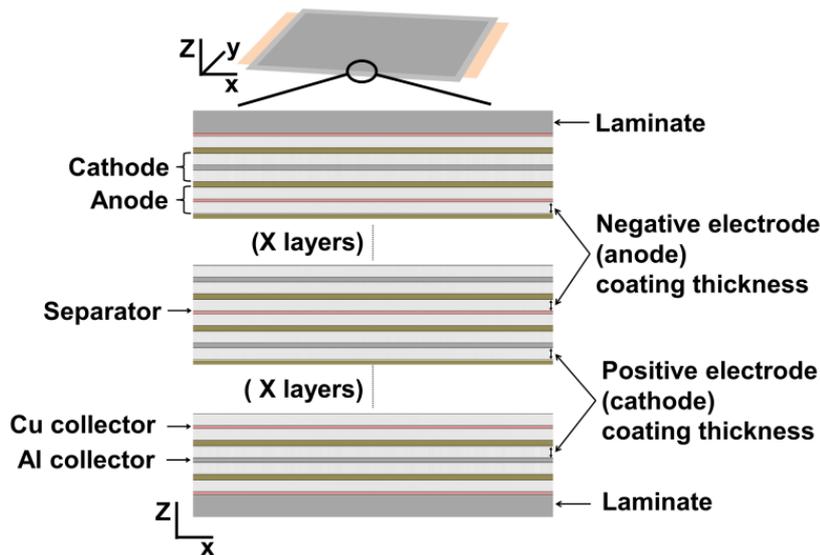


Figure 13 : Vue transversale de l'intérieur d'une cellule lithium-ion

2.1.1 Matériau actif de l'électrode positive

Les principaux matériaux d'électrode positive de batteries lithium-ion pour des applications automobiles vont être présentées par familles.

2.1.1.1 Les oxydes lamellaires

La structure des oxydes lamellaires peut-être décrite comme une alternance de couches contenant les ions lithium et de couches contenant les ions de métaux de transition (Co, Ni, Mn...). Les matériaux que l'on trouve actuellement sur le marché dans cette catégorie sont :

Le NCA ($\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Al}_{1-x-y})\text{O}_2$) qui est un oxyde lamellaire avec de bonnes caractéristiques de vieillissement ainsi qu'une bonne densité d'énergie et de puissance. Sa sécurité intrinsèque est par contre assez mauvaise. La proportion d'aluminium, inactif électrochimiquement mais ajouté pour améliorer le comportement en sécurité, est généralement très faible sur ce type de matière, et celle de nickel est prépondérante, le composé de référence étant $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$.

Le NMC ($\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y})\text{O}_2$) qui est un oxyde lamellaire représentant un bon compromis entre prix et densité d'énergie. La teneur en métaux de transition peut varier afin d'optimiser les propriétés du matériau. Une teneur plus faible en cobalt permet de diminuer les coûts de cette matière, mais rend la structure moins stable. Une teneur plus élevée en nickel augmente la capacité, mais diminue la sûreté alors qu'une haute teneur en manganèse abaisse le coût et augmente la sûreté.

2.1.1.2 Les phosphates de structure olivine

Les composés de structure olivine possèdent un métal de transition (Ni, Mn, Fe...) dans leur structure. Le seul composé de ce genre à être commercialement utilisé est le phosphate de fer LiFePO_4 (LFP). Il s'agit d'un matériau avec un prix relativement faible au kilogramme, une très bonne sécurité intrinsèque et une bonne tenue en cyclage. Il possède un plateau de tension en décharge sur la quasi-totalité de la gamme d'état de charge, ce qui lui donne une puissance stable au cours d'un cycle (cf. Figure 14). Ce matériau a de plus un impact environnemental réduit de par son utilisation de ressources abondantes. Son énergie spécifique est par contre faible à cause d'un potentiel relativement bas face au lithium.

2.1.1.3 Spinelles

Le LMO (LiMn_2O_4) est un spinelle dont le coût est faible et qui possède une bonne stabilité thermique, mais dont la durée de vie est limitée à haute température et l'énergie spécifique assez faible. Il présente néanmoins un très bon comportement en puissance, grâce notamment à sa tension nominale élevée.

Tous ces composés existent aujourd'hui commercialement, car aucun ne se démarque des autres dans tous les domaines. La Figure 14 montre la tension face au lithium de ces matériaux en fonction de la capacité. Sur cette figure apparaît le LCO, qui n'a pas été présenté, car non envisagé pour les applications automobiles. Le Tableau 2 récapitule les caractéristiques de chaque matériau. Les valeurs données sont des ordres de grandeurs, le nom correspondant à un nom générique sous lequel de nombreuses variantes existent.

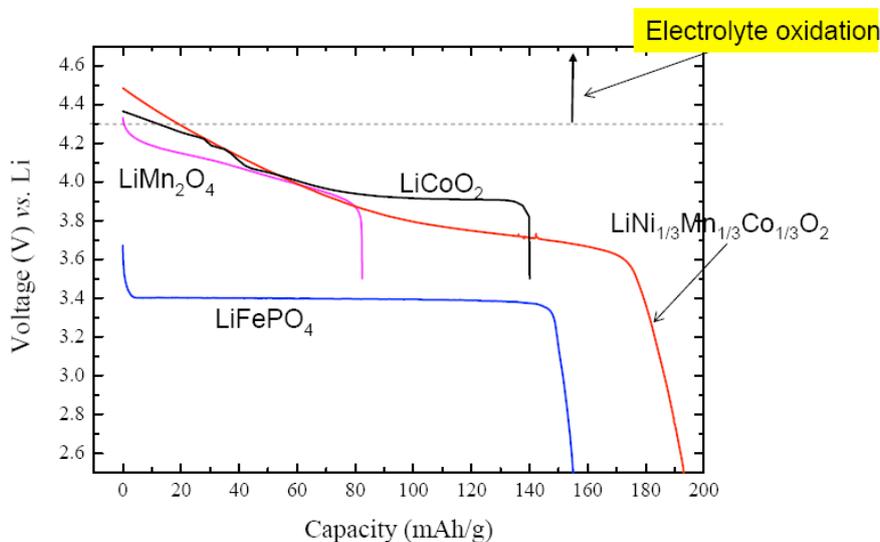


Figure 14 : Tension en fonction de la capacité selon Amirault *et al.* (27)

Ainsi, si deux types de NMC ont été retenus dans le Tableau 2, il existe en pratique une infinité de combinaisons, que l'on peut décrire sous la notation suivante : $N_xM_yC_z$, avec x , y et z compris entre 0 et 1, et la somme des trois égale à 1. Afin de simplifier la notation, on donne en pratique les proportions en fraction, comme dans le Tableau 2. Ainsi, le NMC 333 correspond à un NMC avec $x=y=z=1/3$, et le NMC 622 à $x=6/10$ et $y=z=2/10$.

Tableau 2 : Récapitulatif des propriétés des principaux matériaux d'électrode positive

	NMC 333	NMC 622	NCA	LFP	LMO
Capacité réversible spécifique mAh.g ⁻¹	150	170	160	150	100
Densité g.cm ⁻³	4,7	4,5	4,8	3,5	4,2
Tension nom V (approx. vs Gr)	3,7	3,7	3,7	3,3	3,9
Sûreté	++	+	0	+++	++
Durabilité	++	+	+++	++++	0

D'un point de vue puissance, il est complexe de classer les matériaux les uns par rapport aux autres. En effet, si intrinsèquement le matériau joue un rôle, il y a aussi un ensemble de paramètres sur lesquels il est possible de jouer pour améliorer la performance en puissance (taille des particules, enduction, forme). Dès lors, il faut se placer dans les mêmes conditions pour en tirer des conclusions correctes. Cela complexifie largement la comparaison, et n'a pas été retenu comme critère.

2.1.2 Matériau actif de l'électrode négative

Le carbone est le composé pour l'électrode négative le plus répandu. Les carbones pour l'électrode négative sont classés en trois familles, en fonction du taux de cristallinité : le graphite, le « soft » carbone et le « hard » carbone. On peut utiliser une seule de ces formes dans une cellule, ou bien un mélange des trois.

Le graphite est l'un des allotropes naturel du carbone. Il est utilisé dans de nombreuses industries, contrairement aux matériaux pour l'électrode positive, dont les applications sont uniquement dans les batteries lithium-ion. La structure cristalline consiste en un empilement de couches de graphènes. Le matériau est anisotrope. Il existe une multitude de grades de graphites (pureté, longueur des cristaux) avec des propriétés qui peuvent être fortement différentes et des prix qui varient tout autant.

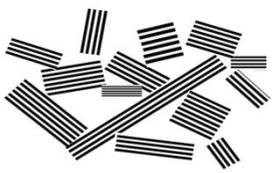
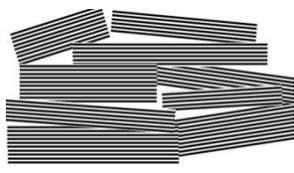
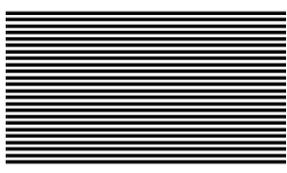
Les graphites sont classés en fonction de la méthode de production utilisée : le graphite naturel et le graphite artificiel. Le graphite naturel est un minerai que l'on trouve dans la

nature. C'est un carbone « graphénique », quel que soit son taux de cristallinité. Le graphite artificiel ou synthétique est un carbone graphénique qui a été obtenu par graphitisation d'une source de carbone non-graphénique (28). La distance inter-planaire du graphite est de 0,335 nm, et la capacité réversible est d'environ 360 mAh.g⁻¹. Lors de l'intercalation d'ion lithium, l'augmentation de volume est d'environ 10% (29,30).

Le Hard carbone est un carbone très peu structuré (non cristallin). Les couches de graphène ne sont pas proprement empilées (nombreuses distorsions de la structure (cf. Tableau 3). Le matériau est isotrope à l'échelle macroscopique. La distance inter-planaire est supérieure à 0,38 nm, ce qui fait que l'intercalation d'ions lithium n'entraîne quasiment pas de changement de volume. La tension face au lithium du hard carbone est plus élevée que celle du graphite. Il est produit à partir de précurseurs organiques qui brûlent lors de la pyrolyse (30,31).

Le Soft carbone est un matériau dont l'organisation structurale est à mi-chemin entre celle d'un hard carbone et d'un graphite. Les couches de graphène sont proprement empilées, mais sur des distances plus faibles que le graphite (Tableau 3). La distance inter-planaire est de l'ordre de 0,375 nm. Ils sont produits à partir de précurseurs organiques qui fondent lors de la pyrolyse (30,31). Le Tableau 3 offre un récapitulatif des caractéristiques de ces familles de carbones.

Tableau 3 : Points forts et faibles du graphite, du hard carbone et du soft carbone

	Hard Carbone	Soft Carbone	Graphite
<i>Cristallinité</i>	<i>Faible</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Elevée</i>
Organisation schématique			
Avantages	-Stabilité vis-à-vis de l'électrolyte (durabilité) -Puissance	Neutre	-Bon rendement -Forte densité d'énergie
Inconvénients	-Faible rendement -Faible densité d'énergie -Coût élevé	Neutre	-Stabilité vis-à-vis de l'électrolyte (durabilité) --Puissance

Les électrodes à base de lithium-titanate (LTO) offrent une alternative intéressante au graphite. Le potentiel face au lithium plus élevé de l'électrode (1,55 V vs Li⁺/Li) réduit considérablement la formation de la couche d'interface dite SEI (Solid Electrolyte Interphase). La capacité théorique du matériau est de 175mAh.g⁻¹. L'impédance de ce type de cellule est considérablement réduite et la formation de lithium métallique à l'électrode

négative en charge est quasiment inexistante. Toutefois, ce type d'électrode est peu adapté à des applications à fortes énergies, à cause de la réduction de 1,5 V de la tension nominale de l'accumulateur.

2.1.3 Autre matières dans les électrodes

En plus des matériaux actifs, des matières sont utilisées dans les électrodes ou bien au cours de la fabrication de celles-ci. Il s'agit de produits tels que les liants, qui assurent une bonne tenue mécanique entre les particules de l'électrode, les agents conducteurs, qui assurent une bonne circulation du courant du collecteur de courant vers les particules de du matériau actif et le solvant utilisé pour la formulation des encres enduites sur le collecteur de courant, et qui est évaporé au cours de la fabrication.

Les additifs conducteurs varient selon les fabricants. La matière fréquemment utilisée à cet effet est le noir de carbone. La particule de base de ce type de produit est constituée de couches de type « graphène », qui se combinent entre elles. La taille de ces particules est comprise entre 5 et 100 nm. La forme de noir de carbone généralement utilisée est le noir d'acétylène, caractérisé par une structure constituée de gros agrégats de particules de 35 à 70 nm de diamètre. Ces propriétés donnent à cette matière une conductivité électrique élevée ainsi qu'une bonne capacité à absorber l'électrolyte (31,32).

Le solvant NMP (N-méthyl-2-pyrrolidone) est fréquemment utilisé pour la fabrication de l'électrode positive. Ce produit étant classé Cancérogène, Mutagène et Reprotoxique (CMR), son utilisation est très contraignante. Ne pouvant être rejeté dans l'environnement, les vapeurs de ce produit obtenues au cours du séchage doivent être entièrement récupérées et retraitées. Pour l'électrode négative, les industriels ont généralement réussi à se passer de la NMP et utilisent un solvant aqueux, plus favorable.

Le liant est choisi en fonction de ses caractéristiques d'adhésion et aussi de compatibilité électrochimique avec l'électrode concernée. C'est aussi lui qui impose le choix du solvant avec lequel l'électrode est formulée. Il s'agit la plupart du temps de PVDF (Polyfluorure de vinylidène), lorsque le mélange est formé avec un solvant organique (NMP). Lorsqu'un solvant aqueux est utilisé, le liant utilisé est généralement un mélange de SBR (Styrène-butadiène rubber), et de CMC (Carboxyméthylcellulose sodique).

2.1.4 Electrolyte

L'électrolyte a pour fonction d'assurer le transport des ions lithium entre les deux électrodes. Le choix de l'électrolyte est fait de façon à obtenir une conductivité ionique élevée, une conductivité électronique nulle, une bonne stabilité thermodynamique et cinétique vis-à-vis des électrodes et des composants de la cellule, et un large domaine de stabilité thermique et électrochimique.

L'électrolyte le plus répandu pour les batteries lithium-ion est basé sur un sel d'hexafluorophosphate de Lithium LiPF_6 dissout dans solvant organique. Ce solvant est souvent un mélange de carbonates d'éthylène (EC) et d'un carbonate linéaire comme un éthyle méthyle carbonate (EMC) ou un diméthyle carbonate (DMC). Des additifs chimiques sont la plupart du temps ajoutés pour limiter les pertes de capacité et de puissance de la batterie au cours du temps.

2.1.5 Séparateur

Le séparateur est une membrane poreuse et isolante électronique, située entre l'électrode négative et positive. Elle n'intervient pas dans les réactions électrochimiques de la batterie. Sa porosité permet de contenir l'électrolyte liquide assurant la conduction ionique entre les électrodes. Le séparateur est typiquement une membrane poreuse basée sur du polypropylène (PP), ou du polyéthylène (PE), généralement utilisés en combinaison en couches superposées.

Son rôle dans la sûreté de la cellule est majeur. Il assure l'isolation des électrodes positive et négative en cas d'emballement thermique de la cellule. Pour renforcer la sûreté, une céramisation du séparateur (ou éventuellement de l'électrode) peut être réalisée. Celle-ci semble devenir une norme sur les applications commerciales récentes. L'épaisseur globale du séparateur est comprise entre 10 (applications portables) et 25 μm .

2.1.6 Feuillard collecteur de courant

Les feuillets collecteurs de courant, sur lesquels les électrodes sont déposées, sont en cuivre pour l'électrode négative (ou en aluminium avec une négative LTO) et en aluminium pour l'électrode positive. L'aluminium est produit par laminage, alors que le cuivre l'est par électrodéposition. Les feuillets ont une épaisseur usuelle de 10 ou 12 μm pour le cuivre et 16 ou 20 μm pour l'aluminium. Des traitements de surfaces peuvent éventuellement être pratiqués pour améliorer l'adhésion des électrodes (attaque chimique, traitement corona).

Une réduction de l'épaisseur de ces feuillets est une piste de gains de masse et de volume étudiée par les industriels. Cette réduction d'épaisseur irait dans le sens d'une augmentation de coût à la surface pour les feuillets d'aluminium, produits par laminage, mais d'une baisse pour les feuillets de cuivre, produits par électrodéposition. Ceci est lié au type de procédé de fabrication, et à la valeur des métaux de base.

2.1.7 Autres composants

2.1.7.1 Cellule en enveloppe souple

Les clinquants (parfois nommés « tabs » ou « leads ») sont des pièces métalliques en cuivre ou en aluminium, qui sont soudées sur les collecteurs de courant, et qui ont pour but de faire sortir le courant de la cellule. Elles comportent une partie adhésive assurant une bonne étanchéité entre l'enveloppe et le clinquant.

Le boîtier est un film composite multicouches, dont une couche d'aluminium, qui sert à assurer l'étanchéité de la cellule vis-à-vis de l'air et de l'humidité extérieur. Le boîtier est fabriqué par emboutissage du film pour former deux coques entre lesquels le faisceau d'électrodes est inséré et qui sont ensuite scellées thermiquement. Un surplus de film peut-être prévu pour réaliser une poche de dégazage, utilisée lors des premiers cycles de formation électrique de l'accumulateur. Ce type d'emballage offre une grande souplesse dans le choix des dimensions de la cellule.

2.1.7.2 Cellules prismatiques rigide

Le boîtier est un parallélépipède en aluminium dans lequel le faisceau d'électrodes est inséré, avec la partie supérieure du boîtier qui a été préalablement soudée à ce faisceau sur les parties prévues à cet effet. La partie supérieure est soudée au reste du boîtier par une soudure laser. Sur cette partie se trouve donc la sortie des électrodes, ainsi qu'un évent de sécurité pour évacuer d'éventuelles surpressions, notamment en conditions abusives (cf. Figure 15).



Figure 15 : Exemple de cellule prismatique commerciale Hitachi (33)

2.1.7.3 Cellules cylindriques

Le boîtier des cellules cylindriques est un cylindre en aluminium, qui joue le rôle de pôle négatif, alors que le couvercle de ce cylindre est isolé électriquement du reste du cylindre, et est relié à l'électrode positive (cf. Figure 16). Le couvercle du cylindre contient généralement un système d'évacuation des gaz en cas de surpression.

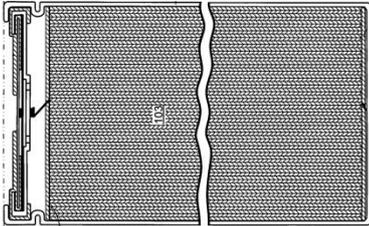


Figure 16 : Vue en coupe schématique de l'intérieur d'une cellule cylindrique (34)

2.2 Autres composants d'une batterie lithium-ion

Une batterie lithium-ion est un système contenant de multiples composants. Si les cellules constituent l'élément central du système et le cœur de cette thèse, de nombreux éléments supplémentaires sont indispensables à son fonctionnement et vont être présentés.

2.2.1 Modules

Les modules sont des regroupements d'une partie des cellules. Ils servent à assurer un bon maintien entre celles-ci ainsi qu'à les connecter. Le nombre de cellules dans un module est très variable, et dépend de la conception adoptée par le fabricant. Les modules contiennent aussi des sondes pour surveiller le courant et la température.

En fonction du type de cellule, le rôle des modules sera différent. Pour des cellules en boîtier rigide, le module sert à regrouper des cellules et à les connecter, alors que pour des cellules en enveloppe souple, il doit aussi assurer une rigidité de l'ensemble. Le module sert aussi à comprimer les cellules. Il est en effet bénéfique d'exercer une pression sur les cellules pour en augmenter la durée de vie.

2.2.2 Système de gestion de la batterie (BMS)

Le système de gestion de la batterie, ou « Battery Management Système » (BMS), est un système électronique qui gère le niveau de charge de chacune des cellules pour optimiser la répartition du courant, et l'empêcher de fonctionner dans les zones de tension ou de courant

non acceptées. Il permet d'améliorer le rendement de la batterie et sa durabilité. Il sert aussi à la surveillance de la température des cellules.

2.2.3 Thermique et connectique

La présence d'un système de refroidissement est facultative. Le but de ces systèmes est de prolonger la durée de vie de la batterie en lui évitant d'être exposée à des températures élevées, et en maintenant une température homogène dans l'ensemble du pack afin d'assurer un vieillissement homogène des éléments. Il est aussi possible d'ajouter un système de chauffage de la batterie. Il s'agit dans ce cas de chauffer la batterie au démarrage dans des conditions de grand froid, afin de ne pas en altérer les performances.

La connectique est souvent assurée par des « busbars », qui servent à conduire le courant au sein de la batterie. Le relais de précharge sert à éviter les forts appels de courant lors de la connexion de la batterie sur le réseau de la voiture. Des fusibles sont utilisés pour déconnecter le module du reste de la batterie en cas de problème. Un sectionneur de courant est un interrupteur qui permet d'ouvrir manuellement le circuit électrique de la batterie et d'en fractionner la tension, pour pouvoir intervenir sans danger sur le véhicule.

2.2.4 Bac batterie

Le bac batterie sert de contenant et de protection à tous les éléments vus précédemment et permet de les fixer à la caisse du véhicule. Il doit répondre aux exigences mécaniques (vibration, tenue aux chocs, résistance à la pénétration,...), de compatibilité électromagnétique (CEM), de thermique et de sécurité.

3 Coût des matières et composants : Etat de l'art

3.1 Matériaux actifs d'électrode positive

Le Tableau 4 regroupe les informations disponibles dans la littérature sur le coût des matériaux actifs pour l'électrode positive. Les données sont pour la plupart présentées comme étant issues de discussions avec des fournisseurs de matières, de cellules et de batteries.

Tableau 4 : Coûts matériaux selon la littérature, en \$.kg⁻¹ (B = basse, R = référence et H = haute)

Source	NCA	NMC 333	N _x M _y C _z	LFP	LMO
Nelson, 2011 (35)	37//33	39//30	(441) 29//26	20	10
Howard, 2007 (36)	35			15	10
Rempel, 2013 (37)	B=36, R=40, H=48	B=33, R=36, H=45		B=15, R=18, H=20	B=12, R=16, H=20
Kalhammer, 2007 (38)	B=28, H=30	B=22, H=25		B=16, H=20	B=8, H=10
Mock, 2011 (39)		23		15	12
Gallagher, 2013 (40)		B=30, H=40	(441) B=25, H=30		
Gaines, 2013 (41)		19,4	(532) B=15, H=17		

Les données d'Howard *et al.* (36), sont une actualisation en 2007 de valeurs d'une publication de 2000 (42) par rapport au cours des métaux. Les données de Mock (39), sont des projections de données de la littérature, en fonction d'hypothèses empiriques sur l'évolution des cours des métaux et sur l'amélioration de la fabrication. Le symbole // pour les données de Nelson *et al.* (35), sépare deux hypothèses de coût du cobalt, 5 ou 2,5 \$.mol⁻¹, soit 85 ou 42 \$.kg⁻¹ (la formule de calcul sera présentée ultérieurement, cf. Équation 1).

Les valeurs entre les publications sont du même ordre de grandeur. Les valeurs de Kalhammer *et al.* (38) sont souvent les plus faibles, celles de Nelson *et al.* et Howard *et al.* sont centrales et celles de Rempel *et al.* (37) sont les plus élevées. Si aucun point de comparaison de la littérature n'est disponible sur le NMC532, la valeur reprise par Gaines *et al.* (41) semble faible en comparaison des NMC 333 et 441, dont les coûts sont proches. Il s'agit d'informations provenant d'organismes spécialisés dans la cotation de métaux et dérivés, comme Asian Metal (<http://www.asianmetal.com>) ou Metal Pages (<http://www.metal-pages.com>).

Kalhammer *et al.* ont aussi fourni des indications de prix en \$.kWh⁻¹ : 50 \$.kWh⁻¹ pour le NCA, 55 pour le NMC 333, 35 pour le LFP et 25 pour le LMO. Le prix rapporté au kWh est un indicateur qui permet de décrire concrètement le coût du matériau pour obtenir une énergie. Mais cet indicateur n'est utilisable que pour des batteries d'énergie et ne tient pas compte des gains sur les matières autres obtenus avec des densités d'énergie élevées, comme cela sera montré par la suite (cf. Chapitre V).

Les estimations de toutes ces publications proviennent de discussions avec des acteurs de ces marchés, sans aucune visibilité sur ces acteurs et les conditions d'obtention. Il manque

aussi pour les publications de Howard *et al.*, Barnett *et al.* et de Kalhammer *et al.*, les volumes de matériau qui accompagnent le prix, ainsi que les cours des métaux. La plage de valeur permet toutefois d'avoir un ordre de grandeur de coût, ainsi qu'un classement relatif des matériaux actifs.

Il est intéressant d'étudier l'impact des métaux précurseurs dans le coût des composés. Nelson *et al.* proposent ainsi l'Équation 1, pour calculer le coût des composés à structure lamellaire ou spinelle basés sur des métaux de transition (35).

Équation 1

$$C(\$.kg^{-1}) = C_0 + \frac{1}{MW} \sum_i x_i C_i MW_i$$

Le coût final C de l'oxyde lithié dépend du coût de base C_0 et de la contribution du lithium et des métaux de transition, C_i . Le titre molaire, x_i , est converti en masse à l'aide de la masse moléculaire de la matière première, MW_i et du produit final MW. Le coût de base C_0 est la somme du coût de transformation, de matières additionnelles et de la marge associés à la fabrication de la matière. Le coût de base pour un oxyde contenant un seul métal de transition (LMO et LCO) est pris à $7\$.kg^{-1}$ et pour un oxyde avec un co-précipité de métaux (NMC) à $16\$.kg^{-1}$. Le NCA a un coût de base pris à $20\$.kg^{-1}$. Les coûts pour Li, Ni, Mn, Al et Co sont pris à 0,22 ; 0,85 ; 0,15 ; 0,15 et $5\$.mol^{-1}$.

Dans une interview de 2012 Bernhart explique que la cathode représente 40% du coût matière total pour une cellule de 96Wh. 45% du prix de la cathode provient des précurseurs, dont le cobalt pour 33%, le carbonate de lithium pour 12%, le manganèse pour 7% et le nickel pour 20%. La composition de la cathode n'est malheureusement pas clairement précisée (43).

Gaines *et al.* précisent aussi la valeur des précurseurs dans le coût total de la cathode. Ainsi pour le NMC, la valeur des précurseurs est de $13,5\$.kg^{-1}$ soit 70% du coût total. Pour le LMO et le LFP, le coût total des composés est repris de la publication de Nelson *et al.* (35), et la valeur des précurseurs indiquée est de respectivement 3 et $1,7\$.kg^{-1}$ soit 30% et 10% du coût total (41).

De cet état de l'art il ressort que la fiabilité des données de la littérature semble assez faible. Ainsi les écarts sont importants entre les informations des différentes publications. Le prix relatif des matériaux actifs change aussi selon les publications. Cela risque de fausser une étude comparative des composés. Pour une telle étude, il faudrait connaître la structure de

coût complète. Ceci permettrait de plus de faire des calculs de coût dans un contexte identique pour tous les matériaux, et éviterait ainsi des biais de comparaison.

3.2 Matériaux actifs d'électrode négative

Il existe de nombreuses variétés de graphite, et donc des prix au kilogramme qui peuvent varier fortement. Les données de la littérature ont été reportées dans le Tableau 5 en \$.kg⁻¹. Elles sont présentées par les auteurs de ces publications comme issues de discussions avec des fournisseurs. L'intervalle de ces données donne des indications sur le niveau de prix à attendre, et le classement relatif de chaque matière les unes avec les autres. Les indications de prix de Nelson *et al.* (35) sont fournies pour une quantité de 1 200 tonnes par an, équivalent à 50 000 packs pour véhicule électrique (type Nissan Leaf) pour le graphite, et 20 000 packs pour le LTO.

Tableau 5 : Coût de matériaux selon la littérature en \$.kg⁻¹

	Nelson, 2011 (35)	Rempel, 2013 (37,44)	Howard, 2007 & Mock, 2011 (36,39)
Graphite	19	B=15, R=18, H=21	30
LTO	12	B=9, R=10, H=12	

Là encore la fiabilité des sources n'est pas satisfaisante pour répondre aux besoins de la thèse. Ceci est lié à la confidentialité des données. L'écart entre les données de différentes publications est important. De plus le contexte est différent pour chacune des données ce qui risque fortement d'introduire des artefacts lors de la comparaison de matériaux pour l'électrode négative.

3.3 Electrolyte et séparateur

Le Tableau 6 récapitule les différentes valeurs de coût de l'électrolyte et du séparateur. Nelson *et al.* donnent un prix pour un électrolyte usuel basé sur un sel hexafluorophosphate de lithium LiPF₆, dissout dans un solvant carboné (EC, EMC, DMC), sans additifs. Le prix proposé par Howard *et al.* est donné sans précision sur sa composition.

Tableau 6 : Coût de l'électrolyte et du séparateur selon la littérature

	Nelson, 2011 (35)	Rempel, 2013 (37)	Howard, 2007 (36)	Mock, 2011 (39)
Electrolyte	18 \$.kg ⁻¹	B=17, R=20 H=22 \$.kg ⁻¹	60 \$.kg ⁻¹	
Séparateur	1 / 2 \$.m ⁻²	1 / 1,8 / 2,2 \$.m ⁻²	2 \$.m ⁻²	60 \$.kg ⁻¹

La matière de base du film de séparateur (PP ou PE) a un coût faible, et c'est la mise en forme en film microporeux ultrafin (typiquement 20 μm) qui représente la plus grosse partie de la valeur. Les prix suggérés dans la littérature sont de 1 à 2 $\text{\$.m}^{-2}$ pour un film PP ou PE prêt à l'emploi. Il s'agit de prix sans céramisation, qui devraient augmenter, mais aucun prix n'est disponible dans la littérature.

3.4 Collecteurs de courant

Le feuillard collecteur de courant est un composant particulièrement soumis aux variations du cours des métaux. Le cuivre est plus cher et avec des prix plus volatils que l'aluminium. Nelson *et al.* proposent un prix de 1,80 $\text{\$.m}^{-2}$ pour le cuivre et 0,80 $\text{\$.m}^{-2}$ pour l'aluminium, avec un cours métal représentant 16% du prix du feuillard d'aluminium et 23% du feuillard de cuivre (35). Howard *et al.* proposent un prix de 20 $\text{\$.kg}^{-1}$ de feuillard d'aluminium et 25 $\text{\$.kg}^{-1}$ pour le feuillard de cuivre (36). Soit respectivement 1,08 $\text{\$.m}^{-2}$ (20 μm , densité 2,7 g.cm^{-3}) et 2,23 $\text{\$.m}^{-2}$ (10 μm , densité 8,92 g.cm^{-3}).

3.5 Liant, solvant du liant et agents conducteurs

Le solvant est évaporé après l'enduction de l'électrode sur le feuillard et est en partie récupéré. Nelson *et al.* supposent une récupération de 99,5% du solvant après évaporation. Lorsqu'un solvant aqueux est utilisé, comme c'est le cas pour la négative, ils négligent le coût de l'eau. Ils supposent un prix pour le liant sans préciser le type de liant dont il s'agit. Ces informations sont dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Coût du liant, $\text{\$.kg}^{-1}$, de l'agent conducteur et du solvant selon la littérature

Auteurs	PVDF	CMC	NMP	Noir de carbone
Howard, 2007 (36)	46	5		10
Nelson, 2011 (35)	10		3,20	6,8

Ces produits ayant déjà des applications variées, l'industrie des batteries ne changera pas considérablement les volumes produits et par conséquent ne diminuera pas les coûts, sauf si une nuance spécialement développée pour les batteries lithium-ion est utilisée.

3.6 Composants de cellule

Nelson *et al.* ont proposé des coûts pour les différentes pièces d'une cellule. Le coût des composants contient une part fixe plus une part variable, proportionnelle à la masse m_i du composant ou à la capacité de la batterie C. Le coût donné pour les terminaux est ainsi de

0,25+4 m_i \$ pour l'électrode positive et 0,25+6 m_i \$ pour la négative. Le coût de l'enveloppe de cellule (pouch) est de 0,20+3 m_i \$ (35).

Howard *et al.* proposent un coût de 0,08 \$ par boîtier pour des cellules cylindriques, et 0,15\$ pour le noyau de chacune de ces cellules (36). Rempel *et al.* ont quant à eux proposé en 2010 une plage de coût pour les composants de cellule allant de 2 à 2,5 \$ par cellule, pour des cellules destinées à des voitures hybrides rechargeables sur le réseau électrique (par la suite on utilisera l'abréviation PHEV pour Plug-In Electric Vehicles pour ce type de véhicule) d'environ 55Wh (37). Brodd *et al.* ont eux proposé un coût de 0,17 \$ pour le boîtier, le bouchon et les terminaux d'une cellule cylindrique 18650 (45).

4 Conclusion

Un panorama des matières et composants utilisés à l'heure actuelle dans les batteries lithium-ion a donc été dressé. Les données de coût sur ces matières disponibles dans la littérature sont peu nombreuses, inhomogènes, et vont parfois du simple au double. De plus les sources à l'origine de ces données ne sont pas connues, et il est probable que leur fiabilité ne soit pas optimale, étant donné que ces publications sont issues de personnes n'ayant pas de relations commerciales avec les fournisseurs. Les auteurs ne peuvent qu'obtenir des ordres de grandeurs de la part de ceux-ci. Les données obtenues ne sont donc pas au niveau de précision nécessaire pour répondre aux attentes de la thèse, et leur utilisation ne peut pas être envisagée pour la construction d'un modèle de coût, avec des résultats à la fiabilité vérifiée.

Chapitre III. Etat de l'art :

fabrication des cellules

Ce chapitre présente un état de l'art de la modélisation du coût des batteries lithium-ion. Le procédé de fabrication est décrit. Ensuite, un état de l'art sur la modélisation du coût de fabrication des cellules est fait, suivi d'un état de l'art sur le coût total des cellules.

1 Introduction

Les procédés industriels de fabrication des batteries lithium-ion sont similaires entre les fabricants. Pour la réalisation des électrodes, les techniques utilisées à l'heure actuelle sont ainsi la plupart du temps identiques. Par contre, le procédé de fabrication des cellules connaît des variations plus importantes entre les industriels, notamment en fonction de la conception de la cellule. De nombreuses publications se sont intéressées à la fabrication des batteries, et sont reprises dans ce chapitre, pour faire un état de l'art de la fabrication des cellules lithium-ion. Un état de l'art sur le coût total des cellules et des batteries lithium-ion est aussi dressé dans ce chapitre, à partir des données sur le procédé de fabrication.

2 Fonctionnement global d'une usine

La publication la plus complète sur le fonctionnement d'une usine est celle du laboratoire américain Argonne sur le logiciel BatPac par Nelson *et al.*, publiée en 2011, avec une actualisation en 2013 (35,46,47). La Figure 17 représente le schéma de principe de la fabrication de batteries donné par cette publication. La modélisation de référence utilisée dans cette publication porte sur une usine fabriquant 100 000 packs par an d'une batterie de 8,7 kWh, contenant 60 cellules en enveloppe souple de 40 Ah, avec une chimie NCA/graphite. Cette usine fonctionne en 300 jours de travail effectif par an, avec trois équipes de 8 heures. La taille des zones du schéma est proportionnelle aux surfaces au sol occupées.

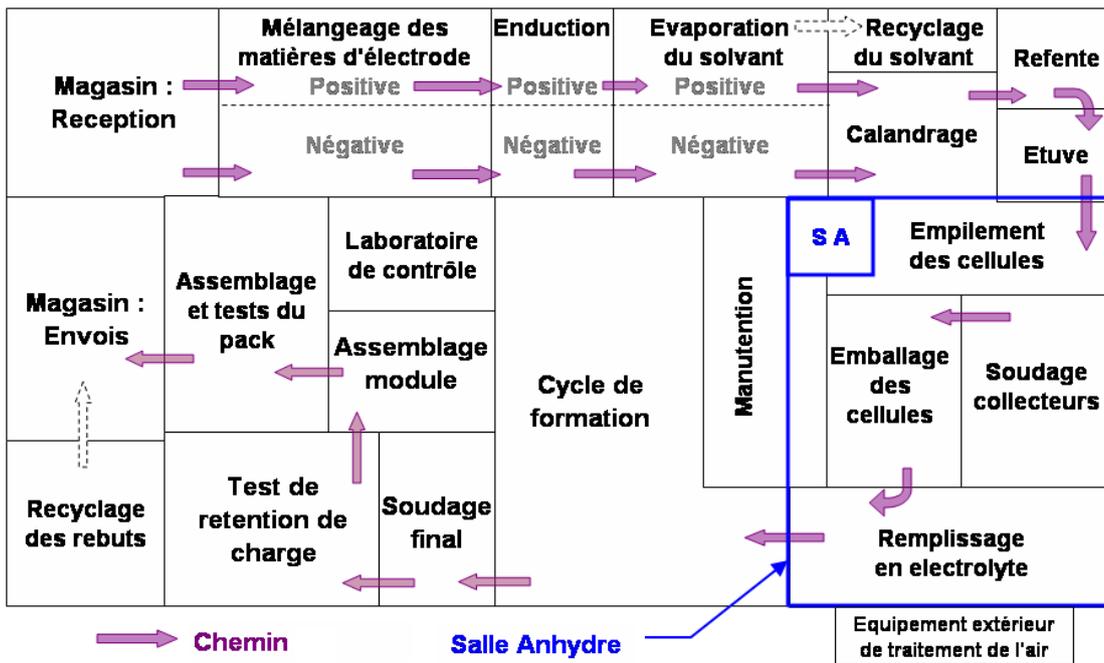


Figure 17 : Schéma d'une usine de batteries pour PHEV selon BatPac (47)

Si des variantes existent entre chaque fabricant, le procédé de fabrication d'une batterie suit toujours les grandes lignes de ce schéma. Le déroulement général de ce procédé est décrit dans les paragraphes suivants, et une présentation complète étape par étape est proposée en annexe (cf. Annexes 1.1).

2.1 Fabrication des électrodes

La fabrication des électrodes correspond aux cases supérieures de la Figure 17 jusqu'à l'étuvage. Brodd a proposé la Figure 18 pour illustrer le fonctionnement d'une ligne d'électrode (48).

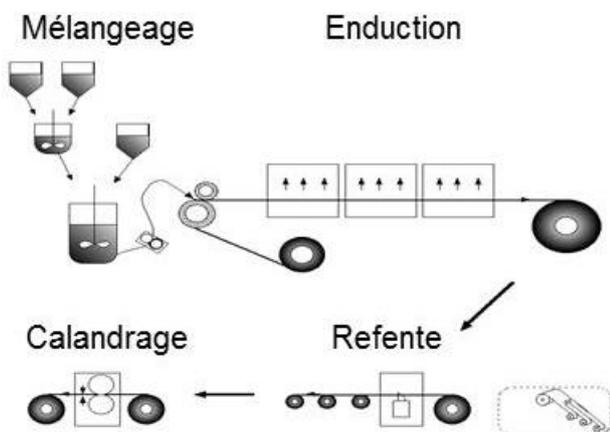


Figure 18 : Schéma des étapes de fabrication des électrodes selon Brodd (48).

La première étape est le mélangeage, qui a lieu dans plusieurs cuves. Cette étape est suivie de l'enduction de l'encre d'électrode sur le feuillard collecteur de courant. Ensuite le rouleau d'électrode obtenu est refendu puis calandré pour obtenir les dimensions et la porosité souhaitées, (ces deux étapes peuvent être inversées). Pour les productions avec des volumes importants, deux lignes identiques mais séparées sont utilisées pour les électrodes positives et négatives, afin d'éviter la contamination croisée.

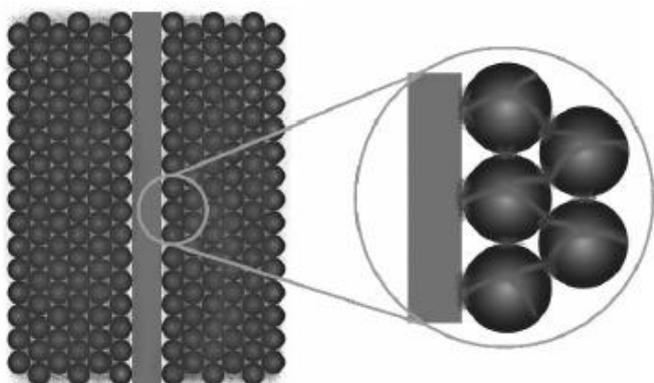


Figure 19 : Représentation de la structure d'électrode : les particules de matières sont maintenues par un liant, et des particules conductrices assurent la conduction électronique (49).

La vision schématique d'une électrode est donnée sur la Figure 19. Plusieurs conditions doivent être remplies pour le fonctionnement correct de celles-ci : les pores doivent tous être remplis en électrolyte, et celui-ci doit pouvoir bien imprégner entre les cavités, les particules de matériau actif doivent être en contact électrique avec le feuillard métallique pour assurer une bonne percolation électronique, elles doivent aussi être mécaniquement tenues à l'aide d'un liant, enfin la charge en matériaux actifs et l'épaisseur de l'enduction doivent être régulières pour éviter des dégradations rapides à cause d'inhomogénéités locales (49). Seule une bonne maîtrise de la fabrication permet de remplir ces conditions. Une description de chacune des étapes de la fabrication des électrodes est proposée en annexe de ce mémoire (*cf.* Annexes 1.1.1).

2.2 Fabrication des cellules et autres étapes

La fabrication des cellules est susceptible de varier fortement en fonction du fabricant. De manière générale, les étapes de fabrication sont les suivantes : l'assemblage du faisceau d'électrode, la soudure des clinquants sur le faisceau, l'insertion dans le boîtier (rigide ou souple), les soudures du boîtier, et enfin la formation et les tests de la cellule. Une fois terminées, les cellules sont assemblées en modules, puis ces modules sont assemblés en pack.

Une description de cette fabrication étape par étape est proposée en annexe (cf. Annexes 1.1.2). Les variantes envisageables pour les étapes susceptibles de différer suivant les fabricants ou le format de cellule y sont présentées. Une description sommaire des autres étapes de la fabrication des batteries lithium-ion est aussi proposée en annexe (cf. Annexes 1.1.3).

3 Coût de fabrication : état de l'art

3.1 Investissement et main d'œuvre

La publication détaillant le plus précisément le procédé de fabrication des batteries est celle de Nelson *et al.* en 2011, actualisée en 2013 (35,46). Ce document décrit à la fois un procédé de référence, sur un cas particulier, et est accompagné d'un logiciel permettant de transposer cette usine pour calculer le coût de fabrication d'une autre batterie (47). Le calcul est détaillé au niveau de chaque étape de fabrication de la Figure 17.

Tableau 8 : Fonctionnement de l'usine de référence de BatPac (35,46)

	Facteur de dimensionnement R_0		MOD / équipe	Investissement \$ Millions	Surface au sol m^2
Mélangeage électrode +	1 710	T matériau actif	2	2	600
Mélangeage électrode -	1 100	T matériau actif	2	2	600
Enduction électrode +	8 210 000	m^2 surface enduite	4	8	750
Enduction électrode -	8 210 000	m^2 surface enduite	4	8	750
Evaporation solvant	2 310	T NMP	2	3	225
Calandrage/Refente	8 210 000	m^2 surface enduite	7	3	750
Etuve	8 210 000	m^2 surface enduite	2	1,6	300
Empilement/soudure	6 320 000	Total cellules	10	8	1200
Emballage/remplissage	6 320 000	Total cellules	8	8	1 500
Formation/finalisation	6 320 000	Total cellules	10	32	2 650
Autre (module, pack,...)			39	50,9	6 100
Total			90	127	15 425

Trois éléments sont déterminés pour modéliser le coût : le nombre de personnes postées, le coût des machines et la surface occupée au sol. En plus de ces trois éléments, un facteur

inducteur de dimensionnement (R_0) de chaque étape est donné. Il sert à faire la transposition des coûts de l'étape à un autre cas de figure (production d'une batterie différente et volumes différents). Ces données sont récapitulées dans le Tableau 8.

Pour faire le calcul total du coût de fabrication, la somme des frais de production est effectuée. Ces frais sont l'amortissement des équipements et des bâtiments, la rémunération du personnel, et les frais généraux variables. Leur calcul avec les hypothèses prises par les auteurs est présenté dans le Tableau 9. Les Frais Généraux Variables (FGV) sont calculés à l'aide de ratios sur la main d'œuvre et l'amortissement identiques pour toutes les étapes, méthode qui semble peu précise.

Tableau 9 : Décomposition du coût de fabrication dans BatPac (35,46)

Coûts	Méthode de calcul
Equipement (<i>machine + installation</i>)	Estimations des coûts pour chaque étape de la fabrication. Amortissement en 6 ans.
Surface au sol (<i>y compris allées et stockage</i>)	Estimations des coûts pour chaque étape, $1\text{m}^2 = 3\,000\text{\$}$, Amortissement en 20 ans.
Main d'œuvre directe	Estimations des coûts pour chaque étape de la fabrication. (1 heure de MOD = 18\$ aux Etats-Unis)
Frais généraux variables (<i>Coûts indirects, outillage, maintenance, fluides et énergie</i>)	40% de coût de la main d'œuvre et 20% du coût de l'amortissement

L'origine des données de base de ce modèle n'est pas explicite, ce qui rend difficile l'évaluation de leur qualité. Comme pour les matières, Nelson *et al.* expliquent qu'il s'agit de discussions avec des acteurs du marché sans que ceux-ci soient cités pour des raisons évidentes de confidentialité. Mais les données ont fait l'objet de relecture par des experts et le laboratoire Argonne a une expertise reconnue dans le domaine des batteries lithium-ion.

Un seul format de cellule est pris en compte, le format en enveloppe souple. Nelson *et al.* précisent toutefois, en se basant sur des travaux plus anciens, que les variations entre différents formats n'influent pas beaucoup sur le coût final. C'est selon eux la quantité de matière d'électrode utilisée, le nombre de couches, la capacité surfacique et la surface d'électrode par cellule qui sont les facteurs clés de coût.

Le traitement des rebuts ne semble pas être traité de façon optimum. En effet le coût de ces rebuts est calculé de deux façons. Le coût de la matière supplémentaire à acheter, et le surcoût de fabrication. Or ce dernier coût n'intervient pas dans les calculs de coût des étapes de fabrication. Il n'est ainsi pas possible de voir l'impact d'une amélioration sur ces rebuts. Il

s'agit d'un point qui pourrait être amélioré, ce qui permettrait d'estimer les enjeux de la diminution de ces rebuts (cf. Annexes 1.1.3.3). La méthode et les résultats du calcul total du coût selon Nelson *et al.* seront étudiés dans le paragraphe 4 de ce chapitre.

Il existe d'autres publications sur le procédé de transformation des batteries, mais l'information y est nettement moins détaillée que dans les travaux de Nelson *et al.* Ainsi Anderson propose la répartition des coûts de fabrication pour les batteries lithium-ion de la Figure 20 (50).

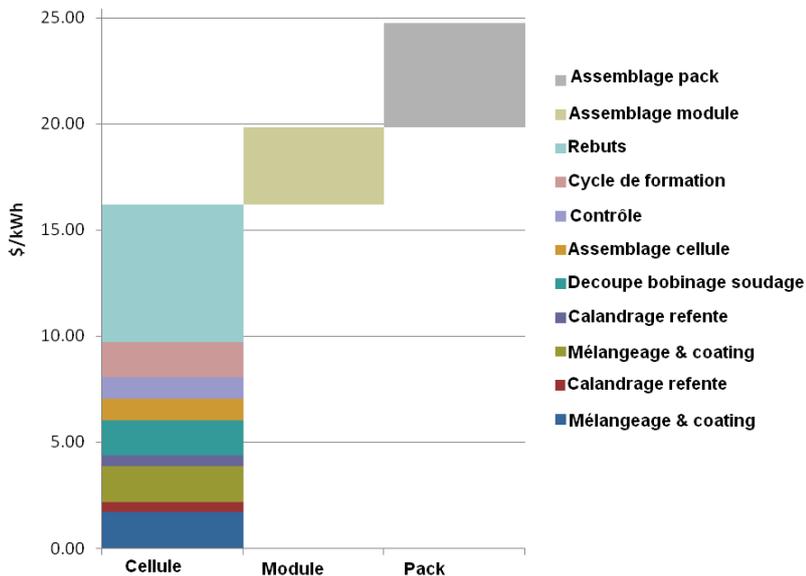


Figure 20 : Répartition des coûts de fabrication selon Anderson (50)

TIAX a proposé en 2013 la répartition des coûts de fabrication en fonction de plusieurs conceptions de cellule de la Figure 21 (37). Selon cette publication, le coût de fabrication va de 52 \$.kWh⁻¹ à 68 \$.kWh⁻¹ pour une même cellule en fonction des choix de conception.

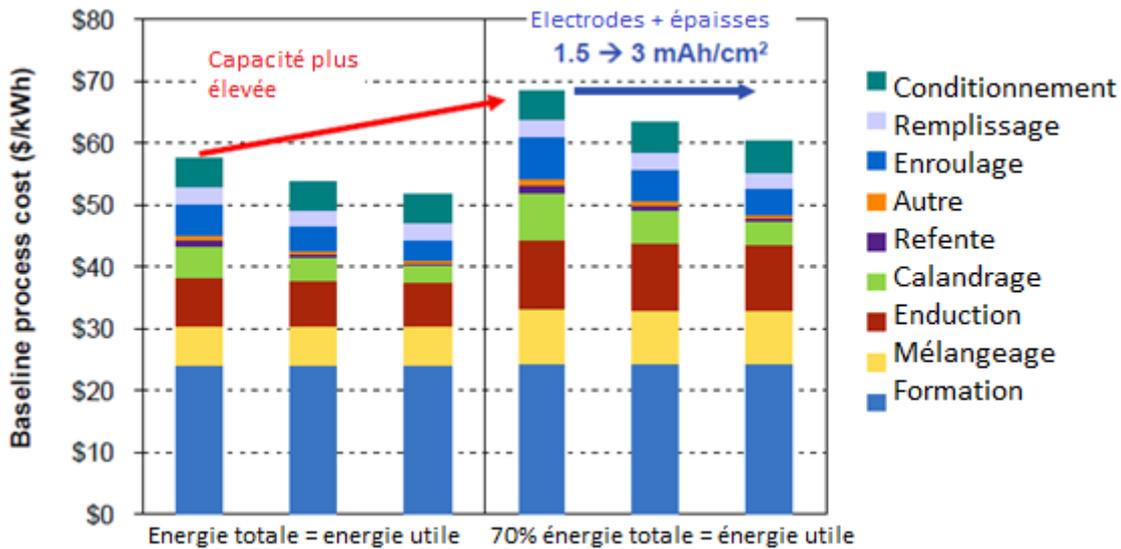


Figure 21 : Répartition des coûts de fabrication de la batterie selon Rempel *et al.* (37)

Seules quelques publications donnent une visibilité sur le procédé de fabrication des batteries lithium-ion. Celle de Nelson *et al.* est la seule à proposer une vue détaillée étape par étape des hypothèses sous-jacentes.

Toutefois, plusieurs points de cette publication ressortent comme problématiques. Tout d'abord, comme c'est le cas pour les données de coût des matières, l'origine des données utilisées n'est pas claire, et il y a un besoin de vérifier la fiabilité de celles-ci. Ensuite les rebuts de fabrication à chaque étape ne sont pas pris en compte dans le calcul du coût du procédé. Dès lors il n'est pas possible de tester des améliorations sur ces points du procédé. Enfin les « frais généraux variables » (Coûts indirects, outillage, maintenance, fluides et énergie) sont calculés à partir de ratio, sans lien avec les consommations réelles, ce qui est peu satisfaisant. Ainsi, si la littérature peut être utile pour une première réflexion, il apparaît aussi des manques.

3.2 Consommations d'énergie

La consommation d'énergie représente une part non négligeable du coût de fabrication. Plusieurs publications se sont intéressées à la consommation d'énergie du procédé de fabrication des batteries lithium-ion. Ces informations sont utiles pour l'estimation du coût de l'énergie, et ont été reportées en annexes (*cf.* Annexes 1.2). Elles montrent que dans le domaine de l'analyse de cycle de vie, les consommations d'énergie sont au cœur du débat, mais aucun consensus n'a été trouvé par les experts sur la consommation réelle. Selon Dunn, l'origine de la discordance proviendrait en grande partie du taux d'utilisation usine des

différentes études. Cette consommation a des conséquences majeures sur le bilan environnemental des batteries (41,51).

4 Coût total des cellules lithium-ion

La littérature s'intéressant au prix des batteries est relativement importante, et avec des résultats très variables. Les valeurs récentes relevées dans les publications vont être comparées dans ce chapitre, afin de monter la situation actuelle des recherches sur ce sujet et la vision du niveau actuel de coût.

4.1 De la difficulté de comparer les coûts

Avant de faire un état de l'art de la littérature, il est important de rappeler les challenges que cette tâche soulève. Fournir un coût pour des batteries nécessite en effet de prendre des précautions, pour bien comparer ce qui est comparable. Derrière le vocable batterie lithium-ion se cache en effet une large palette de systèmes, comme cela a été montré dans les paragraphes précédents : des batteries de puissance ou d'énergie, des chimies variées, des formats, conceptions et assemblages divers. Le coût de revient de fabrication est donc une donnée importante, mais qui n'est pas suffisante face à cette hétérogénéité.

Un indicateur répandu est d'étudier le prix rapporté au kWh. Cet indicateur nécessite de bien définir le périmètre du kWh (avec ou sans système de refroidissement, énergie utilisable ou totale, conditions de mesure...). Il n'est pertinent que dans le cas d'une batterie d'énergie. Pour une batterie de puissance, on peut choisir un autre indicateur, comme par exemple de rapporter le coût à la puissance, en utilisant là encore un périmètre bien défini (définition des conditions d'évaluation, niveau cellule ou batterie)

Ces indicateurs laissent de côté des caractéristiques importantes d'une cellule, jouant un rôle dans le prix global de celle-ci ; la durée de vie, le recyclage, la prestation offerte. Pour tenir compte de la durée de vie, on peut distinguer deux cas, celui des batteries d'énergie et celui des batteries de puissance. Un indicateur pertinent pour une prise en compte de la durée de vie d'une batterie d'énergie est le coût au MWh débité sur toute la vie de la batterie. Pour une batterie de puissance, un indicateur pertinent serait la puissance disponible (selon une définition précise de la puissance) en fin de vie de la batterie (par exemple 10 ans).

Il faut ajouter le coût de recyclage, qui dépend de la chimie de la batterie et des volumes à recycler. Ce travail est rendu difficile par le peu de visibilité actuel, étant donné que le marché

est très récent, et donc que le recyclage des batteries automobile à grande échelle interviendra dans plusieurs années. On peut aussi évoquer la question de la logistique qui peut avoir un rôle non négligeable. Lorsqu'un prix est indiqué, il est donc important de fournir le maximum d'informations, pour pouvoir faire des comparaisons prenant en compte tous ces paramètres.

4.2 Littérature

Dans ce paragraphe, une bibliographie sur le coût des batteries lithium-ion est menée dans un ordre chronologique. Une sélection des travaux les plus pertinents a été effectuée, et les publications dont la fiabilité était clairement médiocre ont été écartées. Seules les informations issues de publications récentes (depuis 2012) sont reprises ici. Des informations plus anciennes sont reprises en complément en annexes (*cf.* Annexes 1.3). Les coûts sont donnés dans la monnaie utilisée dans la publication.

English et Strong (52) ont proposé en 2012 une approche dans l'esprit de celle de Brooker (53), basée sur une formule simple, décomposant le coût en une partie fixe à la cellule et une partie dépendant de la capacité. Ils proposent ainsi des cellules pour PHEV ayant un coût entre 800 et 950 \$.kWh⁻¹. Ils présentent le NMC comme le matériau le plus adapté pour les applications PHEV.

En 2012, dans une interview pour le site EV Update, Wolfgang Bernhart du cabinet Roland Berger (43), évoque des coûts de l'ordre de 250 \$.kWh⁻¹ pour une batterie lithium-ion de PHEV en 2015. Le cabinet d'analyse anglais Element Energy a publié un rapport sur le coût des batteries lithium-ion (54). Selon les conclusions de cette étude, le prix des batteries lithium-ion était de 725 \$.kWh⁻¹ en 2011, et devrait être de 320 \$.kWh⁻¹ en 2020 pour des applications BEV. Ces coûts sont de respectivement 1330 et 525 \$.kWh⁻¹ pour des applications PHEV.

Nelson *et al.* ont détaillé les coûts des matières et de la production d'une batterie lithium-ion de référence et mis au point un modèle permettant de calculer le coût de différentes batteries à partir de celle-ci (46,47). Ces indications sur les matières et la fabrication ont été reprises dans les paragraphes précédents. A partir de celles-ci, le coût global de la batterie est calculé en ajoutant une partie de frais indirects, indexée sur les achats et sur la fabrication. Ces frais correspondent au financement d'activités transversales (R&D, service achats/ventes, administration, fond de roulement, taxes, impôts, marge et garantie), et sont décrits dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Décomposition du coût de fabrication de BatPac (46)

Coûts	Description	Méthode de calcul
R&D	Recherche pour améliorer les produits et rester au niveau de la concurrence	40% de l'amortissement
GSA (Généraux, ventes, achats)	Bureaux, Impôts, Coût des ventes, Assurances	25% (MOD + FGV + Amortissement)
Coût de lancement	Lancement de l'usine, Formation du personnel, Produit non conforme	5% Coût matière + 10 % MOD + 10% FGV
Fond de roulement	Liquidité pour payer les salaires, les créances et les stocks.	15% (Coût matière + MOD + FGV)
Profit	Retour sur le capital investi	5% du montant total investi
Garantie	Fond pour rembourser les clients victimes de pannes.	5,6% ajouté au prix avec les profits

Le prix obtenu par l'addition de la part matière, fabrication et frais généraux pour la batterie de référence de Nelson *et al.* est de 386 \$.kWh⁻¹. Ce prix comprend un BMS ainsi qu'un système de refroidissement. Sans ces deux composants, le coût est de 299 \$.kWh⁻¹. Il s'agit d'une batterie de 8,7 kWh de type PHEV, avec une chimie NCA // Graphite (100 000 packs par an). La décomposition des coûts est montrée sur la Figure 22. Celle-ci n'est faite qu'au niveau de la batterie, le détail pour les cellules n'étant pas directement accessible.

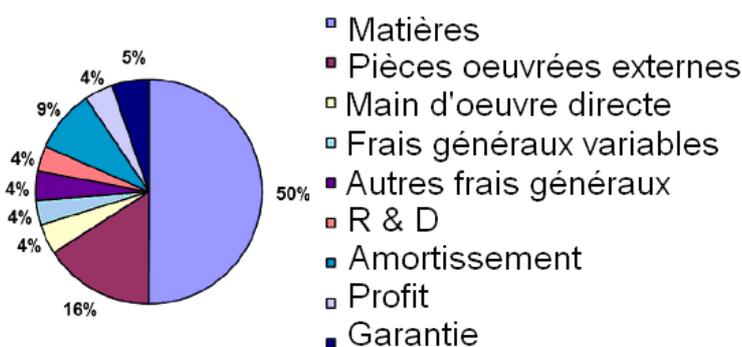


Figure 22 : Répartition des coûts de la batterie référence selon Nelson *et al.* (46)

La partie garantie représente une part importante du coût (5,6% du coût du pack). Cette hypothèse mérite d'être étudiée, pour en vérifier la pertinence, et les potentiels d'amélioration sur ce point. Enfin, on peut signaler la prise en compte des incertitudes dans le résultat final. La méthode utilisée est d'affecter un intervalle automatique de plus ou moins 10% sur la modélisation de coût, avec 95% de confiance.

L'organisme américain TIAX travaille depuis plusieurs années sur le coût des batteries lithium-ion. Il propose un aperçu de ses travaux lors d'une présentation annuelle au département de l'énergie américain (55,44,37). Nous nous référons ici aux travaux les plus récents de cet organisme.

Ainsi sur la Figure 23 reprise de la présentation 2013 (37), des plages de coûts en $\$/kWh^{-1}$ sont données pour le système complet, en fonction de trois paramètres : le composé de l'électrode positive, la capacité surfacique des électrodes et le surdimensionnement pratiqué (pour augmenter la durée de vie, 30% d'énergie initiale en plus). La batterie sur laquelle ce travail a été effectué est une batterie pour PHEV, de 5,5 kWh d'énergie utile en fin de vie.

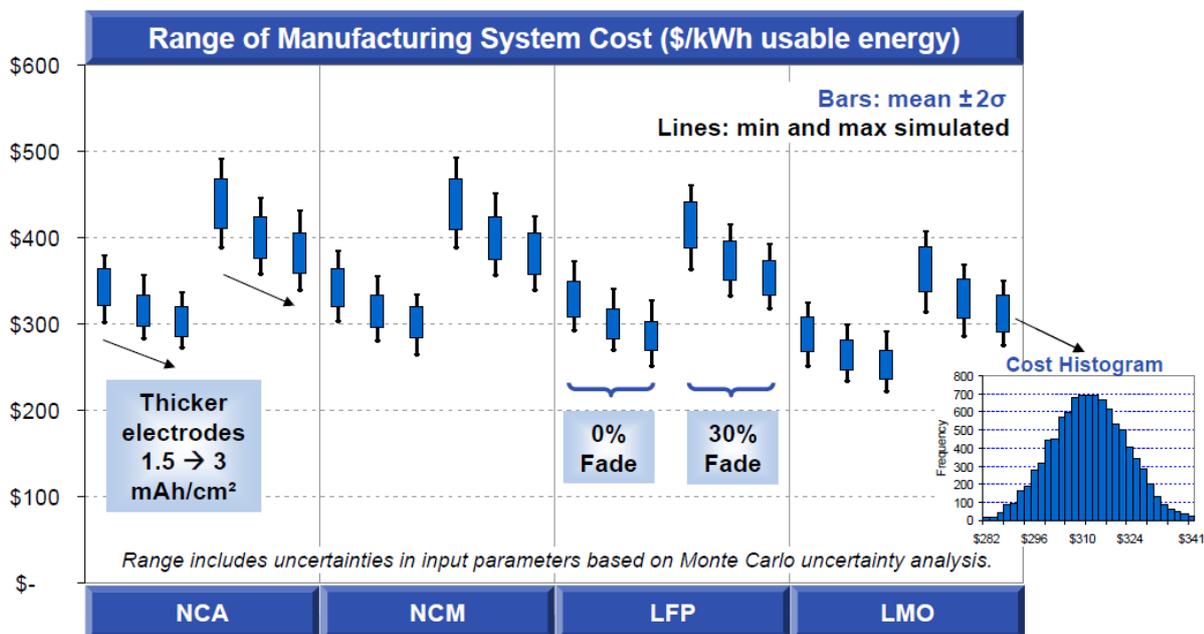


Figure 23 : Prix aux kWh en fonction de trois paramètres selon Rempel *et al.* (37)

TIAX fait donc ressortir l'importance de la conception des électrodes sur le coût, et le rôle clé des matériaux de l'électrode positive sur le coût. In fine les coûts obtenus pour cette étude sur des batteries pour PHEV sont compris entre 220 et 490 $\$/kWh^{-1}$ (utile) selon la Figure 23, en fonction des choix de dimensionnement. Sur ce coût, 80% viennent des achats et les 20% restants sont sur la fabrication. Ce coût inclut les frais directs et indirects de production, mais ne tient pas compte des frais généraux (R&D, achats, G&A, garantie et taxe). Le détail de la construction des coûts et de l'analyse d'incertitude n'est pas donné, mais est basé sur une méthode de Monte-Carlo.

Dans une présentation de ces travaux devant le département de l'énergie américain, Gallagher a montré une cartographie de la performance et du coût à l'aide de l'outil BatPac, auquel il a contribué (40). Il cartographie le coût et la performance du système en fonction des caractéristiques de l'électrode positive ou négative (capacité volumique et tension). L'exemple pour un système de 40 kWh est montré sur la Figure 24, avec des hypothèses de coût matériaux à 30 $\$/kg^{-1}$ et 20 $\$/kg^{-1}$, respectivement pour l'électrode positive et négative, et une épaisseur d'enduction de d'électrode (après calandrage) limitée à 100 μm .

Selon ces travaux l'auteur estime le coût d'un système NMC 333 et graphite silicium à environ $205 \text{ \$.kWh}^{-1}$ (énergie totale). Pour un système Lithium-Manganèse riche, il estime que la cible se situe à $185 \text{ \$.kWh}^{-1}$, mais ce prix est susceptible de varier fortement en fonction de la composition finale du matériau, pour lequel il existe de nombreuses possibilités.

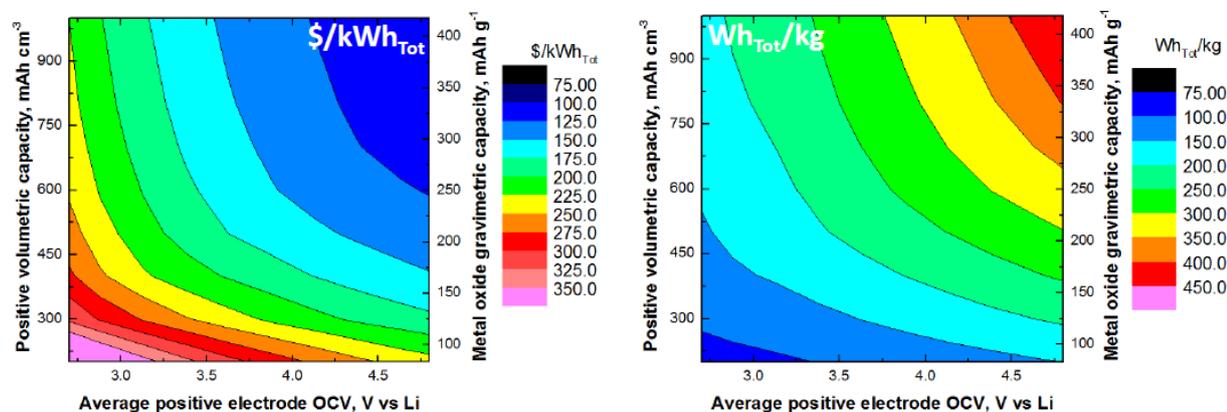


Figure 24 : Cartographie de coût et de performance en fonction de paramètres d'électrode selon Gallagher (40)

Mayer *et al.* ont proposé en 2012 une étude de coût à l'aide de courbe d'apprentissage à deux facteurs : les brevets publiés et les volumes de fabrication mondiale. Ils estiment ainsi le coût des batteries lithium-ion en 2020 à 300 €.kWh^{-1} pour des applications haute énergie. Ils proposent un coût de 32 €.kW^{-1} pour des applications de puissance (56).

Dans une interview pour le magazine ATZelextronik, Christoph Theis et Markus Hackmann (10) analystes de P3 group, suggèrent que les coûts des batteries lithium-ion au moment de l'article (juin 2014) étaient de 250 €.kWh^{-1} et qu'ils seront de 160 €.kWh^{-1} en 2018, pour des cellules lithium-ion en boîtier rigide. Ces coûts correspondent respectivement à des densités d'énergie de 135 à environ 190 Wh.kg^{-1} . Pour des cellules en enveloppes souples, ils estiment les prix actuels à 240 €.kWh^{-1} et 140 en 2018, correspondant à des densités de respectivement 160 et 225 Wh.kg^{-1} . Selon eux, les cellules sont actuellement basées sur du NMC 333, et vont évoluer vers des NMC à plus forte teneur en nickel (d'abord 532 puis 622).

En 2014, Anderman a cité une source anonyme estimant le coût d'une cellule cylindrique Panasonic 18650 de 3,1 Ah, celle utilisée par Tesla pour la Model S, inférieur à $160 \text{ \$.kWh}^{-1}$ (24). Pour une cellule 18650 utilisant du NMC 622, avec un volume annuel de 3,6 GWh par an, Anderman prévoit un coût de $184 \text{ \$.kWh}^{-1}$ en 2015, dont 67% d'achats. Il prévoit un coût de pack de 250 à $275 \text{ \$.kWh}^{-1}$. Si des cellules de format pouch sont utilisées, le coût cellule serait de $213 \text{ \$.kWh}^{-1}$, mais aussi de 250 à $275 \text{ \$.kWh}^{-1}$ au niveau du pack (57).

Takeshita a lui évoqué un coût de 3\$ pour une cellule 18650 NCA de 3,4 Ah, dont environ 50% d'achat et 25% de frais directs de fabrication (MOD, amortissements et frais de fonctionnement). Ceci représente un coût cellule d'environ 240 \$.kWh⁻¹ (58).

De nombreuses publications se sont donc intéressées au coût global des batteries. Ainsi on peut trouver de nombreux ordres de grandeurs de coûts ramenés au kilowattheure, mais qui sont souvent différents entre chaque publication. Ils sont rarement basés sur une construction analytique, mais plutôt sur des hypothèses macroscopiques d'évolution de marché. De plus bien souvent ces coûts sont donnés avec une définition du périmètre manquant de précision. Le Tableau 11 offre un récapitulatif des données récentes.

Tableau 11 : Récapitulatif des données de coût de la littérature (depuis 2012)

Source	Contexte	Cellule (\$.kWh ⁻¹)	Pack (\$.kWh ⁻¹)
Cluzel, 2012 (54)	2020, BEV		320
Mayer, 2012 (56)	2020, (conv. 1,35)		405
Bernhart, 2012 (43)	2015, PHEV		250
Nelson, 2011 (35)	NCA/Gr, 2020, 100 000/an		386 (avec BMS et HVAC), 299 (sans)
Rempel, 2013 (37)			Circa 300 \$.kWh ⁻¹
Gallagher, 2013 (40)	2020		205 (NMC/GrSi) 185 (Li-riche/Gr)
Theis, 2014 (10)	2018, NMC, (conv. 1,35)	Prismatique=216, Pouch=189	
Anderman, 2014 (24)	2014, 18650	< 160	
Anderman, 2014 (57)	2015, 3,6 GWh.an ⁻¹	18650 : 184 Pouch : 213	18650 & pouch : 250 à 275
Takeshita, 2014 (58)	2014, 18650	240	

Dans un espace de temps pourtant restreint à quelques années dans cet état de l'art, il apparait que les informations de la littérature sont très disparates. Si les sources se basent sur des méthodes d'estimation différentes (calcul analytique, courbe d'apprentissage, formule empirique, discussions avec des acteurs du marché), il est tout de même surprenant d'avoir des écarts aussi importants. Et le modèle de Nelson *et al.* qui est le plus détaillé, semble fournir des indications de coûts un peu au-dessus du marché. Le besoin de clarifier les choses, pour comprendre où se situe réellement les coûts techniques, et ce en démêlant les effets des différents inducteurs de coût, ressort donc clairement.

4.3 Effets volume

Les volumes de production affectent le coût d'une batterie. En effet plus la production de batteries est importante, plus des mutualisations au sein d'une usine peuvent être réalisées, et donc l'amortissement des moyens à la pièce être diminué. Un état de l'art sur les effets volume est proposé en annexes (cf. Annexes 1.2). Il apparaît que les effets de volume représentent un levier de baisse des coûts important, mais difficile à estimer. Là encore BatPac par Nelson *et al.* se distingue des autres par son approche claire et détaillée (46). Toutefois, si la méthode utilisée est utile en première approche, elle ne repose pas sur des éléments tangibles, mais une loi de calcul approximative. De plus, l'hypothèse de standardisation du produit peut être remise en question. Il semblerait plus adapté de prendre l'hypothèse d'une usine pouvant produire différents formats de cellule.

5 Conclusion

Les coûts des batteries lithium sont complexes à calculer. Il existe en effet de nombreuses variations : types de batteries, procédés de fabrication, prix d'achat des matières, effets de volume, variations des monnaies, logistique, etc. La publication de Nelson et al (35,47) est celle que nous avons identifiée comme offrant la vision la plus détaillée de ces coûts. De nombreuses autres se sont intéressées à cette question, avec un degré de détail plus faible. Ainsi on peut trouver de nombreux ordres de grandeurs de coûts ramenés au kilowattheure, mais il ressort une disparité importante dans les chiffres annoncés pour un contexte proche. Si une évolution des prix fortement à la baisse semble se dégager, plusieurs manques ressortent : fiabilité des données, méthode de prise en compte de certaines données (rebuts, consommation d'électricité), logique de fonctionnement des usines, prise en compte des frais indirects. Le but de ce travail de recherche sera d'essayer d'apporter à la communauté scientifique des réponses à ces manques.

Problématique et hypothèses de recherche

Le contexte et les enjeux de ce travail ont été décrits, et un état de l'art de la recherche a été dressé. Celui-ci nous permet de cerner les limites de la littérature, et la problématique de recherche va être soulevée à partir des besoins qui sont apparus. Puis des hypothèses de recherche vont être proposées pour guider le travail.

1 Problématique

Des manques dans la littérature et des voies de travail à approfondir ressortent de l'état de l'art. En effet, si plusieurs publications s'intéressent aux aspects technico-économiques des batteries lithium-ion, l'état de l'art fait ressortir des réserves sur la fiabilité des données utilisées. Il est aussi difficile de comprendre à partir de ces publications, quels sont les inducteurs de coût, et leur impact sur le coût final. D'où la problématique suivante :

Comment peut-on optimiser d'un point de vue coût les batteries lithium-ion ? (Figure 25)

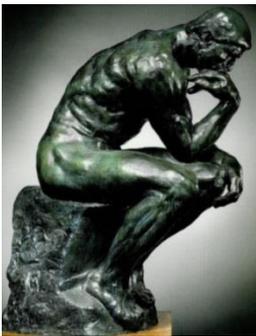


Figure 25 : Le penseur, Rodin

2 Hypothèse de recherche

La problématique porte donc sur l'optimisation des batteries lithium-ion. Pour aider les chercheurs à trouver de meilleures solutions pour ces systèmes, des outils permettant une compréhension économique précise des batteries sont indispensables. La littérature manque

de modèles adéquats, en raison des difficultés que pose leur développement. Notre hypothèse principale de recherche est :

Hypothèse principale : Il est possible de concevoir un modèle de coût des batteries lithium-ion, associé aux bases de données adéquates, qui permette de combler les manques de la littérature.

Nous supposons donc qu'il est possible de dépasser les manques de la littérature sur la modélisation de coût des batteries. Il serait aussi intéressant de mesurer la fiabilité des résultats, malgré le nombre de données élevées, la difficulté d'évaluer les incertitudes et le risque d'obtenir des résultats non exploitables :

Sous-hypothèse : L'analyse des incertitudes de la modélisation de coût est réalisable.

A partir d'un modèle et de référentiels associés, nous pourrions évaluer des pistes de progrès, pour répondre à la problématique de recherche. L'état de l'art fait ressortir d'importants travaux sur les matériaux, mais relativement peu de travaux sur l'amélioration de la conception des batteries :

Sous-hypothèse : Les modèles peuvent permettre de détecter et de quantifier des voies d'amélioration de la conception actuelle des batteries lithium-ion.

Les matériaux actifs constituent une grande partie du coût des batteries lithium-ion actuelles, mais la littérature fait ressortir d'importantes disparités sur les différentes évaluations de leurs coûts. Aucun modèle n'est proposé dans la littérature.

Sous-hypothèse : Il est possible de modéliser le coût des matériaux actifs et d'évaluer leur influence sur la cellule complète.

L'étude de ces hypothèses sera un fil conducteur pour répondre à la problématique. La construction des modèles de coût sera présentée dans un premier temps (Chapitre IV), puis ces modèles seront utilisés pour l'étude de la performance économique des différentes chimies et conceptions de cellules (Chapitre V). Ensuite la construction de référentiels sur les achats et la fabrication sera présentée (Chapitre VI). Une méthode d'analyse de l'incertitude basée sur des méthodes de Monte Carlo sera détaillée par la suite (Chapitre VII). Enfin un modèle de coût des matériaux actifs sera proposé, et appliqué à l'étude de plusieurs nouvelles chimies lithium-ion prometteuses (Chapitre VIII).

Chapitre IV. Développement de modèles de coût

Dans ce chapitre, une définition du coût utilisé dans ce travail est d'abord donnée. Ensuite, le fonctionnement du modèle de coût amont est décrit. Enfin, le principe du modèle de coût analytique est présenté.

1 Introduction

La problématique de cette thèse est de détecter des voies d'optimisation du coût des batteries lithium-ion, et nous avons formulé l'hypothèse que pour répondre à cette problématique, il est nécessaire de développer les modèles de coût adaptés. Nous allons dans ce chapitre décrire la construction de ces modèles et les réponses apportées pour contourner les difficultés qu'implique cette construction. Ce travail sera focalisé sur les cellules, qui sont le cœur des batteries lithium-ion.

La modélisation de coût consiste à calculer les différents postes de coût (achats, procédé de fabrication, frais généraux et autres frais) en fonction d'une méthode définie par le modèle, et à l'aide de données économiques. Ces données proviennent de référentiels, qui ont été mis au point dans cette thèse et qui seront étudiés dans le Chapitre VI. Deux modèles de coût des cellules avec des niveaux de complexité et des attendus différents, ont été développés dans le cadre de cette thèse. Le périmètre de ces modèles va de la fabrication des électrodes à partir des matériaux actifs déjà synthétisés, jusqu'à la cellule prête à l'emploi.

Le premier modèle, nommé « OCA » pour Outil de Chiffrage Amont, permet de faire une première étude amont du coût d'une cellule. Il a l'avantage d'être rapide d'utilisation, et de fournir des résultats fiables, dont la qualité a été vérifiée sur plusieurs cas concrets. Mais il ne permet pas de faire ressortir des synthèses de coût détaillées au niveau de chacune des étapes de fabrication, ni de tester l'impact de paramètres de second plan. Le second modèle développé est nommé « MAC » pour Modèle Analytique de Coût. Il permet de faire ressortir des synthèses détaillées à chaque étape de fabrication, et aussi de tester l'influence d'un grand nombre de paramètres. Il est par contre plus long d'utilisation. Dans ce chapitre, une

définition du terme coût utilisé dans ce mémoire sera d'abord effectuée. Ensuite, le fonctionnement du modèle de coût amont OCA sera décrit. Enfin, le principe du modèle analytique MAC sera présenté.

2 Définition du coût

Le terme « coût » pouvant recouvrir des périmètres différents, une définition claire du périmètre retenu dans cette étude est indispensable pour éviter les confusions. La définition qui est retenue est une définition répandue dans l'industrie automobile, étant appliquée par plusieurs constructeurs et leurs fournisseurs.

2.1 Coût total

Pour définir le coût total, une décomposition du coût en éléments aux caractéristiques proches est retenue (cf. Tableau 12), et va être détaillée dans ce paragraphe.

Tableau 12 : Définition du coût total

Coût total		
Coût de production	Coûts directs	<i>Matières, MOD, amortissement, frais de fonctionnement</i>
	Coûts indirects	<i>Frais d'achat et frais généraux</i>
Paiement des capitaux investis	Dette financière	<i>Sur les achats et sur la fabrication</i>
	Capitaux propres	<i>Sur les achats et sur la fabrication</i>
Garantie	Provision	

2.1.1 Coûts directs

Les coûts directs sont des coûts directement imputables à la fabrication d'un produit donné.

2.1.1.1 Achats

Le terme achats regroupe les achats des matières et des pièces sous traitées à des fournisseurs de rang 2. Pour calculer la part représentée par ces achats, les données nécessaires sont : le coût de la matière, la quantité brute de matière nécessaire pour fabriquer la pièce, et la part de logistique pour transporter la matière de l'usine du fournisseur de rang 2 jusqu'à l'usine du fabricant de cellules.

2.1.1.2 Fabrication

Les coûts directs de fabrication sont : la rémunération des opérateurs de la ligne (Main d'œuvre Directe, MOD), l'amortissement des machines de production, et les frais de

fonctionnement et d'entretien (fluides et énergie, maintenance, outillage). Ils peuvent être directement affectés au produit, à l'aide des hypothèses idoines sur les durées d'amortissement et le nombre de pièces fabriquées par an. Les frais d'infrastructures sont aussi considérés dans les frais directs. Ils englobent des coûts comme les terrains, les assurances ou le nettoyage.

2.1.2 Coûts indirects

Les coûts indirects sont des coûts non directement imputables à la fabrication d'un produit donné. Certains moyens sur lesquels reposent ces frais peuvent être partagés entre plusieurs produits d'un fournisseur.

2.1.2.1 *Frais d'achats*

Les coûts indirects liés aux achats correspondent aux montants alloués pour couvrir les coûts des services achat, approvisionnement, contrôle réception et qualité des approvisionnements. Ils ne comprennent pas les frais de logistique.

2.1.2.2 *Frais généraux*

Ces frais se répartissent en cinq catégories : frais de structure usine atelier, frais de structure usine centrale, frais commerciaux, frais de siège et frais de R&D générique. Les frais de structure atelier incluent le personnel, hors MOD, affecté à la fabrication et à la manutention dans l'atelier, alors que les frais de structure usine centrale correspondent aux frais de l'usine qui ne sont pas directement liés à la production. Ces frais dépendent de plusieurs données telles que la localisation, le contexte économique ou encore le secteur d'activité lié à l'opération de transformation.

2.1.3 Paiement des capitaux investis

Les capitaux investis dans la société proviennent des capitaux propres, apportés par les actionnaires, et des prêts consentis à l'entreprise moyennant un intérêt (dette financière).

2.1.4 Garantie

Les fabricants offrent une garantie sur les cellules de batteries lithium-ion. Afin de couvrir les éventuels frais de remplacement des cellules défectueuses, une somme est provisionnée sur le coût de la cellule. Celle-ci est calculée comme un pourcentage du coût total.

2.2 Logistique

Le coût d'un objet peut être donné avec différentes hypothèses de logistique. Le prix en sortie d'usine permet de comparer la performance des usines dans les mêmes hypothèses. Mais la logistique, ainsi que les risques qu'elle engendre et les taxes douanières doivent être pris en compte pour déterminer le coût réel. Afin de garder la possibilité de comparer plusieurs scénarios industriels, nous n'incluons pas de logistique dans les coûts de cette étude.

2.3 Tickets d'entrée

Les tickets d'entrée sont séparés en deux catégories : le ticket d'entrée fournisseur et le ticket d'entrée industriel. Le premier correspond aux dépenses du fournisseur pour développer et valider un produit spécifique au client. Le second correspond aux dépenses du client pour les mêmes raisons. Ces tickets d'entrée ne sont pas pris en compte dans le calcul du coût total dans cette étude. Ils sont considérés comme payés comptant par l'acheteur, et pris en compte au niveau du projet, lors du calcul de rentabilité. Ils sont en effet amortis en fonction du nombre de pièces total sur un projet donné, qui est différent du nombre de pièces pour lesquelles les moyens de production sont amortis. Il est donc habituel de les prendre en compte dans le calcul de la rentabilité d'un projet, mais de ne pas les inclure directement dans le coût de la pièce.

Cette hypothèse peut toutefois présenter des risques de sous-estimation des gains liés à la standardisation, si ces tickets d'entrée ne sont pris en compte à aucun moment. En effet, en cas d'utilisation d'une pièce standard, les frais de développement sont faibles voire nuls, puisque déjà réalisés. C'est pourquoi il est important de souligner le fait que ces derniers ne sont pas pris en compte dans les coûts calculés dans ce travail.

2.4 Décomposition usuelle de la structure de coût

La décomposition du coût utilisée dans le Tableau 12 est une méthode de classification des coûts, séparant les coûts directs et indirects. Elle permet de définir les coûts en fonction de leur nature. Toutefois, il est fréquent dans l'industrie d'utiliser une méthode de classification du coût en trois postes : les achats, la fabrication et les frais généraux et autres frais. C'est cette méthode que nous allons retenir par la suite, car plus usuelle. Le poste achat contient le coût d'achat des matières, la logistique d'approvisionnement et les frais d'achats. Le poste fabrication contient les coûts directs de fabrication, ainsi que les frais généraux liés à la production : les frais de structure usine atelier, frais de structure usine centrale. Le poste frais

généraux et autres frais contient les frais généraux non directement liés à la production : frais commerciaux, frais de siège et frais de R&D générique. Il contient aussi le paiement des capitaux investis, la garantie et la logistique aval.

3 Modélisation des coûts amont : OCA

La principale difficulté de la modélisation des coûts des batteries est le nombre important de données qui entrent en jeu, lié au procédé de transformation relativement complexe et aux nombreuses variantes. La littérature montre que devant ces difficultés, il est difficile d'apporter des solutions simples et fiables. Si BatPac, le logiciel proposé par Nelson *et al.* (47), offre la meilleure réponse, il existe des limitations, comme nous avons pu le constater. Son utilisation est aussi complexe, et nécessite une bonne maîtrise des nombreuses hypothèses qui sont formulées.

Suite à notre état de l'art et à nos premières réflexions sur la problématique, deux voies complémentaires de modélisations de coût sont apparues. Le besoin de créer un modèle simple d'utilisation, mais avec des résultats robustes, pour répondre rapidement aux questions, et un second modèle plus détaillé, permettant de prendre en compte plus de paramètres et de faire ressortir des synthèses détaillées.

Le modèle nommé « outil de chiffrage amont » (OCA) répond au premier besoin. Il se base sur des observations de la structure de coût des cellules, des visites d'usines, des recoupements d'informations et des discussions avec des fournisseurs. Tout ce travail de réflexion a amené à la constatation du rôle clé de quatre paramètres de fabrication, qui ont été repérés comme les inducteurs de coût principaux : la composition de la cellule (nature et masse des matières et composants), la surface d'électrode par cellule, le nombre de couches et l'épaisseur de l'enduction sur le feuillard.

A partir de ce constat, nous avons perçu la possibilité de faire un modèle précis, mais simple d'utilisation, le modèle amont OCA, qui a fait l'objet d'une publication (59). Ce modèle a été développé pour des cellules en enveloppe souple et des électrodes empilées, avec des capacités de cellule comprises entre 10 et 80 Ah.

3.1 Achats de matières et composants

Pour la partie achat, le coût est calculé matière par matière en fonction des quantités nécessaires. Les coûts des matières sont extraits du référentiel sur les matières, qui sera

présenté dans le Chapitre VI. Les quantités de matière nécessaires correspondent au poids net de chaque matière par cellule, multiplié par le taux de rebut de fabrication de cette matière. Afin de simplifier la modélisation, un taux de rebut unique a été considéré pour toutes les matières dans l'OCA.

Des effets de volume sur les matières peuvent être pris en compte à l'aide du référentiel. Toutefois, notre vue sur ce point est qu'un fabricant de cellules mutualise ses achats de matières pour tous ses produits. Dès lors prendre en compte les prix correspondants aux volumes de matière pour un projet ne semble pas une bonne option. Il semble plus réaliste de choisir un coût correspondant aux volumes achetés par le fabricant pour l'ensemble de sa production (hypothèse de mutualisation de fabrications). Il est toutefois possible que le fabricant n'utilise cette matière que pour un produit ; il faut toujours adapter les hypothèses au cas par cas.

3.2 Fabrication

La partie fabrication comprend la main d'œuvre, l'amortissement des moyens de fabrication, les frais de fonctionnement et de maintenance, les frais indirects et les frais d'infrastructure. Ce coût de fabrication est calculé par transposition du coût de fabrication d'une cellule de référence à la cellule étudiée. La méthode de transposition est basée sur une hypothèse classique de modélisation du coût : un fournisseur de cellule fabrique des produits pour plusieurs clients. Le coût d'une cellule est donc calculé par une transposition depuis la cellule de référence en fonction du temps d'occupation de la ligne du fournisseur pour le produit étudié. Les paramètres utilisés pour réaliser la transposition ne sont pas les mêmes pour chaque étape. Le procédé de fabrication a été décomposé en trois parties ayant chacune des paramètres de transposition différents :

- la fabrication des électrodes dont la transposition dépend de la surface d'électrode par cellule et de l'épaisseur des électrodes

- le coût d'empilement de ces électrodes dont la transposition dépend du nombre de couches d'électrodes dans la cellule

- le coût de conditionnement de la cellule qui est constant à la cellule

Le coût de fabrication de la cellule référence a été construit à l'aide des données du référentiel de transformation et de l'usine de référence qui seront présentés dans le Chapitre VI. Ces deux outils étant mis à jour régulièrement avec des nouvelles données, les données

de l'OCA feront probablement l'objet de mises à jour à l'avenir. Les calculs effectués pour faire la transposition des données de la cellule de référence à l'aide des paramètres adaptés sont donnés dans l'Équation 2, l'Équation 3 et l'Équation 4.

Équation 2 : Coût de la fabrication des électrodes dans l'OCA

$$\text{Coût des électrodes} = Pro_{\text{electrodes}} * \left(\frac{e}{e_{\text{ref}}} \right)^{0.2} * S$$

Avec $Pro_{\text{electrodes}}$ le coût de fabrication d'un mètre carré d'électrode, correspondant au coût de fabrication des électrodes pour la cellule de référence, divisé par la surface des électrodes dans cette cellule ($\text{€} \cdot \text{m}^{-2}$), S la surface d'électrode par cellule (m^2), e l'épaisseur d'enduction de l'électrode (μm), et e_{ref} l'épaisseur d'enduction de l'électrode dans la cellule de référence ($70 \mu\text{m}$).

Équation 3 : Coût de l'empilement des électrodes dans l'OCA

$$\text{Coût d'empilement} = Pro_{\text{cell assy}} * N$$

Avec $Pro_{\text{cell assy}}$ le coût de fabrication pour une bi-cellule (une bi-cellule est un faisceau d'électrode composé de deux couches de cathode et deux couches d'anode) correspondant au coût de l'empilement pour la cellule de référence, divisé par le nombre de bi-cellules dans cette cellule de référence (€ par bi-cellule), et N le nombre de bi-cellules au sein de la cellule.

Équation 4 : Coût de conditionnement des cellules dans l'OCA

$$\text{Coût de conditionnement} = Pro_{\text{fixed}}$$

Avec Pro_{fixed} le coût de conditionnement d'une cellule (€ par cellule). On considère que ce coût est constant pour toutes les cellules. Cette hypothèse est valable si la cellule étudiée à une capacité du même ordre de grandeur que la cellule de référence (entre 10 et 80 Ah).

3.3 Frais généraux et autres frais

La partie « frais généraux et autres frais » comprend : les frais d'achats, de vente, d'administration, de R&D, de licences, de financement, ainsi que la marge et la garantie. Le calcul de ce poste de coût est donné dans l'Équation 5.

Équation 5 : Calcul des frais généraux et autres frais dans l'OCA

$$\text{Frais généraux et autres} = Oof * \text{Fabrication} + 5.6\% * (\text{Achats} + \text{Fabrication}(1 + Oof))$$

Le second terme de l'Équation 5 est lié à la garantie et aux assurances, dont on prend l'hypothèse qu'elles sont égales à 5.6% du coût total, dont 5% de garantie. Il s'agit sur ce

point d'un montant pratiqué par la plupart des fournisseurs de batteries, pour permettre de palier d'éventuelles défaillances anormales des batteries. Le même montant est utilisé pour BatPac (35,46). Le coefficient Oof est le montant des frais généraux et autres frais de la référence, en dehors des frais de garantie et d'assurance, divisé par le coût de la fabrication de celle-ci (sans dimension).

Avec la méthode de calcul de l'Équation 5, la partie « frais généraux et autres frais » est indexée de façon plus importante sur le prix de la fabrication que sur le prix des achats. Il est en effet considéré que seule la partie garantie et assurance dépend des achats et de la fabrication, alors que le reste des frais ne dépend que de la fabrication dans la modélisation utilisée.

3.4 Valeurs des coefficients

Le Tableau 13 fournit les valeurs utilisées pour l'OCA, qui ont été calculées à partir des données du référentiel (*cf. Chapitre VI*). Il s'agit ici des valeurs sélectionnées en septembre 2013. Il est important de préciser la date où ces données ont été adoptées, car celles-ci sont susceptibles d'évoluer dans le temps, avec l'apparition d'améliorations sur le procédé de fabrication des cellules.

Tableau 13 : Coefficients de calcul pour l'OCA

Taux de rebuts	1,09
Proelectrodes	1,93 \$.m ⁻²
Procell assy	0,05 \$.bi-cellule
Profixed	1,79 \$.cellule ⁻¹
Oof	66%

Le taux de rebuts retenu a une valeur élevée en comparaison d'autres industries, particulièrement dans le secteur automobile. Ceci est lié au manque de maturité industrielle de la filière, les premiers accumulateurs lithium-ion pour application automobile ayant été commercialisés en 2009 par JCS (Johnson Control Saft). Cette valeur a été sélectionnée en septembre 2013, et est amenée à diminuer dans les années à venir. La formule complète de calcul avec les coefficients du Tableau 13 est résumée dans l'Équation 6.

Équation 6 : Formule récapitulative du coût utilisée pour l'OCA

$$\text{Coût total} = \left\{ 1,09 * \sum_i C_i m_i + \left[1,93 * S * \left(\frac{e}{70} \right)^{0,2} + 0,05 * N + 1,79 \right] * 1,66 \right\} * (1,056)$$

Un exemple d'application de cet outil est présenté sur les Figure 26 et Figure 28. Pour cet exemple, le coût de six cellules de batteries lithium-ion est modélisé. Il s'agit de cellules de 90 Wh, avec du NMC à la cathode, du graphite à l'anode, et dont seule l'épaisseur des électrodes varie d'une cellule à l'autre, de 50 à 100 μm (une présentation détaillée des choix de conception de ces cellules sera présentée dans le Chapitre V). La Figure 26 représente les quantités de matière pour chacune des cellules de l'étude.

Scenarios	NMC 50u	NMC 60u	NMC 70u	NMC 80u	NMC 90u	NMC 100u
Quantité de matière dans une cellule (g)						
Electrode (+)						
NMC	161,87	162,22	162,58	162,94	163,30	163,66
Conducteur	10,91	10,94	10,96	10,98	11,01	11,03
Liant	9,09	9,11	9,13	9,15	9,17	9,19
Collecteur (+)	40,59	33,81	29,01	25,40	22,62	20,38
Solvant NMP	1,09	1,09	1,10	1,10	1,10	1,10
Electrode (-)						
Graphite	94,75	94,96	95,17	95,37	95,59	95,79
Liant	4,99	5,00	5,01	5,02	5,03	5,04
Collecteur (-)	85,21	71,38	61,58	54,22	48,54	43,98
Solvant eau	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Cellule						
Electrolyte	77,16	74,16	72,12	70,56	69,48	68,52
Séparateur	35,42	29,58	25,41	22,28	19,85	17,90
Enveloppe souple	18,92	18,85	18,73	18,75	18,58	18,63
Clinquant	32,43	31,44	30,77	30,25	29,88	29,57

Figure 26 : Quantités de matières pour les cellules de l'étude

Le coût des matières pour cette étude est donné dans le Tableau 14. Il s'agit de données issues d'un projet européen, le projet Hélios (60), dont la construction sera explicitée dans le Chapitre V, ainsi que de données d'Argonne (liant, NMP et collecteur d'aluminium).

Tableau 14 : Prix des matières et composants des cellules utilisés pour l'étude OCA

NMC	27 \$.kg ⁻¹	Liant eau	10 \$.kg ⁻¹
Conducteur	7,15 \$.kg ⁻¹	NMP	3,2 \$.kg ⁻¹
Liant NMP	27,6 \$.kg ⁻¹	Collecteur, Al	0,8 \$.m ⁻²
Electrolyte	19,5 \$.kg ⁻¹	Collecteur, Cu	1,7 \$.m ⁻²
Séparateur	2,7 \$.m ⁻²		

La Figure 27 donne le résultat du calcul du coût matière pour chaque cellule de l'étude à partir des quantités de matière (cf. Figure 26), ainsi que du taux de rebuts (cf. Tableau 13), et du coût des matières (cf. Tableau 14).

Scenarios	NMC 50u	NMC 60u	NMC 70u	NMC 80u	NMC 90u	NMC 100u
Coût des matières dans une cellule (\$ par cellule)						
Electrode (+)						
NMC	4,76	4,77	4,78	4,80	4,81	4,82
Conducteur	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Liant	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28
Collector (+)	0,66	0,55	0,47	0,41	0,37	0,33
Solvant NMP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Electrode (-)						
Graphite	1,91	1,91	1,92	1,92	1,93	1,93
Liant	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Collector (-)	1,49	1,25	1,08	0,95	0,85	0,77
Solvant eau	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cellule						
Electrolyte	1,64	1,58	1,53	1,50	1,48	1,46
Separateur	4,02	3,63	3,12	2,73	2,43	2,20
Enveloppe souple	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Clinquant	0,63	0,63	0,62	0,62	0,62	0,62
Total	15,79	14,99	14,20	13,61	13,16	12,79

Figure 27 : Calcul du coût matière avec l'OCA

La Figure 28 représente le calcul du coût de fabrication, ainsi que des frais généraux et autres frais pour les mêmes cellules que la Figure 26 et la Figure 27.

Scenarios	NMC 50u	NMC 60u	NMC 70u	NMC 80u	NMC 90u	NMC 100u
Coût des matières dans une cellule (\$ par cellule)						
Total	15,79	14,99	14,20	13,61	13,16	12,79
Coût de fabrication (\$ par cellule)						
Electrode	2,79	2,42	2,15	1,94	1,77	1,63
Assemblage cellule	1,63	1,36	1,17	1,02	0,92	0,82
Emballage & formation	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79
Coût fabrication	6,22	5,57	5,11	4,75	4,48	4,24
Frais généraux et autres frais (\$ par cellule)						
Frais généraux	4,11	3,68	3,38	3,14	2,96	2,81
Garantie et assurance	1,46	1,36	1,27	1,20	1,15	1,11
Total	5,58	5,04	4,65	4,34	4,11	3,92
Coût total cellule \$	27,6	25,6	24,0	22,7	21,7	21,0
Coût cellule \$/kWh	306	284	266	252	242	233

Figure 28 : Exemple de calcul du coût total

Le modèle « OCA » qui vient d'être décrit permet de faire une estimation rapide du coût d'une cellule. La fiabilité des résultats obtenus a pu être vérifiée sur plusieurs cas concrets. Dans le Chapitre V, la comparaison des résultats de ce modèle amont avec des modèles de la littérature sera proposée. De plus, une méthode d'évaluation de l'incertitude des résultats obtenus avec ce modèle sera décrite le Chapitre VII.

4 Modélisation analytique des coûts : MAC

Le second modèle de coût développé dans ces travaux est un modèle analytique, intitulé Modèle Analytique de Coût (MAC), permettant de tester l'influence de nombreux paramètres, ainsi que d'effectuer des synthèses au niveau global de la cellule, ou sur le détail du procédé de fabrication ou des achats. Il est en partie basé sur un logiciel informatique de Renault.

Le fonctionnement de ce modèle est largement basé sur le référentiel sur les matières, le référentiel sur la fabrication ainsi que l'usine de référence, qui seront présentés dans le Chapitre VI. La clé sur laquelle repose ce modèle, est la méthode qui a été développée pour faire la transposition des données provenant des référentiels pour les adapter au cas étudié. Une fois cette transposition réalisée, l'utilisation du logiciel de Renault permet de projeter la modélisation dans plusieurs contextes de temps, ainsi que de comparer le coût de production dans plusieurs pays, grâce à l'utilisation de la base de données économiques liée au logiciel.

4.1 Le choix du logiciel

Le logiciel support utilisé, nommé MGV2, est un outil mis au point par Renault pour faire des modélisations analytiques du coût des différentes pièces automobiles, basé sur un mélange de langage Visual Basic et de langage C. La modélisation se fait à partir d'éléments physiques (nombre d'opérateurs, temps de cycle, quantité de matière...) et d'éléments économiques (taux horaire de la Main d'œuvre, coût du kWh...). L'utilisateur peut utiliser des fonctions automatiques sur certains points, ou bien rentrer directement des valeurs s'il en dispose. L'atout principal de ce logiciel est la base de données économiques sur laquelle il s'appuie, et qui est régulièrement mise à jour. Elle contient des informations économiques (salaire, coût de l'électricité, taux de change, calcul des frais en fonction des secteurs d'activité) dans de nombreux pays différents, et sur plusieurs années.

MGV2 présente aussi l'avantage de proposer un cadre déjà existant pour la modélisation du coût, ce qui simplifie la mise en place du calcul, avec un formatage usuel dans l'industrie pour les données d'entrée et les données de sortie. Ce logiciel n'est par contre pas accessible en dehors de la société Renault pour des raisons de confidentialité. Un exemple du formatage en sortie du modèle est donné sur la Figure 29, sur un cas d'applications identique à celui utilisé dans la première colonne de la Figure 28 (c'est-à-dire une cellule composée de NMC et de graphite, avec une épaisseur d'enduction d'électrode de 50 μm , et qui sera analysée en détail dans le Chapitre V).

Informations études		
Date d'établissement du devis :	30/01/2014	
Monnaie du projet :	US Dollar	
Volume de référence (en pièces/an) :	10 000 000	
Achats bruts locaux	5,78	22%
Achats bruts importés	8,56	33%
Rebuts et Retouches sur achat	1,66	6%
Frais d'achat	0,28	1%
Total Achat	16,27	63%
Main d'oeuvre directe	0,89	3%
Frais de fonctionnement et d'entretien	1,62	6%
Amortissement des moyens	1,95	8%
Rebuts et retouches	0,47	2%
Frais indirects usine	1,48	6%
Infrastructures	0,12	0%
Total Valeur de transformation	6,53	25%
Frais généraux	1,72	6,64%
Frais financiers (pour production)	0,45	1,74%
Marge avant impôt (pour production)	0,95	3,65%
Total Frais	3,12	12%
Total "sortie usine"	25,9	

Figure 29 : Exemple de synthèse simplifiée issue du modèle MAC pour l'étude d'une cellule en USD

La Figure 29 permet de faire ressortir le fait que contrairement au modèle amont OCA, le modèle analytique MAC est capable de faire ressortir le détail de la main d'œuvre, de l'amortissement, des frais de fonctionnement, des rebuts, des frais indirects et de l'infrastructure, ceci au niveau global, comme sur la Figure 29, mais aussi pour chacune des étapes de la fabrication.

4.2 Approche du modèle MAC

Comme pour le modèle OCA, le modèle MAC utilise la composition détaillée de la cellule pour calculer le coût des achats et le coût de fabrication à l'aide de l'utilisation des référentiels et d'une cellule référence. Mais le coût du procédé de fabrication et des frais généraux est calculé étape par étape, et non plus de manière groupée comme dans l'OCA.

Pour chacune des quatorze étapes, les données du référentiel sont transposées au cas étudié. Ceci se fait avec l'utilisation de sept paramètres de transpositions différents, alors que seuls quatre paramètres sont utilisés dans l'OCA, et que la fabrication est divisée en trois étapes. Le fonctionnement du modèle est résumé schématiquement sur la Figure 30. La partie de transposition des données de l'usine de référence à la cellule étudiée, encadrée en

rouge sur la figure, est l'étape clé de la modélisation pour laquelle un travail important sur le procédé de fabrication a été réalisé.

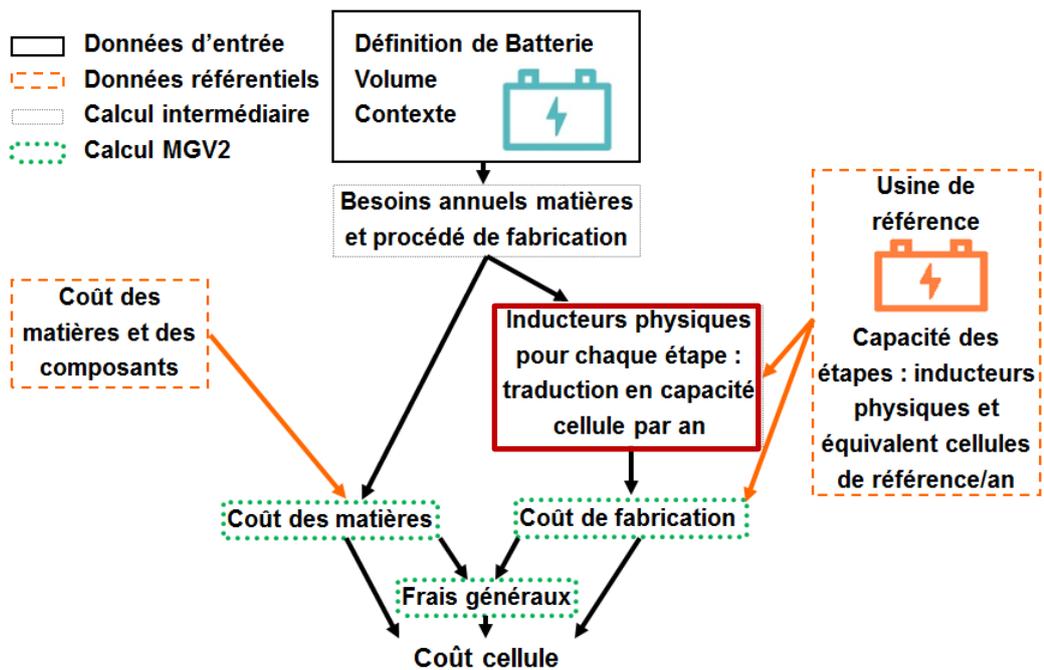


Figure 30 : Vision schématique du principe de calcul de coûts pour le modèle MAC

La méthode de transposition du coût du procédé de fabrication est basée sur un calcul du temps d'occupation de la machine pour la cellule étudiée. Cette transposition nécessite de comprendre finement pour chacune des 14 étapes de fabrication du modèle, quels paramètres vont dicter le temps d'occupation de la machine. Il s'agit à la fois de comprendre pour chacune de ces étapes comment fonctionne la machine, et que va-t-il se passer pour la cellule qui est étudiée.

Il faut en plus de ces hypothèses techniques, faire des hypothèses sur le temps global d'ouverture de l'usine, pour en déduire le temps d'occupation de la ligne pour fabriquer la cellule étudiée. Le principe de calcul est donc de calculer le temps nécessaire pour fabriquer la cellule sur chacune des machines d'une usine de référence. Ceci nécessite une connaissance précise du fonctionnement des machines.

Pour rappel, dans la publication de Nelson *et al.*, le calcul est effectué en imaginant l'investissement nécessaire pour une usine spécialement dimensionnée pour répondre à un besoin (35,47). Pour faire ce calcul, les investissements et la main d'œuvre de l'usine varient continument avec la quantité annuelle de cellules, selon une loi mathématique ne correspondant pas à une variation réelle, qui en pratique est discrète.

4.3 Calcul des nouveaux temps de cycle

Pour modéliser le nouveau coût de fabrication, le temps de cycle de chaque étape est calculé (temps nécessaire pour fabriquer une cellule), à l'aide de l'usine de référence. Ce calcul est fait à partir d'inducteurs de coût adaptés à chaque étape. Par exemple, la machine de mélangeage peut traiter un volume constant de matière par an. Il faut donc calculer le volume de matière nécessaire pour fabriquer une cellule, pour pouvoir calculer le nombre de cellules que la machine peut produire. La formule de calcul utilisée pour la nouvelle capacité est donnée dans l'Équation 7. Les inducteurs de coût pour chacune des étapes sont présentés dans le Tableau 15.

Équation 7 : Formule de conversion de la capacité des machines

$$Capa_i = Capa_{ref} * \frac{R_{ref}}{R_i} * \left(\frac{F_{ref}}{F_i}\right)^{0,2}$$

Avec R l'inducteur de coût, F le coefficient correctif, Capa la capacité de la machine en nombre de cellules par temps de cycle, i la cellule étudiée et ref la référence. Le coefficient correctif F, en grisé dans l'Équation 7, est utilisé sur quelques étapes. Il consiste en un ratio de l'inducteur indiqué pour la cellule étudiée sur la référence, à la puissance 0,2. Ce coefficient a été déterminé de manière empirique, pour prendre en compte des facteurs ayant une influence secondaire sur le coût.

Tableau 15 : Inducteur de coûts utilisés dans le modèle MAC

	Inducteur de coût (R)	Coefficient correctif (F)
Mélangeage	Quantité de matière à traiter pour une cellule	Aucun
Enduction et calandrage	Surface d'électrode dans la cellule	Épaisseur de l'enduction
Refente	Longueur de rouleau pour fabriquer une cellule	Aucun
Découpage	Nombre de couches d'électrode dans la cellule	Aucun
Séchage sous vide	Surface d'électrode dans la cellule	Aucun
Assemblage du faisceau	Surface d'électrode dans la cellule	Nombre de couches d'électrodes dans la cellule
Emballage du faisceau Remplissage Dégazage Formation	Identique si cellule de format proche de celui de la référence.	Aucun

Un traitement réalisé à l'aide d'un fichier dédié permet d'obtenir les temps de cycle pour chacune des étapes. Ces derniers vont être utilisés pour calculer l'amortissement à la cellule des moyens de fabrication et de la main d'œuvre. En fonction du temps d'ouverture de l'usine,

d'entretien de la machine, de pause et d'imprévus, qui sont des données qui doivent être entrées, le logiciel calculera ces amortissements. Pour les frais de fonctionnement et d'entretien, ils sont calculés au préalable dans le fichier dédié et ce pour chaque opération, en multipliant les frais de fonctionnement de la cellule de référence par un ratio du nouveau temps de cycle sur le temps de cycle de référence. La cascade des rebuts nécessite aussi d'être recalculée avec les nouveaux temps de cycle, ce qui sera expliqué dans le Chapitre VI.

4.4 Utilisation du logiciel

4.4.1 Données entrées dans le logiciel

Une fois le travail de calcul des nouveaux temps de cycle réalisé, il faut remplir les données dans le logiciel support de MAC, afin qu'il en fasse la synthèse. Les informations de contexte pour l'ensemble de l'étude sont d'abord complétées, puis une fiche propre à chaque achat (Figure 31) et à chaque étape de transformation (Figure 32) est créée. Sur la Figure 31 et la Figure 32, la zone entourées en rouge correspond au récapitulatif de l'ensemble des fiches achats et transformation de l'étude, classées en quatre sous dossiers (anode, cathode, cellule et formation). Il y a en tout 14 fiches de transformations, et 14 fiches d'achats. Au total, le nombre de données à définir dans le logiciel pour la modélisation du coût d'une cellule est d'environ 600 données.

Ces figures sont données pour illustrer le logiciel, mais nous n'entrerons pas dans le détail ligne par ligne. Ce logiciel n'est qu'un outil permettant de mettre en relation les données que nous avons calculées avec celles de la base économique Renault, et de faire des synthèses du résultat. La difficulté de la modélisation repose dans la définition des données d'entrée, et notamment dans la transposition des données de référence pour les adapter au cas étudié (cf. § 4.3).

Pour la fiche achats (Figure 31), il faut entrer dans chaque fiche la quantité de matière nécessaire pour une cellule, le coût de la matière dans la monnaie d'achat, le taux de rebuts et les frais de logistique. Pour les étapes de transformation (Figure 32), il faut entrer dans chaque fiche le nombre d'opérateurs et leur niveau de qualification, les informations sur le montant d'investissement pour les moyens de production, le taux de rebuts, la durée de fonctionnement hebdomadaire de l'atelier, le temps de cycle de la machine, ainsi que les temps de changement d'outil et aussi les éventuels aléas de fabrication. En ce qui concerne

les frais de fonctionnement, il est possible de laisser le logiciel les calculer, mais dans le modèle MAC, ils sont calculés par l'analyste et entrés dans le logiciel.

Libelle	Valeur	Unité
Entête		
Nom de l'achat	Graphite	
Coefficient d'achat	1,000	
Nature d'achat	MATIERE BRUTE	
Désignation de l'achat	Anode Gr	
Frais Financiers et Marge		
Mode de calcul des frais financiers	Rentabilisation des actifs	
% de dettes	50,000	%
Taux emprunt bancaire + risque pays	9,000	%
Mode de calcul de la marge achats avant IS	(Taux fixe + risque pays) * Coût de revient de l'achat	
Taux de marge achats + risque pays avant IS	3,150	%
Variables		
Quantité engagée	158,610	g
Unité de la quantité engagée	g	
Prix de l'unité	0,0185	USD / g
Devise du prix de l'unité	USD	
Date du Prix	01/06/2012	
Type de prix	FOURNISSEUR	
Pays d'origine de l'achat	CHINE	
Incoterm	EXW	
Types d'approvisionnement	LOCAL	
Logistique		
Transport local	0,000	CNY
Taxes locales sur achats	0,000	CNY
Rebuts et retouches		
Rebuts	9,00	%
Retouches	0,00	%
Commentaires		
Frais		
Frais structure usine centrale	0,00	%
Frais sur achat	0,38	%
Frais d'études pièces/plan	0,00	%
Frais de R&D génériques	0,00	%
Frais commerciaux	0,00	%
Frais de siège	0,00	%
Résultats		
Quantité annuelle calculée	1245 989 405,00	g/an
Achat brut	17,782	CNY
Transport local	0,000	CNY
Taxes locales	0,000	CNY
Achat DDP	17,782	CNY
Rebuts	1,600	CNY
Retouches	0,000	CNY
Frais structure usine centrale	0,000	CNY
Frais sur achat	0,068	CNY
Frais d'études pieces/plan	0,000	CNY
Frais d'études génériques	0,000	CNY
Frais commerciaux	0,000	CNY
Frais de siège	0,000	CNY
Frais financiers	0,095	CNY
Marge	0,613	CNY
Total achats	20,157	CNY

Figure 31 : Exemple de feuille d'achat dans le modèle MAC. En rouge : ensemble des fiches élémentaires de l'étude. En bleu : les données entrées. En vert : résultats calculés par le logiciel.

Une fois les données renseignées, le logiciel fait la synthèse des informations, qu'il croise avec les informations de la base de données associée au logiciel (notamment pour obtenir les salaires ou les taux de change). Le coût de chaque élément (achat ou transformation) est

alors calculé, et les résultats sont présentés pour chacune des fiches dans les zones vertes de la Figure 31 et de la Figure 32.

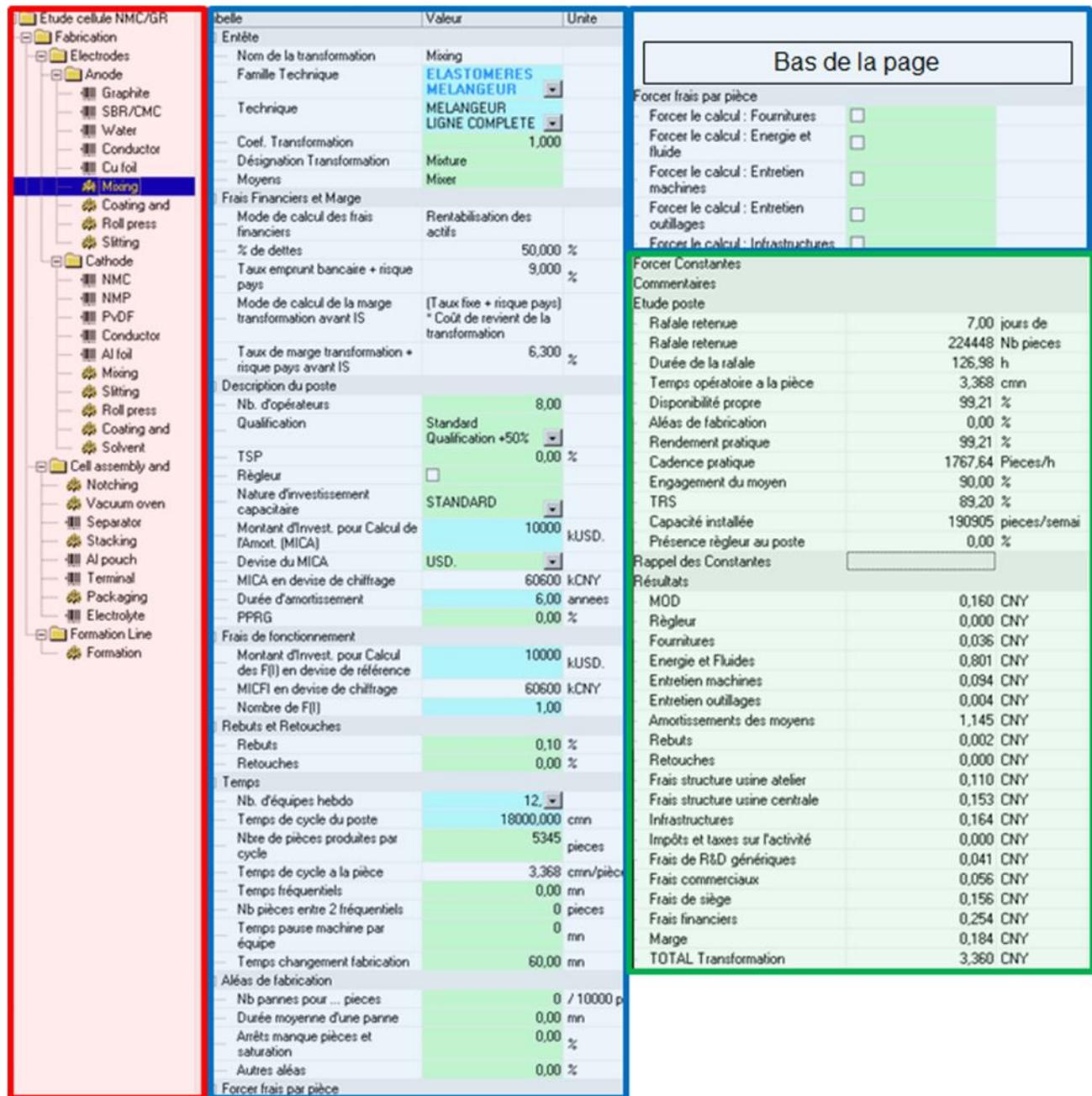


Figure 32 : Exemple de feuille de transformation du modèle MAC. En rouge : ensemble des fiches élémentaires de l'étude. En bleu : les données entrées. En vert : résultats calculés par le logiciel.

Les coûts de chacune des fiches sont sommés pour en déduire le coût total des achats et de la fabrication. A partir du total achat et fabrication, le logiciel fait le calcul des frais généraux et autres frais, en se basant sur des ratios comme nous allons le voir dans le chapitre suivant. Il est alors possible de faire ressortir des synthèses du coût sous plusieurs formats de présentation et sur différents périmètres.

4.4.2 Frais généraux et autres frais

Le calcul des frais généraux est un point délicat du calcul de coût. Il s'agit en effet de frais indirects, qui sont souvent partagés entre plusieurs produits. Prenons ainsi l'exemple du service des achats. Chez un fournisseur, ce service négocie et sélectionne les achats pour toute la gamme de produits proposés par ce fournisseur. Les frais générés par ce service doivent donc être affectés à chaque produit en proportion des dépenses générées par le service achat pour celui-ci. Ces frais doivent ensuite être amortis en fonction du nombre de pièces produites. Le calcul exact de ces frais généraux est donc complexe, et nécessite une connaissance du fournisseur seulement accessible en interne.

Chez Renault comme chez la plupart de ces fournisseurs, des études sur le sujet ont fait ressortir une cohérence sur les frais généraux des différents fournisseurs sur une même famille de pièces. C'est pourquoi la méthode de calcul des frais généraux employée dans le logiciel support de MAC est d'appliquer des coefficients sur le coût de la fabrication et des achats, qui changent en fonction du secteur d'activité et de la localisation. Ces coefficients ont été déterminés par l'observation d'un nombre important d'exemples et sont mis à jour régulièrement. Ce mode de calcul nécessite d'avoir à faire à un produit connu, dont la filière industrielle est bien établie. Il nécessite aussi d'avoir un contexte industriel proche (volumes, type de fournisseurs) entre la pièce étudiée et les exemples qui ont servi à construire les coefficients de référence.

Pour le secteur des batteries lithium-ion, plusieurs méthodes de calcul de ces coefficients ont été mises en place au cours de cette thèse. Des modifications de ces coefficients sont encore susceptibles d'être apportées, en raison des changements permanents du marché. Ainsi, il est possible que les volumes de la filière deviennent nettement supérieurs aux volumes actuels (citons par exemple le projet médiatisé de giga-usine que Tesla souhaite construire, avec une capacité de 35 GWh par an (61), quasiment équivalent à l'ensemble de la production lithium ion actuelle). Si une cellule standard est fabriquée avec un volume très important, la partie des frais généraux sera plus faible que sur un projet à plus faibles volumes. Dès lors, une modification de la méthode de calcul des frais généraux sera nécessaire.

On pourra se référer à la méthode de calcul des frais généraux et autres frais du modèle amont OCA pour avoir un exemple des méthodes de calcul que nous utilisons sur ces frais (*cf.* Chapitre IV 3.3).

5 Conclusion

Pour répondre à la problématique de ce travail, une bonne compréhension de la structure de coût des batteries est un élément clé. C'est pourquoi deux modèles de coût complémentaires, permettant d'acquérir cette compréhension ont été développés. Le périmètre de ces modèles va de la fabrication des électrodes à partir des matériaux actifs déjà synthétisées, jusqu'à la cellule prête à l'emploi.

Le premier modèle nommé OCA permet un calcul du coût basé sur l'étude de quatre paramètres clés. Il permet de faire des études robustes, sans toutefois pouvoir faire ressortir des synthèses détaillées, ni tester l'influence de l'ensemble des paramètres, ou bien des effets de localisation de l'usine. Son principe ainsi que les données sur lesquelles il se base ont été présentés. Le second modèle développé est nommé « MAC ». Il est complémentaire du premier, car il permet de faire ressortir des synthèses détaillées à chaque étape de fabrication, et aussi de tester l'influence de tous les paramètres. Un minimum de sept paramètres est utilisé pour faire la transposition du coût de fabrication de la cellule étudiée. Une comparaison des résultats obtenus avec les deux modèles, ainsi qu'une étude de l'incertitude sera proposée dans le Chapitre VII.

Dans le prochain chapitre, une étude basée sur le modèle amont OCA sera présentée. Le Chapitre VI quant à lui, sera l'objet de la présentation des référentiels sur les achats et sur la fabrication qui ont été développés et entretenus au cours de cette thèse. Ces référentiels permettent notamment d'alimenter les modèles de coût avec des données récentes.

Chapitre V. Etude comparative de coût de cellules

Dans ce chapitre, nous utilisons le modèle amont (OCA) pour réaliser une étude comparative de coût de cellules avec différents matériaux d'électrode positive. Le rôle clé de l'épaisseur de l'électrode est montré. Dans un second temps, cette étude est utilisée pour comparer les résultats obtenus avec le modèle amont OCA et un modèle de la littérature.

1 Introduction

La littérature sur la réduction du coût des batteries lithium-ion est principalement centrée sur l'étude des matériaux et leur optimisation, alors que moins d'articles sont consacrés à la réduction des coûts par l'amélioration de la conception des batteries, qui est pourtant un axe de travail important. De nombreuses matières et conception de cellules étant envisageables, la détermination de la meilleure configuration est un sujet complexe, nécessitant de prendre en compte les aspects techniques et économiques pour faire des comparaisons homogènes.

Dans ce chapitre, une comparaison du coût de cellules utilisant différents matériaux actifs pour l'électrode positive est proposée. Cette étude montre aussi l'influence d'un paramètre clé de conception : l'épaisseur d'enduction de l'électrode. L'effet de ce paramètre sur le coût des batteries a été très peu souligné (35,37,62). Par contre les effets techniques de ce paramètre sur le comportement de la cellule ont eux été au cœur de plusieurs publications (63–73). Nous verrons que ce paramètre est important pour éviter les biais lors de comparaisons du coût de cellules utilisant différents matériaux. Une comparaison des résultats avec un modèle de la littérature sera aussi effectuée.

2 Méthode de l'étude

Dans un premier temps, le dimensionnement de cellules de 90 Wh avec quatre matériaux de cathode et six épaisseurs d'enduction des électrodes différentes a été effectué à l'aide du logiciel de conception de cellules BatPac (47). Des cellules avec ce niveau d'énergie équipent des véhicules du marché, comme la Volkswagen e-golf (74) ou la Ford C-Max Plug-

in Hybrid (75), qui contiennent respectivement 264 et 84 cellules. Le coût de ces cellules a ensuite été calculé à l'aide de nos modèles de coût, pour un volume de fabrication de 10 millions de cellules.

2.1 Dimensionnement des cellules

Les cellules ont été dimensionnées à l'aide de la partie conception de cellule du logiciel BatPac du laboratoire Argonne, par Nelson *et al.* (47). S'il existe des limitations au niveau de la conception de cellules, le logiciel permet tout de même d'obtenir des résultats très satisfaisants, suffisants pour notre étude (76). Les cellules ainsi dimensionnées sont des cellules prismatiques en enveloppe souple. Les cellules ayant toutes une énergie de 90 Wh, la tension et la capacité de la cellule vont dépendre du matériau d'électrode positive utilisé : LFP, NMC, NCA, et LMO, tandis que l'électrode négative est en graphite (Gr).

Un séparateur en polyoléfines enduit de céramique sur les deux faces a été considéré. En comparaison avec un séparateur sans enduction céramique, ce type de membrane assure une meilleure résistance à l'emballement thermique, améliorant ainsi la sûreté de la cellule, critère d'autant plus sensible pour les applications au véhicule électrique. Ce type de séparateur permet aussi d'améliorer la vitesse d'imprégnation de l'électrolyte dans la cellule lors de la fabrication (77–79). Ceci explique leur forte présence dans les batteries lithium-ion pour l'automobile. L'épaisseur, la porosité et la densité du séparateur considéré sont respectivement : 24 μm , 41% et 1 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Pour les matériaux de cathode autres que le LFP (NMC, LMO and NCA), la porosité de l'électrode a été fixée à 32%, correspondant à la valeur par défaut du logiciel. Pour le LFP, la valeur du modèle BatPac de 50% a été réduite à 40%, qui apparaît comme une valeur plus réaliste (65,71,80). La porosité joue un rôle important dans cette étude, car elle influence la densité volumique ($\text{mAh}\cdot\text{cm}^{-3}$) des électrodes.

L'effet de l'épaisseur d'enduction de l'électrode après calandrage a été étudié. Il s'agit de l'épaisseur de matières actives enduite sur le feuillard collecteur de courant, tel qu'illustré sur la Figure 33. Généralement, l'épaisseur de l'enduction n'est pas la même pour l'électrode négative et l'électrode positive. En fonction de la capacité volumétrique ($\text{mAh}\cdot\text{cm}^{-3}$) et de l'équilibrage (« balancing »), l'électrode positive ou bien la négative peut-être la plus épaisse. Le « balancing » est le ratio de capacité surfacique de l'anode sur la cathode. Il dépend des matériaux, mais est toujours supérieur à 1 dans le cas d'utilisation d'électrodes négatives à

base de graphite, et cela pour éviter la formation de dendrites de lithium à la surface de cette électrode, et augmenter la durabilité de la cellule.

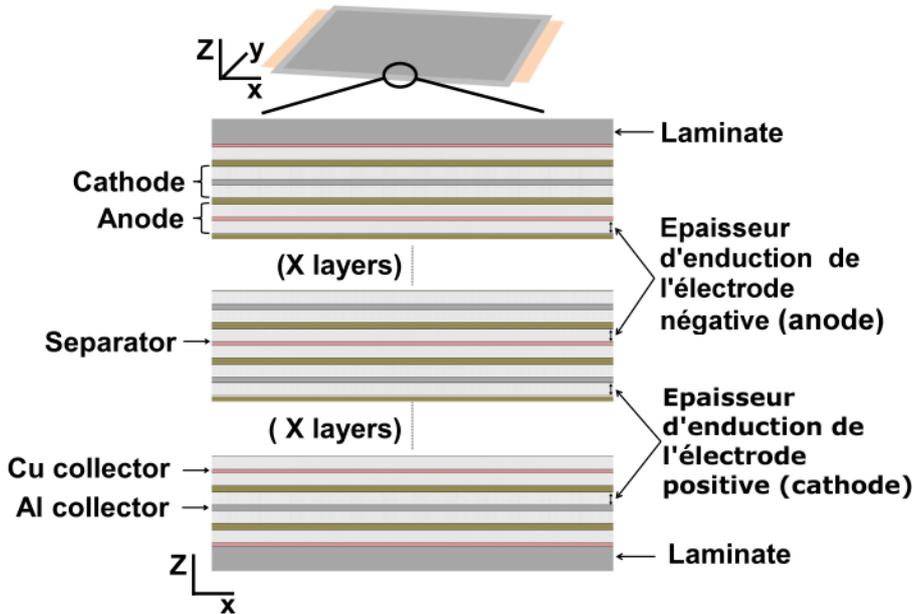


Figure 33 : Définition de l'épaisseur d'enduction d'électrode

Nous avons choisi d'utiliser l'épaisseur d'enduction de l'électrode la plus épaisse (positive ou négative) comme paramètre, notre hypothèse étant que la limitation de l'épaisseur de revêtement concerne les deux électrodes, et doit être appliquée aux deux. Afin d'illustrer cette hypothèse, le Tableau 16 donne l'épaisseur des deux électrodes pour chacune des cellules étudiées, lorsque l'épaisseur d'enduction maximale est fixée à 50 µm. L'électrode la plus épaisse est la positive dans les cellules avec du LMO et du LFP (en raison de la faible capacité du LMO et de la faible densité du LFP), alors que c'est la négative pour les cellules avec du NMC et du NCA.

Tableau 16 : Epaisseurs des électrodes positive et négative pour un revêtement maximal de 50 µm.

	Epaisseur d'enduction de l'électrode positive	Epaisseur d'enduction de l'électrode négative
NMC // Gr	49,0 µm	50,0 µm
NCA // Gr	45,0 µm	50,0 µm
LMO // Gr	50,0 µm	30,4 µm
LFP // Gr	50,0 µm	34,2 µm

Les batteries étant conçues pour des applications EV et PHEV, nous avons retenu 50 µm comme limite inférieure d'enduction. Des électrodes plus fines ne seraient pas viables économiquement pour de telles applications, car elles conduiraient à un ratio matériaux actifs/matériaux inactifs plus faible et par conséquent une plus faible densité d'énergie

massique. Les électrodes fines sont par contre privilégiées pour des applications de type puissance telles que pour les véhicules hybrides. Une enduction de 100 μm a été retenue comme limite supérieure, car selon la littérature, il s'agit de la limite actuelle dans les applications automobiles, pour des raisons de durabilité, de fabrication, de tenue mécanique des électrodes et de perte de capacité à courants élevés (35,67,72,73,80).

La longueur et la largeur de la poche de la cellule contenant les électrodes sont fixées à respectivement 200 et 100 mm. L'épaisseur de la cellule est une variable d'ajustement et change légèrement selon les cellules. L'épaisseur de cellule varie entre 14,1 (cas du LFP à une épaisseur d'enduction de 50 μm) et 8,7 mm (cas du NCA à 100 μm) pour l'ensemble des cellules modélisées dans cette étude.

2.2 Coût des matières et composants

Les données qui ont été utilisées sur le coût des matières proviennent de fournisseurs, qui ont répondu à des demandes d'informations dans le cadre du projet européen Helios (60) au second semestre de l'année 2011. Des fournisseurs majeurs du marché ont été contactés, afin de fournir une estimation de leurs prix pour 4 scénarios de volumes achetés différents. Les données de ce projet ont ensuite été synthétisées pour correspondre aux volumes de notre étude : 10 millions de cellules de 90 Wh par an. Les quantités de matériaux actifs correspondantes sont données dans le Tableau 17.

Il est utile de rappeler que ces valeurs ne sont pas absolues ni définitives. D'abord, sous un même nom générique, chaque matière aura des caractéristiques différentes entre les fournisseurs (comme le contenu en métal, la taille des particules et leur forme, la distribution et la taille des cristaux, tous ces paramètres ayant un impact important sur les performances des composés vendus). Ensuite, le coût des matières dépend du cours des matières premières. Les coûts de l'étude sont basés sur des cours de 22 $\text{\$.kg}^{-1}$ pour le nickel et de 38 $\text{\$.kg}^{-1}$ pour le cobalt (septembre 2011). Enfin, ces prix ayant été obtenus dans un projet sans applications commerciales, ils sont probablement supérieurs à des prix obtenus après négociation.

Nos valeurs sont proches de données de la littérature (35,37). Cependant, les cours des métaux et les volumes n'étant pas les mêmes, nous ne pouvons pas faire une comparaison directe des coûts. Mais il ressort que, en comparaison (prix relatif au NCA dans le Tableau 17), le prix de NMC obtenu par le projet Helios est légèrement inférieur en comparaison avec ces études.

Tableau 17 : Prix des matériaux actifs pour le projet Helios (60)

	Prix (\$.kg ⁻¹)	Prix relatif au NCA	Volumes liés
NMC	27 \$.kg ⁻¹	82%	1,8 kT.an ⁻¹
NCA	33 \$.kg ⁻¹	100%	1,8 kT.an ⁻¹
LMO	14 \$.kg ⁻¹	42%	2,6 kT.an ⁻¹
LFP	21 \$.kg ⁻¹	64%	2,1 kT.an ⁻¹
Graphite	18,5 \$.kg ⁻¹	56%	1,1 kT.an ⁻¹

Les coûts pour les matières communes à toutes les cellules sont donnés dans le Tableau 18 (déjà repris auparavant dans le Chapitre IV). Les coûts pour le liant, le solvant du liant (NMP pour l'électrode positive et eau pour l'électrode négative) et le feuillard d'aluminium ont été repris de BatPac (35), tandis que les autres coûts proviennent du projet Helios (60).

Tableau 18 : Prix des matières et composants des cellules

Conducteur	7,15 \$.kg ⁻¹	Liant eau	10 \$.kg ⁻¹
Liant NMP	27,6 \$.kg ⁻¹	NMP	3,2 \$.kg ⁻¹
Electrolyte	19,5 \$.kg ⁻¹	Collecteur, Al	0,8 \$.m ⁻²
Collecteur, Cu	1,7 \$.m ⁻²		

Pour le séparateur, spécifique à nos cellules, les volumes nécessaires vont influencer le coût. Or pour une épaisseur d'enduction deux fois plus importante, la même énergie est obtenue avec une surface de séparateur deux fois moindre. Dès lors, une évolution de prix avec la quantité nécessaire pour la fabrication est prise en compte. Le coût du séparateur est de 2,5 \$.m⁻² si plus de 15.10⁶ m² sont nécessaires par an, sinon, ce coût est de 2,7 \$.m⁻².

3 Résultats de l'étude

Dans ce paragraphe, les résultats des modélisations vont être présentés et analysés. L'impact du composé actif de l'électrode positive sera d'abord observé. Ensuite, l'effet de l'épaisseur d'enduction sur le coût sera montré, ainsi que les effets sur les propriétés de la cellule. Finalement, une comparaison avec un paramètre de conception différent de l'épaisseur d'enduction sera proposée. Le rôle clé de l'épaisseur d'enduction de l'électrode dans l'analyse de coût des cellules sera ainsi montré.

3.1 Influence du matériau actif de l'électrode positive

D'après les résultats reportés sur la Figure 34, la cellule la moins chère à une épaisseur d'enduction de l'électrode de 50 µm est celle utilisant du NMC. Ce résultat explique pourquoi

le NMC est l'un des composés d'électrode positive le plus répandu dans les batteries lithium-ion pour applications automobiles (11,81). La cellule utilisant du NCA est légèrement plus chère (+3,7%).

Contrairement à ce qui pourrait être attendu, les deux technologies sans cobalt ni nickel, le LMO et le LFP, qui sont les composés les moins chers au kilogramme, entraînent des coûts de cellule plus élevés. La cellule NMC est en effet 18,2% moins chère que celle utilisant du LMO, et 23,8% que celle utilisant du LFP. Ceci est lié à la faible densité énergétique ($\text{Wh}\cdot\text{cm}^{-3}$) du LFP et du LMO en comparaison avec le NCA et le NMC.

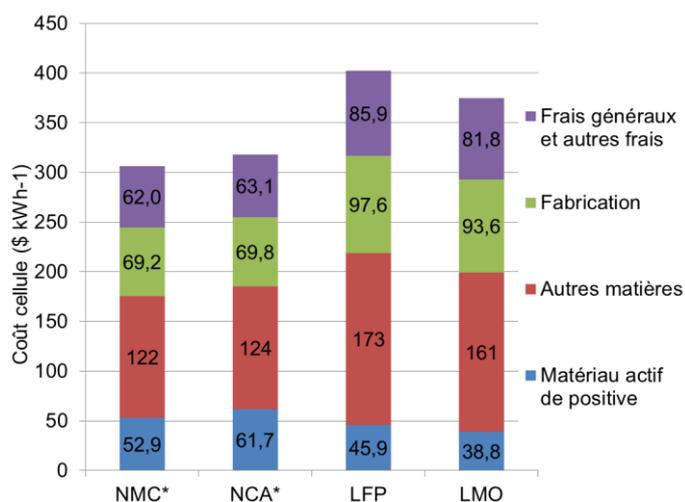


Figure 34: Décomposition du coût des cellules pour une épaisseur d'enduction de 50 µm (* l'électrode négative est limitante pour NMC et NCA)

Selon la Figure 34, la contribution au coût du matériau actif est plus faible pour le LFP et le LMO que pour le NMC. Cependant, la cellule complète est moins chère avec du NMC. En effet, les autres composantes du coût sont toutes inférieures. Ceci est lié aux propriétés du NMC, qui a une meilleure densité énergétique que le LFP et le LMO. Ainsi deux effets se combinent:

- Premièrement, un matériau avec plus d'énergie par kilogramme requiert une plus faible quantité de matière pour obtenir une énergie donnée. Ainsi, si le composé est plus cher au kilogramme, le coût supplémentaire sera plus faible si le coût du composé par kilowattheure est étudié. Ceci explique pourquoi le coût du matériau actif pour la cellule LMO est seulement 27% inférieur à celui de la cellule NMC, alors que le coût du composé au kilogramme est 48% inférieur.
- Deuxièmement, un matériau avec une meilleure densité d'énergie volumique requiert moins de volume pour produire une énergie donnée. Ainsi, pour une épaisseur

d'enduction et une porosité fixées, moins de surface de collecteur de courant sera nécessaire. Le coût supérieur du matériau actif est économisé grâce à la réduction des parties non actives (collecteur de courant, séparateur, liant, solvant), les gains de fabrication grâce à la baisse de surface d'électrode à enduire, et la baisse mécanique des frais généraux associés.

La combinaison de ces deux effets conduit à un coût de cellule final plus faible avec le NMC qu'avec le LMO et le LFP.

Les coûts de cellule indiqués sur la Figure 34 correspondent à des coûts par kilowattheure (énergie totale) de 307 \$.kWh⁻¹ pour la cellule NMC, 318 \$.kWh⁻¹ pour la cellule NCA, 375 \$.kWh⁻¹ pour la cellule LMO et 402 \$.kWh⁻¹ pour la cellule LFP. Pour optimiser la durée de vie de la batterie, BatPac recommande de limiter l'énergie utilisable à 85% du total de l'énergie pour des applications EV, c'est à dire 76,5 Wh (47). Ainsi, si l'énergie utilisable est considérée, les coûts des cellules sont : 361 \$.kWh⁻¹ pour la cellule NMC, 374 \$.kWh⁻¹ pour la cellule NCA, 441 \$.kWh⁻¹ pour la cellule LMO et 473 \$.kWh⁻¹ pour la cellule LFP.

Ces coûts de cellule sont légèrement au-dessus de certaines estimations récentes de la littérature (11,82). Ceci est principalement dû à la limitation de l'épaisseur d'enduction de l'électrode à 50 µm dans notre cas, valeur faible pour une application typée énergie. De plus, le but de l'étude est de comprendre les inducteurs de coût des batteries lithium-ion, plutôt que d'estimer précisément le coût actuel pour les fabricants.

3.2 Influence de l'épaisseur d'enduction des électrodes sur le coût

Le coût au kilowattheure des cellules de cette étude en fonction de l'épaisseur d'enduction des électrodes est représenté sur la Figure 35. La réduction de coût entre une épaisseur de 50 µm et 100 µm est de: 24% pour le NMC, 24% pour le NCA, 29% pour le LFP, et 30% pour le LMO. Ceci montre que le coût de la cellule peut être réduit d'environ un quart si l'épaisseur de l'enduction est doublée, avec les hypothèses de notre modèle. Pour une augmentation de 10 µm de l'épaisseur, (de 50 à 60 µm), le coût de la cellule NMC est 7% plus faible (285 \$.kWh⁻¹ au lieu de 307). Et pour des électrodes plus épaisses de 20 µm (70 µm), le coût est 13% plus faible (266 \$.kWh⁻¹).

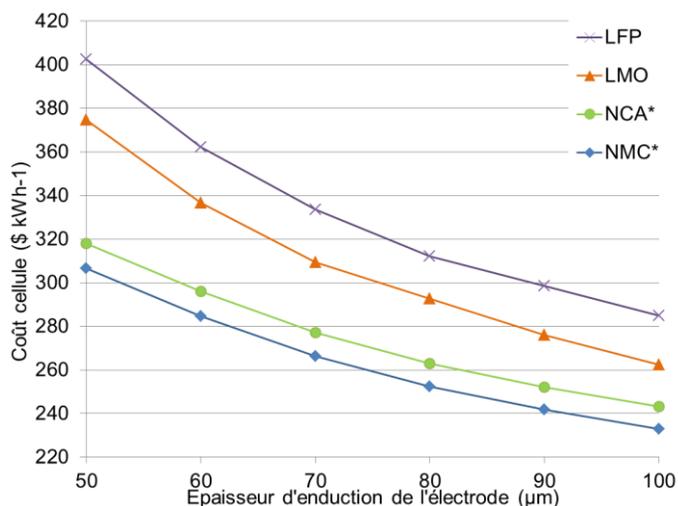


Figure 35 : Comparaison de coût de quatre cellules en fonction de l'épaisseur d'enduction (*l'électrode négative est limitante)

Le rôle majeur de l'épaisseur d'enduction de l'électrode sur le coût d'une cellule ressort clairement de la Figure 35. Cette figure suggère aussi que l'épaisseur d'enduction influence la comparaison de coûts de plusieurs matières. C'est pourquoi nous proposons de fixer l'épaisseur d'enduction de l'électrode à une porosité donnée pour une telle comparaison.

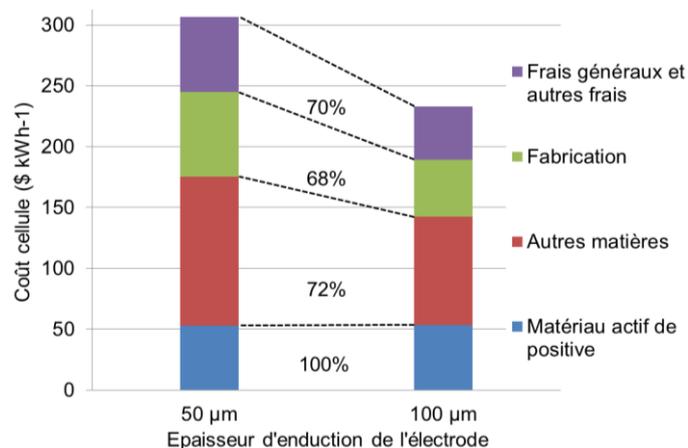


Figure 36 : Décomposition du coût de la cellule NMC pour deux épaisseurs d'enduction (50 et 100 µm)

La Figure 36 montre la répartition des coûts pour la cellule NMC avec deux épaisseurs d'enduction différentes. La partie matières et composants est affectée, grâce à la réduction des parties non actives. Le coût de la fabrication est réduit grâce à la réduction de la surface d'électrode et du nombre de couches dans la cellule. Les frais généraux et autres frais sont aussi réduits, car il y a moins de matières à traiter et une fabrication qui est plus performante. Les gains sur la fabrication sont proportionnellement plus importants (32%) que ceux sur les achats (28% hors matériau actif).

La Figure 37 montre la même répartition, mais avec la cellule utilisant du LMO comme électrode positive. Les gains sur la fabrication (36%) et les achats (32 % hors matériau actif) pour la cellule LMO sont supérieurs à ceux de la cellule NMC. Pour la cellule NCA l'évolution du coût est proche de celle de la cellule NMC, et de la cellule LMO pour la cellule LFP. Les figures n'ont donc pas été représentées.

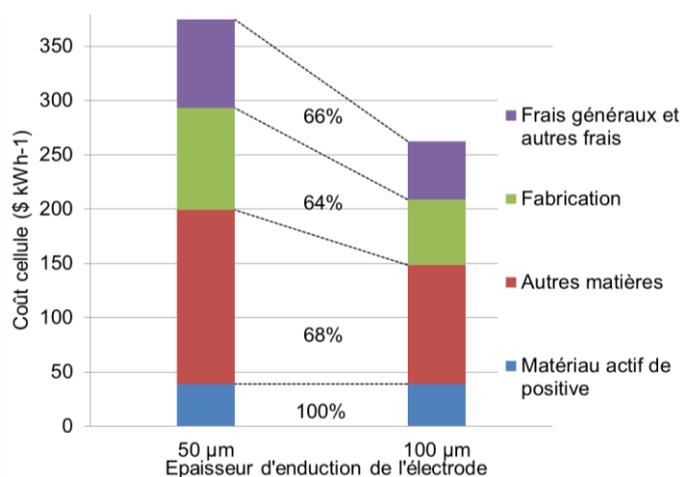


Figure 37 : Décomposition du coût de la cellule LMO pour deux épaisseurs d'enduction (50 et 100 µm)

Les gains potentiels liés à un épaissement de l'enduction de l'électrode ont donc été quantifiés, et indiquent une baisse intéressante du coût. La Figure 35 montre aussi le rôle clé de ce paramètre pour comparer les coûts de plusieurs cellules. C'est pourquoi nous avons formulé l'hypothèse suivante : « ce paramètre doit être fixé pour éviter les biais lors de la comparaison de différents composés d'électrode positive ». Pour vérifier cette hypothèse, le rôle technique et économique de ce paramètre va être exploré.

3.3 Effet de l'épaisseur de l'enduction de l'électrode sur les propriétés de la cellule

Les principaux paramètres influencés par l'épaisseur de l'enduction vont être présentés

3.3.1 Puissance de la cellule

La puissance est un aspect délicat des batteries lithium-ion, pour plusieurs raisons. D'abord, un grand nombre de facteurs influence la puissance d'une cellule, comme la température, l'énergie disponible, l'état de charge et de santé, les matières d'électrode, la composition et l'épaisseur des électrodes (83–85). Ensuite, la modélisation de la puissance, bien que largement discutée dans la littérature, est encore peu maîtrisée (68). Enfin, pour une comparaison correcte de la puissance de batteries pour applications automobiles, la

puissance dans les conditions de conduite les plus défavorables doit être donnée (c'est-à-dire au plus faible état de charge pour la température la plus basse), et toujours avec une même durée de l'appel de puissance. Cependant, il est très rare de trouver dans la littérature les caractéristiques de puissance d'une batterie avec les conditions de mesure clairement indiquées (84,86).

Une autre remarque est que les propriétés en puissance d'un matériau dépendent fortement de l'enduction éventuelle des particules avec un conducteur, du dopage du matériau avec un additif ou encore de la taille des particules. Ces caractéristiques des particules ne sont pas indiquées derrière la dénomination générique donnée aux composés, alors qu'elles vont influencer les propriétés de la cellule, et qu'elles sont aussi susceptibles d'influencer le coût du matériau (66,69,87,88).

Pour une batterie de PHEV, il est possible que la puissance à faible température et état de charge soit difficile à fournir, l'énergie disponible dans la batterie étant faible (89). Par conséquent, la puissance sera déterminante dans le dimensionnement de la batterie et donc sur son coût. Au contraire, pour les véhicules avec une forte énergie embarquée, la puissance est un critère moins contraignant. Ce paramètre clé joue un rôle prépondérant dans le choix de l'épaisseur d'enduction de l'électrode.

3.3.2 Facilité de fabrication

La facilité de fabrication est influencée par l'épaisseur de l'enduction de l'électrode. Il est dans l'ensemble plus facile de fabriquer des électrodes fines. A titre d'exemple, le séchage des électrodes épaisses est plus délicat, pouvant conduire à des craquelures de la couche enduite ou des problèmes d'adhésion sur le collecteur de courant. Nous n'avons pas trouvé beaucoup d'information sur le sujet dans la littérature, bien qu'il s'agisse d'un paramètre important d'un point de vue industriel (90). Le modèle OCA tient en partie compte de ces effets au travers du facteur de surcoût des électrodes lié à l'épaisseur $(T/T_{ref})^{0.2}$.

3.3.3 Durabilité

La durabilité des batteries dépend de plusieurs phénomènes, dont l'épaisseur de l'enduction des électrodes : plus elles sont épaisses, plus mauvaise sera la durabilité. Ce lien entre épaisseur d'enduction de l'électrode et diminution de la capacité dans le temps a été occasionnellement décrit dans la littérature, et reste difficilement quantifiable (73,91–93). Bien qu'il soit utile de mentionner ce lien, la quantification de cet effet est au-delà du cadre

de cette étude. Le sujet est vaste et complexe, et doit être approfondi dans la littérature, comme le suggèrent Zheng *et al.* (73).

3.3.4 Volume et masse

Le volume et la masse des cellules ont un impact sur le coût total des batteries : plus les cellules sont petites et légères (à iso-énergie), plus simple et bon marché seront les modules et le pack. De plus, les fabricants de voitures préfèrent des batteries légères pour des raisons d'économies d'énergie, et un surcoût raisonnable permettant de diminuer la masse peut-être envisageable. Ils sont aussi prêts à sacrifier en coût un gain de volume, pour des raisons d'intégration, particulièrement dans le cas de PHEV, où l'espace occupé est critique.

La Figure 38 montre que le NMC et le NCA permettent d'obtenir des cellules plus légères. En plus de réduire le coût, augmenter l'épaisseur de l'enduction permet de diminuer la masse et le volume des cellules, grâce à la réduction des matières non actives au sein de la cellule. Des réductions de volume et de masse d'environ 15 % sont obtenues pour des épaisseurs d'enduction variant de 50 à 100 μm .

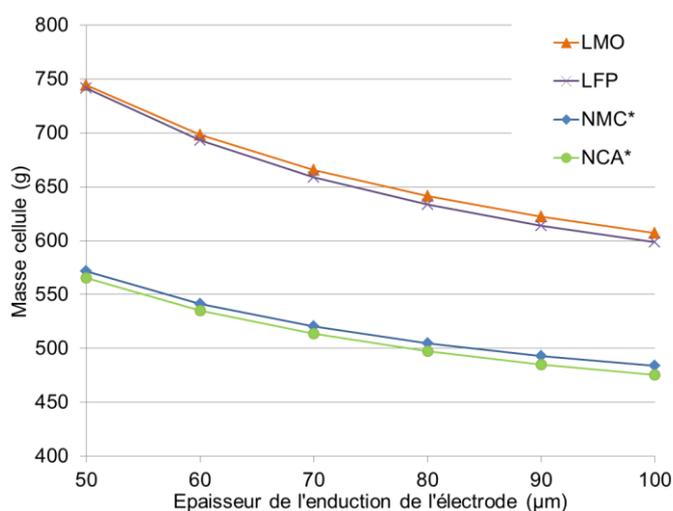


Figure 38 : Masse des cellules (iso-énergie) en fonction de l'épaisseur d'enduction de l'électrode (* l'électrode négative est limitante).

3.3.5 Effets d'autres paramètres

Pour cette étude, seule l'épaisseur de l'enduction est étudiée. Les effets d'une modification de la composition de l'électrode ou de la porosité de celle-ci sont des voies intéressantes d'optimisation de la conception de la cellule. Ces paramètres permettent de réduire le coût des cellules, avec une influence différente sur le comportement de la cellule que la modification de l'épaisseur d'enduction. Mise à part la porosité de la cathode LFP, les

paramètres ont été conservés comme ils étaient dans le modèle de conception de cellule BatPac. Des valeurs plus optimisées (notamment des ratios de matériaux actifs sur matériaux non actifs plus élevés) sont probablement utilisées par les fabricants de batteries (65,72,87,87,94–97)

3.4 Influence de la capacité surfacique d'électrode sur le coût

Nous suggérons donc d'utiliser la même épaisseur d'enduction des électrodes et la même porosité pour comparer l'effet sur le coût de différents matériaux. La classification de coût ainsi obtenue (Figure 35 où le coût des cellules est le suivant : NMC<NCA<LMO<LFP) semble en contradiction avec certaines données de la littérature (37,81). Mais si le paramètre épaisseur de l'enduction de l'électrode est remplacé par la capacité surfacique, comme c'est le cas dans ces documents, la classification des matériaux en fonction du coût est fortement modifiée (Figure 39). La technologie LMO est ainsi la moins chère à iso-capacité surfacique.

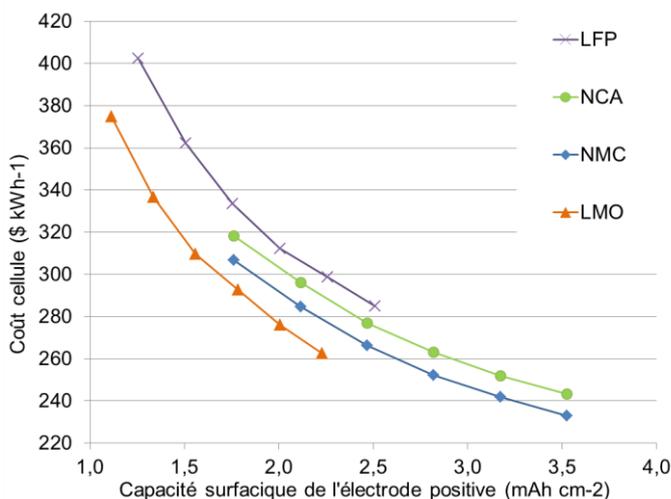


Figure 39 : Comparaison de coût de cellules en fonction de la capacité surfacique (les points correspondent aux épaisseurs d'enduction précédentes, allant de 50 à 100 µm)

Les deux paramètres sont liés : la capacité surfacique correspond à l'épaisseur d'enduction de l'électrode multipliée par la capacité volumique de l'électrode. La porosité étant la même pour tous les matériaux de cette étude (32%) sauf pour le LFP (40%), à épaisseur d'enduction identique, la capacité surfacique sera supérieure pour les composés ayant une meilleur densité volumique. Les capacités volumiques des électrodes (avec matières non actives et porosité incluses) sont : NMC = 359 mAh.cm⁻³, NCA = 392 mAh.cm⁻³, LFP = 251 mAh.cm⁻³

et LMO = 223 mAh.cm⁻³. Dans la même épaisseur d'enduction et porosité, le NCA a ainsi une capacité nettement plus élevée que le LMO.

Ainsi, pour une épaisseur d'enduction de 50 µm, la capacité surfacique du NMC et du NCA est de 1,76 mAh.cm⁻², alors qu'elle est de 1,11 mAh.cm⁻² pour le LMO et 1,26 mAh.cm⁻² pour le LFP. Ceci explique pourquoi le classement des chimies est différent si le paramètre de comparaison est l'épaisseur d'enduction ou bien la capacité surfacique (Figure 35 vs. Figure 39).

Cette remarque soulève une question : quel paramètre est le plus adapté pour établir une classification de coût des matériaux ? Etant donné que de nombreux scénarios sont envisageables, il n'est pas possible de répondre de manière générale à cette question. Cependant, pour les applications d'énergie, où des courants relativement faibles sont utilisés, les surtensions, et par conséquent les pertes, ne sont pas critiques. Notre point de vue, basé sur des discussions avec des fournisseurs de batteries, est que dans ce cas, la principale limitation de l'épaisseur d'enduction provient de la limitation en fabrication (qualité de l'enduction, distribution homogène des particules, tenue mécanique du faisceau d'électrodes, vitesse de fabrication limitée entre autres par la vitesse de séchage). C'est pourquoi nous avons utilisé ce paramètre pour la comparaison du coût de cellules pour des applications avec un typage énergie.

3.5 Sensibilité du modèle au coût des matériaux actifs

Une étude de sensibilité au coût des matériaux actifs a été faite. Pour chaque matériau, une plage de variation a été estimée, basée sur notre expertise (notamment les référentiels présentés dans le Chapitre VI) et sur les données de la littérature (Tableau 19). Pour le NMC et le NCA, le cours du cobalt et du nickel représentent un risque important pour le prix du composé, et par conséquent, la plage de variation est plus large que pour le LMO et le LFP.

Tableau 19 : Plage de variation des données de coût des matériaux

	Low value	Baseline	High value
NMC	23 \$.kg ⁻¹	27 \$.kg ⁻¹	31 \$.kg ⁻¹
NCA	29 \$.kg ⁻¹	33 \$.kg ⁻¹	37 \$.kg ⁻¹
LMO	11 \$.kg ⁻¹	14 \$.kg ⁻¹	17 \$.kg ⁻¹
LFP	18 \$.kg ⁻¹	21 \$.kg ⁻¹	24 \$.kg ⁻¹

La Figure 40 donne le coût maximum et minimum des cellules en utilisant ces valeurs, pour une épaisseur d'enduction de l'électrode de 100 µm. Le coût des cellules varie de 6,6% pour

le NMC, 6% pour le NCA, 4,6% pour le LFP et 6,3% pour le LMO. Les cellules avec du NMC et du NCA restent toujours les plus compétitives économiquement.

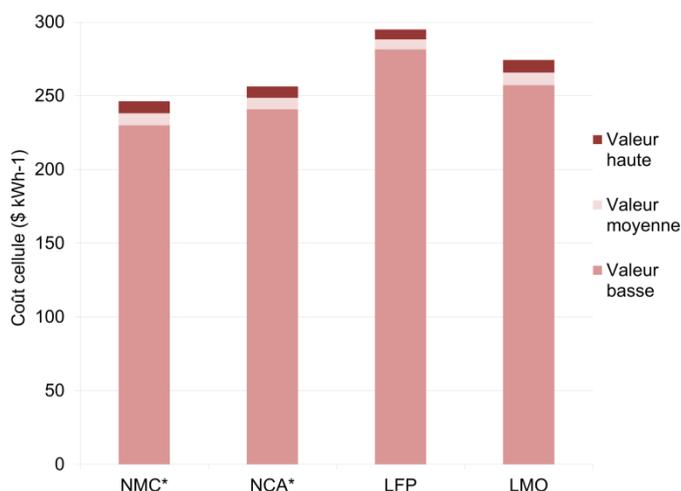


Figure 40 : Sensibilité du coût cellule au coût des matériaux actifs (épaisseur d'enduction de 100 μm)

3.6 Autres facteurs de coût

Certains éléments n'ont pas été étudiés, mais peuvent influencer le coût des batteries. Ainsi, pour certains matériaux avec une meilleure stabilité thermique, il est possible de réduire les coûts de plusieurs façons en conservant un niveau équivalent de sûreté (98). Il est ainsi possible d'augmenter l'énergie utilisable de la cellule. Il est aussi possible de se passer d'un séparateur céramique, tout en assurant un niveau identique de sûreté, avec des gains allant de 15 à 30 $\text{\$.kWh}^{-1}$ selon notre modèle. Il est aussi envisageable de se passer d'un système de refroidissement.

Le même solvant organique a été utilisé pour toutes les électrodes positives. Cependant, certains composés, notamment le LFP, peuvent être enduites avec un solvant aqueux, permettant une réduction du coût (99). Ceci offrirait des gains de l'ordre de 4 $\text{\$.kWh}^{-1}$ sur le coût de la cellule LFP.

Pour finir, les fabricants d'automobiles sont responsables du recyclage des batteries. Le coût de recyclage dépendra de nombreux paramètres, notamment du contenu en métaux à forte valeur, comme le cobalt ou le nickel. Ainsi, une batterie basée sur du NMC ou du NCA sera moins chère à recycler. Si on se base sur le rapport de Kwade *et al.* (100), la différence de coût de recyclage entre une batterie NMC et LFP serait de 2 $\text{\$.kWh}^{-1}$ moins chère pour le NMC. Cette différence étant fortement liée au cours des métaux, elle est susceptible d'évoluer dans le temps.

Une stratégie appliquée par certains fabricants, est d'utiliser des cathodes composites, avec un mélange d'au moins deux matériaux. De telles stratégies permettent une meilleure adéquation entre les caractéristiques techniques que le fabricant souhaite obtenir et les propriétés des composés.

4 Comparaison du modèle amont à la littérature

L'étude de l'influence de l'épaisseur d'enduction qui vient d'être présentée va être utilisée pour comparer sur un exemple concret les résultats obtenus avec le modèle amont OCA et un modèle de la littérature, BatPac. Grâce à la variation de l'épaisseur d'enduction et des matériaux, cet exemple permet de balayer de nombreux cas de figures.

Le modèle analytique est celui développé par le laboratoire Argonne (Batpac) (35,47), il constitue l'état de l'art de la littérature, mais est moins adapté que notre modèle pour cette étude de l'influence de l'épaisseur d'enduction selon notre vision. D'abord, l'usine modélisée est dédiée à une seule production, ce qui n'est pas une hypothèse habituelle pour l'analyse de coût des pièces automobiles. Ensuite, le nombre de couches dans la cellule n'est pas un inducteur de coût pour la fabrication. Enfin, un ralentissement du procédé de fabrication lorsque des électrodes plus épaisses sont fabriquées n'est pas pris en compte. Pour toutes ces raisons, nous estimons que notre modèle est meilleur pour étudier l'impact de l'épaisseur d'enduction des électrodes.

Pour mieux comprendre l'influence de ce choix, nous avons comparé les résultats des deux modèles (Figure 41). Les valeurs de coût matière de BatPac ont été remplacées par les nôtres (Tableau 17). Ainsi, les différences de coût entre les deux modèles ne sont liées qu'au procédé de fabrication et aux frais généraux et autres frais.

Les résultats sont présents sur la Figure 41 pour le NMC et le LFP. La réduction de coût est plus prononcée avec notre modèle. Ceci signifie que le coût est plus impacté par l'épaisseur d'enduction de l'électrode, notamment de par la prise en compte du nombre de couches comme inducteur de coût. L'effet de ce paramètre est donc logiquement plus important selon notre modélisation.

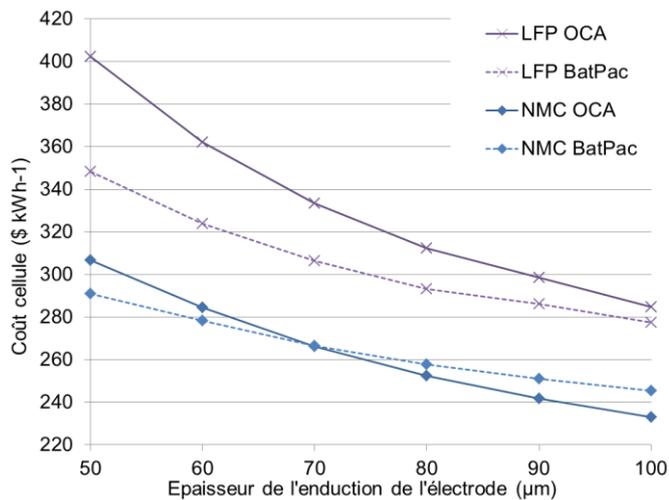


Figure 41 : Comparaison des résultats de l'OCA avec les résultats de BatPac (47)

La différence de coût entre les cellules LFP et NMC est plus marquée avec notre modèle qu'avec BatPac. Ceci est aussi lié à la prise en compte du nombre de couches dans la cellule. Or puisque la cellule LFP a plus de couches que la cellule NMC, l'écart de coût est plus conséquent.

5 Conclusion

L'un des modèles développés pour cette thèse, le modèle amont (OCA) a donc été utilisé pour réaliser une étude comparative du coût de quatre matériaux actifs d'électrode positive. Cette étude a permis de mettre en avant l'intérêt économique du NMC et du NCA au niveau cellule bien que ces matériaux contiennent du cobalt et du nickel. Cette étude a aussi permis de mettre en avant les biais possibles lors de la comparaison de différents matériaux. L'utilisation de l'épaisseur d'enduction de l'électrode ressort comme indispensable pour éviter de tirer des conclusions erronées lors de comparaison de matériaux actifs.

Les enjeux liés à l'épaisseur d'enduction ont aussi été mis en lumière : des électrodes plus épaisses permettent de réaliser des gains importants. Ainsi, il est possible de diminuer d'un quart le coût d'une cellule en passant d'une épaisseur d'enduction des électrodes de 50 à 100 μm. Nous préconisons donc d'orienter les recherches sur la compréhension des phénomènes limitant l'épaisseur. Cette étude sera utilisée dans le Chapitre VII de ce mémoire pour mettre en valeur la méthode d'évaluation des incertitudes. De même, la méthode proposée ici sera réutilisée pour une étude des matériaux prometteurs de batteries lithium-ion, dans le Chapitre VIII.

Chapitre VI. Développement de référentiels sur les matières et la fabrication

Dans ce chapitre, le référentiel sur les achats est présenté dans un premier temps, suivi du référentiel sur le procédé de fabrication. Enfin l'usine de référence qui a été construite à partir de ces bases de données pour simplifier la modélisation de coût est détaillée.

1 Introduction

Pour utiliser les modèles de coût qui ont été présentés dans le Chapitre IV, des informations économiques et techniques sur les achats et sur la fabrication sont nécessaires. C'est pour fournir ces informations que deux référentiels ont été mis au point. Ils servent à stocker et à mettre en parallèle l'ensemble des informations disponibles. Le périmètre de ces bases de données va de la fabrication des électrodes à partir des matériaux actifs, jusqu'à la cellule prête à l'emploi.

La création de ces référentiels est un travail complexe de par le nombre élevé de paramètres et de variantes à considérer, et le besoin de faire ressortir facilement des synthèses à partir des données. En effet, le référentiel achat recense environ 700 références matières à la date de ce rapport, représentant plus de 14 000 données actuellement dans ce fichier. Le référentiel de transformation recense lui environ 60 références pour le moment, représentant plus de 40 000 données dans ce fichier. Ces référentiels doivent de plus permettre d'ajouter aisément de nouvelles données. La méthodologie utilisée pour la construction de ces référentiels va être présentée.

2 Référentiel achats

Le référentiel achat est basé sur un fichier Excel, regroupant les informations portant sur les matières et composants pour cellules qui ont été recueillis au cours de la thèse. Celles-ci ont été obtenues soit lors de négociations avec des fournisseurs de batteries, de discussions

avec des industriels à plusieurs niveaux de la chaîne de fabrication, de projets dans lesquels Renault ou le CEA sont impliqués, de congrès sur les batteries ou encore d'informations publiques. Au total au moment de la rédaction de ce rapport, le référentiel contenait environ 700 références matières différentes.

Cette base de données a un rôle primordial dans la modélisation du coût des cellules pour batteries lithium-ion. En effet, l'achat des matières et des composants représente entre 50% et 70% du coût final d'une cellule selon les projets. Le coût de ces achats fluctue dans le temps, car il dépend d'un grand nombre de paramètres qui changent selon les projets et évoluent rapidement. Ainsi, on peut citer parmi les paramètres les plus influents : les variations induites par le cours des métaux de base, les parités des monnaies, les améliorations de fabrication sur ces produits récents.

Les matériaux représentant le poids le plus important dans les achats sont les matériaux actifs de cathode (environ 35% sur une batterie d'énergie, cf. Figure 42) et d'anode (10%), le séparateur (20%) et l'électrolyte (10%). La répartition des coûts matières présentée sur la Figure 42 est susceptible de varier fortement en fonction des cellules (typage de la batterie puissance ou énergie, chimie utilisée, choix des composants). Devant leur importance, les matériaux actifs de cathodes seront étudiées plus en détail dans ce chapitre.

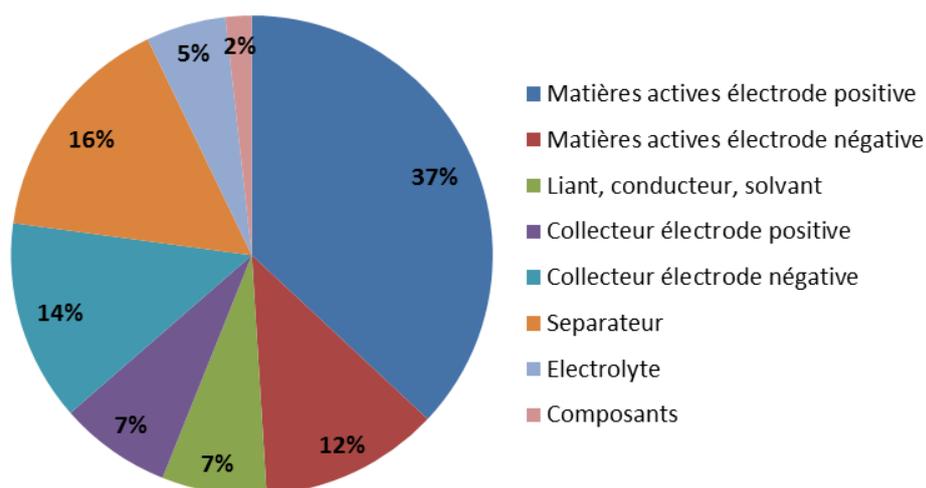


Figure 42 : Répartition des achats d'une cellule de format enveloppe souple pour véhicule électrique (type de cellule équipant par exemple la Nissan Leaf)

2.1 Les défis de l'estimation du coût des matières

Le référentiel sur les matières doit permettre d'appréhender les différents facteurs qui vont influencer le coût : les effets commerciaux et de volumes, l'instabilité du cours de certains métaux, l'évolution des technologies de production, et la différence de performance en

fonction des fabricants. Les matières et leurs inducteurs de coûts vont être analysés en détail en fonction de leur rôle dans la cellule. Mais avant de voir ce détail, les facteurs de coût communs à toutes les matières vont être exposés.

Un de ces facteurs est la variation des taux de change. Les achats de précurseurs, leur transformation et la vente du produit final se font généralement dans différentes monnaies. La variation des cours va entraîner une instabilité du coût. La Figure 43 montre la variabilité des principales parités utilisées sur le marché des batteries (euro, won, yen, yuan) par rapport à une monnaie référence (dollar US). Un cours supérieur à 100% signifie que le taux de change de la monnaie en USD est supérieur au taux référence du 01/02/14.

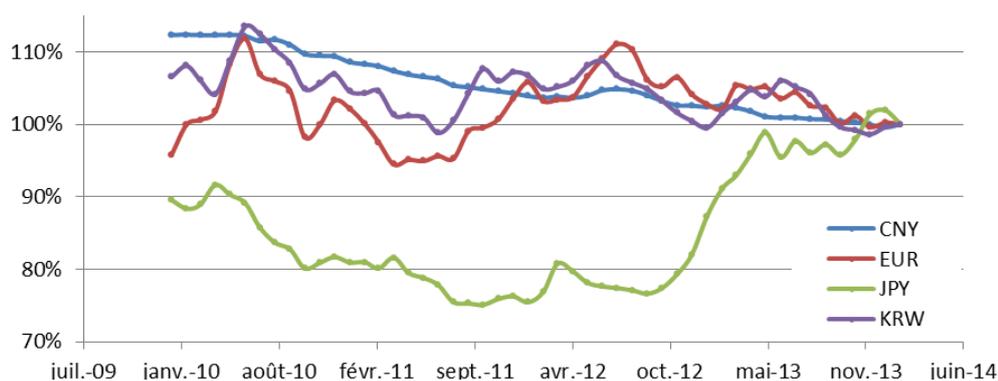


Figure 43 : Evolution relative au dollar US des parités principales du marché li-ion

Un autre facteur est l'existence de nombreux brevets sur les matières et leur fabrication. Ceci peut engendrer un surcoût pour certaines d'entre elles, pour les fabricants ne disposant pas des brevets et qui doivent par conséquent payer une licence pour avoir le droit de commercialiser le produit. Ainsi il est important de préciser avec un prix de matière, s'il existe une licence d'exploitation et si elle est incluse dans le prix.

Un point délicat de la définition de coût d'une matière est de déterminer quelle doit être la marge brute du fabricant, c'est-à-dire la différence entre le prix de vente et le coût de revient du produit. Celle-ci est le résultat d'une discussion entre le fournisseur de la matière et l'acheteur, qui se mettent d'accord sur une proportion permettant de préserver leurs intérêts respectifs. Cette gestion de la marge brute des fournisseurs se règle en pratique lors de la négociation. Dans le référentiel, il est important de tenir compte de cette marge. S'il est rarement possible de la connaître, on peut en revanche connaître les volumes associés à un coût, qui en tant que leviers de négociation ont une influence sur celle-ci.

Par contre, les volumes influencent aussi le coût technique, par des aspects d'investissements plus ou moins importants dans une usine. En effet, avec des volumes

élevés, il est possible d'investir dans des moyens de production à plus forte capacité, avec un amortissement à la pièce plus faible. Il est aussi possible de bénéficier de réduction sur les moyens de production et sur les matières en effectuant des achats plus nombreux de machines, et des achats plus importants de matière. Enfin, il est possible de remplir au mieux la ligne de production, pour amortir pleinement les moyens. L'effet volume a donc deux composantes, l'une commerciale et l'autre technique, qui sont difficiles à dissocier. Ceci montre l'importance de bien renseigner la quantité liée à un prix matière.

Enfin un dernier inducteur de coût peut-être la logistique. En fonction de la localisation des usines, il faut considérer un coût pour acheminer le produit final, qui dans le contexte mondialisé des batteries lithium-ion est souvent non négligeable. Ainsi, pour importer une matière, le coût de la logistique est de l'ordre d'un ou deux pourcent du coût de la matière. Ceci est toutefois une indication, susceptible de varier, notamment en fonction de la distance à parcourir, ou bien encore si le produit nécessite des conditions spéciales de transport pour raison de sécurité, comme c'est le cas par exemple pour l'électrolyte.

Comme nous pouvons le constater, de nombreux facteurs influencent le coût d'une matière. C'est pourquoi il est important de préciser les informations suivantes lorsqu'une donnée est ajoutée au référentiel : le type de matière et sa composition, la date à laquelle un prix est donné, les cours pour les métaux et les parités à cette date, et si ce prix tient compte ou non d'éventuelles licences.

2.2 Matériaux actifs d'électrode positive

Le coût des matériaux actifs pour l'électrode positive est fortement lié au coût des précurseurs à partir desquels elles sont fabriquées. Le coût des métaux de base constituant ces précurseurs est généralement le principal inducteur. Prenons l'exemple du NMC, probablement le matériau d'électrode positive le plus répandu actuellement dans les applications automobile (10,11,81).

Les deux métaux de transition cobalt et nickel jouent un rôle majeur dans le coût final de ce matériau (entre 35 et 45% du coût). Leur prix est lié à un cours de marché, celui du London Metal Exchange, qui fluctue au gré de la spéculation (*cf.* Figure 44). Il est donc important d'associer le contexte de cours des métaux au prix du composé. Réduire les quantités de ces deux métaux dans le composé aura donc pour effet de diminuer le prix au kilogramme de celui-ci et la volatilité de ce prix.

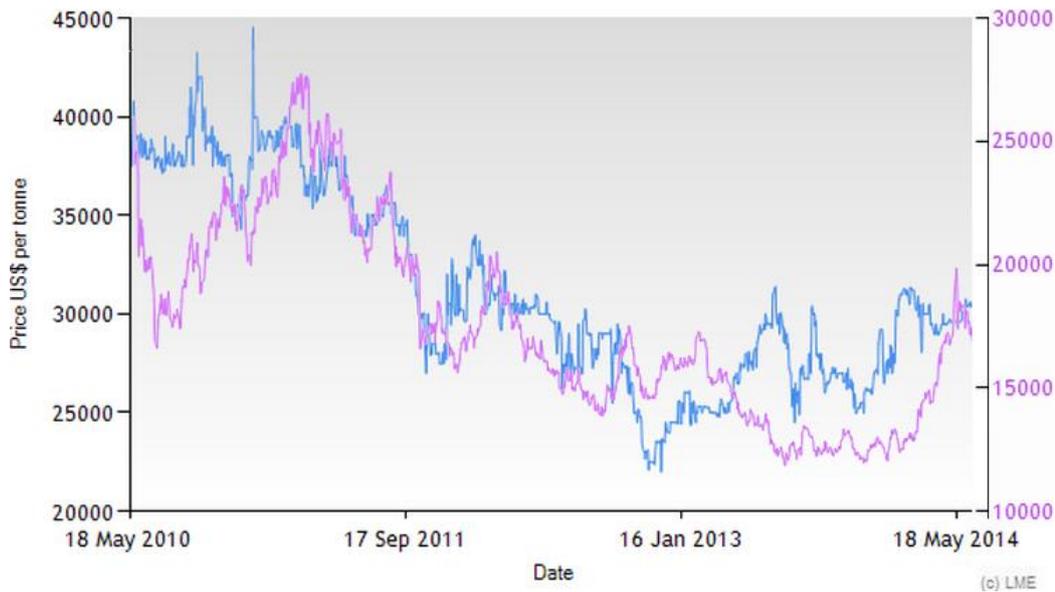


Figure 44 : Evolution du cours LME (USD.ton⁻¹) du cobalt (bleu) et du nickel (mauve)

Les matériaux actifs les moins coûteux au kilogramme sont donc ceux basés sur des éléments abondants, notamment les métaux de transition fer et manganèse. Ainsi le phosphate de fer et le spinelle de manganèse LMO sont moins chers en prix rapporté à la masse que les autres matériaux. Si l'on compare ces deux composés entre eux, le LMO a un prix au kilogramme inférieur au LFP : la différence provient d'une plus grande simplicité du procédé de fabrication du LMO comparé à celui du LFP, et de licences pour le LFP.

Malgré cette constatation sur le prix des métaux de base, le NMC et le NCA font partie des matériaux les plus répandus sur les batteries d'énergie pour véhicules électriques. En effet, le surplus de coût au niveau de la poudre (prix au kilogramme), peut-être plus que compensé au niveau cellule, grâce à des caractéristiques supérieures (capacité, tension, densité, durabilité), comme nous avons pu le constater dans l'étude du Chapitre V. Il peut être ainsi plus pertinent de comparer les matériaux actifs en termes de coût au kWh, même si cela ne permet pas de prendre en compte les gains liés à la capacité volumique (mAh.cm⁻³) du matériau.

La direction que semble prendre le marché des batteries pour véhicules électriques est celle de composés NMC avec une proportion de cobalt plus faible que celle du nickel et celle du manganèse, alors qu'actuellement, le NMC est souvent constitué de la même proportion des trois métaux de transition (NMC 333). Ainsi les nouveaux composés sont et seront moins sensibles à la forte volatilité du cours du cobalt, avec de meilleures performances (10).

Le référentiel mis au point au cours de cette thèse contient de nombreuses informations de fabricants de matières ou de fournisseurs de batteries sur les matériaux actifs d'électrodes positives. Deux extraits simplifiés du référentiel sont proposés sur la Figure 45 pour le NMC et le NCA et sur la Figure 46 pour le LMO et le LFP.

	Matière	Fournisseur	Pays de production	Quantité (Tonnes/an)	Prix sortie usine	Date
1	NCA	Fournisseur 1	Pays 1			26/05/2010
2	NCA	Fournisseur 1		1200 tpa		28/01/2013
3	NCA	Fournisseur 1		2000 tpa		28/01/2013
4	NCA	Fournisseur 1		4000 tpa		28/01/2013
5	NCA	Fournisseur 1		8000 tpa		28/01/2013
					Données confidentielles pour la version publique	
6	NMC	Fournisseur 9	Pays 4	50 tpa		03/12/2009
7	NMC	Fournisseur 3				14/12/2011
8	NMC	Fournisseur 3	Pays 2			14/12/2011
9	NMC	Fournisseur 10		1300 tpa		17/02/2012
10	NMC	Fournisseur 1	Pays 1			26/05/2010
11	NMC	Fournisseur 1	Pays 1			26/05/2010
12	NMC	Fournisseur 1	Pays 1	1200 tpa		28/01/2013
13	NMC	Fournisseur 1	Pays 1	2000 tpa		28/01/2013
14	NMC	Fournisseur 1	Pays 1	4000 tpa		28/01/2013
15	NMC	Fournisseur 1	Pays 1	8000 tpa		28/01/2013

Figure 45 : Extrait simplifié du référentiel achats sur le NMC et le NCA

Pour présenter les choses de manière simple, seul un petit nombre des données disponibles dans le référentiel est présenté afin d'illustrer les problématiques précédentes. De même, seule une partie des informations renseignées sur chaque matériau (nom du composé, fournisseur, pays, quantité, prix et date) pour chaque ligne est reportée dans la Figure 45 et la Figure 46.

Sur la Figure 45, les données d'un fournisseur (fournisseur 1) ont été principalement retenues pour cet exemple, afin de faire ressortir différents aspects du référentiel avec des données d'une même origine. Un premier aspect est l'importance des effets de volume, qui ressort sur le NCA (lignes 2 à 5) et sur le NMC (ligne 12 à 15), montrant des gains de 10% pour le NCA pour des volumes de 1200 à 8000 tonnes par an, alors qu'ils ne sont que de 4% pour le NMC selon ce fournisseur. Les raisons de cette différence ne sont pas claires.

L'influence de la date ressort aussi (*cf.* ligne 1 en 2010 contre 2 à 5 en 2013 et lignes 10 à 11 en 2010 contre ligne 12 à 15 en 2013). Avec environ trois ans d'écart, des écarts de prix d'environ 20% apparaissent pour le NCA et le NMC. La Figure 45 fait aussi ressortir le fait que toute l'information n'est pas disponible pour chacun des points observés (cases vides).

Ceci est dû à la difficulté d'obtenir des informations avec le niveau de détail souhaité. Mais il est tout de même intéressant de conserver toutes les informations dans le référentiel. Enfin, sur le NMC, la disparité de l'information en fonction de son origine ressort (ligne 6 à 15), avec des écarts de prix de 30%. Si les données sont dispersées, on distingue une tendance globale à la baisse dans le temps pour les deux matériaux.

Sur la Figure 46, un panel plus large de fournisseurs a été sélectionné. Lorsqu'aucun fournisseur n'est mentionné (ligne 3 et 5), cela signifie que l'information n'est pas issue d'un fournisseur direct du matériau.

	Matière	Fournisseur	Pays de production	Quantité (Tonnes/an)	Prix sortie usine	Date
1	LMO	Fournisseur 3	Pays 2		Données confidentielles pour la version publique	14/12/2011
2	LMO	Fournisseur 10		1200 tpa		17/02/2012
3	LMO					15/10/2012
4	LMO	Fournisseur 15	Pays 2			06/03/2013
5	LMO		Pays 3			06/03/2013
6	LFP	Fournisseur 17	Pays 4	1000 tpa		10/12/2009
7	LFP	Fournisseur 19	Pays 4	300 tpa		02/12/2009
8	LFP	Fournisseur 20	Pays 4	1000 tpa		01/11/2009
9	LFP	Fournisseur 4	Pays 4	1200 tpa		28/01/2013
10	LFP	Fournisseur 4	Pays 4	2000 tpa		28/01/2013
11	LFP	Fournisseur 4	Pays 4	4000 tpa		28/01/2013
12	LFP	Fournisseur 4	Pays 4	8000 tpa		28/01/2013
13	LFP	Fournisseur 16	Pays 1	2000 tpa		05/05/2011

Figure 46 : Extrait simplifié du référentiel achats sur le LMO et le LFP

Les informations sur le LFP font là encore ressortir un effet volume (ligne 9 à 12), avec une influence très importante, puisque les prix chutent d'un quart entre une quantité de 1200 tonnes par an et de 8000.

Les données sur le LFP de la ligne 6 et 8, ont un écart de 6 dollars par kilogramme, avec pourtant un contexte de volume, de temps et de pays identiques. Ceci illustre la disparité des retours que l'on peut rencontrer, dont les explications peuvent être nombreuses citons par exemple la performance du fournisseur, les conditions de la requête de prix, la date de validité du prix ou la prise en compte de licence (LiFePO₄+C Licensing AG). Les données retenues pour le LMO semblent indiquer une tendance à la baisse pour ce matériau.

Ces données sont cohérentes avec celles obtenues lors du projet Hélios et présentées dans le Chapitre V (NMC=27 \$.kg⁻¹, NCA=33 \$.kg⁻¹, LMO=14 \$.kg⁻¹, LFP=21 \$.kg⁻¹). En plus de ces retours, signalons qu'une méthode de modélisation du coût de ces matériaux a été mise

au point au cours de la thèse, et fait l'objet du Chapitre VIII. Selon le scénario central de modélisation des coûts avec cette méthode, le coût du LFP estimé est de 9,6 \$.kg⁻¹, 26,3 \$.kg⁻¹ pour le NCA, et 21,4 \$.kg⁻¹ pour le NMC. Soit des coûts nettement inférieurs à ceux de la Figure 45 et de la Figure 46. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette différence, notamment le moyen d'obtention des données pour le référentiel (questionnement de fournisseur de matière sans leviers de négociation), et l'existence d'un coût de marché différent du coût de revient calculé par la modélisation.

Signalons aussi, comme cela a été soulevé dans le Chapitre II, que certains matériaux actifs (NMC 532 et le LCO) font désormais l'objet d'une cotation non officielle par des organismes spécialisés, comme Asian Metal (<http://www.asianmetal.com>) ou Metal Pages (<http://www.metal-pages.com>). Ces cotations sont proches des coûts obtenus par la modélisation. Ainsi, la valeur du NMC de Metal Pages reprise dans l'état de l'art est de 19,4 \$.kg⁻¹ (cf. Chapitre II et (41)).

2.3 Matériaux actifs d'électrode négative

Le graphite est largement utilisé dans l'industrie, et des informations sur les méthodes de fabrication et le coût de celui-ci sont relativement accessibles. Mais il existe de nombreuses variantes, dont des grades dédiés au lithium-ion, et avec des prix très dispersés. Le LTO quant à lui est récent et développé uniquement pour les batteries. Il est susceptible de connaître une forte baisse si son utilisation se généralise. Les cours des matières semblent moins prépondérants dans ces composés d'électrode négative, que pour la positive. Le cours du titane influence légèrement le coût du LTO.

Le coût du graphite varie fortement en fonction des nombreuses variantes qui sont utilisées dans les batteries lithium-ion. De plus, il est fréquent que l'anode soit constituée d'un mélange de différents carbones (graphite naturel, hard carbone, soft carbone). Les ordres de grandeurs de Barnett *et al.*, Nelson *et al.*, Rempel *et al.*, indiqués dans l'état de l'art, situent le coût du graphite pour accumulateurs lithium-ion dans une fourchette entre 15 et 21 \$.kg⁻¹, ce prix est cohérent en comparaison des données du référentiel achats, même si des mélanges de ce graphite avec un autre matériau pourraient abaisser ce coût (35,37,44). Les indications de coût du graphite issues du projet européen Hélios (60), et utilisées dans le Chapitre V indiquent un coût de 18,5 \$.kg⁻¹ pour des quantités de 1000 tonnes par an.

La Figure 47 montre les visions de plusieurs fournisseurs sur le coût du LTO en fonction des volumes. Ces résultats ont été obtenus dans des contextes similaires. Cela fait ressortir les

disparités, d'une part en fonction des sources, d'autre part en fonction des volumes. Si le marché du LTO se développe, le prix du matériau peut ainsi être divisé de plus d'un facteur deux.

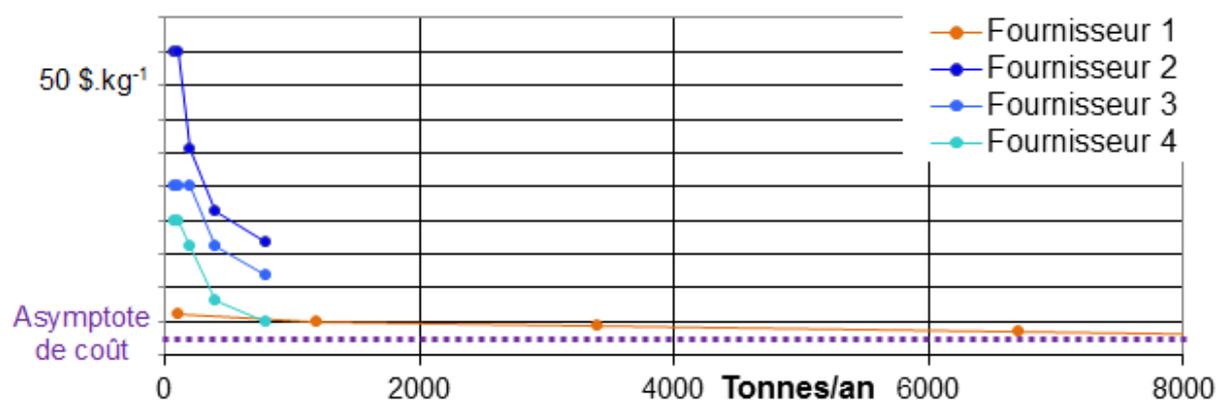


Figure 47 : Vision de coût LTO en 2020 en fonction des volumes selon plusieurs fournisseurs

Il faut toutefois signaler que le cas du LTO est particulier, car ce matériau est adapté à des batteries de puissance. Or celles-ci sont constituées de petites cellules avec de faibles quantités de matériau actif (environ 500 g par batterie) en comparaison avec les batteries d'énergie (environ 60 kg par batterie). Si le marché des batteries d'énergie basées sur du LTO ne se développe pas, il faudra qu'un nombre important de batteries de puissance au LTO soit fabriqué pour atteindre des seuils permettant de baisser les coûts de production de la matière. Ceci est envisageable dans le cas d'applications telles que les véhicules micro-hybrides.

2.4 Electrolyte et séparateur

Le Tableau 20 récapitule les données de l'état de l'art (reprises du Chapitre II) pour l'électrolyte et le séparateur. La valeur basse correspond à un séparateur polymère, et la valeur haute à un séparateur enduit d'une couche céramique sur chaque face. Les données de notre référentiel indiquent que des prix plus favorables que ceux du Tableau 20 sont pratiqués pour l'électrolyte, et que des prix du même ordre de grandeur que ceux du tableau sont observés pour le séparateur. Les indications de coût de ces matières, issues du projet européen Hélios indiquent des coûts de 15 €/kg⁻¹ pour l'électrolyte et de 2 €/m⁻² pour le séparateur. Pour le séparateur, il est préférable de donner un prix rapporté à la surface, qui est moins sensible aux variations d'épaisseur que le prix au kilogramme.

Tableau 20 : Données de la littérature pour l'électrolyte et le séparateur

	Valeur basse	Valeur haute
Séparateur	1,3 €.m ⁻²	2,6 €.m ⁻²
Electrolyte LiPF6	22 €.kg ⁻¹	26 €.kg ⁻¹

2.5 Autres composants d'une cellule

Le coût des feuillets collecteurs est constitué d'une part achat des métaux et d'une part transformation en film ultra fin. L'aluminium est principalement produit par laminage, alors que le cuivre l'est par électrodéposition. Une réduction de l'épaisseur de ces feuillets est une piste de gains de masse et de volume, voire de coût étudiée par les industriels. Les données recueillies dans le référentiel montrent que les valeurs sont légèrement inférieures aux données de la littérature vues dans le chapitre 2, qui étaient comprises entre 0,8 et 1,1 \$.m⁻² pour un film d'aluminium de 20 µm et entre 1,8 et 2,2 \$.m⁻² pour un film de cuivre de 10 µm. Ceci est aussi corroboré par la valeur pour le feuillet de cuivre obtenue au travers du projet Hélios, indiquant un coût de 1,7 \$.m⁻².

Les matières d'électrodes (hors matériau actif), telles que les liants, le solvant et les agents conducteurs, représentent au total une part du coût d'achats de la cellule d'environ 7% (cf. Figure 42). Pour les agents conducteurs (du carbone black en l'occurrence), les indications issues du projet Hélios indiquent un coût de 7,2 \$.kg⁻¹. En ce qui concerne l'enveloppe, il faut faire attention à bien prendre en compte le coût du film et de l'emboutissage de celui-ci. A priori l'emboutissage est effectué par le fabricant de la cellule,

Données confidentielles pour la version publique . Pour les cellules en boîtier rigide (prismatique ou cylindrique), la pièce est généralement fabriquée par un sous-traitant, et varie fortement avec la taille et les spécificités du boîtier. Le coût des clinquants varie aussi fortement en fonction des formats et des choix de conception.

2.6 Organisation du référentiel

La base de données achats est un document Excel regroupant les informations économiques sur les matières et composants des batteries lithium-ion recueillis au cours de la thèse. Le fichier de départ était déjà existant chez l'industriel et a été complété lors de la thèse. Le fichier est organisé en famille de matériaux (à l'image de la Figure 45 et Figure 46). Le référentiel achat recense environ 700 références, sur 35 familles de matériaux à la date de ce rapport. Les informations à renseigner sur chaque matériau sont les suivantes :

- Les renseignements sur le nom de la matière et du grade utilisé (à la fois les noms génériques et d'éventuelles appellations commerciales).
- Les renseignements sur le fournisseur, et la source du prix
- La date de l'information et la date de production
- La composition et la structure chimique de la matière
- Les conditions de production (pays, volumes, technique de synthèse)
- Les prix proposés avec les conditions de taux de change et éventuellement la logistique
- La décomposition du coût matière, du coût de fabrication et des frais généraux

Ainsi, la base de données achats permet de retrouver toutes les informations économiques disponibles sur les matières pour cellules lithium-ion et de les comparer entre elles. Les données y sont stockées avec toutes les informations disponibles sur le contexte. Elle est un des outils principaux de la modélisation de coût, et doit être mise à jour en permanence avec les informations disponibles.

3 Référentiel fabrication

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à la seconde base de données portant sur la fabrication. Comme pour la base de données achats, la méthode de construction et les enjeux de celle-ci seront expliqués. Afin de simplifier la description, le détail étape par étape n'est pas retranscrit, et une décomposition en trois parties est utilisée (fabrication des électrodes, assemblages des cellules et formation).

Le référentiel de fabrication (ou référentiel de transformation), est un document regroupant l'ensemble des données accumulées sur les coûts directs et indirects de transformation. Ces données ont été obtenues soit lors de négociations avec les fournisseurs de batteries, de discussions avec des industriels, de projets dans lesquels Renault ou le CEA LITEN sont impliqués, ou encore d'informations publiques. Le référentiel de transformation recense environ 60 références industrielles différentes à la date d'écriture de ce mémoire.

Le but principal de ce référentiel est de servir de support à la modélisation de coût des batteries lithium-ion, mais il permet aussi de faire des recoupements de données sur le procédé de fabrication. Pour donner un ordre de grandeur, la valeur de transformation représente environ un quart du coût d'une cellule de type énergie. Dans le cas des batteries de puissance, la part de transformation augmente de par la conception de ces batteries. Une

présentation de l'organisation des données dans ce référentiel de fabrication va d'abord être faite. Ensuite un aperçu des données contenues dans celui-ci sera donné.

3.1 Organisation des données dans le référentiel

Les défis qui se posent pour la construction, l'entretien et l'utilisation du référentiel de transformation sont multiples. D'abord, il est délicat d'obtenir des données fiables dans un milieu opaque et concurrentiel, où de plus les évolutions sont rapides. Ensuite, il est difficile de faire des recoupements de données qui ont des périmètres différents (type de cellule, variation sur le procédé). De plus, le nombre d'étapes et de techniques utilisées au cours de la fabrication est relativement élevé, ce qui complexifie le travail, tout comme les effets de localisation de la production ainsi que des taux de change.

Le référentiel est un fichier Excel, dans lequel l'information sur le procédé de fabrication est découpée en 5 grandes parties : fabrication des électrodes, assemblage des cellules, formation des cellules, structure de l'usine et assemblage des modules (cf. Figure 48). Ces parties sont elles-mêmes décomposées en plusieurs opérations, représentées sur la Figure 48.

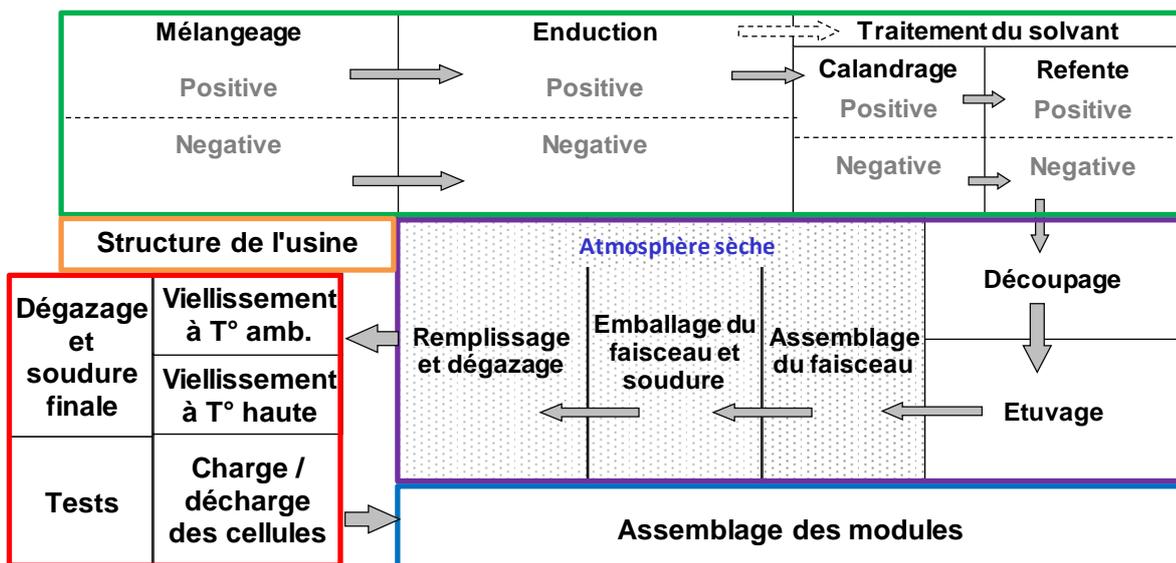


Figure 48 : Découpage de la fabrication dans le référentiel : vert=fabrication électrodes, bleu foncé =assemblage cellules, rouge=formation, orange=structure usine et bleu clair=assemblage modules

Des synthèses graphiques de chacune des étapes de fabrication sont disponibles dans ce fichier et seront présentés dans le paragraphe 3.2. Les informations qui sont entrées dans ce référentiel sont présentées en annexes (cf. Annexes 2) afin de rendre intelligible la construction du fichier. Ce référentiel représente une avancée majeure de la thèse : offrir une

organisation d'informations disparates sur la fabrication, qui les rend utilisables pour nos modèles de coût, et qui permet de faire des comparaisons sur les performances de différents procédés de fabrication.

3.2 Graphiques récapitulatifs

Afin de montrer concrètement l'étendue de l'information disponible dans le référentiel, les graphiques résumant l'information sur le coût d'investissement et la MOD pour les ateliers de fabrication des électrodes, d'assemblage des cellules et de formation sont présentés dans les paragraphes suivants. Pour réaliser ces figures, des conditions équivalentes ont été prises pour chaque point, pour déterminer la capacité maximale de la machine : fonctionnement de l'atelier en 7200 heures par an et considération du taux de rebuts.

L'information ne parvient pas par une voie unique. Par conséquent elle est distordue, de fiabilité plus ou moins élevée, et basée sur des contextes et des hypothèses éparses. Les données ont donc été formatées pour pouvoir être convenablement ajoutées au référentiel.

Les graphiques du paragraphe suivant et de l'annexe (*cf.* Annexes 2.2) représentent l'ensemble des points disponibles par grande opérations (*cf.* Figure 48) au mois de décembre 2013. Les données qu'ils contiennent n'ont volontairement pas été triées dans les graphiques qui sont reproduits ici, et par conséquent, le contexte (date, lieu, origine) des points n'est pas identique. Si le détail étape par étape est disponible dans le référentiel, seuls les graphiques pour les grandes étapes ont été repris. En effet, étant donné le nombre élevé d'étapes de transformation, il serait laborieux de faire le détail complet de celles-ci dans ce rapport. De plus, il s'agit de données confidentielles, et les regrouper permet de diminuer le détail de l'information, tout en offrant un panorama intelligible.

3.2.1 Fabrication des électrodes

L'inducteur de coût global utilisé pour cet atelier est la surface d'électrode traitée par an. On parle ici en surface enduite des deux côtés, ainsi 1 m² correspond à un feuillard d'un mètre carré, enduit de un mètre carré de matière sur une face et d'un autre mètre carré sur l'autre face. Nous nous intéressons à la fabrication globale des électrodes, incluant les électrodes positive et négative.

En pratique, le procédé de fabrication de l'électrode est décomposé en étapes élémentaires au sein du référentiel (soit 9 étapes, *cf.* Figure 48), permettant de traiter l'analyse fine de nombreux points de détails. Ainsi, l'inducteur de coût n'est pas le même pour chaque étape :

la quantité de matériau actif produite pour le mélangeage, la surface d'électrode traitée par an pour l'enduction et le calandrage et la longueur de feuillard que la machine peut découper pour la refente. La Figure 49 représente donc l'investissement pour l'ensemble de l'atelier électrode en fonction de l'inducteur principal retenu, la capacité en surface d'électrode produite.

Données confidentielles pour la version publique

Figure 49 : Fabrication des électrodes, investissements en fonction de la surface d'électrode (fournisseur 1=croix, fourn.2=tiret, fourn.7=carré, fourn.8=rond, BatPac=triangle)

Une batterie comme celle de 16 kWh qui équipe la Mitsubishi i Miev (même voiture que la Peugeot iOn et la Citroën C-ZERO) contient 88 cellules de 50 Ah (101). En faisant l'hypothèse de 2 mAh.cm⁻² par face, ceci représente 2,5 m² d'électrode (positive et négative) par cellule, soit environ 220 m² d'électrode par batterie. 20 millions de mètres carrés d'électrode correspondent donc à environ 90 000 batteries lithium-ion de 16 kWh. Sur la Figure 49, le point de BatPac (triangle orange), correspond à 13 millions de m² de capacité électrode par an, pour un investissement supérieur à 20 millions d'euros (l'axe horizontale ne coupe pas l'axe vertical au 0).

L'obtention d'informations fiables et de sources variées sur la performance des machines (qui par ailleurs est susceptible de s'améliorer fortement dans le temps), demande des contacts étroits et réguliers avec des fabricants de batteries ou de machines. Une fois

l'information obtenue, elle est ajoutée au référentiel. Elle apparaît alors dans les graphiques récapitulatifs tels que celui de la Figure 49, sans que les données sous-jacentes n'apparaissent. Il est donc important de rappeler que ces informations ne sont pas données pour des contextes équivalents.

Ainsi les points du fournisseur 1 (les croix) correspondent à des informations obtenues au cours de la même année, mais avec des dates de lancement du projet différentes, plusieurs hypothèses de pays de production et des applications différentes (puissance ou énergie). Ces informations de contexte ne peuvent pas être présentées ici, car elles sont liées directement à des informations confidentielles. Malgré ces différences de contexte entre les points, la Figure 49 fait ressortir une ligne de tendance dans les données d'investissement.

La Figure 50 représente l'investissement total du poste de fabrication d'électrodes en fonction de la capacité de stockage d'énergie fabriquée par an. Les données proviennent de 33 sources différentes (une source pouvant provenir d'un même fabricant de batteries). A titre indicatif, 500 mégawattheures par an représentent environ 20 000 batteries pour Renault Zoé par an.

En dehors du fournisseur 7 (carré rouge), un nuage de points en relative cohérence se dessine, avec là encore des écarts liés au contexte des données (date de l'information, génération de la machine, pays d'installation). Elle contient plus de points que la Figure 49, car la quantité d'énergie fabriquée par an est une donnée plus facilement accessible. Elle est aussi moins cohérente à cause des différences, notamment entre des batteries privilégiant une forte énergie massique (véhicule électrique), d'autres privilégiant une forte puissance massique (véhicules hybrides) et des batteries intermédiaires (Véhicules hybrides rechargeables), différences que la surface d'électrode produite permet de mieux prendre en compte. Ceci est la principale raison du décalage des points les uns par rapport aux autres entre la Figure 50 et la Figure 49.

Données confidentielles pour la version publique

Figure 50 : Fabrication des électrodes, investissements en fonction de la capacité de stockage produite (MWh.an⁻¹) (fournisseur 1=croix, fourn.2=tiret, fourn.7=carré, fourn.8=rond, BatPac=triangle)

Si ce graphique permet de faire ressortir une tendance, il faut là encore faire attention aux écarts liés au contexte des données (date de l'information, génération de la machine, pays d'installation). Ainsi, les deux points du fournisseur 1 qui sont positionnés nettement au-dessous des autres (croix violette et croix verte) sont issus de projections en 2012 des investissements à l'horizon 2020. Au contraire, le point du fournisseur 7 (carré rouge) nettement décalé par rapport aux autres est une projection datant de 2006, donc probablement obsolète.

Pour les informations du fournisseur 2, certaines informations ont été fournies en 2009, alors que d'autres l'ont été en 2014. De plus elles portent sur des projets différents, avec des batteries à plus ou moins forte énergie. Il est donc normal d'observer une dispersion. Ces données (regroupées dans l'ovale en pointillés noirs) montrent une amélioration de la productivité des machines pour le même investissement initial, la capacité augmente au fil des ans (les points restent sur la même ligne horizontale). Cette observation est toutefois à corriger des différences de typage des électrodes.

En ce qui concerne la main d'œuvre directe, des graphiques équivalents à ceux des investissements sont disponibles dans le référentiel (*cf.* Figure 51) et permettent de faire une estimation des besoins.

Données confidentielles pour la version publique

Figure 51 : Fabrication des électrodes, main d'œuvre directe en fonction de la capacité de stockage produite (MWh.an⁻¹) (fournisseur 1=croix, fourn.2=tiret, fourn.7=carré, fourn.8=rond, BatPac = triangle)

Le besoin de main d'œuvre est de 20 personnes pour la plupart des fournisseurs, et semble ne pas dépendre de la capacité avec les conditions utilisées. Le point du fournisseur 7 (carré rouge) est décalé, mais comme cela a été noté précédemment, il s'agit d'une projection de 2006. Le point du fournisseur 2 (tiret vert foncé) est décalé, mais un doute sur l'information est présent, car il s'agit d'une information orale, avec un fort risque de mauvaise compréhension. Le point a tout de même été gardé pour illustrer cette difficulté que l'on peut rencontrer dans la documentation du référentiel. Certains points apparaissent dans la légende, mais ne sont pas visibles sur le graphique, simplement parce qu'ils sont cachés par d'autres points.

3.2.2 Assemblage et formation des cellules

Pour la fabrication des électrodes, le recouplement de données entre plusieurs sources était relativement simple, la méthode de transformation étant quasiment identique pour tous les fabricants. Par contre pour l'assemblage et la formation des cellules, il existe de fortes disparités entre les fabricants. La comparaison porte donc sur des procédés qui ne

correspondent pas forcément au même objet (cellule cylindrique, boîtier rigide ou souple, capacité de la cellule, typage) ni sur la même méthode d'assemblage (empilement, enroulement, découpage facultatif des collecteurs). Pour des raisons de simplification de la lecture de ce mémoire, l'analyse des graphiques portant sur la partie assemblage et formation des cellules est reportée en annexe (*cf.* Annexes 2.2).

Le référentiel de fabrication a donc été présenté. Il s'agit d'une avancée majeure obtenue lors de ce travail de thèse, aussi bien d'un point de vue méthodologique, devant les difficultés particulières que posent ces référentiels, que d'un point de vue de la modélisation de coût, pour laquelle ces données sont requises. Cette base de données contient plus de 40 000 informations, et peut aussi être utilisée pour faire des comparaisons directes sur le niveau compétitif de fabricants sur une opération donnée.

4 Usine de référence

Dans ce chapitre, la méthodologie de construction de l'usine de référence à partir des données du référentiel va être présentée. Une comparaison qualitative entre les données de cette usine de référence, et celle définie pour le logiciel BatPac sera faite (35,47).

L'usine de référence sert de base unique pour effectuer les calculs de coût. Cette usine est conçue pour produire environ 1,25 GWh de cellule d'énergie par an, ce qui correspond à la capacité d'une usine de batteries pour automobile à l'heure actuelle. En équivalent batteries pour véhicules électriques (type BMW i3), cela représente environ 50 000 batteries. Les cellules considérées sont basées sur un format en enveloppe souple et ont une énergie de l'ordre de 130 Wh. La fabrication se fait avec un fonctionnement de l'atelier en quinze équipes, à un nombre de jours équivalent à 300 jours par an de production effectivement pleine, soit 7200 heures par an. Une grande partie des opérations sont effectuées dans une salle avec une température et une humidité légèrement contrôlées (environ 23°C et 45% d'humidité). Les étapes d'assemblage cellules sont-elles effectuées sous atmosphère sèche.

Une description du procédé de fabrication retenu va être faite. Les valeurs d'investissement et de main d'œuvre ne seront pas communiquées pour des raisons de confidentialité, mais les données seront présentées de manière qualitative par rapport à la littérature. Ces données seront amenées à évoluer avec l'amélioration des technologies de fabrication.

4.1 Fabrication des électrodes

4.1.1 Description du procédé retenu

La fabrication des électrodes se fait sur deux lignes séparées, une pour l'électrode positive, et l'autre pour la négative. Les lignes d'enduction des matières sur les collecteurs de courant de l'électrode positive et négative constituent le point bouchon de ces lignes. Les collecteurs ont une laize

Données confidentielles pour la version publique

Figure 52 : Représentation du feillard enduit de l'électrode négative

Le solvant utilisé pour l'électrode positive est la NMP et pour l'électrode négative, l'eau. Avec une formulation aqueuse, il n'y a pas besoin de récupérer ni de recycler les vapeurs d'eau sortant du four, ce qui offre un avantage conséquent. Les machines de calandrage et de refente fonctionnent à une vitesse supérieure ($60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) à celle de la machine d'enduction, avec une laize identique (600 mm). Ces étapes étant assez simples et relativement peu coûteuses, des surcapacités sont installées pour compenser d'éventuelles pannes.

4.1.2 Comparaison qualitative des données avec la littérature

Afin de fournir un aperçu des données sélectionnées, une comparaison des données de l'usine de référence avec celles de BatPac (35,47), est proposée dans le Tableau 21. Ceci permet de situer le niveau de nos données en évitant de révéler des données confidentielles. Le symbole « + » indique que l'investissement nécessaire pour produire la quantité associée est plus cher ou que la MOD est plus nombreuse selon nos données, alors que le symbole « - » indique le contraire. L'utilisation de deux symboles signifie un écart relativement important. Trois symboles signifient au moins un ordre de grandeur d'écart. Le symbole « 0 » signifie que les données sont très proches. La vision de BatPac est présentée comme étant valable pour 2020 aux Etats-Unis, alors que la nôtre correspond à un contexte de temps plus proche, et à des localisations asiatiques (Chine, Corée ou Japon).

Tableau 21 : Comparaison de l'atelier de fabrication des électrodes entre l'usine de référence et les données de BatPac (35)

<i>Données confidentielles pour la version publique</i>						

Données confidentielles pour la version publique

4.2 Assemblage des cellules et formation

4.2.1 Description du procédé retenu

Les données d'investissements utilisées pour la partie assemblage des cellules correspondent à une chaîne de fabrication de cellules en emballage souple, avec un faisceau d'électrodes empilées. L'étape de dégazage est considérée ici alors qu'elle a lieu au cours de la formation, car les machines de dégazage relèvent de technologies homogènes avec celle de l'assemblage des cellules. Le point bouchon est l'assemblage du faisceau d'électrodes, constitué de plus de 100 couches d'électrode positive, négative et séparateur dans le cas considéré.

L'assemblage des cellules se déroule dans une salle anhydre. S'il pourrait éventuellement être envisageable d'ajouter des informations d'investissements sur ce point dans le modèle, il est considéré sous la forme de frais de fonctionnement, répartis sur l'ensemble des étapes de l'assemblage cellule.

L'étape du cycle de formation prend une vingtaine de jours pour l'usine de base et nécessite beaucoup de place pour stocker les cellules. Les opérations consistent à charger et décharger partiellement la cellule à plusieurs reprises et à deux températures différentes. Au cours de ces opérations, les caractéristiques de la cellule sont testées à plusieurs reprises. Le transport des cellules entre les différents lieux de stockage est assuré de manière automatique.

4.2.2 Comparaison qualitative des données avec la littérature

Une comparaison des données de l'usine de référence avec celles de BatPac (35,47), pour l'assemblage des cellules est proposée dans le Tableau 22. Comme précédemment, le symbole « + » indique que l'investissement nécessaire pour produire la quantité associée est plus cher ou que la MOD est plus nombreuse selon nos données, le symbole « - » indique le contraire.

Tableau 22 : Comparaison de l'assemblage des cellules entre l'usine de référence et les données de BatPac (35)

<i>Données confidentielles pour la version publique</i>						

Données confidentielles pour la version publique

Une comparaison des données de l'usine de référence avec celles de BatPac (35,47), pour la formation est proposée dans le Tableau 23. Comme précédemment, le symbole « + »

indique que l'investissement nécessaire pour produire la quantité associée est plus cher ou que la MOD est plus nombreuse selon nos données, le symbole « – » indique le contraire.

Tableau 23 : Comparaison de l'étape de formation entre l'usine de référence et les données de BatPac (35)

Données confidentielles pour la version publique

4.3 Frais de fonctionnement et d'entretien

4.3.1 Description des frais retenus

Les frais de fonctionnement et d'entretien regroupent les fournitures, l'outillage, les fluides et l'énergie, la maintenance et l'infrastructure. Leur calcul est basé sur des recoupements d'informations fournisseurs, à l'aide des données du référentiel de transformation.

Données confidentielles pour la version publique

La consommation d'énergie (gaz et électricité) nécessaire à la fabrication des électrodes et à l'assemblage des cellules est estimée à environ $300 \text{ MJ}_{\text{consommé}} \cdot \text{kWh}_{\text{cellule}}^{-1}$. Ces estimations dépendent du produit, des matières, du fabricant, du remplissage de la ligne et des taux de rebuts. Le coût de ce poste dépendra fortement du coût de l'énergie dans la région de l'usine, et de la proportion de gaz et d'électricité.

La partie infrastructure a été traitée de deux façons : une partie de cette infrastructure est déjà comprise dans l'amortissement des moyens de production, puisque les investissements fournis contiennent le coût machine plus les frais d'installation. L'infrastructure qui est considérée dans les frais de fonctionnement et d'entretien correspond à des frais de type loyers, entretien des bâtiments de l'usine, assurances, taxes foncières, chauffage... C'est pour la formation que les frais d'infrastructures sont les plus élevés de par la nature de l'opération : un stockage sur une longue durée de la cellule.

4.3.2 Comparaison avec des données de la littérature

Selon nos estimations, l'énergie nécessaire à la fabrication d'une cellule complète, hors matières est d'environ 300 MJ.kWh⁻¹. Pour rappel du Chapitre III et de l'annexe 1.2, les valeurs données par la littérature sur le sujet, objets d'un débat important dans la littérature sur l'analyse du cycle de vie des batteries, sont reprises ici. Pour Notter *et al.* elle est de 7,9 MJ.kWh⁻¹ sur le même périmètre (102). Pour Amarakoon *et al.*, elle varie de 670 à 970 MJ.kWh⁻¹ en fonction des matériaux d'électrode utilisées (103). Pour Ellingsen *et al.*, elle est comprise entre 586 et 2 318 MJ.kWh⁻¹ (104). Selon une publication de Dunn *et al.* elle est de 10,7 MJ.kWh⁻¹ (104,105). Pour comparaison, la consommation d'électricité d'une batterie sur la durée de vie du véhicule est d'environ 2 MWh_{consommé}.kWh_{batterie}⁻¹, soit 7 200 MJ_{consommé}.kWh⁻¹. Ceci correspond au service rendu par la batterie.

4.4 Rebut

4.4.1 Rebut pratiques

La fabrication de cellules lithium-ion avec des capacités supérieures à 30 Ah pour des applications automobiles est récente et soumise à de nombreuses contraintes de qualité qui engendrent des taux de rebut de fabrication souvent élevés en comparaison d'autres industries. L'hypothèse formulée dans le modèle OCA était ainsi de 9% de surplus de matière à apporter. Ce taux est décomposé étape par étape pour l'usine de référence, mais est confidentiel.

4.4.2 Cascade des rebus

La cascade des rebus est la correction du taux de rebus pour une étape donnée lorsque plusieurs machines (n) sont en série, pour intégrer les étapes amont dans le calcul du coût des rebus à l'étape. Ce calcul doit donc être fait manuellement dans le modèle MAC. La méthode consiste à modifier le taux de rebus pratique pour que le coût de la transformation amont soit intégré artificiellement dans le calcul. La formule à utiliser est donnée dans l'Équation 8 :

Équation 8 : calcul de la cascade des rebus

$$\text{Taux de rebut corrigé} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Coût de l'opération})_i}{\text{Coût de l'opération}_n} * \text{Taux de rebut pratique}$$

Cette cascade des rebuts permet de montrer le coût réel des rebuts à chaque étape. Mais elle fait aussi ressortir un artefact sur l'étape de formation. En effet, les rebuts sur cette étape sont importants et coûtent cher car c'est la dernière étape de fabrication. Pourtant, les rebuts sur cette étape ne sont pas dus à des raisons intrinsèques à celle-ci, mais au fait que des défauts intervenus en amont ne ressortent qu'à cette étape. Ainsi les rebuts représentent un coût important pour cette étape alors que le problème est situé en amont.

L'usine de référence, permettant notamment d'effectuer une modélisation reproductible et robuste, car basée sur des données soigneusement sélectionnées a donc été présentée. Une comparaison qualitative avec les données de la littérature a été faite.

5 Conclusion

Deux référentiels supports ont donc été créés pour cette thèse, l'un sur les achats de matières et de composants, et l'autre sur le procédé de fabrication. Ces référentiels constituent une avancée importante de la thèse, notamment en raison de leur rôle majeur dans la modélisation de coût, et des difficultés importantes rencontrées lors de leur construction. Ces référentiels ont été conçus de façon à mettre en valeur l'information et à pouvoir extraire des résultats utiles. A partir de ces référentiels, une usine de référence a été mise au point. Le but de cette usine est de faciliter les modélisations. Ces outils sont indispensables à la modélisation du coût, car ils permettent d'utiliser des valeurs fiables, à jour, et dans plusieurs contextes de date, de localisation ou encore de volume.

Ces référentiels présentent aussi un intérêt pour évaluer l'incertitude des données d'entrée de la modélisation de coût, comme nous allons le voir dans le prochain chapitre qui se propose de fournir une méthode pour l'évaluation de l'incertitude des résultats obtenus avec les modèles développés dans ce travail.

Chapitre VII. Analyse de l'incertitude des résultats

Dans ce chapitre, une méthode de détermination de l'incertitude associée aux résultats de la modélisation de coût est proposée. Dans un premier temps les sources d'incertitudes sont définies. Ensuite le fonctionnement de la méthode, basée sur des simulations de Monte Carlo est décrit. Enfin, une méthode pour cadrer le choix des distributions des données d'entrée est proposée.

1 Introduction

L'incertitude finale des résultats obtenus est une question importante pour ce travail de modélisation des coûts. En effet, devant l'importance des décisions stratégiques qui pourront découler des résultats, il est nécessaire d'évaluer de manière objective la confiance que l'on peut avoir dans le résultat.

La méthode utilisée pour déterminer l'incertitude doit être capable de prendre en compte l'ensemble des incertitudes et des imprécisions auquel la modélisation de coût est confrontée, et de quantifier le poids de chacun des postes d'incertitude. Face à ces besoins et au nombre important de données d'entrées, les méthodes de type Monte Carlo ont été détectées comme permettant potentiellement de répondre à ces questions. Leur utilisation va donc être étudiée afin de vérifier si elles conviennent, et permettent d'obtenir des résultats satisfaisants.

2 Source d'incertitude

Le terme incertitude recouvre un ensemble de notions différentes et il est nécessaire de définir le sens donné à ce mot dans ce travail. Pour nous aider dans cette tâche, nous nous appuyons sur la définition de Benetto (106). Il décompose le terme incertitude en trois éléments indépendants : la variabilité, l'imprécision et l'incertitude au sens strict. Nous allons reprendre ici ces définitions pour l'analyse du cycle de vie, en les adaptant au contexte du mémoire.

2.1 Variabilité

La variabilité traduit les aléas et le hasard. Elle donne lieu à des erreurs dites « aléatoires » issues de la somme de toutes les variations induites par les phénomènes extérieurs à la modélisation de coût (106). Pour notre application, la modélisation de coût d'un système, cette catégorie contient ainsi l'évolution des parités monétaires et du cours des métaux, qui varient de manière stochastique.

2.2 Imprécision

L'imprécision dérive des erreurs dans la modélisation. Elles sont dues à une modélisation imparfaite, qui induit des erreurs dans le résultat final (106). Dans le cas de la modélisation de coût MAC, nous formulons l'hypothèse qu'il n'y a pas d'imprécision, car le modèle décrit le coût à un niveau de détail identique à celui des industriels. L'imprécision de la méthode sera donc considérée comme nulle avec ce modèle. Dans le cas de la modélisation OCA, la décomposition du procédé est moins précise, et des artéfacts de modélisation sont susceptibles d'apparaître. C'est pourquoi une part d'imprécision liée au modèle sera considérée avec ce modèle. A l'aide de comparaison de résultats obtenus avec le modèle MAC et de résultats de l'OCA, nous estimons que cette incertitude est de l'ordre 2,5% pour le modèle OCA.

2.3 Incertitude au sens strict

L'incertitude au sens strict est le manque de confiance sur les données d'entrée de la modélisation économique, et ce par rapport au contexte de l'étude. Les éléments de contexte sur la donnée peuvent en effet indiquer que cette dernière ne correspond pas à une donnée commerciale pour le contexte de l'étude, et ce pour plusieurs raisons, qui seront détaillées par la suite (106).

Pour nos modélisations de coût, le but est (sauf cas exceptionnels) de sélectionner les meilleurs prix du marché à prestation donnée, pour calculer la valeur de coût la plus optimale. Le but de la modélisation de coût est dans la plupart des cas de faire ressortir le coût le plus attractif qui puisse exister sur le marché, dans les conditions de l'étude. Ainsi si la modélisation donne un résultat inférieur à celui d'un fabricant de batterie du marché, cela peut signifier deux choses : soit la modélisation sous-estime le coût, ce qui est lié à une incertitude, soit le fabricant n'a pas la solution la plus optimale du marché au niveau de son

prix d'achat ou de son procédé de fabrication, ce qui dans ce cas n'est pas lié à une incertitude du modèle.

3 Méthode Monte Carlo

Une méthode d'évaluation de la qualité des résultats, basée sur des techniques de Monte Carlo a été mise au point. Il s'agit de méthodes d'approximation au sens statistique du terme, se caractérisant par une utilisation du hasard pour résoudre des problèmes centrés sur un calcul. Elles peuvent être utilisées dans de nombreux cadres, dont l'analyse de l'incertitude. L'existence de ces méthodes est ancienne, mais le développement effectif a débuté avec l'invention du premier ordinateur électronique à la fin de la seconde guerre mondiale, et notamment à Los Alamos pour le développement de la bombe atomique. Le nom Monte Carlo a été attribué pour signifier le jeu du hasard dans cette méthode (107,108).

L'adaptation de ces méthodes pour des calculs d'incertitudes afin de décrire la propagation des distributions est relativement aisée (109). La principale difficulté de l'utilisation de la méthode porte sur la définition des distributions des variables d'entrée. L'incertitude et l'imprécision qui sont étudiées dans le cadre de ce travail, sont uniquement liées aux modèles et aux données d'entrée sur les achats et la transformation. Les incertitudes et imprécisions portant sur les aspects techniques (dimensionnement et performance des cellules) ne sont pas prises en compte, car n'étant pas du ressort de cette étude.

Derrière la notion générique de précision du résultat utilisée dans ce document se cache en fait plusieurs éléments : la fiabilité des données, la performance de l'industriel, l'évolution des données dans le temps (parités, cours des matières, inflation), les effets commerciaux (liés ou non aux volumes) et les difficultés non prévues initialement. La méthode de Monte Carlo offre l'avantage d'être très souple et de pouvoir prendre en compte tous ces paramètres ensemble ou séparément. Cette souplesse a par contre le désavantage d'entraîner une incertitude finale fortement dépendante de la vision de l'analyste. Les outils développés dans cette thèse pour appliquer l'analyse de l'incertitude à l'aide d'une méthode de Monte Carlo vont être présentés dans les paragraphes suivants.

3.1 Fonction MATLAB

MATLAB a été choisi comme logiciel support pour le développement des méthodes, notamment en raison de la qualité du générateur de nombres aléatoires (109). Deux

fonctions MATLAB différentes ont été créées pour le modèle OCA et MAC. Les deux fonctions effectuent les mêmes opérations : lire les données d'entrée dans un fichier Excel, attribuer une valeur aléatoire à ces données selon la fourchette et la loi de distribution définies dans ce fichier Excel, faire le calcul de coût avec les valeurs aléatoires pour le nombre d'itération demandé et enfin écrire les valeurs de sortie (moyenne et écart type de tous les points calculés) dans le fichier Excel. Le script de la fonction MATLAB est donné en annexe du mémoire (cf. Annexes 3).

Pour la partie achat, le fonctionnement est quasiment identique entre les deux modèles. Pour la partie fabrication et frais généraux, le fonctionnement est différent, le calcul étant nettement plus détaillé pour le modèle MAC. Le nombre d'itérations nécessaires pour obtenir des résultats avec un niveau de précision suffisant dépend du nombre de données d'entrée. Pour nos études, la littérature indique qu'un nombre d'itérations de 1 million permet d'obtenir des résultats satisfaisants (quatre chiffres significatifs) (108,109), pour des temps de calcul raisonnables, de l'ordre de la minute sur un ordinateur de base.

3.2 Choix de la distribution

La définition de la distribution de l'incertitude pour les données d'entrée est une tâche délicate, qui détermine la qualité de l'analyse de l'incertitude. Il est nécessaire d'avoir un recul suffisant pour porter un regard impartial sur la donnée, afin de ne pas sous-estimer la précision de celle-ci ni de la surestimer. Les référentiels qui ont été développés dans cette thèse apportent notamment ce recul. Le type de loi de distribution choisi ainsi que les paramètres associés (par exemple la moyenne et l'écart type pour une loi normale) auront de même une influence capitale. Là encore, le référentiel est un support précieux dans cette détermination.

Afin de réduire la subjectivité de cet exercice, une méthode basée sur des critères sera présentée. Elle permet à l'analyste de faire une première évaluation de la qualité des données. Une fois ce premier niveau de qualification des données réalisé, l'analyste devra sélectionner la loi de variation. Nous avons développé le modèle en utilisant trois lois de distribution : loi normale, uniforme ou beta.

3.2.1 Loi uniforme

La loi uniforme est une loi de probabilité égale pour tous les points d'un intervalle, et nulle en dehors de celui-ci. Elle offre une modélisation très simple, nécessitant de définir la borne

inférieure et supérieure. Elle est adaptée dans des situations où deux valeurs sont disponibles, sans que l'on sache dire laquelle est la plus fiable par rapport à l'étude.

3.2.2 Loi normale

La loi normale (ou loi de Gauss) est une loi de probabilité centrée sur un point, et dont la densité de probabilité diminue de façon symétrique par rapport à ce point. Il s'agit d'une loi très répandue, et qui permet de décrire de façon réaliste l'écart que peut prendre une valeur. Elle est bien adaptée à une situation où on dispose d'une valeur fiable de la donnée, susceptible de varier en fonction de critères d'incertitude étudiés. Elle nécessite de définir une valeur centrale, l'espérance notée μ et un écart type noté σ . La fonction « randn » de MATLAB est ensuite utilisée pour créer la distribution.

3.2.3 Loi Beta

La loi Beta est une loi de probabilité avec un point central et qui n'est pas symétrique. Elle permet de définir une distribution dans un cas où la valeur la plus probable est probablement supérieure ou inférieure à la distribution. Elle nécessite de définir deux valeurs extrêmes et une moyenne. La fonction « betarnd » de MATLAB est utilisée pour créer la distribution. Admettant une grande variété de formes, elle permet de modéliser de nombreuses distributions à support fini.

3.2.4 Optimisation du temps de calcul global

Le temps de mise en place de la méthode peut être important face au grand nombre de données d'entrées. Afin de diminuer le temps de préparation et le temps de calcul, tout en s'assurant de la fiabilité du résultat, l'analyste doit organiser le temps d'analyse pour effectuer en priorité les actions importantes. Il doit d'abord soigner la définition des paramètres de distribution des valeurs clés de son analyse. Pour fixer une règle arbitraire, les valeurs clés sont les valeurs supérieures ou de l'ordre de 10% du coût total de la cellule. Pour ces cas, notamment les matériaux actifs, il est important de faire un calcul détaillé et justifié. Pour les valeurs plus faibles, l'analyste devra simplement veiller à avoir une distribution cohérente avec la qualité de la donnée, ou bien à ne pas faire varier la donnée si l'incertitude apparaît comme faible ou inexistante.

4 Cadrage de la méthode : matrices de critères

La qualité du résultat repose sur le choix des distributions des valeurs d'entrée du modèle. La méthode est très souple, et peut s'appliquer à un grand nombre de cas de figures (prise en compte de tous ou seulement de quelques paramètres d'incertitude). Il existe donc un grand nombre de variantes. Ce chapitre se propose de présenter les sources d'incertitudes qui peuvent survenir au cours des modélisations de coûts des batteries lithium-ion, ainsi que de distinguer de façon qualitative des degrés d'importance de ces incertitudes, ceci à la fois pour les achats et pour le procédé de fabrication.

4.1 Incertitudes sur les données d'entrées achats

La méthode qui est proposée ici est inspirée des méthodes pratiquées en Analyse de Cycle de Vie, notamment des matrices de pedigree (110). Pour déterminer la distribution de la valeur d'entrée, il faut dans un premier temps déterminer les différentes incertitudes qui peuvent se rencontrer sur cette valeur. Une fois ces incertitudes cernées, il faut estimer l'influence qu'elles peuvent avoir.

Le Tableau 24 montre les différents critères ou sources d'incertitudes qui ont été répertoriés. Ces critères sont au nombre de six, indépendants entre eux. En fonction du contexte de l'étude, de l'origine de la donnée, des informations dont l'analyste dispose sur celle-ci, et du type d'incertitude que l'analyste souhaite étudier, les critères qui sont à étudier seront déterminés. En plus de ces critères, le tableau indique ensuite les différents degrés d'incertitude que l'on peut rencontrer pour chacun de ces critères, afin que l'analyste évalue dans un premier temps de manière qualitative les données.

Les variations associées à ces critères sont à calculer au cas par cas avec les informations à disposition, qui dépendent fortement du cas étudié et des conditions de l'étude. Pour cette évaluation, le référentiel achats est un outil clé, qui permet à l'analyste de faire les comparaisons idoines. En réutilisant en partie l'exemple de l'étude de l'épaisseur d'enduction des électrodes (*cf.* Chapitre V), un cas concret d'utilisation de ces critères sera donné dans le paragraphe 5.

Tableau 24 : Attribution des notes aux critères pour les achats

Notes		5/5	4/5	3/5	2/5	1/5	0/5
Origine de la donnée	C ₁	Réel (fabricant)	Approximative (fabricant)	Source fiable, non liée à un fabricant	Source peu fiable	Coût estimé ou de source inconnue	Aucune donnée
Date de la donnée	C ₂	< 1ans (vs SOP)	< 3 ans	< 6 ans	< 9 ans	<15 ans	Autre
Métaux de base	C ₃	Métaux très abondants ou quantité <1%	Métaux abondants ou quantité <5%	Métaux à risque faible ou quantité <10%	Métaux à risque moyen ou quantité <30%	Métaux à risque élevé en grande quantité	Métaux à fort risque quantité importante
Parité	C ₄	Pas d'impact parité	Impact parité faible	Impact parité moyen	Impact important	Impact modéré	Impact élevé
Logistique	C ₅	Même région d'étude	Même pays d'étude	Zone économique proche	Distance moyenne	Distance élevée	
Volume	C ₆	Très peu impactant ou écart ±20%	Peu impactant ou écart ±50%	Impactant et écart ±50%	Impactant et écart ±100%	Impactant et écart ±1000%	Impactant et écart >±1000%

Ces variables sont considérées comme indépendantes, et donc les covariances sont nulles. Toutefois, la question de la véracité de cette hypothèse, notamment pour le critère de parité peut se poser. En effet ce critère est pris en compte pour chaque matière et chaque niveau de la fabrication. Pour les matières, il peut être lié aux autres (covariance non nulle) en fonction du panier de devises de celles-ci. Ainsi, si deux matières sont achetées par un fabricant américain au Japon, elles seront impactées de la même manière par ce critère. Il faudrait donc de manière rigoureuse lier ce critère dans le cas où le panier de devises est identique. Ceci étant peu fréquent pour les achats (paniers de devises complets rarement identiques), les critères seront indépendants dans la plupart des études.

4.2 Incertitude sur le procédé de fabrication

La méthode de matrice de critères présentée dans le paragraphe précédent pour les achats est reprise pour le procédé de fabrication. Pour déterminer la distribution de la valeur d'entrée, il faut là encore déterminer les différentes incertitudes qui peuvent se rencontrer et estimer l'influence qu'elles peuvent avoir. Le Tableau 25 montre les six critères indépendants qui ont été répertoriés pour la fabrication. En plus de ces critères, le tableau indique ensuite les différents degrés d'incertitude que l'on peut rencontrer pour chacun de ces critères.

Tableau 25 : Attribution des notes aux critères pour le procédé de fabrication

Notes	5/5	4/5	3/5	2/5	1/5	0/5
Qualité du modèle C ₀	Modèle type fabricant	Modèle analytique simplifié	Modèle non analytique	Simple règle de calcul		
Origine de la donnée C ₁	Réelle (fabricant)	Approximative (fabricant)	Source fiable, non liée à un fabricant	Source peu fiable	Coût estimé ou de source inconnue	Aucune donnée
Capacité (volume/an) C ₂	Très peu impactant ou écart ±20%	Peu impactant ou écart ±50%	Impactant et écart ±50%	Impactant et écart ±100%	Impactant et écart ±1000%	Impactant et écart >±1000%
Date de la donnée C ₃	< 2ans (vs SOP)	< 4 ans	< 6 ans	< 10 ans	<15 ans	Autre
Parité C ₄	Pas d'impact parité	Impact parité faible	impact parité moyen	Impact important	Impact modéré	Impact élevé
Logistique C ₅	Même région d'étude	Même pays d'étude	Zone éco proche	Distance moyenne	Distance élevé	

Comme ceci a été évoqué, une incertitude sur la méthode de modélisation du coût est considérée pour le modèle amont OCA, mais pas pour le modèle MAC. Dans le cas d'utilisation du modèle MAC, la note maximale est ainsi attribuée au critère C₀. Pour l'utilisation du modèle OCA, la note de 4/5 est appliquée.

Comme pour les matières, il faut faire attention à la dépendance des données. Si des données sont dépendantes, il faut les faire varier de la même façon (covariance non nulle). Ainsi si on applique la méthode de calcul de l'OCA, avec des coefficients provenant d'une seule source de données, il faut appliquer la méthode sur le calcul global du coût de la fabrication et non pas sur chacun des coefficients pris individuellement. Par contre, si les coefficients sont calculés à partir de sources différentes, alors il faut détailler le calcul.

4.3 Détermination de la distribution

Pour calculer la distribution globale de la valeur, l'influence des 6 critères indépendants du Tableau 24 est étudiée. Il faut dans un premier temps déterminer la distribution de la valeur pour chacun des six critères. Ensuite il faut déterminer la variation globale prenant en compte l'influence de tous les critères.

Une distribution uniforme sera déterminée à l'aide de deux valeurs : le maximum et le minimum de l'intervalle et calculée dans Matlab à l'aide de la fonction « rand » selon la formule : $\max - (\max - \min) * \text{rand}$. Une distribution normale sera déterminée avec deux valeurs : une moyenne et un écart type et calculée à l'aide de la fonction randn de MATLAB, selon la formule : $\mu + \sigma * \text{randn}$. Ainsi si on détermine qu'une donnée est incertaine par l'influence de 3 critères, avec une distribution normale pour les deux premiers critères et uniforme pour le dernier, alors la distribution de la donnée d'entrée sera déterminée à l'aide de l'Équation 9.

Équation 9 : Calcul de la dispersion

$$\text{Données d'entrée} = \mu + \sigma_1 * \text{randn} + \sigma_2 * \text{randn} + (\text{max} - \mu - (\text{max} - \text{min}) * \text{rand})$$

Avec μ la moyenne de la valeur, et σ_i les écarts type pour chacune des valeurs. Pour calculer ces écarts types, nous proposons la méthode suivante : déterminer le maximum et le minimum que peut prendre la valeur à l'aide des points de comparaison dont on dispose (référentiels, évolution des cours, ...), puis en déduire l'écart type correspondant selon l'Équation 10 (109), où μ est la médiane de l'intervalle et C_i l'écart entre μ et le maximum et le minimum. Le calcul pour une distribution Beta ne sera pas détaillé dans ce mémoire.

Équation 10 : Calcul des écarts type pour une loi normale

$$\sigma_i = \frac{2 * C_i * \mu}{\sqrt{12}}$$

En matière de modélisation de coût, l'incertitude apparaît comme une notion complexe. Ainsi il n'existe pas de certitude absolue : un coût va dépendre de la performance du fabricant et du contexte dans lequel le coût est donné (date, localisation). L'expression de l'incertitude dépendra des objectifs d'une étude. La méthode proposée permet par sa souplesse, de répondre aux différentes situations que l'on peut rencontrer sur l'évaluation de l'incertitude de la modélisation de coût.

Elle permet ainsi d'analyser différentes incertitudes : la justesse du modèle, les risques sur les parités, ou encore de prendre en compte tout risque détecté par l'analyste. La qualité du résultat de l'analyse d'incertitude dépend de la rigueur des hypothèses sur les données d'entrée prise par l'analyste. Afin de cadrer à un premier niveau ces hypothèses, une méthode a été mise au point, basée sur des critères de qualité des données d'entrée.

5 Application aux modèles de l'étude

Les principes de la méthode de Monte Carlo pour l'analyse de l'incertitude de la modélisation de coût ont été présentés. Nous allons maintenant montrer un exemple d'utilisation de la méthode, en effectuant l'analyse de l'incertitude dans le cas de l'étude de coût présentée dans le Chapitre V. Les différences dans les incertitudes calculées pour les deux modèles vont être étudiées, et une comparaison avec le modèle externe BatPac sera aussi proposée.

5.1 Contexte

Comme cela a été souligné précédemment, le terme incertitude recouvre un ensemble de notions différentes que nous avons séparé en trois catégories : la variabilité, l'imprécision et l'incertitude au sens strict. La première catégorie traduit les aléas et le hasard. Cette catégorie contient ainsi la variation des parités monétaires, et du cours des métaux, qui varient de manière stochastique. Elle est donc liée à l'année pour laquelle l'étude est faite, et si cette année est proche de celle pour laquelle s'applique notre modélisation. C'est pourquoi il est important de situer le contexte temporel de notre étude, ainsi que celui des différentes modélisations. Précisons donc que l'analyse est menée pour une fabrication en 2014.

Une difficulté porte aussi sur le contexte spatial. Alors que nous réalisons des simulations économiques dans un contexte asiatique, BatPac fournit des résultats pour un contexte nord-américain. Les conditions salariales, ainsi que les frais d'installations sont différents. Le prix en sortie d'usine, qui est celui qui nous intéresse, sera donc influencé par ce contexte. On ne peut toutefois pas considérer cet aspect sous forme d'incertitude, il s'agit d'un avantage compétitif. Nous nous contentons donc de souligner cet aspect, mais aucune compensation ne sera apportée sur ce point.

5.2 Modèle amont OCA

Les incertitudes retenues pour le modèle amont OCA vont d'abord être décrites. Dans un premier temps, les incertitudes sur les achats seront déterminées. Dans un second temps, les incertitudes sur la modélisation de coût de la fabrication et des autres frais seront déterminées.

5.2.1 Achats

Pour déterminer les critères sources d'incertitude, les informations du Tableau 24 sont utilisées. Pour le critère 1, sur l'origine de la donnée, on peut supposer que les valeurs soient surestimées, car il s'agit de prix obtenus en dehors d'un contexte de négociation. Toutefois nous avons retenu une loi normale, le but de l'étude d'incertitude sur ce cas de figure étant de comparer les matières entre elles. Les sources de données étant homogènes, une loi normale est adaptée. Pour les autres critères, une loi de distribution normale est aussi utilisée.

Pour le critère 1 d'origine des données, nous attribuons la note de 3/5. Les données proviennent en effet de fabricants, mais sans réelle négociation commerciale, ce qui explique la confiance modérée que nous attribuons aux données. La moyenne est donc la valeur retenue et l'écart type est calculé à partir de l'écart observé avec le référentiel. La valeur retenue est de 8%. Pour le critère 2 de date de l'information, la note de 4/5, a été attribuée, les données étant de la fin de l'année 2011. Ceci correspond à une loi normale avec un écart type de 2%.

Pour le critère 3 de contenu en métaux, la note de 1/5 est attribuée au NMC, 3/5 au feuillard de cuivre, 4/5 au graphite et à l'électrolyte et 5/5 au séparateur. Enfin pour le critère 4, la parité des monnaies, une même note de 3/5 est attribuée, les matières étant susceptibles d'être toutes affectées de la même façon. Les critères 5 et 6, respectivement de volume et de logistique ont été négligés pour cette étude et n'ont pas fait l'objet de variation. La Figure 53 représente l'attribution des notes pour chacun des critères sur l'exemple du NMC. Seul le critère 3 de contenu en métaux à forte fluctuation de coût a une note qui est différente des autres matières étudiées.

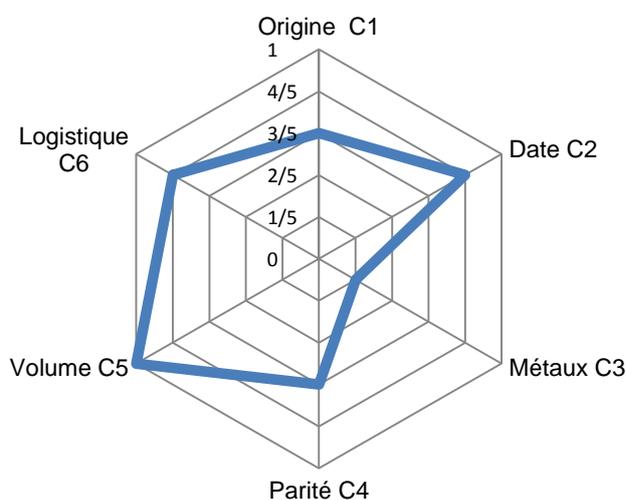


Figure 53 : Diagramme radar des 5 critères pour le NMC dans un exemple de modélisation

Les écarts associés à chacun des critères et pour les différentes matières étudiées sont résumés dans le Tableau 26. Ils permettent de calculer l'écart type selon la formule de l'Équation 10. Ils ont été calculés à l'aide du référentiel, ou bien de données de cours de métaux. Ainsi, pour le critère 3 de variation des métaux dans le cas du NMC, la variation du cours du cobalt, du nickel et du lithium au cours des quatre dernières années a été observée (cf. Figure 44). Ceci a permis d'en déduire les variations possibles pour chacun de ces cours,

qui ont ensuite été rapportés à la quantité de ces matières nécessaires à la fabrication. Une technique similaire sur la variation des parités a été utilisée (cf. Figure 43).

Tableau 26 : Ecarts retenus pour chacun des critères et pour chaque matière de l'étude

	C1	Loi	C2	Loi	C3	Loi	C4	Loi
NMC	0,08	N	0,02	N	0,125	N	0,04	N
Graphite	0,08	N	0,02	N	0,03	N	0,04	N
Feuillard Cu	0,08	N	0,02	N	0,05	N	0,04	N
Electrolyte	0,08	N	0,02	N	0,03	N	0,04	N
Séparateur	0,08	N	0,02	N	0	N	0,04	N

La Figure 54 représente la distribution obtenue avec les écarts type calculés à partir des données du Tableau 26 pour le NMC. La moyenne de 26 correspond au coût retenu pour le calcul. L'écart type est de 2.33. Le théorème central limite s'applique à ce cas, ce qui signifie que la densité de probabilité qui caractérise l'incertitude final est gaussienne (109). 99.7% des valeurs de cette distribution sont donc comprises dans l'intervalle [19;33], soit plus ou moins 27%. La variation est liée principalement au critère 3 : la présence importante de métaux critiques.

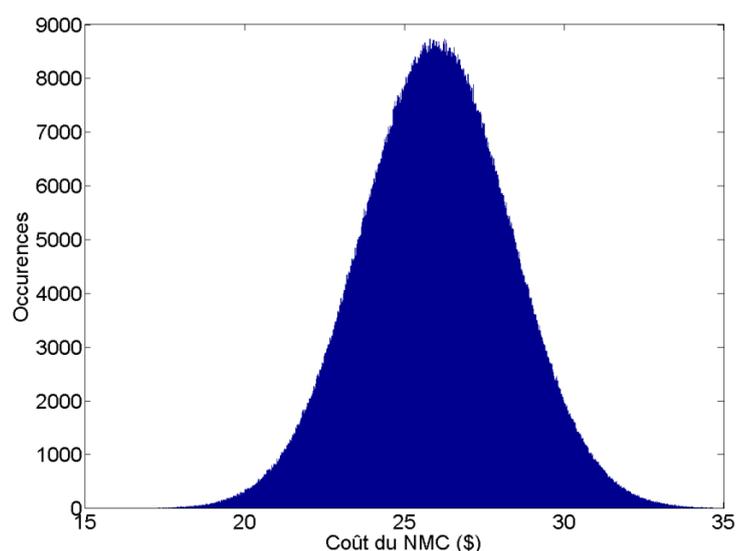


Figure 54 : Distribution de coût obtenue pour le NMC

Pour simplifier le problème et les temps de calcul, seuls les coûts des matières à fort enjeu (les matières représentant plus de 2% du coût total de la cellule, soit : NMC, graphite, électrolyte, feuillard de cuivre et séparateur) ont été décrites avec ce type de loi lors de l'étude des résultats de la publication. Aucune incertitude n'a été considérée pour le coût des autres matières.

5.2.2 Fabrication

Les incertitudes des 3 étapes du procédé de fabrication simulé dans l'OCA ont chacune été modélisées par une distribution de type normale. Les cinq critères appliqués à chacune de ces étapes ont la même valeur, mais les distributions sont considérées comme étant indépendantes pour chacune des 3 étapes.

Pour le critère 0 de qualité de la modélisation, comme cela a déjà été évoqué précédemment, il est considéré que le modèle induit des imprécisions dans la modélisation. On attribue la note de 4/5 à ce critère. L'écart utilisé pour calculer la distribution induite par ces imprécisions est de 4%. Pour le critère 1 de qualité des données d'entrées, la décomposition du procédé de fabrication est considérée comme basée sur des données d'entrée fiables, correspondant à la réalité industrielle en 2012. C'est pourquoi la note attribuée est de 5/5 et l'écart utilisé pour calculer la distribution est de $C_1=0\%$.

Pour le critère 2 de capacité la note de 5/5 est attribuée, les volumes étant les mêmes que ceux du référentiel, soit un critère $C_2=0\%$. Pour le critère 3 d'écart de dates de fabrication, note de 5/5 est appliquée, soit un critère $C_3=0\%$. Pour le critère 4 de parité, le panier de devises sous-jacent est composé de trois devises qui peuvent varier entre elles, la note de 4/5 est donc attribuée, soit un critère $C_4=4\%$. Pour le critère 5 de logistique, nous ne le considérons pas dans cette étude, soit un critère $C_5=0\%$.

Pour le calcul des frais généraux et autres frais, l'incertitude considérée pour le coefficient Oof (coefficient de l'OCA pour le calcul des frais généraux) est différente de l'incertitude considérée pour la fabrication. Pour le critère 0 de qualité de la modélisation, la note de 2/5 est attribuée, avec un écart retenu de $C_0=12\%$. Ceci est lié à la méthode de calcul des frais généraux, avec laquelle les résultats obtenus sont apparus avec des écarts sur des valeurs calculées par une autre méthode. Pour tous les autres critères, la note de 5/5 a été attribuée.

5.3 Modèle analytique MAC

Les incertitudes retenues pour le modèle MAC vont être décrites. Les incertitudes sur les achats sont identiques à celles retenues pour le modèle OCA. Les incertitudes sur la modélisation de coût de la fabrication et des autres frais sont différentes, et vont être déterminées.

5.3.1 Achats

Les coûts des matières étant basés sur les mêmes hypothèses que celles de l'OCA, des distributions identiques ont été utilisées pour les deux modèles. On se référera donc aux distributions de l'OCA, sur ce point.

5.3.2 Fabrication

Pour calculer l'incertitude sur la fabrication, un extrait de la synthèse de transformation MAC est fait, afin de sortir le coût des étapes de fabrication. Les 14 étapes du procédé de fabrication simulées dans MAC ont chacune une distribution normale. Les cinq critères appliqués à chacune de ces étapes ont la même valeur, mais les distributions sont considérées comme étant indépendantes pour chacune des 14 étapes, les données ayant été acquises séparément.

Pour le critère 0 de qualité de la modélisation, il est considéré que le modèle est analytique, et correspond à une modélisation équivalente à celle pratiquée par les fournisseurs. La note de 5/5 est attribuée et l'écart utilisé est de $C_0=0\%$. Pour le critère 1 de qualité des données d'entrées, la décomposition du procédé de fabrication est basée sur des données d'entrée réelles, correspondant à la réalité industrielle en 2012. C'est pourquoi la note attribuée est de 5/5 et l'écart utilisé pour calculer la distribution est de $C_1=0\%$.

Pour le critère 2 de capacité la note de 5/5 est attribuée, les volumes étant les mêmes que ceux du référentiel, soit un critère $C_2=0\%$. Pour le critère 3 d'écart de dates de fabrication, note de 5/5 est appliquée, soit un critère $C_3=0\%$. Pour le critère 4 de parité, le panier de devises sous-jacent est composé de trois devises, qui peuvent varier entre elles, la note de 4/5 est donc attribuée, soit un critère $C_4=4\%$. Pour le critère 5 de logistique, nous ne le considérons pas dans cette étude, soit un critère $C_5=0\%$.

Pour l'aspect calcul des frais généraux, une note de 3/5 est attribuée au critère 0 sur la qualité de la modélisation, en raison de la méthode utilisée, qui ne correspond pas à un calcul exact, soit un écart de 8%. Celle-ci ne s'applique pas sur la garantie, qui vaut 5% du coût total. Les autres critères n'interviennent pas dans le calcul des frais généraux, et une note de 5/5 leur a été attribuée, soit un écart nul.

5.4 BatPac

Deux versions quasiment identiques du rapport sur l'utilisation de BatPac sont disponibles. Dans la version la plus récente, l'une des plus grosses différences est l'ajout d'une partie sur l'estimation de l'incertitude (46). L'incertitude est classée en trois catégories : celle portant sur les données d'entrées économiques, celle sur l'épaisseur maximale d'enduction autorisée, et celle sur la capacité maximale d'une cellule. Notre étude ne portant que sur les modèles de coût, et non pas sur les modèles de conception de cellule, nous ne nous intéressons qu'à la première catégorie, le dimensionnement en entrée que nous utilisons étant admis comme correct.

La méthode utilisée dans BatPac est d'appliquer un intervalle de confiance de plus ou moins 10%, qui capture selon les auteurs 95% des valeurs. Ceci a été constaté à l'aide d'études de sensibilité sur 7 des principaux inducteurs de coût (matériaux actifs, collecteurs de cuivre, électrolyte, séparateur, investissement pour la fabrication des électrodes et la formation). Des distributions normales ou log-normal ont été appliquées, avec des valeurs basses, médianes et hautes déterminées par les auteurs. Les résultats de l'étude de sensibilité ne sont pas détaillés, seul l'intervalle de plus ou moins 10% est donné, et est considéré comme valable pour tous les matériaux et tous les types de cellules.

5.5 Résultats

Les résultats de l'étude du Chapitre V ont été en partie utilisés pour comparer les différents résultats obtenus par les deux modèles développés pour cette thèse et le modèle public BatPac (47). Seul le cas considérant du NMC comme électrode positive est pris en compte, et les deux épaisseurs d'enduction extrêmes sont observées (soit 50 et 100 μm). Les distributions d'incertitudes sont celles qui ont été décrites dans les paragraphes précédents. Le script MATLAB utilisé pour l'OCA est donné en annexe (*cf.* Annexes 3), et est très proche du script pour le modèle MAC.

Les résultats des trois modèles sont représentés sur la Figure 55. Les résultats obtenus sont tous proches et les domaines d'incertitudes se recouvrent. La décroissance de prix lié à l'épaisseur de l'enduction est nettement moins importante avec l'outil BatPac qu'avec les autres modèles, comme cela avait déjà été remarqué (*cf.* Chapitre V, paragraphe 4). Nous pouvons aussi noter que l'outil BatPac, représentatif des prix des batteries lithium-ion en

2020 selon les auteurs (46), donne des résultats proches, voir supérieurs à nos outils, qui correspondent pourtant à des données de batteries fabriquées en 2014.

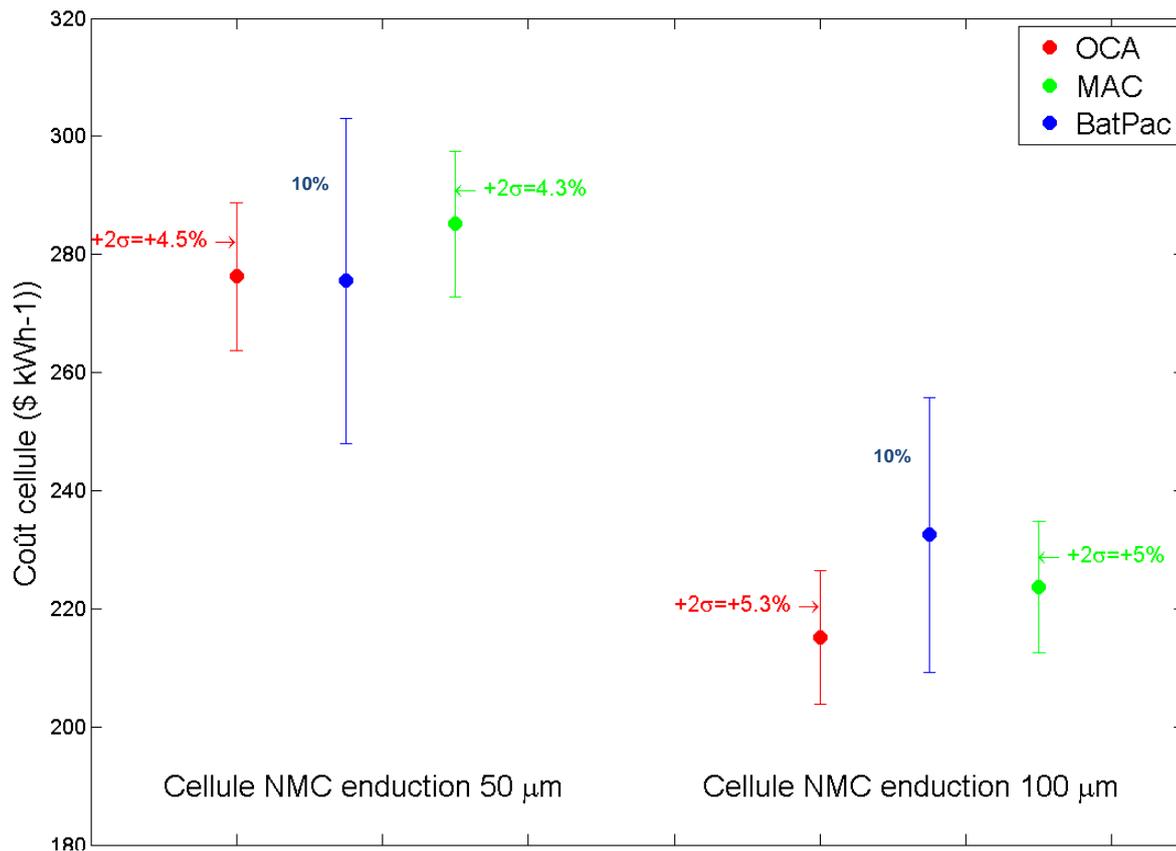


Figure 55 : Comparaison des résultats obtenus avec les 3 modèles (OCA, MAC et BatPac)

Pour le modèle BatPac, l'intervalle de confiance contenant 95% des valeurs correspond à plus ou moins 10% de la valeur obtenue par la modélisation. Pour correspondre à cette amplitude, l'écart reporté sur la Figure 55 pour nos deux modèles correspond à un intervalle de plus ou moins deux écarts types, soit 95,5% des valeurs de la simulation. Les résultats de la simulation sont en effet, selon le théorème central limite, répartis selon une loi normale, les données d'entrée étant indépendantes et identiquement distribuées.

Pour le modèle amont OCA, l'écart entre le maximum et le minimum est de 25 \$.kWh⁻¹, soit 9 % pour l'épaisseur d'enduction de 50 µm et de 23 \$.kWh⁻¹, soit 10,6 % pour l'épaisseur d'enduction de 100 µm. Pour le modèle analytique MAC, l'écart entre le maximum et le minimum est de 25 \$.kWh⁻¹, soit 8.6 % pour l'épaisseur d'enduction de 50 µm et de 22 \$.kWh⁻¹, soit 10 % pour l'épaisseur d'enduction de 100 µm.

Cette augmentation de l'incertitude avec l'augmentation de l'épaisseur d'enduction est liée au changement de la répartition de coût : le poids des matières dans le coût total est plus

important pour des électrodes plus épaisses (*cf.* Figure 36). L'incertitude sur les matières étant plus élevée, ceci entraîne une augmentation de l'incertitude relative.

En comparaison de la méthode BatPac, notre méthode permet d'adapter l'analyse d'incertitude à un cas précis. Ceci est utile, car le contexte détermine une grande part de l'incertitude (date, localisation, but). Comme le montre cet exemple, il est possible de choisir quels paramètres nous souhaitons étudier en fonction du contexte. Si la mise en place est beaucoup plus lourde que pour la méthode d'analyse de l'incertitude de BatPac, les résultats obtenus sont plus significatifs.

6 Conclusion

Le but de ce chapitre était de présenter la méthode d'analyse des incertitudes développées dans cette thèse, et de montrer un exemple d'utilisation de celle-ci. La méthode proposée est très souple et permet de modéliser l'ensemble des incertitudes qui peuvent être rencontrées. En contrepartie, elle nécessite un temps important de mise en œuvre. De plus, le résultat final est très lié aux hypothèses de l'analyste. C'est pourquoi des matrices de critères sont proposées pour cadrer le choix des distributions des données d'entrée, et un exemple est donné afin de montrer comment utiliser la méthode. Cette méthode offre donc la possibilité d'évaluer l'incertitude sur le résultat final, ce qui est un atout particulièrement intéressant et novateur, permettant de renforcer le poids des modélisations de coût qui sont effectuées.

Chapitre VIII. Examen économique des matériaux prometteurs

Dans ce chapitre, une étude du coût des matériaux actifs est réalisée dans un premier temps, portant principalement sur des composés encore au stade de la recherche. Ensuite, l'influence de ces matériaux sur le coût des cellules est observée. Enfin les résultats économiques sont présentés, offrant ainsi une projection du coût des batteries lithium-ion dans les dix prochaines années.

1 Introduction

Le but de ce chapitre est d'évaluer les perspectives économiques à moyen terme des batteries lithium-ion, avec l'utilisation de matériaux actifs encore au stade de la recherche actuellement, mais qui offrent des perspectives alléchantes. Dans un premier temps une étude analytique du coût des différents matériaux actifs prometteurs est effectuée. Un dimensionnement de cellules utilisant ces composés est aussi effectué à l'aide du logiciel de conception de cellules BatPac (47). Par la suite, les coûts obtenus pour les matériaux sont utilisés pour comparer l'influence de ces composés sur le coût de l'énergie au niveau de la cellule.

Ce travail a été effectué en partie avec des experts du CEA LITEN, et porte donc sur les solutions qui y sont étudiées, et qui sont envisagées par l'ensemble de la communauté scientifique. Les trois familles de matériaux retenues pour augmenter la densité d'énergie sont pour l'électrode positive : les oxydes lamellaires riches en lithium (Li-Rich) qui ont une capacité élevée, le spinelle 5V $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ (LMNO), qui a une tension de fonctionnement élevée et le phosphate lithié mixte de fer et de manganèse (LMFP), qui augmente la tension par rapport au LFP et qui est censé améliorer le comportement en sécurité par rapport aux oxydes NMC et NCA. Pour l'électrode négative : le silicium (Si) est retenu, car il permet d'augmenter la capacité, et l'oxyde de titane et niobium TiNb_2O_7 (TNO) pour augmenter les performances en charge rapide, durabilité et sécurité.

2 Modélisation du coût des matériaux actifs

Pour notre estimation du coût des systèmes à venir, nous avons axé l'étude sur les matériaux actifs, en ne considérant pas dans un premier temps d'éventuels progrès sur les autres composants. Ceci permet de voir les progrès intrinsèques aux matériaux actifs, et de les comparer avec les matériaux actuels, mais l'étude de la valeur de coût absolue à l'avenir doit donc être considérée en tenant compte de cette hypothèse.

Les matériaux actifs jouent un rôle primordial dans le coût des cellules, comme nous avons pu le voir. Pour une comparaison économique correcte, il est primordial d'avoir des valeurs de coût des matériaux cohérentes en valeur absolue, et en valeur relative. Or ces composés ne sont à l'heure actuelle que produits en petite quantité en laboratoire ou en usine pilote. Afin d'éviter un artéfact de comparaison, il faut donc projeter une production industrielle dans des conditions identiques. Cela suppose d'avoir une connaissance fine de la fabrication des matériaux actuels, pour être capable de faire des extrapolations aux composés à venir.

Nous avons décidé de mener cette étude par rapport à l'un des composés le plus répandu à l'heure actuelle dans les batteries lithium-ion pour applications automobiles : le NMC. Nous allons donc dans un premier temps présenter une méthode de modélisation des coûts du NMC. Nous extrapolerons ensuite cette méthode aux matériaux prometteurs qui sont étudiées dans ce travail.

2.1 Modélisation de coût du NMC

2.1.1 Procédé de fabrication

Il existe plusieurs voies de synthèse du NMC. Celles-ci partent de précurseurs pouvant différer et de techniques de fabrication qui varient aussi. Si elles permettent d'arriver au même produit final, elles ont des avantages et des inconvénients qui guident le choix des industriels : coût, facilité de mise en place, impact environnemental, possibilité de contrôler la taille des grains, et pureté.

D'après des lectures de brevets (111–114), des informations de fournisseurs ou encore des publications nous avons retenu une voie de synthèse dite par « co-précipitation ». Celle-ci utilise les formes sulfates des précurseurs pour les métaux de transitions (Ni, Co, Mn), et la forme carbonate pour le lithium. Les grandes étapes de la fabrication sont récapitulées sur la Figure 56.

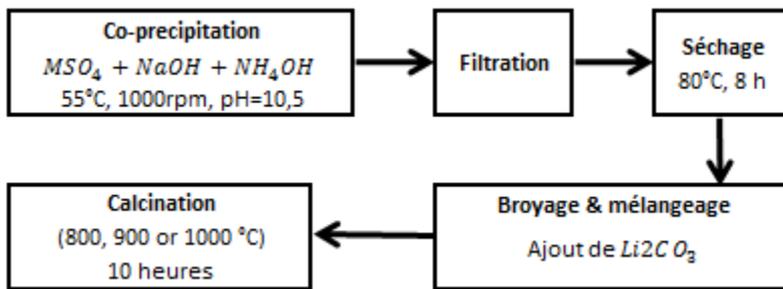


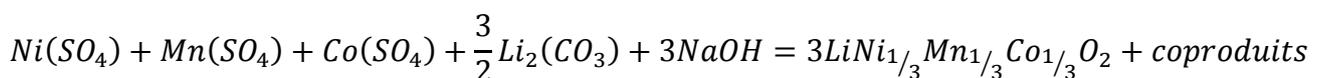
Figure 56 : Procédé de fabrication du NMC par co-précipitation retenu

Les sulfates des métaux de transition sont d'abord mélangés en présence de soude et d'un agent chélateur, l'ammoniaque. Le précipité est filtré et séché. La poudre obtenue est mélangée et broyée plusieurs fois avec du carbonate de lithium et le tout est ensuite calciné. La modification de la température et/ou de la durée sur l'étape de calcination permet de jouer sur la taille des grains.

2.1.2 Coût des précurseurs

Pour calculer la quantité de précurseurs nécessaire, on prend en compte le mélange stœchiométrique et une réaction totale. Par conséquent, aucun surplus de précurseurs n'a été considéré. La réaction globale est donnée dans l'Équation 11. A partir de celle-ci, les quantités de précurseurs nécessaires pour la fabrication d'un kilogramme de produits sont calculées.

Équation 11 : Réaction globale de synthèse du NMC



Pour les valeurs des sulfates, les données du site Asian Metal ont été exploitées. Ce site donne une cotation pour la forme sulfate du cobalt et du nickel, ainsi que pour le carbonate de lithium, principaux inducteurs de coût du NMC, comme le montre la Figure 57. Pour le manganèse, le coût de la matière « sulfate » a été calculé à partir d'estimations basées sur le cours du métal et de l'équivalent en contenu métal dans le sulfate de manganèse, qui ont été croisées avec d'autres sources d'informations, comme le site de commerce alibaba (www.alibaba.com).

2.1.3 Estimation du coût de fabrication

Pour l'estimation du coût de fabrication, l'outil interne de Renault utilisé pour le modèle MAC, MG2, a aussi été utilisé. Des hypothèses ont été formulées sur l'investissement et la main

d'œuvre nécessaire pour dimensionner une usine d'une capacité de 4000 tonnes de matériau par an. Une telle capacité correspond à environ 110 000 batteries pour véhicules électriques de type Renault Zoé. Les chiffres retenus sont de 55 millions d'euros d'investissement et de 20 opérateurs. Ces chiffres sont des estimations, basées sur des données de fournisseurs, ou bien des informations publiques (115).

Les autres frais associés (frais de fonctionnement et d'entretien, frais généraux) proviennent de la base de données économique associée à MG2. Le choix du contexte pays de l'usine est la Corée, car ce pays est l'un des principaux centres de production des batteries lithium-ion. Les données obtenues ont été recoupées avec les informations de coût du NMC disponible dans Asian Metal. Ceci nous a confortés dans le choix de la méthode de calcul et des résultats obtenus.

Les structures de coût des composés sont présentées dans la Figure 57 pour deux NMC 333 avec deux cours de précurseurs différents (04/03/2014 et 12/10/2012). Le coût calculé du NMC 532 est de 19,7 USD.kg⁻¹. En comparaison, le cours Asian Metal du NMC 532 à la même date (04/03/2014) était de 124 RMB.kg⁻¹ soit 20,9 USD.kg⁻¹ avec le taux de change USD/RMB à cette date.

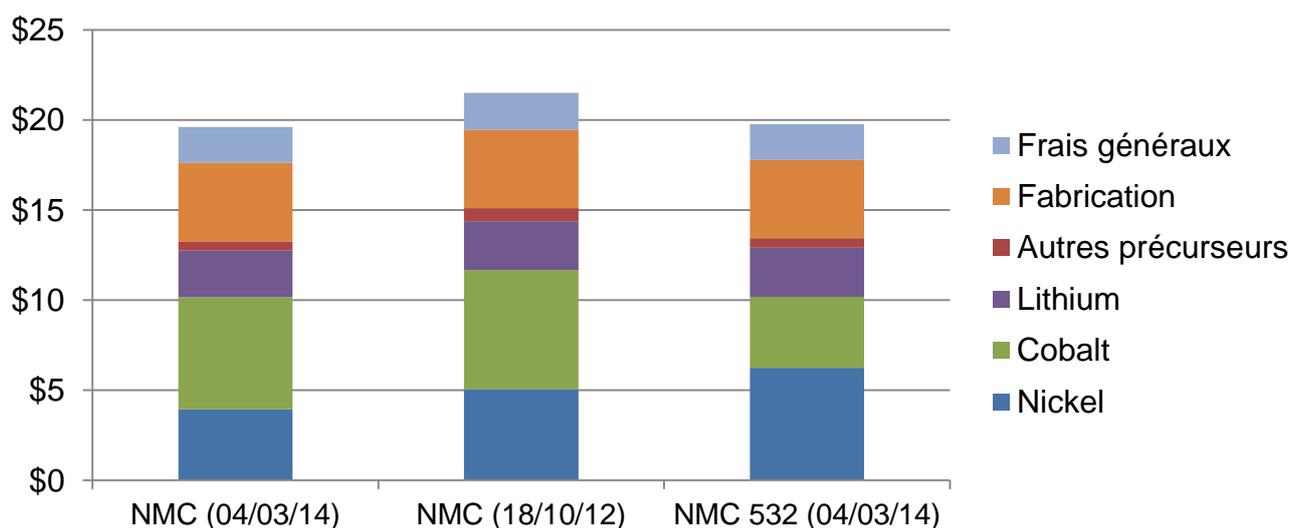


Figure 57 : Structure de coût de matériaux actifs selon le modèle de l'étude en USD.kg⁻¹

Cette méthode de modélisation de coût permet de disposer d'un outil objectif de comparaison des prix de matériaux actifs. Il est en effet possible de simuler les coûts de composés dans des conditions identiques (volumes de fabrication, pays, voie de synthèse), à condition de prendre en compte les spécificités de synthèse de chaque produit lors de l'étude.

2.2 Application du modèle à d'autres matériaux actifs

Le modèle peut être utilisé pour d'autres composés, en adaptant le procédé de fabrication et les précurseurs pour le matériau étudié (co-précipitation, cf. Figure 56). Il faut donc déterminer les procédés employés par l'industrie pour la fabrication du matériau. Pour li-riche, LMNO, LMFP et TNO, le procédé de fabrication qui nous a semblé avoir le meilleur potentiel est aussi un procédé de co-précipitation d'après l'état de l'art et des publications sur ces matériaux (116,117). Des variantes sur la fabrication sont prises en comptes pour le Li riche, qui d'après des indications de fournisseurs, ainsi que la publication de Wang *et al.* nécessite une atmosphère inerte plus contraignante industriellement (117). Les résultats obtenus pour ces matériaux sont récapitulés dans le Tableau 27, pour des cours des précurseurs au 18 octobre 2012.

Tableau 27 : Structure de coût des matériaux actifs de l'étude (cours du 18/10/2012)

	Précurseurs (\$·kg ⁻¹)	Co (%\$)	Ni (%\$)	Li (%\$)	Fabrication et autres frais (\$·kg ⁻¹)	Total (\$·kg ⁻¹)	Total \$.kWh ⁻¹ (Graphite)
NMC 333 : LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O₂	15	44%	34%	18%	6,4	21,4	39
Li rich : Li_{1,5}Ni_{0,25}Mn_{0,75}O_{2+d}	8,8	N/A	42%	45%	6,6	15,4	20,5
LMFP : LiMn_{0,8}Fe_{0,2}PO₄	3,8	N/A	N/A	42%	6	9,8	17,7
LMNO : LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O₄	6,7	N/A	60%	21%	6	12,7	22
TNO : Ti₂Nb₂O₇	41,9	N/A	N/A	N/A	7,3	48,4	N/A
Silicium	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	20	N/A

La dernière colonne permet d'estimer le coût du matériau d'électrode positive pour obtenir 1 kWh d'accumulateur face à une négative en graphite. Ce coût permet de prendre en compte la performance du matériau. Le NMC a ainsi un coût très élevé au kWh, quasiment deux fois plus cher que tous les autres matériaux. Le li-rich a un prix au kilogramme supérieur au LMNO, mais un coût inférieur au kWh. Ceci est lié à la forte capacité du composé, ce qui fait que peu de matériau actif est nécessaire pour obtenir 1 kWh.

Pour le TNO, le coût est fortement lié au cours du Niobium, qui est très volatil : le cours Asian Metal du pentoxyde de Niobium a varié entre 30 et 65 \$.kg⁻¹ sur les trois dernières années. De plus, plus de 90 % de l'offre globale de niobium est contrôlée par le Brésil, même si les

risques semblent limités selon les analystes (15). Le cours retenu au 18 octobre 2012 est de 61,5 \$.kg⁻¹, et le pentoxyde de Niobium représente 85% du coût.

Pour le silicium, la méthode de production est totalement différente. La forme que nous avons choisi d'étudier est obtenue à partir de poudres de silicium dont les grains sont portés à des dimensions de l'ordre de 30 à 50 nanomètres. Pour faire l'estimation du coût de la poudre de silicium nano, nous avons croisé les coûts de poudres de silicium purifié sous Asian Métal (grade 1101, signifiant que le produit contient moins de 0.1% de fer et aluminium et moins de 0.01% de calcium), avec des indications de fournisseurs et aussi du site de commerce Alibaba sur les prix du silicium nano. Nous estimons ainsi le coût de la poudre de silicium nano à 20 \$.kg⁻¹, avec un cours du silicium qui est susceptible là aussi de varier.

Le Tableau 28 donne des indications de coût de la littérature pour les matériaux prometteurs qui ont été étudiés. Ces données sont nettement supérieures à celles qui ont été calculées avec la méthode décrite dans ce chapitre. Ainsi l'indication de Nelson *et al.* sur le coût du LMNO est plus de deux fois supérieure à notre calcul, les indications les plus optimistes sur le lithium-riche sont au moins 30 % plus élevées. En ce qui concerne le LMFP, il n'y a pas d'indication sur un phosphate lithié avec du manganèse et du fer, mais seulement pour deux phosphates lithiés, l'un avec du fer et l'autre avec du manganèse. Les données sont du même ordre de grandeur que celles de notre calcul.

Tableau 28 : Estimation de coût de matériaux en développement à l'heure actuelle (\$.kg⁻¹) issues de différentes références bibliographiques

Source	LMNO	Li riche	LFP	LMP
Nelson 2011 (35)	21	29 // 22	20	
Howard, 2007 (36)			15	10
Barnett, 2011 (44)		B=24, R=31, H=39	B=15, R=18, H=20	
Gallagher, 2013 (40)		B=20, H=25		

2.3 Evaluation des incertitudes sur le coût des matériaux

Afin d'évaluer l'incertitude sur les coûts de matériaux actifs obtenus, la méthode d'analyse de l'incertitude décrite dans le Chapitre VII, basée sur une méthode de type Monte Carlo, a été utilisée. L'incertitude provenant de quatre sources indépendantes est considérée : le modèle, la composition du matériau, le taux de change des parités et les cours des métaux. Sur les trois premiers critères, une même distribution a été considérée. Sur le critère du cours des métaux, une distribution spécifique est adoptée pour chaque matériau.

Pour l'aspect modélisation, le modèle est basé sur MG2, et a été comparé aux données d'Asian Metal avec un niveau intéressant. Toutefois, les données sous-jacentes sur la fabrication ne sont pas parfaitement adaptées à chacun des matériaux, et le calcul des frais généraux n'a pas été recoupé avec des calculs d'industriels du secteur. Une variation possible de plus ou moins 5% du résultat final a été retenue. Comme une distribution normale est attribuée, on calcule l'écart type correspondant, ce qui donne $\sigma=0,0289$ pour ce critère, et pour tous les matériaux.

Pour l'aspect composition du matériau actif, il est considéré que la composition de la version retenue est susceptible d'avoir des écarts en pratique. Soit parce que l'ajout d'un additif sera nécessaire, soit que les quantités de matières considérées ne sont pas exactes. Nous estimons que ceci peut entraîner une divergence de plus ou moins 2% du résultat final. Comme là encore une distribution normale est attribuée, on calcule l'écart type correspondant, ce qui donne $\sigma=0,0116$ pour ce critère, et pour tous les matériaux.

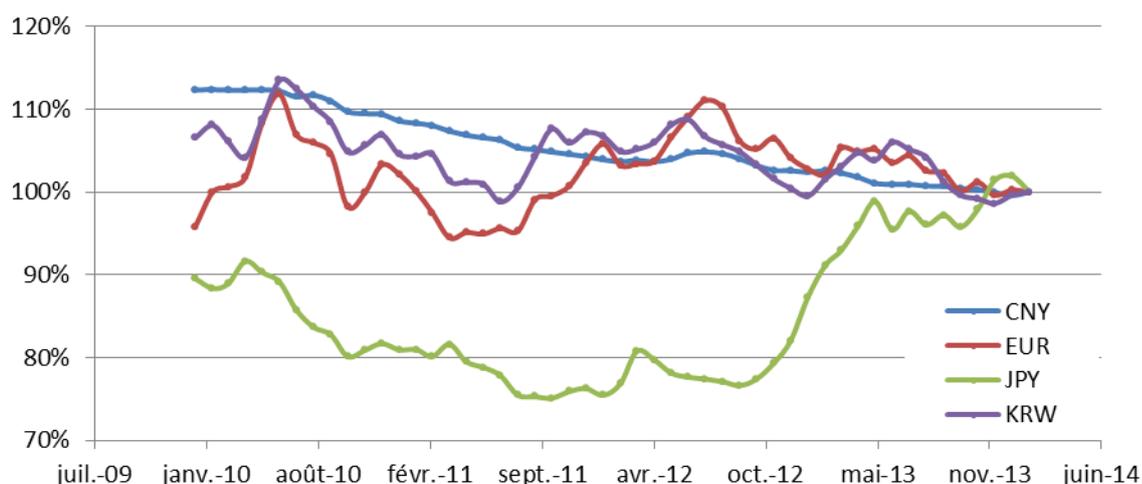


Figure 58 : Evolution relative au dollar US des parités principales du marché li-ion

Pour l'aspect taux de change, il est considéré que chacun des matériaux repose sur un panier de devises important. La Figure 58, déjà présentée précédemment, a servi à déterminer l'écart potentiel de 10%. Une distribution normale est de nouveau attribuée, on calcul l'écart type correspondant, de $\sigma=0,0577$ pour ce critère, et pour tous les matériaux.

Enfin, sur le critère de variation du cours des métaux, les cours maximum et minimum du nickel, du cobalt et du lithium ont été relevés sur les quatre dernières années, les cours utilisés dans le scénario de base (18/10/12) correspondant à un scénario moyen sur cette période. En fonction des quantités de chaque matériau présent dans le composé actif, un écart de coût envisageable a ainsi pu être déterminé : $\pm 10\%$ pour le LMNO et le Li riche, $\pm 2\%$

pour le LMFP et $\pm 20\%$ pour le NMC. Ainsi, une distribution normale a été attribuée à chacun de ces critères, avec un écart type respectivement de : 0,0577, 0,0116 et 0,1155.

Des simulations ont alors été effectuées sous MATLAB pour déterminer la plage d'incertitude sur le coût des matériaux en fonction de ces quatre critères. D'après le théorème central limite, la densité de probabilité du coût du composé suit une loi normale. L'intervalle est représenté à l'aide de boîtes à moustache sur la Figure 59. Le pavé rouge correspond à un intervalle de plus ou moins un écart type (soit environ 68% des valeurs). Les lignes correspondent à un intervalle de plus ou moins deux fois l'écart type (soit plus de 95% des valeurs). L'intervalle de confiance de 95% pour le NMC correspond ainsi à plus ou moins 27%, 17 % pour le lithium-riche et le LMNO et 13 % pour le LMFP.

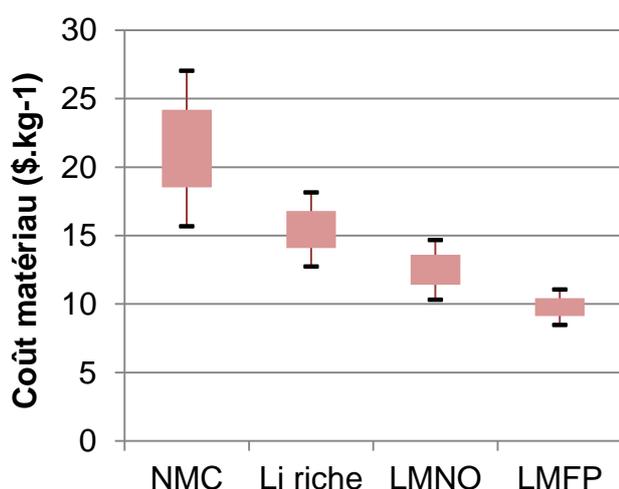


Figure 59 : Evaluation des incertitudes sur le coût des matériaux actifs. Distribution normale, la boîte rouge correspond à un intervalle de $\pm\sigma$, les moustaches à $\pm 2\sigma$.

Ainsi un modèle de coût pour les matériaux a été mis au point. Ce modèle a été utilisé pour déterminer le coût d'un matériau d'électrode positive actuel, le NMC, et de trois matériaux prometteurs, le LMNO, le LMFP et le Li riche. Deux autres matériaux, pour l'électrode négative cette fois, ont été estimées. Le TNO avec la même méthode que les matériaux d'électrode positive, et le silicium nano par une autre méthode. Nous allons maintenant voir l'influence de ces composés au niveau cellule, en effectuant tout d'abord la conception de cellules basées sur ces matériaux, puis en modélisant le coût de ces cellules.

3 Dimensionnement des cellules

Le nombre de variantes envisageables dans le domaine des batteries lithium-ion est très élevé, comme cela a pu être constaté jusqu'à présent. Les préconisations à respecter qui ont été décrites dans ce mémoire seront prise en compte pour réaliser une comparaison des matériaux actifs dans des conditions identiques. En ce qui concerne les propriétés des matériaux considérés pour la conception de ces cellules, les caractéristiques considérées sont issues de données du CEA ou de publications.

3.1 Caractéristiques techniques des composés

3.1.1 LMNO

Le LMNO, de formule $\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$ (aussi appelé spinelle « 5 volt » en raison de sa structure spinelle et de sa tension de coupure en fin de charge pouvant dépasser les 5 Volt), est un matériau en développement. Il nécessite l'utilisation d'un électrolyte compatible avec des tensions élevées, ce qui empêche à l'heure actuelle son utilisation (4,91). Le LMNO utilisé pour cette étude correspond à un composé développé par le CEA, dont la tension et la capacité sont représentées sur la Figure 60, pour un régime de décharge à 1C (c'est-à-dire une décharge totale en une heure). La densité du matériau est de $4,4 \text{ g.cm}^{-3}$.

3.1.2 Lithium-riche

Le Lithium-riche (parfois dénommé Lithium et manganèse riche, HLM ou encore HE NCM) est un oxyde lamellaire encore au stade de développement. Il s'agit d'un oxyde lamellaire riche en lithium. En comparaison avec un NMC classique, des atomes de lithium remplacent une partie des atomes de métaux de transition. Ceci permet d'obtenir des capacités de matériaux supérieures à 200 mAh.g^{-1} jusqu'à près de 300 mAh.g^{-1} dans certains cas.

Des problèmes de durabilité et de puissance spécifique, notamment liés à l'électrolyte comme pour le LMNO, s'opposent pour le moment à son exploitation. Le Lithium-riche utilisé pour cette étude des matériaux prometteurs est repris d'une publication de Wang *et al.*, et a pour formule : $\text{Li}_{1,5}\text{Ni}_{0,25}\text{Mn}_{0,75}\text{O}_{2+d}$ (117). La tension et la capacité du matériau sont représentées sur la Figure 60, pour un régime de décharge à 1C. La densité du matériau est de $3,2 \text{ g.cm}^{-3}$.

3.1.3 LMFP/C

Depuis la découverte du matériau de cathode LFP, les composés de structure olivine LiMPO_4 ($M=\text{Fe}$, Mn , Co et Ni ou un mélange de ces quatre métaux) ont fait l'objet d'un intérêt croissant grâce à leur supposée grande stabilité structurale en comportement abusif (groupements PO_4), leur bonne capacité réversible, longue durée de vie, et pour les composés basés sur le fer et le manganèse, leurs faibles toxicité et coût.

Un des principaux désavantages du LFP est la faible tension de ce dernier face au lithium, qui induit une faible densité d'énergie. En remplaçant le manganèse par du fer, la tension face au lithium est plus élevée (plateau à 4,1 V au lieu de 3,45), mais ce composé a une conductivité électrique très faible ainsi qu'une faible cyclabilité. Une de solutions les plus prometteuses sont les olivines multi composants. C'est pourquoi nous avons retenu la forme $\text{LiMn}_{0,8}\text{Fe}_{0,2}\text{PO}_4$ avec un revêtement de carbone, telle que décrite par Tan *et al.* pour notre étude (116). La tension et la capacité du matériau sont représentées sur la Figure 60, pour un régime de décharge à 1C. La densité du matériau est de $3,6 \text{ g.cm}^{-3}$.

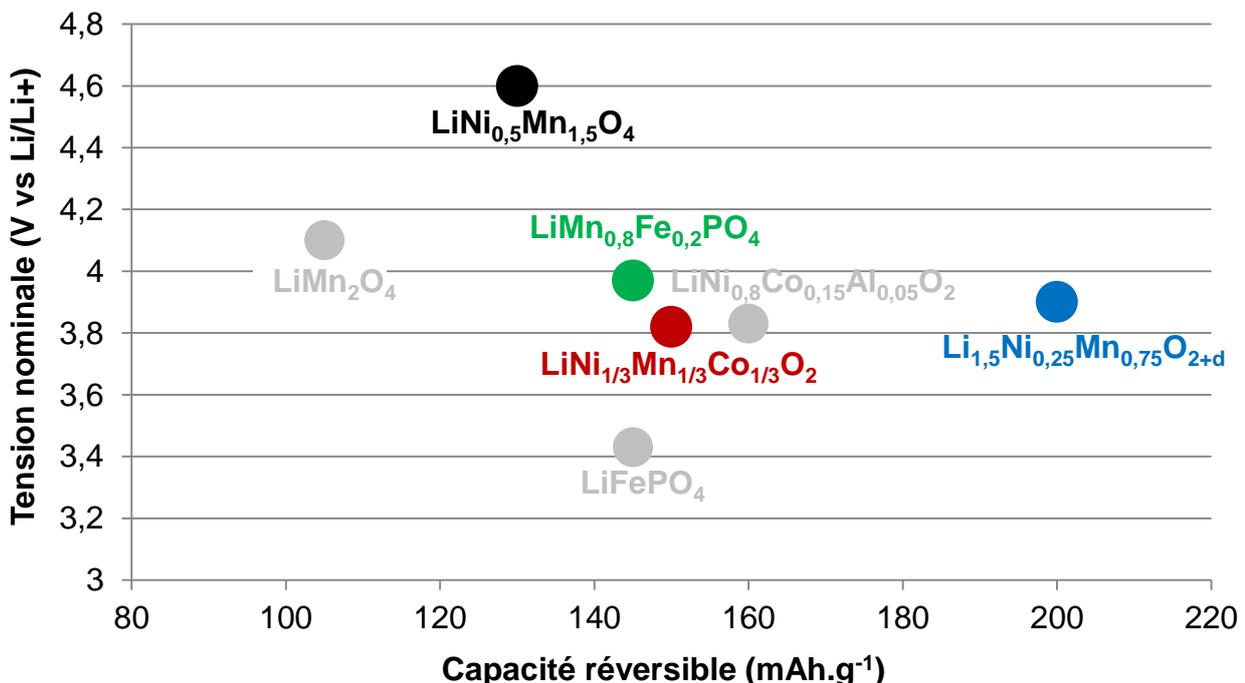


Figure 60 : Positionnement des matériaux en tension face au graphite et en capacité réversible (@ 1C)

3.1.4 Silicium

En plus des trois composés d'électrode positive qui viennent d'être présentés, un matériau pour l'électrode négative a aussi été étudié, le silicium. La capacité théorique de ce matériau

actif est de $3\,580\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$. Les forts changements de volume lors de l'intercalation d'ion lithium (qui peuvent aller jusqu'à des augmentations de plus de 300% du volume), entraînent une dégradation très rapide de ce type de batterie. De nombreuses recherches étudient différentes formes d'utilisation (structure nano, composites, alliages), pour essayer de réduire les problèmes de durabilité (118). Nous avons choisi d'étudier le silicium sous une forme considérée au CEA : des grains de structure nano (30 à 50 nm), mélangés à du graphite dans une proportion de 60% de silicium et 40% de graphite, avec une capacité limitée à $700\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ (cf. Figure 61).

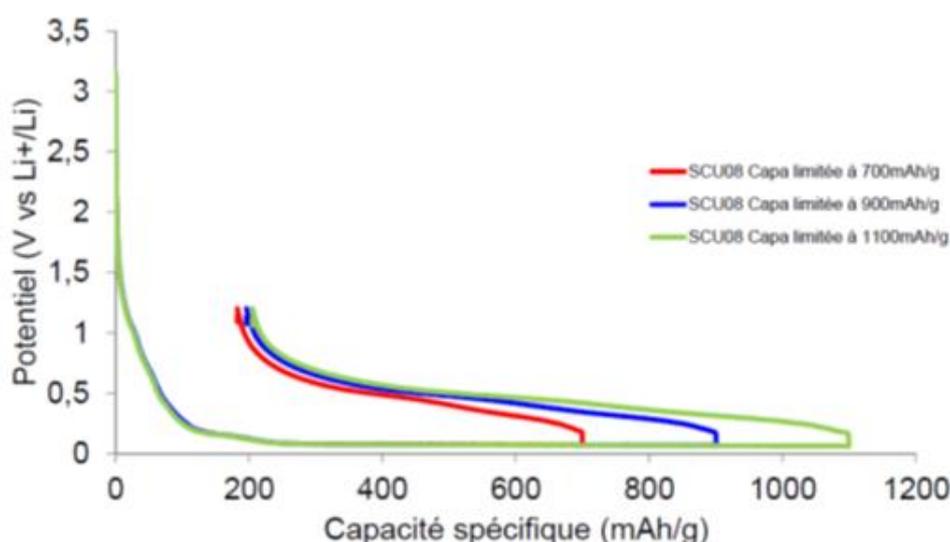


Figure 61 : Tension en fonction de la capacité pour le composé graphite silicium étudié.

3.1.5 TNO

Le TNO est un matériau actif pour électrode négative de formule TiNb_2O_7 . La capacité pratique de ce composé est de $260\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$, et la tension face au lithium est de 1,7 V. Ce matériau pourrait offrir des propriétés semblables à celles du LTO, avec une meilleure densité d'énergie. Si le coût du matériau actif a été estimé, son influence sur le coût de la cellule n'est pas prise en compte dans l'étude suivante, car ce matériau n'est pas compétitif avec les autres pour les applications de très haute énergie comme les véhicules électriques.

3.2 Dimensionnement de cellules

Le dimensionnement de cellules a été effectué à partir d'informations du CEA, et aussi d'hypothèses de conception liées au logiciel BatPac. Les hypothèses de dimensionnement sont quasiment identiques à celle du Chapitre V. Les cellules ont ainsi toute une énergie identique de 90 Wh. Les pourcentages de matériaux actifs, agents conducteurs et liants sont

de respectivement 90, 5 et 5% pour l'électrode positive, et de 95% de matériaux actifs et 5% de liant pour l'électrode négative. La porosité de l'électrode positive est de 32% pour tous les matériaux d'électrode positive et de 34% pour tous les matériaux d'électrode négative. Le ratio de capacité négative sur positive après formation (« balancing ») utilisé est de 1,13.

Un séparateur en polyoléfines enduit de céramique sur les deux faces a été considéré avec une épaisseur de 24 μm , une porosité de 41% et une densité de 1 gcm^{-3} . Comme dans le Chapitre V, l'épaisseur d'enduction de l'électrode est utilisée pour faire une comparaison objective des matériaux d'électrode. Les batteries étant conçues pour des applications EV et PHEV, nous avons retenu 50 μm comme limite inférieure d'enduction. Des électrodes plus fines ne seraient pas viables économiquement pour de telles applications. Une enduction maximale de 110 μm a été retenue comme limite supérieure, afin d'envisager des cas optimistes de conception en 2020, permettant de dépasser les 100 μm considérés pour les technologies actuelles.

Tableau 29 : Quantité de matière (g) pour chacune des cellules de l'étude à une épaisseur d'enduction de 100 μm

	NMC // Gr (référence)	Li riche // Gr	LMNO // Gr	LMFP // Gr	NMC // GrSi
Quantité de matière électrode positive	186 g	136 g	175 g	190 g	206 g
Quantité collecteur aluminium	20 g	20 g	19 g	25 g	22 g
Quantité de matière électrode négative	93 g	92 g	75 g	91 g	49 g
Quantité collecteur cuivre	43 g	42 g	42 g	52 g	47 g
Quantité d'électrolyte	66 g	65 g	59 g	73 g	56 g
Quantité de séparateur	18 g	17 g	17 g	21 g	20 g
Enveloppe et terminaux	47 g	47 g	45 g	50 g	44 g

La longueur et la largeur de la poche de la cellule contenant les électrodes sont fixées à respectivement 200 et 100 mm. L'épaisseur de la cellule n'est-elle pas fixe et change légèrement selon les cellules. Les quantités de matière nettes dans chacune des cellules étudiées, pour une épaisseur d'enduction de 100 μm , soit une valeur haute de la fourchette allant de 50 à 110 μm , sont présentées dans le Tableau 29.

A partir des dimensionnements ainsi obtenus, la densité massique des cellules a pu être calculée. Les résultats obtenus sont représentés sur la Figure 62, où l'énergie correspond à l'énergie totale des cellules en début de vie (parfois désignée par BOL pour « Beginning Of Life »). Le li riche offre la densité massique la plus importante grâce à sa forte capacité massique (mAh.g^{-1}), permettant de diminuer la masse des matières de l'électrode positive en comparaison avec la cellule de référence NMC. Le LMNO offre une meilleure densité massique que le NMC grâce à sa tension nominale plus élevée, qui permet de diminuer les quantités nécessaires de matières pour l'électrode positive et négative. Enfin, le LMFP est handicapé par sa faible capacité volumique (mAh.cm^{-3}), qui entraîne une augmentation de la surface de collecteur en comparaison avec la cellule NMC, aux effets néfastes sur la masse de la cellule.

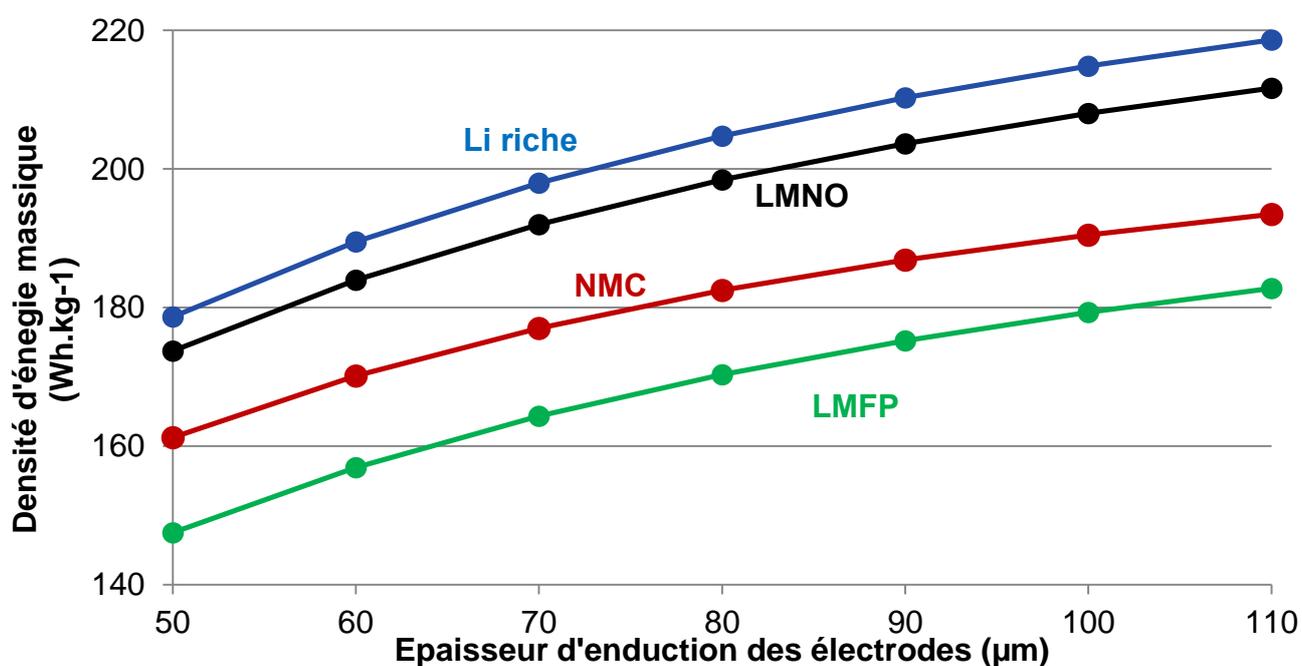


Figure 62 : Densité massique des cellules de l'étude en fonction de l'épaisseur d'enduction de l'électrode et du matériau d'électrode positive considéré

La densité massique des cellules utilisant une électrode négative basée sur le mélange de graphite et de silicium est représentée sur la Figure 63, avec deux cas de figure : une positive NMC et une positive LMNO. Dans les deux cas, le silicium permet d'augmenter la densité massique des cellules, avec une augmentation de 4 à 6% par rapport à la référence. Les gains relatifs s'accroissent avec l'augmentation de l'épaisseur de l'électrode.

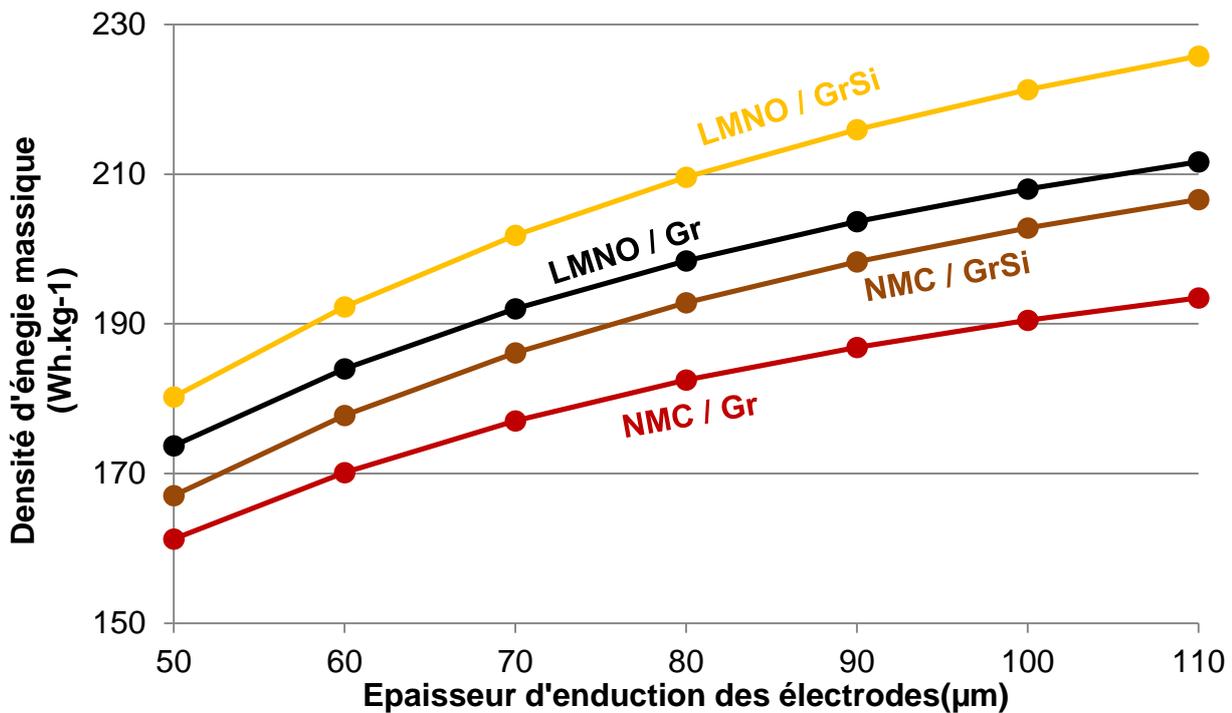


Figure 63 : Densité massique des cellules de l'étude avec une négative en graphite ou un composite graphite silicium

Ces quantités de matières vont être utilisées pour la modélisation économique des cellules utilisant les composés prometteurs retenus. Ceci va permettre de déterminer l'influence des matériaux actifs sur le système complet.

4 Résultats de l'étude

A partir de la modélisation du coût des matériaux actifs proposée dans le paragraphe 2 de ce chapitre, et du dimensionnement de cellules décrit dans le paragraphe 2.3, l'influence de ces matières sur le coût des cellules a été observée.

4.1 Hypothèses de la modélisation de coût

Pour l'étude des matériaux actifs prometteurs, le but premier est de comparer l'influence des composés sur le coût des cellules. Ces matériaux étant en développement, il est aussi intéressant de les utiliser pour faire des prévisions de niveau de coût des cellules à l'horizon où celles-ci seront commercialisées, correspondant à l'horizon 2020. C'est pourquoi des modifications de la modélisation de coût sont prises en compte pour tenir compte des améliorations qui interviendront entre temps.

La modélisation de coût a été effectuée à l'aide du modèle OCA décrit dans le paragraphe 3 du Chapitre IV. Sur les données de ce modèle, seule une modification du taux de rebut, a été considéré : 1,03 au lieu de 1,09. Il est en effet supposé que d'importants progrès auront été effectués sur ce point, et une cible à 1,03 correspond à une cible qui nous semble réaliste. En ce qui concerne le coût des matières autres que les matériaux actifs, les données du projet Hélios ont été reprises, comme pour l'étude du Chapitre V (paragraphe 2.2). Mais ces coûts étant considérés comme issu d'un projet sans but commercial, et pouvant potentiellement faire l'objet d'amélioration, ils ont donc été estimés comme 25% inférieurs en 2020.

4.2 Résultats

Ainsi, la Figure 64 montre le coût rapporté à l'énergie pour les cellules basées sur les quatre composés d'électrode positive de l'étude : le lithium-riche, le LMNO, le LMFP et la référence NMC. L'électrode négative est en graphite. L'énergie utilisée pour ce calcul est l'énergie totale des cellules en début de vie (BOL).

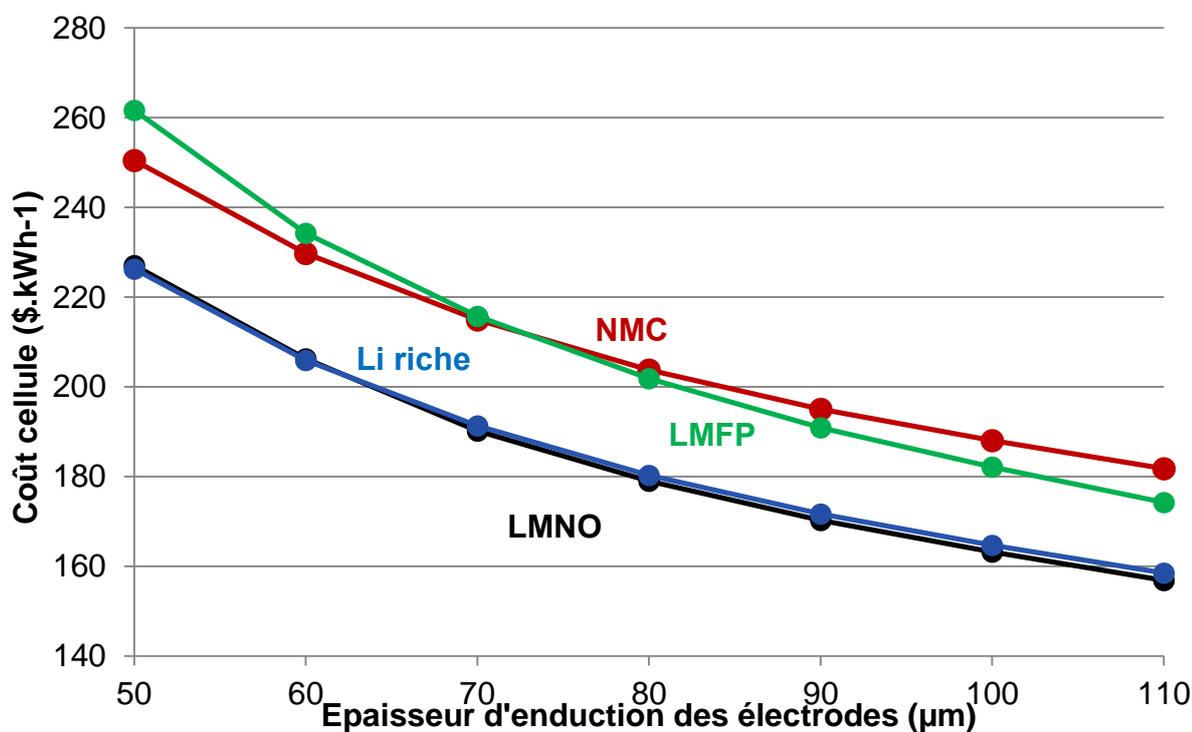


Figure 64 : Coût rapporté à l'énergie totale en fonction de l'épaisseur d'enduction pour les cellules de l'étude, avec électrode négative en graphite

L'épaisseur de l'enduction de l'électrode est un paramètre de conception de cellule qui a une influence importante sur le coût de la cellule, comme ceci peut être constaté sur la Figure 64. L'épaisseur maximale est liée aux limites techniques auxquelles un fabricant est confronté

en augmentant celle-ci : fabrication des électrodes, durabilité, puissance, sur-potentiel. Des progrès sont envisageables à l'avenir sur ces points, permettant d'augmenter les épaisseurs d'enduction. Il n'est donc pas possible de prédire les épaisseurs qui seront utilisées, c'est pourquoi la représentation du coût en fonction de l'épaisseur de l'enduction est adaptée : elle permet d'indiquer le niveau de coût qui pourrait être atteint en fonction de l'épaisseur que les fabricants arriveront à produire.

D'après la Figure 64, les cellules basées sur du LMFP ont un coût similaire aux cellules utilisant du NMC, avec une décroissance de coût plus marquée avec l'épaississement des électrodes. Ceci indique que le LMFP n'offrirait pas de gains de coût, mais pourrait être plus intéressant que le NMC si ces caractéristiques en termes de durabilité, de stabilité thermique ou encore de performances à courant élevés sont meilleures. Le Li riche et le LMNO apparaissent comme des matériaux très intéressants d'un point de vue du coût, avec un coût cellule quasiment identique pour les deux composés. Les gains obtenus pour une même épaisseur d'enduction de l'électrode varient entre 10 et 15 % en comparaison avec la cellule de référence utilisant du NMC. Mais ce succès est conditionné à l'heure actuelle par la mise au point d'un nouvel électrolyte stable à haut potentiel, pierre d'achoppement de ces matériaux.

La Figure 65 montre la décomposition de coût de ces cellules à une même épaisseur d'enduction des électrodes (100 μm). Le LMFP offre le coût de matériau actif d'électrode positive le plus faible. Ceci est lié au coût faible du matériau au kilogramme, ainsi qu'au kWh de matériau (*cf.* Tableau 27). Par contre la faible performance du composé, notamment la faible densité, engendre un besoin plus important de surfaces d'électrode positive, négative et de séparateur par cellule. Ceci explique pourquoi les trois autres postes de coût sont plus élevés avec le LMFP, faisant perdre à ce composé l'avantage de son faible coût.

Le NMC offre une performance intéressante, qui explique que le niveau de coût des autres matières, de la fabrication et des autres frais soit proche du Li riche et du LMNO. Mais le coût élevé du matériau au kilogramme le désavantage nettement. Le Li riche et le LMNO ont des décompositions de coût relativement proches, du fait notamment de l'absence de cobalt dans la composition.

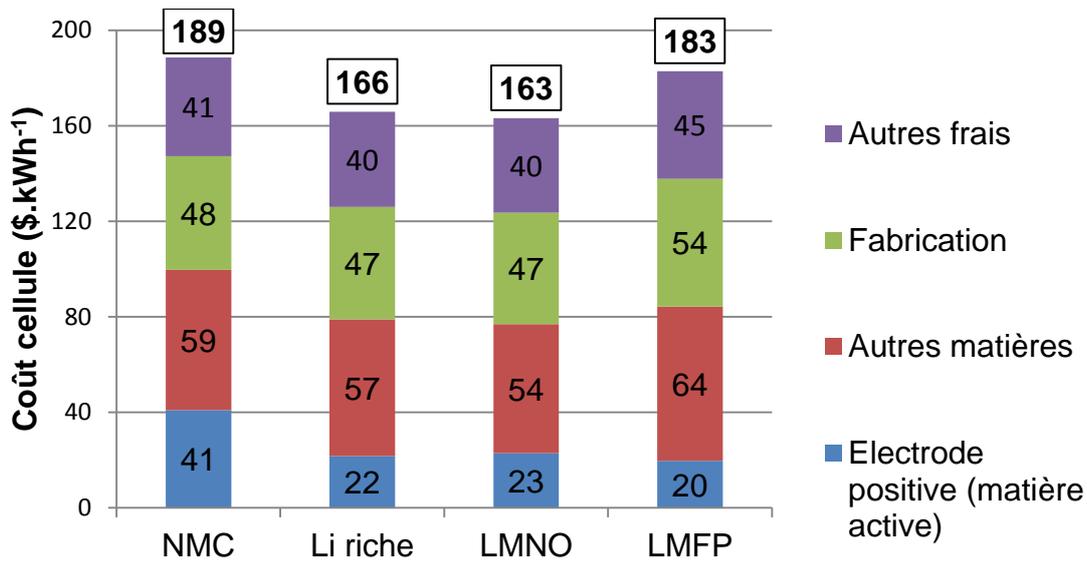


Figure 65 : Décomposition du coût des cellules pour une épaisseur d'enduction de 100 μm

Pour ce qui est du coût des cellules basées sur l'électrode négative composée de graphite et de silicium, ils sont représentés sur la Figure 66 pour des cellules utilisant du NMC et du LMNO à l'électrode positive. Cette figure fait ressortir le faible intérêt d'un point de vue uniquement économique du silicium. En effet, le coût de la cellule avec du NMC à la positive et une négative en graphite est légèrement inférieur au coût de la même cellule avec une négative composite graphite et silicium telle que décrite précédemment.

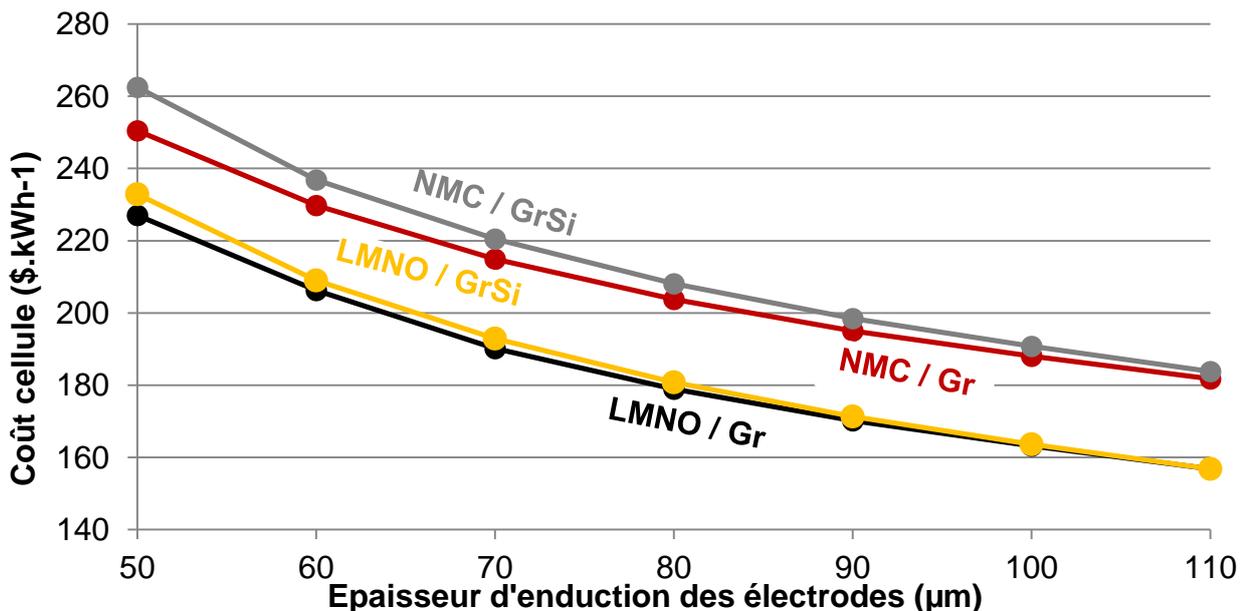


Figure 66 : Coût à l'énergie en fonction de l'épaisseur d'enduction pour 4 cellules

La différence de coût est quasiment nulle entre les deux négatives lorsque le LMNO sert d'électrode positive. On voit donc que si l'électrode négative composite silicium/graphite

permet une augmentation de la densité d'énergie massique (cf. Figure 63), avec les hypothèses de l'étude, le silicium semble sans effet sur le coût.

4.3 Evaluation des incertitudes sur le coût des cellules

Les incertitudes calculées sur le coût des matériaux actifs ont été réutilisées pour évaluer l'influence de l'incertitude sur le coût total de la cellule. Les résultats sont présentés sous forme de boîte à moustache sur la Figure 67, avec la boîte rouge correspondant à des écarts de plus ou moins un écart type, et les lignes correspondant à un écart de plus ou moins deux écarts types. L'intervalle d'incertitude de plus ou moins deux écarts types correspond à un écart de plus ou moins 6 % pour le NMC, 2 % pour le Li riche et LMNO et 1 % pour le LMFP.

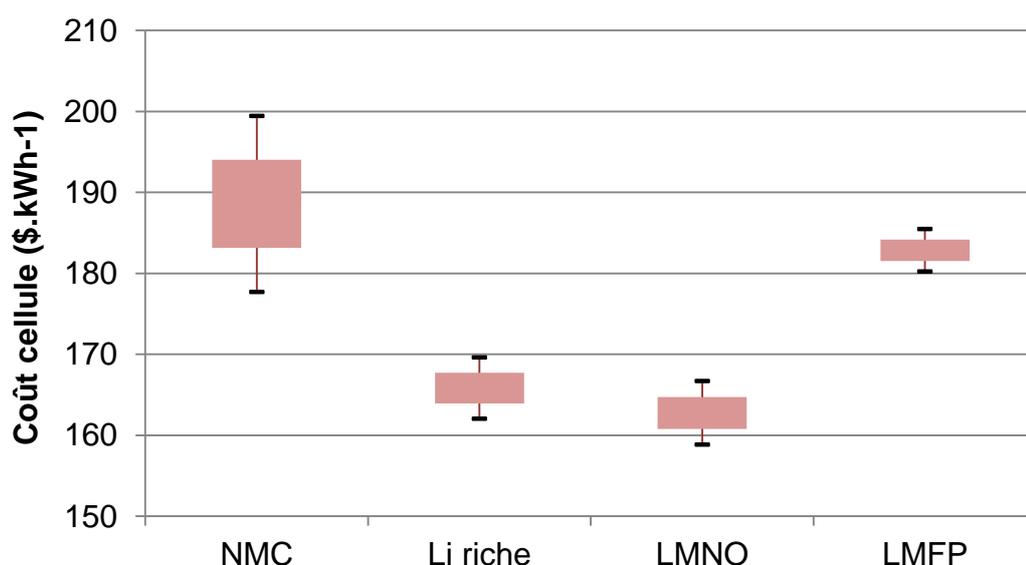


Figure 67 : Effet des incertitudes sur le coût des matériaux actifs sur le coût des cellules rapporté à l'énergie. Distribution normale, la boîte rouge correspond à un intervalle de $\pm\sigma$, les moustaches à $\pm 2\sigma$.

L'absence de cobalt, voire de nickel permet donc de réduire les incertitudes sur le coût des matériaux actifs. Ainsi les composés prometteurs qui ont été étudiés permettront de diminuer la sensibilité des matériaux aux variations aléatoire du cours de ces métaux de transition, ce qui offre un avantage important par la suite sur le coût des cellules. Ceci apparait sur la Figure 67 : la cellule utilisant le NMC a un intervalle d'incertitude de plus de 20 $\$/kWh^{-1}$, alors que la cellule utilisant le LMFP a un intervalle légèrement supérieur à 5 $\$/kWh^{-1}$. Une plus faible incertitude sur le coût final est importante pour les industriels de la filière.

5 Conclusion

Un modèle de coût pour les matériaux actifs d'électrode a été mis au point. Ce modèle a été utilisé pour déterminer le coût d'un composé de référence, le NMC, et de quatre matériaux prometteurs, le LMNO, le LMFP et le Li riche pour la positive, et le TNO pour la négative. Une autre matière, pour l'électrode négative, a été estimée par une autre méthode : le silicium nanométrique. L'influence de ces matériaux au niveau cellule a ensuite été étudiée. Tout d'abord en effectuant la conception de cellules basées sur ces matériaux, en réalisant le dimensionnement de ces cellules à partir des données du CEA ou bien de publications et du logiciel de conception BatPac (47). Une fois le dimensionnement de cellules effectué, le modèle amont OCA a été utilisé pour étudier le coût de ces cellules.

Il ressort de cette étude que le LMFP est le matériau au coût le plus faible au kilogramme et au kilowattheure. Ceci est lié aux précurseurs du LMFP qui sont basés sur des métaux abondants et peu chers que sont le fer et le manganèse. Le LMNO et le Li riche sont aussi intéressants d'un point de vue de coût au kilogramme et au kilowattheure en comparaison avec le NMC. Ceci est principalement lié à leur composition sans Cobalt, et des quantités de Nickel réduites. D'un point de vue coût cellule avec électrode négative de graphite conventionnelle, le Li riche et le LMNO se montrent très intéressants, permettant des gains de 10 à 15 % en comparaison du coût rapporté à l'énergie d'une cellule NMC. Le coût cellule avec du LMFP est par contre proche de cellules avec du NMC. Si le LMFP offre des améliorations des propriétés d'une cellule en comparaison du NMC, il peut être compétitif.

En ce qui concerne la densité massique d'énergie, le Li riche offre les meilleures performances des quatre matériaux actifs d'électrode positive. L'utilisation de Silicium à la négative permet d'améliorer cette densité, sans modification notable du coût cellule. Ainsi, pour la première fois, cette étude propose une comparaison des matériaux actifs prometteurs pour batteries lithium-ion dans un contexte homogène, avec des hypothèses identiques. Ceci permet de montrer les gains pour chacun des composés, et donc les enjeux qui accompagnent leur développement.

Cette étude fait ressortir des coûts projetés en 2020 de l'ordre de 160 \$.kWh⁻¹ et des densités d'énergie de l'ordre 220 Wh.kg⁻¹ au niveau des cellules, à comparer aux 260 \$.kWh⁻¹ (Chapitre V) et 160 Wh.kg⁻¹ actuels. S'agissant d'un travail sur les matériaux actifs, il reste des améliorations potentielles qui n'ont pas été prises en compte : sur les autres matières, sur la conception de la cellule et sur le coût de fabrication. Des améliorations sur ces points

seront nécessaires pour remplir les objectifs de la filière, comme par exemple ceux du gouvernement américain (119), qui vise pour 2022 un coût de 125 \$.kWh⁻¹ et une densité d'énergie de 250 Wh.kg⁻¹, et ce au niveau de la batterie complète.

Conclusion

Les batteries lithium-ion ont permis de relancer le marché des véhicules électriques, qui ne parvenait pas à véritablement décoller depuis la fin du XIX^{ème} siècle. Pour réussir à augmenter de manière significative les parts de marché de ces véhicules à l'avenir, une réduction de leur coût apparaît comme indispensable. Le prix élevé de ces automobiles est en effet souvent désigné comme le principal frein à leur achat, et est principalement lié au stockage de l'électricité dans les batteries lithium-ion. C'est pourquoi la problématique de cette thèse était la suivante : comment peut-on optimiser d'un point de vue coût les batteries lithium-ion?

Dans un premier temps, le contexte à l'origine de cette thèse a été présenté. Les solutions techniques pour le stockage de l'électricité ont été exposées et l'intérêt des batteries lithium-ion pour répondre aux problématiques de l'automobile a été montré. Ensuite un état de l'art des données économiques sur les composants, la fabrication et le coût total des batteries lithium-ion a été dressé, et les manques de la littérature actuelle sur ce sujet ont été mis en lumière. A partir de ce constat, la problématique de cette thèse a été proposée, ainsi que des hypothèses de recherche.

Notre hypothèse principale de recherche était que pour répondre à la problématique, il était possible et nécessaire de développer des modèles de coût et des référentiels adaptés palliant les manques apparus dans la littérature. Nous avons donc développé deux modèles de coût (OCA et MAC), ainsi qu'un référentiel sur les matériaux actifs et un référentiel sur la fabrication. Cette mise au point a nécessité de contourner de nombreuses difficultés, qui sont à l'origine des manques constatés. Citons notamment : la compréhension des paramètres influençant le coût, le grand nombre de données d'entrées, la difficulté d'accès à ces données confidentielles et la rapidité des évolutions.

L'utilisation de cet environnement pour la modélisation du coût des cellules a permis de tester les différentes hypothèses de recherche proposées. Nous avons ainsi émis l'hypothèse que les modèles pourraient permettre de détecter et de quantifier des voies d'amélioration de la conception des cellules. En effet, l'utilisation de ces modèles nous a permis de mettre en lumière le rôle de l'épaisseur des électrodes : un doublement de l'épaisseur d'enduction des électrodes (de 50 à 100 μm) permet de diminuer de 25% environ le coût des cellules. Nous avons aussi constaté le rôle majeur de l'épaisseur des électrodes dans la comparaison du

coût de cellules avec différents matériaux actifs. Il est nécessaire de prendre en compte ce paramètre pour éviter les biais de comparaison.

Nous avons aussi émis l'hypothèse qu'il était possible d'analyser les incertitudes des modélisations de coût. Une méthode de type Monte Carlo a donc été mise au point au cours de la thèse. Basée sur l'utilisation de MATLAB, elle permet d'évaluer l'ensemble des incertitudes liées aux modélisations en s'adaptant au cas étudié. A notre connaissance, la littérature ne détaillait pas d'utilisation de ces analyses pour les modélisations de coût. Sur les deux cas applicatifs proposés, nous avons montré que la plage d'incertitudes pour le modèle MAC était de $\pm 4,3\%$ et $\pm 5\%$, et de $\pm 4,5\%$ et $\pm 5,3\%$ pour le modèle OCA.

Enfin, nous avons supposé qu'il était possible de développer un modèle de coût pour les matériaux actifs, qui représentent la part la plus importante du coût total, et d'évaluer leur influence sur le coût des cellules. Nous avons réussi à développer ce modèle pour les matériaux actuels, et aussi pour des matériaux encore au stade de la recherche. Nous avons de plus proposé une modélisation du coût de cellules basées sur ces composés. Ainsi une comparaison objective des différents matériaux a pu être réalisée, et les coûts des cellules les utilisant ont pu être évalués.

Ceci nous a aussi permis d'estimer les coûts des futures cellules de batteries lithium-ion, basées sur les composés prometteurs étudiés, avec des améliorations de conception (épaisseur des électrodes) en comparaison avec les cellules actuelles. Cette étude fait ressortir des coûts projetés en 2020 de l'ordre de $160 \text{ \$.kWh}^{-1}$ et des densités d'énergie de l'ordre 220 Wh.kg^{-1} au niveau des cellules, à comparer aux coûts actuels évalués dans cette thèse d'environ $260 \text{ \$.kWh}^{-1}$ pour 160 Wh.kg^{-1} .

Ce travail permet donc de répondre à plusieurs interrogations sur les questions touchant à l'optimisation économique des batteries lithium ion, pour lesquelles la littérature ne fournissait pas les réponses suffisantes. Les modèles nécessaires à une compréhension détaillée de la structure de coût des cellules de batteries lithium-ion ont été mis au point, et des pistes de progrès prometteuses pour réduire les coûts ont été présentées. Ceci offre à la communauté scientifique une compréhension économique globale, précieuse pour l'optimisation des batteries lithium-ion.

Apports scientifiques :

L'innovation qu'apporte cette thèse par rapport à la littérature, c'est-à-dire la valeur ajoutée, peut se résumer en cinq points :

- Nouveau modèle de coût pour les cellules lithium-ion
- Méthode d'estimation des incertitudes de la modélisation de coût
- Mise en lumière du rôle prépondérant de l'épaisseur des électrodes
- Modèle de coût des matériaux actifs
- Eclairage sur le potentiel économique des nouvelles générations de batteries lithium-ion

Perspectives

Si cette thèse a permis d'apporter des réponses à certaines questions, elle en a aussi soulevées de nouvelles. Ces questions permettent de dégager de nouvelles directions pour poursuivre nos recherches :

- L'augmentation de l'épaisseur des électrodes apparaît comme un élément clé de la réduction du coût des batteries. Il serait intéressant d'approfondir l'étude des effets d'épaisseurs d'électrodes plus importantes sur les caractéristiques de la batterie, sur la fabrication ou sur les matériaux. Ceci pourrait permettre d'éclairer un pan prometteur mais peu exploré de l'optimisation des batteries.
- L'intégration des modèles de coût des cellules dans un modèle plus général allant jusqu'au pack batterie. Si ceci est réalisé en interne chez Renault, il pourrait être intéressant de proposer un modèle public, qui permettrait de comparer plusieurs conceptions.
- Intégrer les problématiques de seconde vie et de recyclage pour évaluer le coût complet des batteries en considérant l'ensemble du cycle de production. Si le marché n'était pas suffisamment mature pour inclure ces éléments dans nos travaux de thèse, ils sont amenés à jouer un rôle important pour le marché des batteries lithium-ion, et leur prise en compte va devenir incontournable à l'avenir.
- L'extrapolation de nos modèles et de nos référentiels à d'autres technologies que le lithium-ion, afin de comparer de manière homogène l'ensemble des technologies d'avenir, pour offrir une comparaison économique objective de chacune d'entre elles.

Ces technologies sont les batteries lithium soufre, sodium ion, redox vanadium ou métal air, ainsi que les super capacités, voir les piles à combustible.

Annexes

1 Etat de l'art

Des compléments à l'état de l'art réalisé dans les trois premiers chapitres de ce mémoire sont proposés dans ces annexes. Ils portent sur le fonctionnement des usines de production de batteries lithium-ion (1.1), sur la consommation d'énergie dans ces usines (1.2), sur le coût des cellules (1.3) et enfin sur les effets volume (1.4).

1.1 Fonctionnement d'une usine

Si des variantes existent entre chaque fabricant, le procédé de fabrication d'une batterie suit toujours les grandes lignes de ce schéma. Le déroulement de ce procédé étape par étape est détaillé dans ce chapitre.

1.1.1 Fabrication des électrodes

1.1.1.1 Mélangeage des matières d'électrode

Le mélangeage et la dispersion des particules représentent un défi car il faut remplir des objectifs peu compatibles. Ainsi d'importants efforts mécaniques sont imposés aux particules, alors qu'il faut dans le même temps en contrôler la taille, les propriétés de surface ou la morphologie, ainsi que les propriétés adéquates, notamment de viscoélasticité de l'encre, pour le bon déroulement de la suite de la fabrication.

Les étapes de mélangeage sont légèrement différentes entre l'électrode positive et négative. L'électrode positive nécessite une bonne répartition des agents conducteurs à cause de sa mauvaise conduction électronique intrinsèque. De plus l'utilisation d'un solvant organique est incontournable pour celle-ci dans le cas des oxydes traditionnels (NMC, NCA, LMO), nécessitant le PVdF comme liant, mais pose des contraintes industrielles. Pour la négative, la résistance plus importante du graphite face aux contraintes mécaniques complexifie le mélangeage (49).

Les matières constituant les électrodes sont mixées en petites quantités dans des citernes, d'abord les matériaux actifs et additifs, puis le solvant et le liant. Dans l'usine type proposée par Nelson *et al.*, trois citernes pouvant chacune contenir environ 1000 litres de mélange d'électrode positive et trois citernes pouvant contenir 900 litres de mélanges de matériaux

pour l'électrode négative sont utilisées (35). Les containers de préparation des matières sont ensuite amenés à côté de la machine d'enduction pour l'étape suivante.

1.1.1.2 Enduction des électrodes sur les feuillards

Pour l'enduction des matières sur le collecteur métallique, la technique d'enduction fente, (« slot die »), est la solution la plus répandue. Elle permet une enduction précise et homogène, ainsi qu'un ajustement facile des paramètres. Pour le séchage de ces électrodes suivant directement l'enduction, le solvant introduit au mélangeage pour faire l'enduction est extrait des électrodes nouvellement formées. Ce solvant constitue entre 40 et 60 % de l'encre en masse. La technique utilisée est le séchage par convection d'air, mais il est aussi possible de rencontrer un séchage par infrarouge (49).

Dans l'usine décrite par Nelson *et al.*, les lignes d'enduction sont des lignes continues, avec une laize de collecteur de 1,5 m fonctionnant à une vitesse de 10m.min⁻¹. La première partie du revêtement et du séchage a lieu sur une face du collecteur de courant, puis celui-ci est retourné et l'autre face est alors enduite puis séchée à son tour à l'aide d'une autre machine. A la fin de la ligne le feuillard est enroulé sur un grand rouleau (35).

TIAX avait évoqué en 2009 des vitesses d'enduction de 5m.min⁻¹, en envisageant la possibilité d'atteindre des vitesses de 50 m.min⁻¹ (120), et en 2013, le passage d'une enduction simple face, à une enduction double face, avec une laize plus large (37). Les chercheurs du Karlsruher Institut für Technologie, avec leur partenaire industriel KROENERT suggèrent que des vitesses de 100 m.min⁻¹ seront prochainement envisageables industriellement, car atteintes en laboratoire. Selon eux, il s'agit d'un doublement des vitesses industrielles actuelles, aux alentours de 50 m.min⁻¹, sans précisions sur la laize (121). Ces vitesses restent indicatives, car les matières d'électrode et l'épaisseur de celle-ci influencent la vitesse.

Les lignes d'enduction sont quasiment identiques pour les 2 électrodes. Le collecteur n'est pas enduit sur toute la largeur afin de laisser de l'espace pour former des clinquants, sur lesquels seront soudés les terminaux de la cellule (environ 10% de surface de collecteur non enduite). Le solvant pour l'électrode positive étant la NMP (classé CMR), il doit être récupéré et recyclé. Nelson *et al.* considèrent que 0,5% du solvant est perdu dans l'opération. Si le solvant utilisé pour l'électrode négative est l'eau, il n'y a pas besoin de le récupérer.

1.1.1.3 Calandrage et refente

L'électrode sortant de l'enduction est stockée sous forme de rouleau, qui est ensuite amené soit à l'étape de calandrage, soit de refente, l'ordre étant échangeable. Le but du calandrage est de compresser les matières enduites sur le feillard pour obtenir la porosité voulue par le fabricant. Ceci permet d'assurer une meilleure conductivité électronique de l'électrode, et de gagner en densité d'énergie. La pression linéaire exercée lors de cette étape est de l'ordre de 2000 N.mm^{-1} (49).

Le but de la refente est de découper les rouleaux initiaux (mesurant jusqu'à 2000m en longueur et 1000mm en largeur) en petit rouleaux moins larges, correspondant aux largeurs des électrodes. Les couteaux utilisés sont en céramique, notamment pour éviter la dispersion de particules conductrices pouvant causer des courts circuits dans la cellule finale (49).

1.1.1.4 Etuvage des électrodes

Les électrodes ainsi que le séparateur doivent ensuite être séchés, par un chauffage sous vide. L'étape de séchage finale, combinée au déroulement du procédé sous atmosphère sèche assure une quantité d'humidité résiduelle très faible dans le produit final. Ceci évite la formation de fluorure d'hydrogène dans la cellule finale, par réaction du sel de lithium de l'électrolyte en présence d'eau. HF est un gaz corrosif dont la présence abîmerait les matières de la cellule. Le séchage dure plusieurs heures à des températures d'environ 100 à 200°C. Les électrodes sont directement amenées en salle sèche après ce séchage et y sont stockées, le temps de parvenir à une température et humidité convenables selon les critères du fabricant.

1.1.1.5 Manutention

Pour chaque étape, il faut transporter et stocker des rouleaux d'électrodes en cours de transformation, afin de permettre un fonctionnement quasiment continu de l'installation. Des zones de stockage doivent être prévues à la fois dans et en dehors de la zone sèche, ainsi que des manutentionnaires. Ce chargement déchargement de rouleau entraîne des chutes de collecteurs notables. Pourtant aucun fabricant ne semble avoir une ligne fonctionnant en continu, probablement pour des raisons de flexibilité.

1.1.2 Fabrication des cellules

La fabrication des cellules va être décrite dans ce chapitre. Les variantes envisageables pour les étapes susceptibles de différer suivant les fabricants ou le format de cellule vont être présentées.

1.1.2.1 *Empilage des cellules*

La première étape est l'assemblage d'un élément constitué de couches d'électrodes positives et négatives en alternance avec une couche de séparateur. Ceci peut être fait de différentes manières, en fonction du type de cellule. Pour une cellule prismatique, le faisceau peut-être assemblé par plusieurs méthodes : un empilement feuille à feuille de couches indépendantes, un enroulement à plat des bandes, un enroulement cylindrique des bandes, écrasé pour obtenir un format prismatique, voire enfin, des combinaisons de ces techniques (122). Pour les cellules cylindriques, il s'agit directement d'un enroulement, simple et rapide à réaliser industriellement. Cet enroulement permet de plus d'assurer un très bon maintien des bandes d'électrodes et du séparateur.

En fonction de la méthode d'assemblage du faisceau d'électrodes, ainsi que de la conception de la cellule, il peut être nécessaire sur cette étape de réaliser de la découpe d'électrodes. Ainsi pour l'assemblage feuille à feuille, il faut justement découper les feuilles. En fonction de la conception de la cellule, il peut être nécessaire de découper des zones sur les collecteurs de courant, où les clinquants (Tabs) seront par la suite soudés. Ceci peut entraîner des chutes de collecteurs à cette étape.

1.1.2.2 *Soudage des collecteurs de courant*

Les clinquants de collecte du courant sont soudés à leurs terminaux respectifs (positifs et négatifs), généralement par une soudure ultrason. Cette procédure permet une connexion avec une résistance quasiment nulle et évite une surchauffe des électrodes au cours du processus de soudure. En fonction du type de cellules, la largeur et l'épaisseur des clinquants et des terminaux peut varier fortement.

1.1.2.3 *Emboîtement de la cellule dans son container*

Les faisceaux d'électrodes sont alors placés dans l'emballage prévu à cet effet. Pour les cellules en enveloppe souple, le film composite est préalablement embouti. Le faisceau est introduit entre deux films préformés par emboutissage, qui sont ensuite scellés thermiquement l'un à l'autre. Pour les cellules en boîtier rigide, la face supérieure du boîtier

est soudée sur les collecteurs de courant du faisceau d'électrode préalablement à l'emboîtement. Après la soudure, le faisceau obtenu est introduit dans le boîtier, et la face supérieure est fixée par soudure laser. Enfin, pour les cellules cylindriques, les clinquants sont soudés au faisceau d'électrodes, et le couvercle au clinquant. Le bobineau est ensuite introduit dans le godet, qui est fermé avec le couvercle. Les soudures pratiquées sont des soudures laser.

1.1.2.4 Cycle de formation et test de validation

L'étape du cycle de formation consiste à charger la cellule pour la première fois. C'est au cours de cette première charge que va se former la couche de passivation sur l'électrode négative, appelée SEI pour Solid Electrolyte Interface, particulièrement importante dans le comportement ultérieur de la cellule. La façon dont est réalisée cette première charge va influencer les propriétés de cette SEI, et donc de la cellule. Elle est réalisée avec beaucoup de précaution, selon un protocole propre à chaque fabricant, et généralement secret.

De manière générale, les opérations consistent à charger la cellule avec une première charge lente partielle, éventuellement à une température supérieure à 40°C, pour former une SEI de qualité. La cellule est ensuite déchargée pour mesurer la capacité et l'impédance. Une recharge au niveau final désiré est enfin effectuée. Des tests sont effectués en parallèle sur les cellules, pour vérifier leur comportement, et enlever les cellules défectueuses du flux. Le nombre de rebuts à cette étape reflète donc la qualité de l'ensemble du procédé du fabricant.

Des gaz sont formés dans la cellule au cours de cette étape. Pour les cellules en enveloppe souple, il est nécessaire de les évacuer, ce qui n'est pas le cas pour des cellules en boîtier rigide. La cellule est ouverte pour procéder à cette évacuation, puis la soudure finale est effectuée.

Etant donné qu'une dispersion minimale des performances entre cellules est souhaitable (la cellule la plus faible limitant la capacité globale du module (123)), et que la mise au point du procédé de fabrication est encore relativement récente, le taux de cellules testées ne répondant pas aux critères de performance semble être assez important chez les industriels. Nelson *et al.* considèrent ainsi que 5% des cellules en formation sont dans ce cas (47). Ceci représente un axe de progrès important, mais assez difficile à améliorer. Il nécessite en effet de détecter les étapes amont du procédé de fabrication à l'origine de ces défauts.

1.1.2.5 Gestion des salles anhydres

Une excellente gestion de l'humidité de l'air est nécessaire sur la ligne d'assemblage des cellules, jusqu'à ce que la cellule soit hermétiquement fermée. Une température maximale de point de rosée d'au moins -20°C doit être maintenue dans les salles où se déroule cet assemblage. Ceci permet de s'assurer d'une très faible humidité résiduelle dans les cellules. Le fonctionnement en salle blanche est aussi nécessaire pour minimiser les polluants potentiels (poussières et particules métalliques).

1.1.3 Autres étapes de fabrication

1.1.3.1 Assemblage des modules et du pack

Les cellules qui remplissent les spécifications à la fin de la ligne de fabrication sont assemblées en module. Il existe une grande variété de modules, au niveau de la forme, du nombre de cellules, des matières ou des composants. Il peut par exemple y avoir des éléments pour un refroidissement liquide que l'on ne retrouve pas chez d'autres fabricants. Le module est parfois fermé hermétiquement. A cette étape, les terminaux des cellules sont soudés entre eux, et les sondes de mesures nécessaires (température, tension des cellules) sont ajoutées. Des boîtiers électroniques peuvent être ajoutés au module en cas de BMS délocalisé (voir section 2.2.2).

Une fois finis, les modules sont assemblés sous forme d'un pack batterie, où là encore il existe une forte diversité de taille, de format, de matières et de fonction. L'assemblage des modules et/ou du pack peuvent être fait par le fournisseur de cellules ou bien par le constructeur automobile, en fonction des scénarios industriels.

1.1.3.2 Laboratoire de contrôle

Le but de ce laboratoire est d'assurer le respect des spécifications attendues pour les matières premières comme pour les éléments fabriqués dans l'usine. Le personnel du laboratoire collecte ou supervise la collecte d'échantillons et réalise des analyses ex-situ.

1.1.3.3 Cellules rejetées et recyclage des rebuts

Les rebuts sont générés au cours de la fabrication des électrodes et par le rejet des cellules finales. Certains rebuts peuvent être récupérés comme les chutes de cuivre ou d'aluminium. Pour ce qui est de la récupération (au lieu de jeter) des matières d'une électrode ou d'une cellule non-conforme, elle est plus délicate. On peut techniquement envisager un recyclage de ces déchets (124), c'est ensuite au fabricant de déterminer si le jeu en vaut la chandelle.

Les hypothèses de pertes de matière lors de la fabrication de (35) sont représentées dans le Tableau 30. Elles ne font pas apparaître de différenciation entre pertes dues à des imprévus et pertes inévitables dues à la conception.

Tableau 30 : Répartition des rebuts de fabrication en % (35)

	Mélangeage	Enduction	Refente	Empilage	Remplissage	Total
Electrode+	99	95	99	99		92,2
Electrode-	99	95	99	99		92,2
Feuillard+		99	92	99		90,2
Feuillard-		99	92	99		90,2
Séparateur				98		98
Electrolyte					94	94

Un taux de rebuts final des cellules est aussi pris en compte en fin de ligne. En plus de ces rebuts, Nelson *et al.* considèrent que seulement 95% des cellules sortant du cycle de formation remplissent les critères requis (47). Il s'agit de taux très élevés en comparaison avec des industries plus anciennes. On peut espérer de nombreux progrès de ce côté, dont l'impact sur le coût serait conséquent.

1.2 Consommations d'énergie

La consommation d'énergie représente une part non négligeable du coût de fabrication. Plusieurs publications portant sur l'analyse de cycle de vie des batteries lithium-ion se sont intéressées à la consommation d'énergie du procédé de fabrication des batteries lithium-ion. Ces informations sont particulièrement utiles pour l'estimation du coût de l'énergie.

Ainsi Notter *et al.* (102) ont proposé des consommations d'énergie pour produire 1 kg de batterie de type LMO/Graphite. Ces valeurs sont présentées en MJ.kWh⁻¹ dans le Tableau 31, sachant que la batterie a une énergie de 0,114 kWh.kg⁻¹. La consommation d'énergie pour la fabrication du LMO représente à elle seule 51 % de la consommation d'énergie.

Tableau 31 : Consommation d'un procédé de fabrication d'une batterie (102)

Composant	Valeur (MJ.kg ⁻¹)	Valeur (MJ.kWh ⁻¹)	Proportion
LMO	2,49	21,82	51%
Sel LiPF ₆	0,03	0,26	1%
El. négative	0,39	3,44	8%
El. Positive	0,17	1,49	3%
Séparateur	0,05	0,43	1%
Solvant de l'électrolyte	0,05	0,43	1%
Fabrication cellule	0,35	3,01	7%
Total cellule	1,01	8,89	21%
Fabrication pack	0,39	3,39	8%
Total	4,93	43,16	100%

En 2010, Zackrisson *et al.* ont proposé les consommations pour le procédé de fabrication de batterie LFP/Gr de 20,5 kWh.kg⁻¹, dont 11,7 kWh.kg⁻¹ d'énergie électrique et 8,8 kWh.kg⁻¹ d'énergie thermique. Ces données sont basées sur des informations de Saft de 2008 (125,126). Les indications données portent sur l'énergie primaire, qui n'est pas uniquement l'énergie consommée sur le réseau par l'usine, mais l'énergie utilisée dès le départ pour produire l'électricité sur le réseau. Il est intéressant de noter que la conversion de l'énergie primaire en électricité a une efficacité de 35% selon la publication, et que l'on peut donc facilement revenir à l'énergie absolue.

La publication de Sullivan (127) regroupe différentes consommations d'électricité trouvées dans la littérature (Tableau 32). Ces consommations sont données pour le procédé de fabrication global, sans détailler chaque étape. Afin de pouvoir comparer avec des données exprimées en MJ.kWh⁻¹, la conversion a été ajoutée. Dans cette publication, il est précisé que les résultats de Notter (Tableau 31) sont particulièrement faibles, ce qui avait déjà été soulevé par (128).

Tableau 32 : Consommations d'énergie selon Sullivan *et al.* (127)

Chimie	Source	Energie (MJ.kg ⁻¹)	Energie (MJ.kWh ⁻¹)
NMC/Gr	Majeau-Bettez <i>et al.</i> (2011) (129)	88	786
LFP/Gr	Majeau-Bettez <i>et al.</i> (2011) (129)	86	977
NMC/Gr	Burnham <i>et al.</i> (2010)	91,5	-
NCA/Gr	Rydh (2005)	96 / 144	1 200 / 1 200
NCA/Gr	Ishihara (non daté)	32	-
LMO/Gr	Ishihara (non daté)	30	-

En 2012, Amarakoon *et al.* ont proposé les consommations d'énergie primaire du Tableau 33 (103). Les valeurs sont exprimées en MJ d'énergie primaire par kilowattheure de la batterie. Les données obtenues sont issues d'un mélange entre données d'industriels et données de la littérature. Les données pour le LFP proviennent d'une étude faite au Canada par Phostech Lithium, contrairement aux autres données provenant des Etats unis, alors que le mix énergétique est différent entre les deux pays, ce qui introduit un artefact dans l'étude.

Tableau 33 : Energie primaire consommée par composants (MJ.kWh⁻¹) (103)

Chimie	LMO	NMC 442	LFP
El. négative	186	168	152
El. Positive	426	645	462
Séparateur	16,9	0	37,6
Electrolyte	63,1	248	140
Enveloppe cellule	26,8	158	339
Fabrication cellule	28,3	0	0
Total cellule	747	1220	1130
BMS	43,7	43,7	43,7
Emballage Pack	68,9	68,9	165
Fabrication pack	89,5	621	1150
Transport	8,46	10,2	9,63
Total	869	1960	2500

Il reste des incertitudes sur le procédé de fabrication dans l'étude. Ainsi aucune donnée n'étant disponible pour les auteurs sur la fabrication des feuillets pour l'électrode négative ou la fabrication de l'enveloppe de la cellule, des extrapolations ont été effectuées.

Ellingsen *et al.* ont eux proposé trois scénarios différents de consommation d'électricité pour la fabrication des cellules, avec des valeurs de 586, 960 et 2 318 MJ_{consommé.kWh_{cellule}⁻¹} pour ces trois scénarios (104).

Comme on peut le voir, des publications sur l'analyse de cycle de vie donnent des renseignements sur la consommation d'énergie du procédé de fabrication des batteries lithium-ion. Les consommations d'énergie sont au cœur du débat pour ce type d'analyse, mais aucun consensus n'a été trouvé sur la consommation réelle, qui fait encore l'objet de discussion chez les experts. Selon Dunn, l'origine de la discorde proviendrait en grande partie du taux d'utilisation usine des différentes études. Cette consommation a des conséquences majeures sur le bilan environnemental des batteries (41,51).

1.3 Coût des cellules

Dans ce paragraphe, une bibliographie complémentaire à celle du Chapitre III est menée. Elle concerne les études antérieures à l'année 2012, dont les résultats présentent un fort intérêt pour ce travail. Une sélection des travaux les plus pertinents a là aussi été effectuée, et les publications dont la fiabilité était clairement médiocre ont été écartées. Les coûts sont donnés dans la monnaie utilisée dans la publication.

Dans ses travaux (*cf.* Figure 68), Anderson explore les différents chemins de variation de coût envisageables pour les batteries lithium-ion, en utilisant son propre modèle de calcul (50). Une évolution des coûts selon différents scénarios est donnée : la base correspond à une baisse du coût de 4% tous les ans, l'optimiste correspond à des progrès importants de la fabrication, le pessimiste à de faibles progrès. Anderson suggère que le scénario optimiste semble le plus probable, au vu des investissements sur le marché des batteries lithium-ion. Les points violets correspondent à une projection de 2008 du Boston Consulting Group (BCG), reportés à titre indicatif.

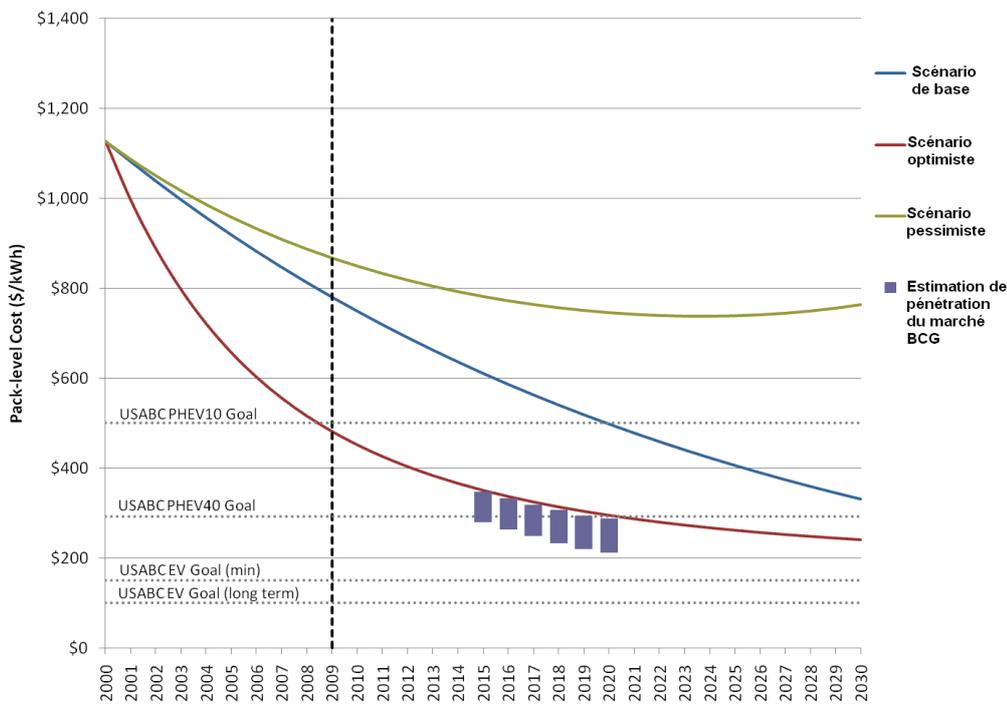


Figure 68 : Analyse de différents scénarios de coût (50)

En 2010, Cheah *et al.* ont publié une revue bibliographique sur le coût de l'électrification d'un véhicule. Le coût des batteries varie selon ces données de 260 à 1700 \$.kWh⁻¹, alors que les objectifs fixés par le consortium américain USABC sont compris entre 200 et 300 \$.kWh⁻¹ en 2016. La Figure 69 issue de cette publication montre ces coûts (de 2007 à 2020) pour des packs batterie pour PHEV (130).

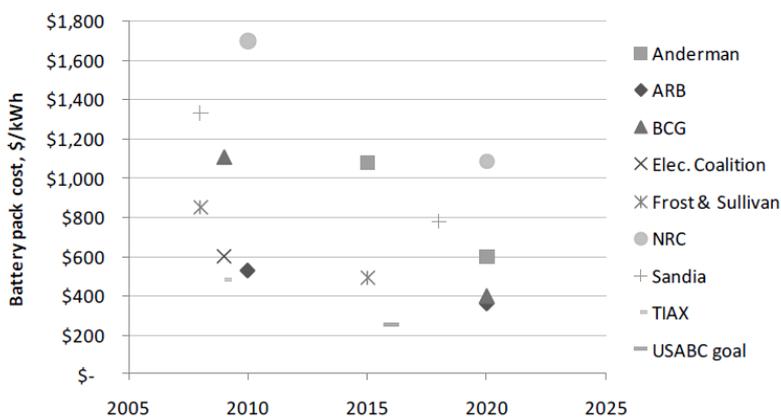


Figure 69 : Estimation du coût du pack batterie pour PHEV (130)

En 2010 Delucchi *et al.* ont publié un document sur le coût des véhicules électriques (131). Des informations d'autres publications (avant 2007) sur le coût des batteries pour véhicule BEV ou PHEV sont reprises dans ce document et sont reportées dans le Tableau 34.

Tableau 34 : Etat de l'art coût de pack batterie (131)

Référence	Application	Année/cadre référence	Coût
(132)	BEV 320 km	2007 cas 1, 48 kWh	12 000 \$
	BEV 320 km	2007 cas 2, 42 kWh	8 400 \$
	PHEV 16 km	2007	1 500 \$
	PHEV 48 km		2 800\$
	PHEV 96 km		4 800\$
(133)	BEV 480 km	2009	12 119 \$
(134)	BEV 25 kWh	2010	27 700 \$
		2030	6 200 / 7 865 / 9530 \$

Kromer *et al.* considèrent deux batteries pour une voiture électrique avec une autonomie de 320 km : une batterie de 150 Wh.kg⁻¹ à 250 \$.kWh⁻¹ (cas 1) et une autre avec 300 Wh.kg⁻¹ à 200 \$.kWh⁻¹ (cas 2) (132). Offer *et al.* considèrent 3 scénarios pour 2030, un scenario optimiste, moyen et pessimiste (134).

Un rapport d'un institut de recherche américain EPRI a proposé en 2010 une revue des analyses de coût de la littérature. Ce rapport a été élaboré en collaboration avec les chercheurs d'Argonne, et propose des pistes de réflexion qui ont été ensuite utilisées pour le développement de l'outil BatPac (135).

Brooker *et al.* ont envisagé le problème sous un angle intéressant en proposant une modélisation du coût de la batterie selon l'Équation 12 (P_b : puissance crête en kW et E_b : énergie de la batterie en kWh) (53).

Équation 12

$$\text{\$Batterie} = \frac{22\text{\$}}{\text{kW}} P_b + \frac{700\text{\$}}{\text{kWh}} E_b + 680\text{\$}$$

En 2010 Brodd (48) a proposé un coût total des matières de 1,01 \$ pour une cellule NMC 18650 de 2,2 Ah. Il a en 2013 réactualisé ce coût à 1,30 \$ pour une cellule 18650, sans préciser les caractéristiques techniques de la cellule (45). Dans cette publication, une comparaison des coûts de production de cellules entre la Chine et les Etats-Unis est proposée.

Pour le scénario de volume maximum (350 millions de cellules par an), le coût est de 1,65 \$ pour les Etats-Unis contre 1,85 \$ en Chine (incluant les frais généraux). Si, à titre indicatif, ce prix est appliqué aux accumulateurs 18650 les plus performants du marché (environ 10

Wh pour des conditions de décharge automobile (7)), les prix seraient de 165 et 185 \$.kWh⁻¹.

Mock a proposé un coût total matière compris entre 100 et 150 \$.kWh⁻¹ pour des batteries de forte énergie (électrode positive de 150 µm d'épaisseur) et 190 à 250 \$.kWh⁻¹ pour des batteries de puissance (30 µm). Par des analogies avec les proportions de coût disponible dans la littérature, il suggère un coût pour le système complet compris entre 210 et 375 \$.kWh⁻¹ pour une batterie d'énergie et 400 et 625 \$.kWh⁻¹ pour une batterie de puissance (39).

En 2011, Boekestyn *et al.* ont proposé la décomposition de coût du Tableau 35, pour une batterie NMC de 25 kWh, fabriquée à 100 000 exemplaires par an, avec des cellules de 180 Wh, en se basant sur des données de la Deutsche Bank de 2009. Le périmètre couvert par la partie frais généraux est peu explicite (136). Selon leurs estimations, le prix des cellules ne descendra pas en dessous d'une fourchette de 270 à 300 USD.kWh⁻¹.

Tableau 35 : Décomposition de coût de la batterie (136)

	USD par batterie	% de la cellule	% coût batterie
Cathode	1 663	22,5	10,0
Anode	477	6,5	2,9
Electrolyte	447	6,0	2,7
Feuillard Cuivre	184	2,5	1,1
Séparateur	608	8,2	3,7
Enveloppe	1 050	14,2	6,3
Autres matières	375	5,1	2,3
Total matière	4 804	65	28,9
MOD fabrication cellule	2 586	35	15,6
Total cellule	7 390	100	44,5
Composants pack	3733		22,5
MOD fabrication pack	268		1,6
Total Pack	11 391		68,6
Garantie	228		1,4
Frais généraux et profits	4 979		30,0
Coût total	16 598		100,0

1.4 Effets volume

Les volumes de production affectent le coût d'une batterie. En effet plus la production de batteries est importante, plus des mutualisations au sein d'une usine peuvent être réalisées,

et donc l'amortissement des moyens à la pièce être diminué. Ainsi dans le modèle de Nelson *et al.*, les volumes de production affectent le prix final de la batterie : l'utilisateur peut choisir les volumes de production annuelle et chaque étape du procédé sera affectée (35).

Comme cela a été présenté dans le Tableau 8, il existe un ou plusieurs inducteurs de coût pour chaque étape du procédé dans ce modèle. Ces inducteurs dépendent directement du nombre de batteries produites par an. L'estimation de coût C de chaque étape est faite en multipliant le coût d'investissement de référence par le ratio d'inducteur de coût avec une certaine puissance p (*cf.* Équation 13). Avec C₀ le coût d'un équipement conçu pour l'usine de référence et R₀ la valeur de l'inducteur de référence pour cet équipement.

Équation 13 : effets de volume dans BatPac

$$C = C_0 \left[\frac{R}{R_0} \right]^p$$

La puissance p est fixée par les auteurs et, est représentative des gains potentiels liés aux effets d'échelle pour chaque étape. Elle est comprise entre 0 et 1. Lorsqu'elle est faible, cela signifie que l'étape bénéficierait fortement d'une production importante. Lorsqu'elle est proche de 1, cela signifie que l'étape est déjà optimisée et qu'une augmentation de la production ne donnerait pas de gains importants. p est généralement compris entre 0,6 et 0,7.

Lorsque une augmentation des volumes de production nécessite l'achat de plusieurs petites machines identiques, au lieu d'une seule de plus grande capacité, comme c'est le cas pour le cycle de formation par exemple, p peut avoir une valeur élevée, allant jusqu'à 0,9. La valeur de p n'atteint jamais 1, car il y a des coûts d'installations qui sont pris en compte, sur lesquels des économies sont nécessairement réalisées, même dans le cas de plusieurs petites machines.

Des équations similaires ont été appliquées pour déterminer la main d'œuvre et la surface au sol nécessaires à chaque étape. Le facteur p estimé est faible pour la main d'œuvre, habituellement entre 0,4 et 0,5 et p est semblable aux coefficients pour le coût d'investissement pour la surface au sol.

Nelson *et al.* font donc l'hypothèse d'un amortissement des moyens en ne considérant la fabrication que d'un seul type de cellule sur la ligne. Ceci suppose soit que l'usine fabrique la même cellule pour plusieurs clients, soit qu'elle est dimensionnée pour répondre aux besoins d'un seul client. Ces hypothèses supposent une forte standardisation des cellules.

Il existe un risque avec ce type d'hypothèse : dimensionner une usine avec une capacité totale de production trop faible. En effet, si une usine est plus flexible, et peut fabriquer plusieurs cellules en fonction des besoins de ces clients, alors il est possible d'acheter des machines plus grosses dès le départ, et de faire passer les différentes cellules à tour de rôle sur les lignes. Avec ce scénario, beaucoup plus classique industriellement, les effets de volumes peuvent être beaucoup plus élevés qu'avec le scénario de Nelson *et al.*.

Dans BatPac, des effets de volumes sont aussi donnés pour les achats de matériaux d'électrode positive. Les prix de référence donnés C_0 (cf. Tableau 4) le sont pour une quantité de 1 700 tonnes par an (R_0). Ils varient en fonction de la quantité R en tonnes de matériaux nécessaires par an, selon la formule de l'Équation 13, avec $p=0,95$.

Le modèle de Nelson et al (35) permet une première approche utile de ces effets de volume. Sans revenir sur l'aspect flexibilité de l'usine, un autre aspect délicat de l'approche est la variation de coût linéaire avec les volumes. On obtient un résultat automatique, qui ne repose pas sur des éléments tangibles.

En réalité, on comprend bien que cette relation coût volume doit-être discrète. Il semblerait plus sain d'envisager le problème sous un autre angle : quels sont les volumes clés pour lesquels des gains de coûts seront attendus. Et existe-t-il une limite à partir de laquelle on ne fait plus de gains effectifs ? Ceci permettrait ainsi aux fournisseurs de déterminer quelle doit être la taille à donner à l'usine pour atteindre la meilleure performance économique. Charge ensuite à eux de rendre les lignes flexibles, et grâce à cet outil industriel performant, d'arriver à les charger au maximum.

Dans leur état de l'art, Cheah *et al.* (130) ont repris des estimations de la littérature de la baisse du coût des batteries lithium-ion en fonction des volumes. Elles sont données pour 500 et 2500 MWh.an⁻¹, ce qui correspondrait à environ 20 000 et 100 000 batteries pour un véhicule électrique comme la Zoé de Renault. Les coûts sont reportés dans le Tableau 36.

Tableau 36 : Coût de pack batterie en fonction des volumes repris par Cheah et al. (130)

Référence	Application	Cadre de référence	Coût
Kalhammer (38)	HEV	500 MWh.an ⁻¹	800 \$.kWh ⁻¹ ou 2400\$
		2 500 MWh.an ⁻¹	550 \$.kWh ⁻¹ ou 1700\$
	PHEV 10	500 MWh.an ⁻¹	575 \$.kWh ⁻¹ ou 3300\$
		2 500 MWh.an ⁻¹	400 \$.kWh ⁻¹ ou 2200\$
	PHEV 40	500 MWh.an ⁻¹	380 \$.kWh ⁻¹ ou 7100\$
		2 500 MWh.an ⁻¹	260 \$.kWh ⁻¹ ou 4900\$
Air Ressources Board (137)	PHEV 10	500 MWh.an ⁻¹	480-600 \$.kWh ⁻¹
		2 500 MWh.an ⁻¹	340-400 \$.kWh ⁻¹
	PHEV 40	500 MWh.an ⁻¹	450-560 \$.kWh ⁻¹
		2 500 MWh.an ⁻¹	320-370 \$.kWh ⁻¹

Les effets de volume représentent un levier de baisse des coûts important, mais difficile à estimer. Là encore la publication de Nelson *et al.* se distingue des autres par son approche claire et détaillée. Toutefois, si la méthode utilisée est utile en première approche, elle ne repose pas sur des éléments tangibles, mais une loi de calcul approximative. De plus, l'hypothèse de standardisation du produit ne semble pas en ligne avec le marché actuel, où les outils de production sont capables de fournir différents produits adaptés aux demandes des clients.

2 Référentiel de fabrication

2.1 Organisation globale du fichier

Le référentiel est un fichier Excel, dans lequel l'information est organisée sous plusieurs onglets. L'onglet « synthèse » est le principal onglet du document, regroupant les données clés. L'information sur le procédé de fabrication est découpée en 5 grandes parties : fabrication des électrodes, assemblage des cellules, formation des cellules, structure de l'usine et assemblage des modules (*cf.* Figure 70). Ces parties sont elles-mêmes décomposées en plusieurs opérations, représentées sur la Figure 70. La partie électrode est ainsi décomposée en 9 étapes élémentaires, la partie assemblage cellule est décomposée en 5 parties et la partie formation est divisée en 5 opérations. Les parties « structure de l'usine » et « assemblage des modules » ne sont pas décomposées.

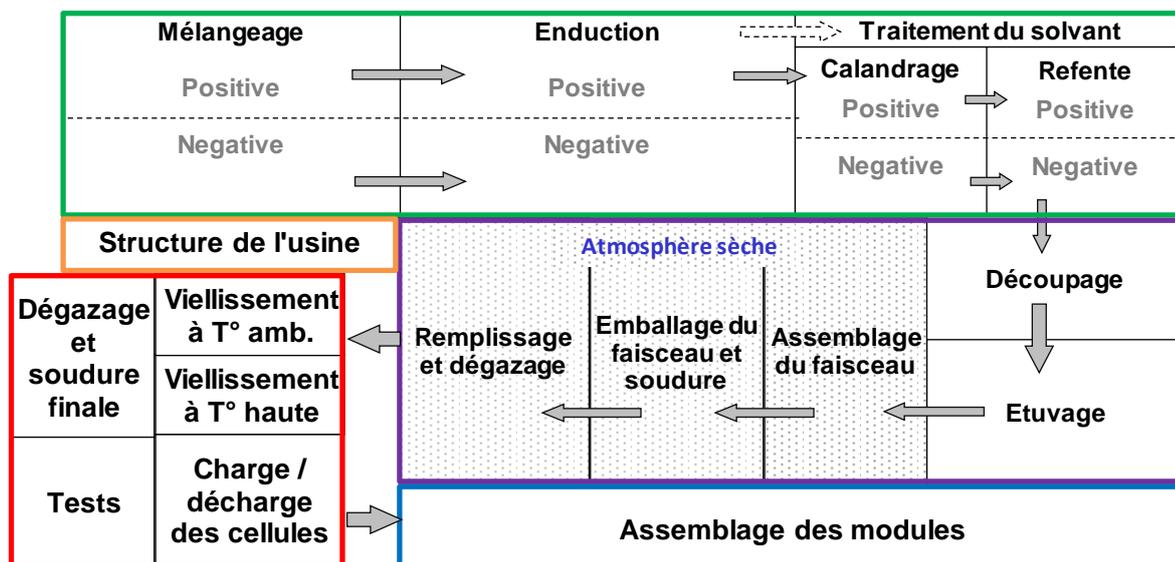


Figure 70 : Découpage de la fabrication dans le référentiel : vert=fabrication électrodes, bleu foncé =assemblage cellules, rouge=formation, orange=structure usine et bleu clair=assemblage modules

Un onglet dédié à chaque étape de fabrication (21 étapes) récapitule sous forme de graphique les informations disponibles dans l'onglet « synthèse » sur cette étape, comme nous le verrons dans le paragraphe 3.2. Un onglet « parité » regroupe les taux de change utiles pour le référentiel. Toutes les informations de coût sont converties en euros à l'aide des taux renseignés dans l'onglet. Ceci permet de comparer toutes les données entre elles, et de remettre simultanément tous les taux de change à jour. Par ailleurs les taux de change au moment où l'information a été donnée sont aussi conservés dans le fichier.

Enfin, des onglets sont prévus pour capitaliser les informations supplémentaires qui ne peuvent pas être entrées dans le référentiel : des données sur la gestion des effectifs, des notions éparses d'investissements, des données sur les fluides et l'énergie et sur les rebuts de fabrication des matières. De manière générale, beaucoup d'endroits dans le fichier sont prévus pour insérer des commentaires, et des références aux documents d'origine, afin de rendre traçable et compréhensible les informations qui ont été capitalisées.

Les données sur le procédé de fabrication des cellules lithium-ion sont ainsi classées dans une logique qui permet de multiples comparaisons. Les informations qui sont entrées dans ce référentiel vont être présentées dans les paragraphes suivants, afin de rendre intelligible le fonctionnement et l'intérêt du fichier.

2.1.1 Informations à compléter pour les opérations principales

Les opérations principales correspondent aux 5 cadres de couleurs de la Figure 48. En dehors du cas particulier « structure usine », ces opérations peuvent avoir lieu dans la même usine, ou bien dans des endroits séparés. Les informations à compléter sur ces opérations sont résumées dans le Tableau 37.

Tableau 37 : Informations à compléter pour les opérations principales.

Information demandée	Description de l'item
Temps d'ouverture et de fonctionnement de l'atelier	L'hypothèse de référence est 24 h par jour 300 jours par an, soit 7200 heures/an.
Main d'œuvre directe	Nombre de personnes postées sur la ligne.
Capacité maximum de la ligne (en MWh/an et inducteur adéquat)	Capacité maximum théorique de la ligne dans un contexte standard d'utilisation (7200 h/an).
Investissement avec et sans frais d'installations	Coût des machines et de l'infrastructure liée à ces machines (variable en fonction des pays).
Budgets annuels de maintenance, fournitures, fluides et énergies	Estimation des frais de fonctionnement.
Durée d'amortissement des machines	Durée généralement de 6 ans.
Salaire annuel moyen chargé	Coût total des salaires de la main d'œuvre directe à l'année.
Rebut (%)	Rebut machine cumulé de l'atelier.

2.1.2 Informations à compléter pour les opérations secondaires

Les opérations secondaires correspondent aux opérations unitaires composant les opérations principales. En fonction du type d'opération, de légères variations peuvent exister dans les informations à compléter, notamment pour le calcul des temps de cycle. Le menu global pour chaque opération est divisé en 2 sous-parties détaillées dans le Tableau 38 et le Tableau 39.

Tableau 38 : Description de la machine

Description de la machine	Description de l'item
Nom et capacité de la machine	Informations générales sur la machine et sur sa capacité.
Nombre de machines, coût et contexte d'acquisition, durée d'amortissement	Coût machine, date d'achat, nombre de machines, monnaie d'achat, utilisation dédiée ou capacitaire.
Nombre d'opérateurs et qualification	Informations sur la main d'œuvre de la ligne

Tableau 39 : Description de l'opération

Description de l'opération	Description de l'item
Cycle et rafale, temps d'arrêts et rebuts	Détermination du taux horaire de pièces
Frais de fonctionnement	Evaluation des budgets fournitures, fluides et énergie, maintenance et infrastructure de l'opération
Contrôle de l'environnement	Conditions atmosphériques (humidité, température, qualité de l'air)
Bâtiment	Surface au sol et volume occupés par la machine

Le référentiel de transformation recense au total une vingtaine d'étapes de transformation (cf. Figure 48), pour lesquelles environ 30 informations sont à compléter si possible (cf. Tableau 37, Tableau 38 et Tableau 39). Ces étapes sont documentées pour environ 60 références pour le moment, soit au total, plus de 40 000 cases d'informations actuellement dans ce fichier. Ce référentiel permet donc d'organiser l'ensemble de l'information sur la fabrication malgré la complexité de la tâche

2.2 Graphiques récapitulatifs

Les graphiques récapitulatifs sont présentés dans le mémoire pour la partie électrode dans le Chapitre VI. Les mêmes graphiques pour la partie assemblage cellules sont repris ici en annexe pour simplifier la lecture du mémoire.

2.2.1 Assemblage des cellules

Pour la fabrication des électrodes, le recoupement de données entre plusieurs sources était relativement simple, la méthode de transformation étant quasiment identique pour tous les fabricants. Par contre pour l'assemblage des cellules, il existe de fortes disparités entre les fabricants. La comparaison porte donc sur des procédés qui ne correspondent pas forcément au même objet (cellule cylindrique ou prismatique, boîtier rigide ou souple, capacité de la cellule, typage) ni sur la même méthode d'assemblage (empilement, enroulement, découpage facultatif des collecteurs).

L'inducteur de coût retenu pour cette étape dans ce chapitre est le nombre de cellules fabriquées par an. Pour une décomposition détaillée étape par étape, l'inducteur de coût le plus adapté change. Ainsi, l'inducteur de coût est :

- le nombre de couches d'électrode fabriquées par an pour le découpage et l'assemblage du faisceau
- la surface d'électrodes fabriquées par an pour le séchage des électrodes

- le nombre de cellules fabriquées pour l’emballage, la soudure, le remplissage et le dégazage.

La Figure 71 représente l’investissement total pour l’assemblage des cellules en fonction de la capacité de stockage d’énergie fabriquée par an. La diversité des informations est un peu plus faible que pour la fabrication des électrodes, puisque la plupart des points proviennent du fournisseur 1. Ceci est lié au fait que des fournisseurs sollicités n’ont pas répondu, ou alors avec des données non exploitables. Sur cette figure, le point de BatPac (triangle orange), correspond à 870 MWh de capacité par an, pour un investissement supérieur à 13 millions d’euros (l’axe vertical ne commence pas au 0).

Données confidentielles pour la version publique

Figure 71 : Investissement pour l’assemblage des cellules en fonction de la capacité de stockage produite (MWh.an⁻¹) (fournisseur 1=croix, fourn. 2=tiret ou rond, fourn. 7=carré, BatPac=triangle)

La Figure 72 représente aussi l’investissement pour l’assemblage des cellules, mais cette fois en fonction du nombre de cellules fabriquées par an. On peut voir que le point du fournisseur 1 entouré en rouge, est fortement décalé en comparaison avec les autres points entre les deux figures. Cela est lié au typage haute puissance de la batterie concernée. Le rapport entre la capacité en cellule et en quantité d’énergie est donc très différent de celui

des batteries d'énergie. Par conséquent une distorsion du point apparait entre la Figure 71 et la Figure 72.

Données confidentielles pour la version publique

Figure 72 : Investissement pour l'assemblage cellule en fonction du nombre de cellules par an (fournisseur 1=croix, fourn. 2=rond, fourn. 7=carré, BatPac=triangle)

Là encore, ces données ne correspondent pas à des contextes de dates et de pays identiques. De même la technique d'assemblage n'est pas la même, et celle-ci peut jouer un rôle dans les caractéristiques de la cellule (puissance, durabilité, encombrement). Mais elles permettent de faire ressortir une tendance de coût. On peut remarquer que le fournisseur 1 prévoit une diminution du coût de ces machines de 3^{ème} génération (en 2020, en comparaison avec 2012 et 2016). Les points du fournisseur 7 correspondent à des indications anciennes, ce qui peut expliquer au moins en partie le fait qu'ils soient supérieurs aux autres. En ce qui concerne le format de ces cellules, il s'agit soit d'enveloppe souple ou de boîtier rigide, sans différence marquante entre les deux.

En ce qui concerne la main d'œuvre directe, la Figure 73 montre une disparité relativement importante entre les différentes sources. Ceci peut-être lié à des optimisations du fabricant ou à une automatisation plus ou moins marquées du procédé de fabrication. Ainsi le pays où est située l'usine aura une forte influence. Plus la main d'œuvre est chère, plus l'automatisation de la ligne sera recherchée.

Données confidentielles pour la version publique

Figure 73 : Main d'œuvre directe en fonction de la capacité de stockage produite (MWh.an⁻¹) (fournisseur 1=croix, fourn. 2=tiret ou rond, fourn. 7=carré, BatPac=triangle)

2.2.2 Formation des cellules

L'inducteur de coût pour l'étape de formation des cellules est là aussi le nombre de cellules fabriquées par an. Ce qui semble influencer le plus fortement la durée de l'opération est le savoir-faire du fabricant (à la fois sur la façon de procéder et sur le choix d'additifs performants), avec des écarts de durée allant du simple au double. Les figures dégageant une tendance similaire à celle de l'assemblage des cellules elles n'ont pas été représentées.

3 Fonction MATLAB d'analyse des incertitudes

```
function [ ] = Unc_analysis_OCA()
% Cette fonction MATLAB permet d'étudier les incertitudes de la modélisation OCA

% Une extraction des données depuis EXCEL est d'abord effectuée (coût des
différents postes et loi de distribution des données). La simulation est lancée
sur le nombre de tirage demandé et la distribution finale est ainsi calculée Les
résultats finaux sont inscrits dans le fichier Excel du départ.

Materials=xlsread('Matlab_uncertainty_analysis_Oof.xlsx', 'materials');
Process=xlsread('Matlab_uncertainty_analysis_Oof.xlsx', 'process');
Nb_iteration=1000000;
```

```

% On cherche la masse des différentes matières dans le fichier Excel
Pos_mat_mass= Materials(1,5);
Pos_cond_mass= Materials(2,5);
Pos_bind_mass= Materials(3,5);
Pos_foil_mass= Materials(4,5);
Pos_solv_mass= Materials(5,5);
Pos_mass=[Pos_mat_mass,Pos_cond_mass,Pos_bind_mass,Pos_foil_mass,Pos_solv_mass];
Neg_mat_mass= Materials(6,5);
Neg_cond_mass= Materials(7,5);
Neg_bind_mass= Materials(8,5);
Neg_foil_mass= Materials(9,5);
Neg_solv_mass= Materials(10,5);
Neg_mass=[Neg_mat_mass,Neg_cond_mass,Neg_bind_mass,Neg_foil_mass,Neg_solv_mass];
Electrolyte_mass= Materials(11,5);
Separator_mass= Materials(12,5);
Cell_mass = [Electrolyte_mass , Separator_mass];

% Les dimensions des matrices sont fixées
Pos_mat_cost=zeros(1,Nb_iteration);
Pos_cond_cost =zeros(1,Nb_iteration);
Pos_bind_cost =zeros(1,Nb_iteration);
Pos_foil_cost =zeros(1,Nb_iteration);
Pos_solv_cost =zeros(1,Nb_iteration);
Neg_mat_cost =zeros(1,Nb_iteration);
Neg_cond_cost =zeros(1,Nb_iteration);
Neg_bind_cost =zeros(1,Nb_iteration);
Neg_foil_cost =zeros(1,Nb_iteration);
Neg_solv_cost =zeros(1,Nb_iteration);
Electrolyte_cost =zeros(1,Nb_iteration);
Separator_cost =zeros(1,Nb_iteration);
Pos_materials_cost=zeros(1,Nb_iteration);
Neg_materials_cost=zeros(1,Nb_iteration);
Cell_materials_cost=zeros(1,Nb_iteration);
Materials_cost=zeros(1,Nb_iteration);
Process_cost=zeros(1,Nb_iteration);
Electrode=zeros(1,Nb_iteration);
NLF=zeros(1,Nb_iteration);
CpF=zeros(1,Nb_iteration);
Oof=zeros(1,Nb_iteration);
Total_cell=zeros(1,Nb_iteration);

% Lecture des paramètres
Coat_thick=Process(6,1);
Nb_bicell=Process(6,3);
Elec_surf=Process(5,3);
Warranty=Process(5,1);
Scrap_rate=Materials(1:12,12)';
Cell_container_cost = Materials(14,2);
Terminal_cost = Materials(15,2);

for i=1:Nb_iteration

    %=====Achats=====
    % On attribue un prix aux matériaux de l'électrode positive une distribution
    uniforme (==0) ou normale (==1)
        if Materials(1,6)==1
    % Si on choisit une distribution normale, on utilise la fonction randn, et on
    calcul l'écart type par la formule sigma=interval/racine(12)

```

```

        Pos_mat_cost(i)= Materials(1,2) * (1 + (2/sqrt(12))) * (
Materials(1,7)*randn + Materials(1,8)*randn + Materials(1,9)*randn +
Materials(1,10)*randn + Materials(1,11)*randn) );
    else
%si on choisit une distribution uniforme, alors on utilise une valeur au hasard
sur l'intervalle défini dans le fichier Excel
        Pos_mat_cost(i)=Materials(1,3)-Materials(1,4)*rand;
    end
    if Materials(2,6)==1
        Pos_cond_cost(i)= Materials(2,2) * (1 + (2/sqrt(12))) * (
Materials(2,7)*randn + Materials(2,8)*randn + Materials(2,9)*randn +
Materials(2,10)*randn + Materials(2,11)*randn) );
    else
        Pos_cond_cost(i)= Materials(2,3)-Materials(2,4)*rand;
    end
    if Materials(3,6)==1
        Pos_bind_cost(i)= Materials(3,2) * (1 + (2/sqrt(12))) * (
Materials(3,7)*randn + Materials(3,8)*randn + Materials(3,9)*randn +
Materials(3,10)*randn + Materials(3,11)*randn) );
    else
        Pos_bind_cost(i)= Materials(3,3)-Materials(3,4)*rand;
    end
    if Materials(4,6)==1
        Pos_foil_cost(i)= Materials(4,2) * (1 + (2/sqrt(12))) * (
Materials(4,7)*randn + Materials(4,8)*randn + Materials(4,9)*randn +
Materials(4,10)*randn + Materials(4,11)*randn) );
    else
        Pos_foil_cost(i)= Materials(4,3)-Materials(4,4)*rand;
    end
    if Materials(5,6)==1
        Pos_solv_cost(i)= Materials(5,2) * (1 + (2/sqrt(12))) * (
Materials(5,7)*randn + Materials(5,8)*randn + Materials(5,9)*randn +
Materials(5,10)*randn + Materials(5,11)*randn) );
    else
        Pos_solv_cost(i)= Materials(5,3)-Materials(5,4)*rand;
    end

    % On attribue un prix aux matériaux de l'électrode négative
    if Materials(6,6)==1
        Neg_mat_cost(i)= Materials(6,2) * (1 + (2/sqrt(12))) * (
Materials(6,7)*randn + Materials(6,8)*randn + Materials(6,9)*randn +
Materials(6,10)*randn + Materials(6,11)*randn) );
    else
        Neg_mat_cost(i)= Materials(6,3)-Materials(6,4)*rand;
    end
    if Materials(7,6)==1
        Neg_cond_cost(i)= Materials(7,2) * (1 + (2/sqrt(12))) * (
Materials(7,7)*randn + Materials(7,8)*randn + Materials(7,9)*randn +
Materials(7,10)*randn + Materials(7,11)*randn) );
    else
        Neg_cond_cost(i)= Materials(7,3)-Materials(7,4)*rand;
    end
    if Materials(8,6)==1
        Neg_bind_cost(i)= Materials(8,2) * (1 + (2/sqrt(12))) * (
Materials(8,7)*randn + Materials(8,8)*randn + Materials(8,9)*randn +
Materials(8,10)*randn + Materials(8,11)*randn) );
    else
        Neg_bind_cost(i)= Materials(8,3)-Materials(8,4)*rand;
    end
    if Materials(9,6)==1

```

```

        Neg_foil_cost(i)= Materials(9,2) * (1 + (2/sqrt(12))) * (
Materials(9,7)*randn + Materials(9,8)*randn + Materials(9,9)*randn +
Materials(9,10)*randn + Materials(9,11)*randn) );
    else
        Neg_foil_cost(i)= Materials(9,3)-Materials(9,4)*rand;
    end
    if Materials(10,6)==1
        Neg_solv_cost(i)= Materials(10,2) * (1 + (2/sqrt(12))) * (
Materials(10,7)*randn + Materials(10,8)*randn + Materials(10,9)*randn +
Materials(10,10)*randn + Materials(10,11)*randn) );
    else
        Neg_solv_cost(i)= Materials(10,3)-Materials(10,4)*rand;
    end

    % On attribue un prix aux matières restantes
    if Materials(11,6)==1
        Electrolyte_cost(i)= Materials(11,2) * (1 + (2/sqrt(12))) * (
Materials(11,7)*randn + Materials(11,8)*randn + Materials(11,9)*randn +
Materials(11,10)*randn + Materials(11,11)*randn) );
    else
        Electrolyte_cost(i)= Materials(11,3)-Materials(11,4)*rand;
    end
    if Materials(12,6)==1
        Separator_cost(i)= Materials(12,2) * (1 + (2/sqrt(12))) * (
Materials(12,7)*randn + Materials(12,8)*randn + Materials(12,9)*randn +
Materials(12,10)*randn + Materials(12,11)*randn) );
    else
        Separator_cost(i)= Materials(12,3)-Materials(12,4)*rand;
    end

    Pos_cost = [Pos_mat_cost(i) , Pos_cond_cost(i) , Pos_bind_cost(i) ,
Pos_foil_cost(i) , Pos_solv_cost(i)];
    Neg_cost = [Neg_mat_cost(i) , Neg_cond_cost(i) , Neg_bind_cost(i) ,
Neg_foil_cost(i) , Neg_solv_cost(i)];
    Cell_cost = [Electrolyte_cost(i) , Separator_cost(i)];

    % On donne le coût total
    Pos_materials_cost(i)=sum((Pos_cost.*Pos_mass) .* Scrap_rate(1:5))/1000;
    Neg_materials_cost(i)=sum((Neg_cost.*Neg_mass) .* Scrap_rate(6:10))/1000;
    Cell_materials_cost(i)=sum((Cell_cost.*Cell_mass) .*Scrap_rate(11:12))/1000;
    Materials_cost(i)=Pos_materials_cost(i)+Neg_materials_cost(i)+
Cell_materials_cost(i)+ Cell_container_cost + Terminal_cost;

    %=====Fabrication=====
    % On attribue un prix à la fabrication de l'électrode
    if Process(1,5)==1
        Electrode(i)=Process(1,2)*(1+(2/sqrt(12)))*(Process(1,6)*randn+
Process(1,7)*randn+Process(1,8)*randn+Process(1,9)*randn+Process(1,10)*randn)*
Elec_surf*((Coat_thick)^0.2);
    else
        Electrode(i)= (Process(1,3)-
Process(1,4)*rand)*Elec_surf*((Coat_thick)^0.2);
    end
    % On attribue un prix au découpage, calandrage et empilage
    if Process(2,5)==1
        NLF(i)= Process(2,2) * (1 + (2/sqrt(12))) * ( Process(2,6)*randn +
Process(2,7)*randn + Process(2,8)*randn + Process(2,9)*randn +
Process(2,10)*randn) ) *Nb_bicell;
    else
        NLF(i)= (Process(2,3)-Process(2,4)*rand)*Nb_bicell;
    end

```

```

end
% On attribue un prix à l'assemblage cellule + formation
if Process(3,5)==1
    CpF(i)= Process(3,2) * (1 + (2/sqrt(12))) * ( Process(3,6)*randn +
Process(3,7)*randn + Process(3,8)*randn + Process(3,9)*randn +
Process(3,10)*randn );
else
    CpF(i)= (Process(3,3)-Process(3,4)*rand);
end
Process_cost(i)= Electrode(i) + NLF(i)+ CpF(i);

%=====Frais généraux et autres frais=====
% On attribue aux Frais généraux et autre frais
if Process(4,5)==1
    Oof(i)= Process(4,2) * (1 + (2/sqrt(12))) * ( Process(4,6)*randn +
Process(4,7)*randn + Process(4,8)*randn + Process(4,9)*randn +
Process(4,10)*randn ) * Process_cost(i)*( 1 + Warranty ) +
Warranty*(Materials_cost(i)+Process_cost(i));
else
    Oof(i)= (Process(4,3)-
Process(4,4)*rand)*Process_cost(i)+Warranty*(Materials_cost(i)+Process_cost(i)+(P
rocess(4,3)-Process(4,4)*rand)*Process_cost(i));
end

%=====Total=====
% On calcule le total
Total_cell(i)= Materials_cost(i) + Process_cost(i) + Oof(i);
end

% On calcule les différentes moyennes, qui sont ensuite inscrite dans le fichier
Excel de départ
Moy_pos_mat=mean(Pos_mat_cost);
Std_pos_mat=std(Pos_mat_cost);
Moy_neg_mat=mean(Neg_mat_cost);
Std_neg_mat=std(Neg_mat_cost);
Moy_elec_mat=mean(Electrolyte_cost);
Std_elec_mat=std(Electrolyte_cost);
Moy_sep_mat=mean(Separator_cost);
Std_sep_mat=std(Separator_cost);
Moyenne_mat=mean(Materials_cost);
Ecart_type_mat=std(Materials_cost);
xlswrite('Matlab_uncertainty_analysis_Oof.xlsx',Moyenne_mat,'materials','P18');

Moy_elec=mean(Electrode);
Std_elec=std(Electrode);
Moy_NLF=mean(NLF);
Std_NLF=std(NLF);
Moy_CpF=mean(CpF);
Std_CpF=std(CpF);
Moyenne_pro=mean(Process_cost);
Ecart_type_pro=std(Process_cost);
xlswrite('Matlab_uncertainty_analysis_Oof.xlsx',Moyenne_pro,'process','R6');

Moyenne_oof=mean(Oof);
Ecart_type_oof=std(Oof);
xlswrite('Matlab_uncertainty_analysis_Oof.xlsx',Moyenne_oof,'process','R8');

Moyenne_tot=mean(Total_cell)
Ecart_type_tot=std(Total_cell)

```

```
Ecart_pour=4*Ecart_type_tot/Moyenne_tot*100
% On inscrit un tableau récapitulatif dans le fichier Excel, avec les moyennes et
les écarts type pour chacun des postes de coût étudiés.
Tableau_reca=[Moyenne_mat,Ecart_type_mat; Moy_pos_mat Std_pos_mat ; Moy_neg_mat
Std_neg_mat ; Moy_elec_mat Std_elec_mat ; Moy_sep_mat Std_sep_mat ; Moyenne_pro
Ecart_type_pro ; Moy_elec Std_elec ; Moy_NLF Std_NLF ; Moy_CpF Std_CpF ;
Moyenne_oof,Ecart_type_oof;Moyenne_tot,Ecart_type_tot];

xlswrite('Matlab_uncertainty_analysis_Oof.xlsx',Tableau_reca,'results','B2:C12');
```

Bibliographie

1. Zola E. Les Trois Villes : Paris. Charpentier; 1898.
2. Lohner-Porsche [Internet]. Wikipedia, the free encyclopedia. 2014 [cité 26 juin 2014]. Disponible sur: <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lohner-Porsche&oldid=609323368>
3. Torregrossa M. Voitures hybrides – Toyota franchit le cap des 6 millions d'unités vendues. 18 janv 2014; Disponible sur: <http://www.avem.fr/actualite-voitures-hybrides-toyota-franchit-le-cap-des-6-millions-d-unites-vendues-4710.html>
4. Beeker E, Bryden A, Buba J, Le Moign C, von Pechmann F, Hossie G. La voiture de demain : carburants et électricité. Paris: Centre d'analyse stratégique; 2011. Report No.: 978-2-11-008738-6.
5. Laslau C. Lux: Panasonic has 39% share of plug-in vehicle batteries, thanks to its deal with Tesla [Internet]. Green Car Congress. 2014 [cité 12 mai 2014]. Disponible sur: <http://www.greencarcongress.com/2014/05/20140507-lux.html>
6. Rohan JF, Hasan M, Patil S, Casey DP, Clancy T. Chapter 6 Energy Storage: Battery Materials and Architectures at the Nanoscale. ICT - Energy - Concepts Towards Zero - Power Information and Communication Technology [Internet]. InTech. 2014 [cité 12 mai 2014]. Disponible sur: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/45932.pdf>
7. Panasonic Global. Cylindrical type, Lithium Ion Batteries, Batteries & Energy Products, Industrial Devices [Internet]. 2014 [cité 12 mai 2014]. Disponible sur: <http://industrial.panasonic.com/www-cgi/jvcr13pz.cgi?E+BA+4+ACA4001+NCR18650B+7+WW>
8. Tarascon J-M. Histoire et évolution des technologies d'accumulateurs [Internet]. Chaire Développement durable Environnement, Énergie et Société; 2011 févr 2 [cité 21 août 2014]; Paris. Disponible sur: http://www.college-de-france.fr/media/jean-marie-tarascon/UPL51353_courshistoirefinal_Tarascon.pdf
9. Navigant Research ranks LG Chem as top automotive Li-ion battery manufacturer. Green Car Congress [Internet]. 25 juin 2013 [cité 15 juin 2014]; Disponible sur: <http://www.greencarcongress.com/2013/06/navigant-20130625.html>
10. Theis C, Hackmann M. Die Zelle zu unterschätzen, könnte fatale Folgen haben [Internet]. 2014 [cité 18 juin 2014]. Disponible sur: <http://www.springerprofessional.de/5139874>
11. Pillot C. The worldwide battery market 2012-2025 Avicenne energy. Batteries 2013; 2013; Nice, France.
12. Leblanc B. Voiture électrique : vers une pénurie de lithium ? L'usine nouvelle [Internet]. 14 nov 2008 [cité 27 juin 2014]; Disponible sur:

<http://www.usinenouvelle.com/article/voiture-electrique-vers-une-penurie-de-lithium.N27012>

13. Gruber PW, Medina PA, Keoleian GA, Kesler SE, Everson MP, Wallington TJ. Global Lithium Availability. *JIndEcol.* 2011;15(5):760-75.
14. Lithium Investing News. 2013 Top 8 Lithium-producing Countries. 24 juin 2014 [cité 27 juin 2014]; Disponible sur: <http://lithiuminvestingnews.com/9115/2013-top-8-lithium-producing-countries/>
15. Krajka D, Hocquard C, Lifton J. L'importance des métaux critiques. L'usine nouvelle [Internet]. 9 déc 2010 [cité 2 juill 2014]; Disponible sur: <http://indices.usinenouvelle.com/metaux-non-ferreux/metaux-mineurs/l-importance-des-metaux-critiques.3397>
16. Cowie T. Why graphite stocks are on the rise. *The Sydney Morning Herald* [Internet]. 14 juin 2014 [cité 27 juin 2014]; Disponible sur: <http://www.smh.com.au/business/why-graphite-stocks-are-on-the-rise-20140624-3apyt.html>
17. European Commission. Report on critical raw materials [Internet]. 2014 mai [cité 1 juin 2014]. Disponible sur: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-report-on-critical-raw-materials_en.pdf
18. Moragues M. Qui montera dans l'Airbus de l'énergie ? L'usine nouvelle [Internet]. 19 févr 2014 [cité 27 juin 2014]; Disponible sur: <http://www.usinenouvelle.com/article/qui-montera-dans-l-airbus-de-l-energie.N241324>
19. Büchler AB. Benchmarking Chevrolet Volt/Opel Ampera. *Polymotive: polymers and e-mobility in the automotive industry.* 2012;10(Journal Article):10-3.
20. Wagner R, Preschitschek N, Passerini S, Leker J, Winter M. Current research trends and prospects among the various materials and designs used in lithium-based batteries. *J Appl Electrochem.* 1 mai 2013;43(5):481-96.
21. Chikkannanavar SB, Bernardi DM, Liu L. A review of blended cathode materials for use in Li-ion batteries. *JPower Sources.* 2014;248(0):91-100.
22. Frank R. Li-ion suppliers try to find the right chemistry with car buyers. *Electronic Design.* 2009;57(23):34-9.
23. Davis M. Brave new world. *Electric & Hybrid Vehicle Technology International* - January 2014 [Internet]. janv 2014 [cité 20 juin 2014]; Disponible sur: <http://viewer.zmags.com/publication/70ad7366#/70ad7366/8>
24. Anderman M. Battery guru: Future of 18650 cells unclear beyond Tesla S [Internet]. *SAE International.* 2014 [cité 20 juin 2014]. Disponible sur: <http://articles.sae.org/12833/>
25. Kim J. Samsung SDI poised to sign deal with Tesla [Internet]. 2013 [cité 20 juin 2014]. Disponible sur: <http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20130825000207>

26. M+W Group, Eberhardt K. Large scale factories for li-ion batteries. Paris: M+W group; 2013.
27. Amirault J, Chien J, Garg S, Gibbons D, Ross B, Tang M, et al. The Electric Vehicle Battery Landscape: Opportunities and Challenges [Internet]. Berkeley: University of California; 2009. Disponible sur: http://cet.berkeley.edu/dl/BatteryBrief_final.pdf
28. Fitzer E, Kochling KH, Boehm HP, Marsh H. Recommended Terminology for the Description of Carbon as a Solid - (Iupac Recommendations 1995). Pure and Applied Chemistry. 1995;67(3):473-506.
29. Liu J-L, Wang J, Xia Y-Y. A new rechargeable lithium-ion battery with a $x\text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot (1 - x) \text{LiMn}_0.4\text{Ni}_0.4\text{Co}_0.2\text{O}_2$ cathode and a hard carbon anode. Electrochimica Acta. 30 août 2011;56(21):7392-6.
30. Patterson ML. Enerdel : Anode materials for Lithium Ion Batteries. 2009.
31. Wissler M. Graphite and carbon powders for electrochemical applications. JPower Sources. 2006;156(2):142-50.
32. Yazami R. Surface chemistry and lithium storage capability of the graphite-lithium electrode. Electrochimica Acta. 1999;45(1):87-97.
33. Hitachi Vehicle Energy, Ltd. Product Specification [Internet]. Hitachi Vehicle Energy, Ltd.; 2014 [cité 23 juin 2014]. Disponible sur: www.hitachi-ve.co.jp/en/products/spec/index.html
34. Kohn SI, Hermann WA. Cell cap assembly with recessed terminal and enlarged insulating gasket. US8057928 B2, 2011.
35. Nelson PA, Gallagher KG, Bloom I, Dees DW. Modeling the performance and cost of lithium-Ion batteries for electric-drive vehicles [Internet]. Argonne National Laboratory; 2011. Disponible sur: <http://www.osti.gov/bridge>
36. Howard WF, Spotnitz RM. Theoretical evaluation of high-energy lithium metal phosphate cathode materials in Li-ion batteries. JPower Sources. 2007;165(2):887-91.
37. Rempel J, Barnett B, Hyung J. PHEV Battery Cost Assessment, TIAX [Internet]. DOE merit review; 2013 mai 14 [cité 26 mai 2014]. Disponible sur: <http://www4.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/resources/merit-review/content/phev-battery-cost-assessment>
38. Kalhammer FR, Kopf BM, Swan DH, Roan VP, Walsh MP. Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology Report of the ARB Independent Expert Panel 2007 [Internet]. 2007. Disponible sur: http://www.lifepo4.info/Battery_study/Batteries/zev_panel_report.pdf
39. Mock P. Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21) [Internet]. Stuttgart: Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart; 2011. Disponible sur: <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2011/5845>

40. Gallagher KG. Promises and Challenges of Lithium- and Manganese-Rich Transition-Metal Layered-Oxide Cathodes, Project ID# ES177. Washington D.C.; 2013 [cité 18 juin 2014]. Disponible sur: <http://www4.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/resources/merit-review/content/promises-and-challenges-lithium-and-manganese-rich-transition-metal-layered-oxide-cathodes>
41. Gaines L, Dunn JB, James C. Cathode Material as the Key to Battery Lifecycle Impacts. Berkeley, CA; 2013 [cité 25 août 2014]. Disponible sur: <http://bestar.lbl.gov/us-china-workshop-2013/files/2013/04/Linda-Gaines-ANL.pdf>
42. Gaines L, Cuenca R. Costs of lithium-ion batteries for vehicles [Internet]. US Department of energy; 2000 [cité 25 févr 2014]. Disponible sur: <http://www.doe.gov/bridge>
43. Bernhart W. Battery costs [Internet]. EV update; 2012 juin [cité 18 août 2014]. Disponible sur: <http://analysis.evupdate.com>
44. Barnett B, Rempel J, McCoy C, Dalton-Castor S, Sriramulu S. PHEV and LEES Battery Cost Assessment, TIAX [Internet]. DOE merit review; 2011 [cité 26 mai 2014]. Disponible sur: http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/merit_review_2011/electrochemical_storage/es001_barnett_2011_o.pdf
45. Brodd RJ, Helou C. Cost comparison of producing high-performance Li-ion batteries in the U.S. and in China. *JPower Sources*. 2013;231:293-300.
46. Nelson PA, Gallagher KG, Bloom I, Dees DW. Modeling the performance and cost of lithium-Ion batteries for electric-drive vehicles, second edition [Internet]. Argonne National Laboratory; 2013. Disponible sur: <http://www.osti.gov/bridge>
47. Nelson PA, Gallagher KG, Bloom I. BatPac (Battery Performance and Cost Model) Software Version 2.0 [Internet]. Argonne National Laboratory; 2013. Disponible sur: <http://www.cse.anl.gov/batpac/>
48. Brodd RJ. Cost comparison of producing high-performance batteries in the US and in China. Broddarp of Nevada; 2010.
49. Kaiser J, Wenzel V, Nirschl H, Bitsch B, Willenbacher N, Baunach M, et al. Prozess- und Produktentwicklung von Elektroden für Li-Ionen-Zellen. *Chemie Ingenieur Technik*. 1 mai 2014;86(5):695-706.
50. Anderson DL. An evaluation of current and future costs for lithium-ion batteries for use in electrified vehicle powertrains [Internet]. Nicholas School of the Environment of Duke University; 2009. Disponible sur: <http://hdl.handle.net/10161/1007>
51. Dunn JB. Life Cycle Analysis of Vehicle and Fuel Systems with the GREETM Model. Chimie ParisTech; 2014.
52. English J, Strong D. Optimization of Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles. Electric Mobility Canada / Mobilité Electrique Canada; 2012. p. 51-8.

53. Brooker A, Thornton M, Rugh J. Technology improvement pathways to cost-effective vehicle electrification. SAE TechniPaper [Internet]. 2010;Detroit, MI. Disponible sur: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79959847895&partnerID=40&md5=0927fe406586ea2b347e4565f58f248e>
54. Cluzel C, Douglas C. Cost and performance of EV batteries [Internet]. Cambridge: Element Energy; 2012 mars [cité 7 avr 2013]. Disponible sur: <http://www.element-energy.co.uk/publications/>
55. Barnett B, Rempel J, Ofer D, Oh B, Siriamulu S, Sinha J, et al. PHEV battery cost assessment, TIAX. DOE merit review; 2010.
56. Mayer T, Kreyenberg D, Wind J, Braun F. Feasibility study of 2020 target costs for PEM fuel cells and lithium-ion batteries: A two-factor experience curve approach. *Int J Hydrogen Energy*. 2012;37(0):14463-74.
57. Anderman M. Tesla Motors and its Impact on the xEV Industry. 2014. Disponible sur: www.advancedautobat.com
58. Takeshita H. Market Trends for xEV Batteries - B3 Corporation [Internet]. Proceedings présenté à: AABC, AABTAM Symposium; 2014 mai 21; International Conference Center Kyoto, Japan. Disponible sur: <https://advancedautobat.com/conferences/previous/AABC-Asia-2014/battery-technology-market/session-1-xEV-and-xEV-battery-market.html>
59. Patry G, Romagny A, Martinet S, Froelich D. Cost modeling of lithium-ion battery cells for automotive applications. *Energy Sci Eng* [Internet]. 1 oct 2014 [cité 22 oct 2014]; Disponible sur: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ese3.47/abstract>
60. Del Corso F, Mettlach H. Helios website [Internet]. 2013 [cité 8 mai 2013]. Disponible sur: <http://www.helios-eu.org/>
61. Tesla motors. Gigafactory | Blog | Tesla Motors [Internet]. <http://www.teslamotors.com>. 2014 [cité 23 août 2014]. Disponible sur: http://www.teslamotors.com/fr_FR/blog/gigafactory
62. Xue N, Du W, Greszler TA, Shyy W, Martins JRRA. Design of a lithium-ion battery pack for PHEV using a hybrid optimization method. *ApplEnergy*. 2014;115(0):591-602.
63. Chabot V, Farhad S, Chen Z, Fung AS, Yu A, Hamdullahpur F. Effect of electrode physical and chemical properties on lithium-ion battery performance. *IntJEnergy Res*. 2013;37(14):1723-36.
64. Chen Y-H, Wang C-W, Zhang X, Sastry AM. Porous cathode optimization for lithium cells: Ionic and electronic conductivity, capacity, and selection of materials. *JPower Sources*. 2010;195(9):2851-62.
65. Fongy C, Gaillot AC, Jouanneau S, Guyomard D, Lestriez B. Ionic vs Electronic Power Limitations and Analysis of the Fraction of Wired Grains in LiFePO4 Composite Electrodes. *JElectrochemSoc*. 2010;157(7):A885-A885.

66. Gaberscek M. Towards optimized preparation of cathode materials: How can modeling and concepts be used in practice. *JPower Sources*. 2009;189(1):22-7.
67. Lu W, Jansen A, Dees D, Nelson P, Veselka NR, Henriksen G. High-energy electrode investigation for plug-in hybrid electric vehicles. *JPower Sources*. 2011;196(3):1537-40.
68. Ramadesigan V, Northrop PWC, De S, Santhanagopalan S, Braatz RD, Subramanian VR. Modeling and simulation of lithium-ion batteries from a systems engineering perspective. *JElectrochemSoc*. 2012;159(3):R31-45.
69. Ridgway P, Zheng H, Bello AF, Song X, Xun S, Chong J, et al. Comparison of cycling performance of lithium ion cell anode graphites. *JElectrochemSoc*. 2012;159(5):A520-4.
70. Srinivasan V, Newman J. Design and optimization of a natural graphite/iron phosphate lithium-ion cell. *JElectrochemSoc*. 2004;151(10):A1530-8.
71. Thorat IV, Joshi T, Zaghbi K, Harb JN, Wheeler DR. Understanding rate-limiting mechanisms in LiFePO₄ cathodes for Li-ion batteries. *JElectrochemSoc*. 2011;158(11):A1185-93.
72. Yu S, Chung Y, Song M, Nam J, Cho W. Investigation of design parameter effects on high current performance of lithium-ion cells with LiFePO₄/graphite electrodes. *JApplElectrochem*. 2012;42(6):443-53.
73. Zheng H, Li J, Song X, Liu G, Battaglia VS. A comprehensive understanding of electrode thickness effects on the electrochemical performances of Li-ion battery cathodes. *ElectrochimActa*. 2012;71(0):258-65.
74. VW provides details on e-Golf prior to launch at LA Auto Show. Green Car Congress [Internet]. [cité 15 févr 2014]; Disponible sur: <http://www.greencarcongress.com/2013/11/20131114-egolf.html>
75. Schamel A, Schmitz P, d' Annunzio J, Iorio R. Ford C-Max Plug-In Hybrid. *MTZ worldwide*. 2013;74(3):4-10.
76. Gallagher KG, Nelson PA, Dees DW. Simplified calculation of the area specific impedance for battery design. *JPower Sources*. 2011;196(4):2289-97.
77. Jeong H-S, Kim D-W, Jeong YU, Lee S-Y. Effect of phase inversion on microporous structure development of Al₂O₃/poly(vinylidene fluoride-hexafluoropropylene)-based ceramic composite separators for lithium-ion batteries. *JPower Sources*. 2010;195(18):6116-21.
78. Kim KJ, Kim J-H, Park M-S, Kwon HK, Kim H, Kim Y-J. Enhancement of electrochemical and thermal properties of polyethylene separators coated with polyvinylidene fluoride-hexafluoropropylene co-polymer for Li-ion batteries. *JPower Sources*. 2012;198(0):298-302.

79. Park J-H, Park W, Kim JH, Ryoo D, Kim HS, Jeong YU, et al. Close-packed poly(methyl methacrylate) nanoparticle arrays-coated polyethylene separators for high-power lithium-ion polymer batteries. *JPower Sources*. 2011;196(16):7035-8.
80. Wang JS, Liu P, Soukiazian S, Tataria H, Dontigny M, Guerfi A, et al. Evaluation of lithium ion cells with titanate negative electrodes and iron phosphate positive electrode for start-stop applications. *JPower Sources* [Internet]. (0). Disponible sur: <http://www.sciencedirect.com.rp1.ensam.eu/science/article/pii/S0378775314001037>
81. Bernhart W, Kruger FJ. Roland Berger, Technology & market drivers for stationary and automotive battery systems. Nice, France: Batteries; 2012.
82. Roland Berger, Lithium-ion batteries - The bubble bursts [Internet]. 2012. Disponible sur: http://www.rolandberger.fr/media/pdf/Roland_Berger_Li_Ion_Batteries_Bubble_Bursts_20121019.pdf
83. Braun PV, Cho J, Pikul JH, King WP, Zhang H. High power rechargeable batteries. *Emerging Opportunities in Energy Storage*. 2012;16(4):186-98.
84. Burke A, Miller M. The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications. *JPower Sources*. 2011;196(1):514-22.
85. Moshtev R, Johnson B. State of the art of commercial Li ion batteries. *JPower Sources*. 2000;91(2):86-91.
86. Dillon SJ, Sun K. Microstructural design considerations for Li-ion battery systems. *CurrOpinSolid State MatSci*. 2012;16(4):153-62.
87. Cheng F, Liang J, Tao Z, Chen J. Functional Materials for Rechargeable Batteries. *Adv Mater*. 2011;23(15):1695-715.
88. Fergus JW. Recent developments in cathode materials for lithium ion batteries. *JPower Sources*. 2010;195(4):939-54.
89. Pesaran AA. Choices and Requirements of Batteries for EVs, HEVs, PHEVs, NREL/PR-5400-51474. 2011 [cité 24 févr 2013]; Disponible sur: <http://www.nrel.gov/docs/fy11osti/51474.pdf>
90. Li J, Daniel C, Wood D. Materials processing for lithium-ion batteries. *JPower Sources*. 2011;196(5):2452-60.
91. Badey Q. Etude des mecanismes et modelisation du vieillissement des batteries lithium-ion dans le cadre d'un usage automobile [Internet]. Paris: Universite Paris Sud; 2012. Disponible sur: <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00693344>
92. Barré A, Deguilhem B, Grolleau S, Gérard M, Suard F, Riu D. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. *JPower Sources*. 2013;241(0):680-9.

93. Vetter J, Novàk P, Wagner MR, Veit C, Möller K-C, Besenhard JO, et al. Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. *JPower Sources*. 2005;147(1-2):269-81.
94. De S, Northrop PWC, Ramadesigan V, Subramanian VR. Model-based simultaneous optimization of multiple design parameters for lithium-ion batteries for maximization of energy density. *JPower Sources*. 2013;227(0):161-70.
95. Hong JK, Lee JH, Oh SM. Effect of carbon additive on electrochemical performance of LiCoO₂ composite cathodes. *JPower Sources*. 2002;111(1):90-6.
96. Shim J, Striebel KA. Effect of electrode density on cycle performance and irreversible capacity loss for natural graphite anode in lithium-ion batteries. *JPower Sources*. 2003;119-121(0):934-7.
97. Tran HY, Greco G, Täubert C, Wohlfahrt-Mehrens M, Haselrieder W, Kwade A. Influence of electrode preparation on the electrochemical performance of LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ composite electrodes for lithium-ion batteries. *JPower Sources*. 2012;210(0):276-85.
98. Lamm A, Wattré P. Battery choices for PHEV applications. 2013 [cité 7 févr 2013]. Disponible sur: <http://www.cars21.com/news/view/5481>
99. Lee J-H, Kim J-S, Kim YC, Zang DS, Paik U. Dispersion properties of aqueous-based LiFePO₄ pastes and their electrochemical performance for lithium batteries. *Ultramicroscopy*. 2008;108(10):1256-9.
100. Kwade A, Bärwaldt G, Meinfelder T, Steinbild M, Kramer K, Barenstee R, et al. Recycling von Lithium-Ionen-Batterien [Internet]. 2012 [cité 28 avr 2014]. Disponible sur: <http://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/batterierecycling/abschlussberichte-recycling/abschlussbericht-lithorec.pdf>
101. Millikin M. The Battery Pack for Mitsubishi's i MiEV. Green Car Congress [Internet]. 14 mai 2008; Disponible sur: <http://www.greencarcongress.com/2008/05/the-battery-pac.html>
102. Notter DA, Gauch M, Widmer R, Wäger P, Stamp A, Zah R, et al. Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Environmental Science and Technology*. 2010;44(17):6550-6.
103. Amarakoon S, Smith J, Segal B. Lithium-ion Batteries and Nanotechnology for Electric Vehicles : A life cycle assessment -Draft- [Internet]. U.S. Environmental Protection Agency; 2012. Disponible sur: <http://epa.gov/dfe/pubs/projects/lbnp/Li-ion-battery-LCA-Report-42612.pdf>
104. Ellingsen LA-W, Majeau-Bettez G, Singh B, Srivastava AK, Valøen LO, Strømman AH. Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. *Journal of Industrial Ecology*. 2014;18(1):113-24.

105. Dunn JB, Gaines L, Sullivan J, Wang MQ. Impact of recycling on cradle-to-gate energy consumption and greenhouse gas emissions of automotive lithium-ion batteries. *Environmental science & technology*. nov 2012;46(22):12704—12710.
106. Benetto E. Analyse du cycle de vie. Incertitudes des évaluations des impacts. *Techniques de l'ingénieur Systèmes de management environnemental* [Internet]. 2014;base documentaire: TIB442DUO.(ref. article: g5620). Disponible sur: <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/systemes-de-management-environnemental-42442210/analyse-du-cycle-de-vie-incertitudes-des-evaluations-des-impacts-g5620/>
107. Metropolis N. The Beginning of the Monte Carlo Method. *Los Alamos Science*. 1987;(15):125.
108. Rubino G, Tuffin B. Simulations et méthodes de Monte Carlo. *Techniques de l'ingénieur Probabilités et statistique* [Internet]. 2007 [cité 1 oct 2010];base documentaire: TIB101DUO. Disponible sur: <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/sciences-fondamentales-th8/probabilites-et-statistique-42101210/simulations-et-methodes-de-monte-carlo-af600/>
109. Hennebelle F, Coorevits T. Propagation des distributions, Détermination des incertitudes par la méthode de Monte Carlo. *Techniques de l'ingénieur Capteurs et méthodes de mesure* [Internet]. 2013 [cité 1 oct 2009];base documentaire: TIB419DUO. Disponible sur: <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/capteurs-et-methodes-de-mesure-42419210/propagation-des-distributions-r288/>
110. Weidema BP, Wesnaes MS. Data quality management for life cycle inventories - An example of using data quality indicators. *JCleanProd*. 1996;4(3-4):167-74.
111. Lu Z, Dahn JR. Does not undergo a phase transformation to a spinel crystal structure when incorporated in lithium-ion battery and cycled for 100 full charge- discharge cycles at 30 degrees C. and final capacity of 130 mAh/g [Internet]. US6964828 B2, 2005. Disponible sur: <https://www.google.com/patents/US6964828>
112. Lu Z, Dahn JR. Lithium oxide, metal oxide composite cathode [Internet]. US7078128 B2, 2006. Disponible sur: <http://www.google.com/patents/US7078128>
113. Lu Z, Dahn JR. Cathode compositions for lithium-ion batteries [Internet]. US8241791 B2, 2012. Disponible sur: <https://www.google.com/patents/US8241791>
114. Park HK, Shin SS, Park S, Shin H, Paulsen J. Method of preparing material for lithium secondary battery of high performance [Internet]. US20080032196 A1, 2008. Disponible sur: <https://www.google.com/patents/US20080032196>
115. Han D, Abe Y. Toda cathode materials production facility. 2013 [cité 24 juin 2014]. Disponible sur: http://www4.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/resources/merit-review/sites/default/files/arravt017_es_han_2013_p.pdf
116. Tan Z, Wang X, Zhou H. Highly energy density olivine cathode material synthesized by coprecipitation technique. *Electrochimica Acta*. 15 févr 2013;90(0):597-603.

117. Wang D, Belharouak I, Zhou G, Amine K. Nanoarchitecture Multi-Structural Cathode Materials for High Capacity Lithium Batteries. *Adv Funct Mater.* 25 févr 2013;23(8):1070-5.
118. Liang B, Liu Y, Xu Y. Silicon-based Materials as High Capacity Anodes for Next Generation Lithium Ion Batteries. *Journal of Power Sources* [Internet]. 1 déc 2014;(0). Disponible sur: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775314007897>
119. U.S. Department Of Energy. Vehicle Technologies Office: EV Everywhere Grand Challenge [Internet]. 2014 [cité 2 oct 2014]. Disponible sur: <http://energy.gov/eere/vehicles/vehicle-technologies-office-ev-everywhere-grand-challenge>
120. Barnett B, Ofer D, McCoy C, Yang Y, Rhodes T, Oh B, et al. PHEV battery cost assessment, TIAx [Internet]. DOE merit review; 2009 [cité 26 mai 2014]. Disponible sur: http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/merit_review_2009/energy_storage/es_02_barnett.pdf
121. Scheuerle S. KIT - PI 2013 [Internet]. 2014 [cité 24 juin 2014]. Disponible sur: http://www.kit.edu/kit/pi_2013_12520.php
122. Lee HM, Ahn SH, Kim KJ, Lee JH. Stacked electrochemical cell and method for preparing the same [Internet]. US6709785 B2, 2004. Disponible sur: <https://www.google.com/patents/US6709785>
123. Kenney B, Darcovich K, MacNeil DD, Davidson IJ. Modelling the impact of variations in electrode manufacturing on lithium-ion battery modules. *Journal of Power Sources.* 2012;213:391-401.
124. Kim HS, Shin EJ. Re-synthesis and electrochemical characteristics of LiFePO₄ cathode materials recycled from scrap electrodes. *Bulletin of the Korean Chemical Society.* 2013;34(3):851-5.
125. Tao P. Potential economic and environmental advantages of lithium-ion battery manufacturing using geothermal energy in Iceland [Internet]. Reykjavik: Reykjavik energy graduate school of sustainable energy; 2011. Disponible sur: <http://hdl.handle.net/1946/7708>
126. Zackrisson M, Avellan L, Orlenius J. Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles - Critical issues. *JCleanProd.* 2010;18(15):1519-29.
127. Sullivan JL, Gaines L. Status of life cycle inventories for batteries. *Energy ConversManage.* 2012;58:134-48.
128. Majeau-Bettez G, Hawkins TR, Strømman AH. Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles. Supporting information. Industrial Ecology Programme, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Høgskoleringen 5, NO7491 Trondheim, Norway;

129. Majeau-Bettez S, Trigg T, Gereffi G. Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles. - Environ Sci Technol. 2011;(- 10):4548.
130. Cheah L, Heywood J. The cost of vehicle electrification: A literature review. MIT Energy Initiative Symposium; 2010.
131. Delucchi MA, Lipman TE. Lifetime Cost of Battery, Fuel-Cell, and Plug-in Hybrid Electric Vehicles. Elsevier; 2010. p. 19-60. Disponible sur: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84858832106&partnerID=40&md5=a1a17d0b78e80b4a68bccd0ef6e92e6d>
132. Kromer MA, Heywood JB. Electric Powertrains: Opportunities and Challenges in the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet [Internet]. Massachusetts Institute of Technology; 2007. Disponible sur: <http://hdl.handle.net/1721.1/40372>
133. Thomas CE. Fuel cell and battery electric vehicles compared. Int J Hydrogen Energy. 2009;34(15):6005-20.
134. Offer GJ, Howey D, Contestabile M, Clague R, Brandon NP. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. Energy Policy. 2010;38(1):24-9.
135. Chhaya S. Large-Format Lithium-Ion Battery Costs Analysis: Critical Review of Existing PHEV Lithium Ion Battery Cost Studies. EPRI, Palo Alto [Internet]. 2010;CA: 2010.1019923. Disponible sur: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=00000000001019923>
136. Boekestyn A, Hill A, Leigh G, Pedder S. Hybrid-Electric Light Vehicles Report. United Kingdom: IHS SupplierBusiness; 2011.
137. Air Resources Board. White paper : Summary of Staff's Preliminary Assessment of the Need for Revisions to the Zero Emission Vehicle Regulation. State of California AIR RESOURCES BOARD; 2009.

Clés de progrès technico-économiques des batteries lithium-ion pour la traction automobile

RESUME : Les véhicules électriques et hybrides présentent des avantages considérables qui les rendent attrayants, mais ont un coût élevé limitant leur succès. Ce travail a pour but de contribuer à la baisse du coût des batteries lithium-ion, inducteur majeur du prix des véhicules électriques, en proposant et en évaluant des pistes d'optimisation. Pour cela, une visibilité fiable et détaillée de la structure de coût de ces batteries est un prérequis. C'est pourquoi une méthodologie de modélisation des coûts des batteries lithium-ion en lien avec la conception technique, ainsi que des référentiels économiques sur le procédé de fabrication et les matières ont été mis au point. La modélisation présentant une part d'incertitude, une méthode innovante d'évaluation de celle-ci a aussi été développée. L'utilisation de ce modèle de coût a permis la détection et l'évaluation de piste de progrès. Ainsi, une piste de progrès notable soulevée dans cette thèse porte sur un paramètre de conception négligé dans la littérature : l'épaisseur d'enduction de l'électrode. Ce modèle a aussi permis de confirmer un point déjà remarqué dans plusieurs publications : le poids considérable des matériaux actifs dans le coût total. Pour comprendre les raisons de ce fait, un modèle de coût de ces composés a été développé et a permis de mettre en lumière des voies de réduction. In fine, ce travail propose pour la première fois une modélisation détaillée jusqu'aux précurseurs des matériaux actifs de la structure de coût des batteries lithium-ion et indique des leviers de réduction. Ceci constitue un résultat remarquable, offrant de nouvelles clés pour l'optimisation technico-économique des batteries lithium-ion pour la traction automobile.

Mots clés : modélisation, coût, lithium-ion, automobile, conception, innovation.

Cost modeling of lithium-ion battery for automotive applications

ABSTRACT: Electric and hybrid vehicles are particularly attractive. They offer several advantages, but at a high cost, which explains their current limited success. The purpose of this work is to contribute to the cost reduction of lithium-ion batteries, the main cost factor in electric vehicles. For the evaluation of cost reduction solutions, a clear and detailed comprehension of the structure of the battery cost is required. A complete environment for the cost modelling of cells for lithium ion batteries has also been developed: two cost models and two databases. This environment is made in order to precisely calculate the cost of a battery using the design parameters. Since there are uncertainties surrounding the cost modelling, an innovative method for the assessment of this uncertainty has also been developed. Using the cost model, several ways of improvement for lithium-ion batteries have been detected and quantified. Thus, a way to reduce the cost evaluated in this work is concerned with a design parameter neglected in the literature: the electrode coating thickness. This model has also confirmed a point already suggested on several papers: the preponderance of active materials on overall cost of lithium-ion batteries. To understand the reasons behind this fact, a cost model for active materials has been developed. New ways of cost reduction have been highlighted with this model. Finally, this work proposes for the first time a complete modelling of cells for lithium-ion batteries, detailed up to materials precursors. It also indicates several ways to reduce the cost of these batteries. This work gives to the community a comprehensive view on the cost structure, essential for the optimization of lithium-ion batteries.

Keywords : modelling, cost, lithium-ion, car, innovation, design.