

---

## **Modélisation de systèmes de stockage électrique et leur intégration dans un réseau électrique intelligent**

**Auteur :** Baiwir, Romain

**Promoteur(s) :** Andre, Philippe; 2770

**Faculté :** Faculté des Sciences

**Diplôme :** Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée en énergies renouvelables

**Année académique :** 2016-2017

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/3151>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---



---

Faculté des Sciences  
Département des Sciences et Gestion de  
l'Environnement  
*Building Energy Monitoring & Simulation*  
(BEMS)

---

Faculté des Sciences,  
de la Technologie et de la  
Communication  
*Research Unit in Engineering Science*  
(RUES)

---



**Modélisation de systèmes de stockage électrique et leur intégration dans un réseau électrique intelligent**

**BAIWIR Romain**

**Mémoire présenté en vue de l'obtention des diplômes de**

**Master en Sciences et Gestion de l'Environnement – finalité Energies Renouvelables (ULg)**

**Master en Développement Durable – finalité Énergie-Environnement (uni.lu)**

**Promoteur : ANDRE Philippe**

**Année académique 2016 – 2017**

**Comité de lecture : ANDRE Philippe, SCHOLZEN Frank, ERNST Damien, DAVIN Elisabeth**



## Remerciements

*Je souhaiterais adresser mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce travail grâce à leurs compétences aussi importantes que variées.*

*Je remercie d'abord tout particulièrement Mme Elisabeth Davin, mon encadrante, pour son suivi, son encadrement ainsi que pour tous les conseils qu'elle m'a apportés. Elle a toujours été disponible lorsque j'en avais besoin et a pu m'aiguiller efficacement durant la réalisation de ce travail.*

*Merci à Mr Philippe André, mon promoteur, pour son suivi et ses conseils pendant la réalisation de ce mémoire. Egalement pour m'avoir permis de réaliser celui-ci au sein de l'unité de recherche BEMS de l'Université de Liège.*

*Je tiens ensuite à remercier Mr Stefan Winterheimer, de l'Université HTW Saar en Allemagne, pour l'aide et les conseils apportés, notamment en ce qui concerne une meilleure compréhension des batteries et leur modélisation.*

*Je remercie également toute l'équipe BEMS pour leur accueil, et particulièrement Mr Samuel Hennaut pour ses conseils par rapport au fonctionnement de TRNSYS et Matlab.*

*Ensuite, je remercie ma famille pour son soutien dans mon choix de reprendre des études après quatre ans de travail. Et merci tout particulièrement à mon père qui m'a épaulé pendant ces dernières années ainsi que pour la relecture de ce mémoire.*

*Pour terminer, je remercie tous mes amis pour et avec qui nous nous sommes soutenus pendant ce parcours.*

# Table des matières

Liste des abréviations .....	1
Liste des figures .....	2
Liste des tableaux .....	4
Liste des équations .....	5
Introduction.....	7
1. Partie théorique .....	9
1.1. Historique .....	9
1.1.1. Définitions .....	12
1.1.2. La batterie octogonale.....	15
1.1.3. Constituants d'une cellule .....	17
1.1.4. Fonctionnement d'une cellule.....	22
1.1.5. Informations sur le voltage .....	25
1.2. Types de batteries lithium-ion et futures.....	30
1.2.1. Batteries lithium-ion.....	30
1.2.2. Avantages et inconvénients des batteries lithium-ion.....	39
1.2.3. Futurs types de batteries.....	40
1.2.4. Méthodes alternatives de stockage .....	43
1.3. Conditionnement des batteries.....	47
1.3.1. Cylindre.....	47
1.3.2. Bouton .....	48
1.3.3. Prismatique.....	49
1.3.4. Poche .....	49
1.4. Conception d'une batterie .....	51
1.4.1. Agencement des cellules entre elles .....	51
1.4.2. Appariement des cellules dans une batterie.....	53
1.5. Détérioration, perte de performances et sécurité.....	55
1.5.1. Phénomènes de vieillissement et de détérioration de la batterie.....	55
1.5.2. Perte de capacité.....	57
1.5.3. Auto-déchargement .....	61
1.5.4. Solutions .....	62
1.5.5. Sécurité.....	63
1.6. Détermination de l'état de charge de la batterie.....	66
1.7. Eléments externes .....	67

1.7.1.	Chargeur .....	67
1.7.2.	Systèmes de connexion .....	68
1.8.	Batteries domestiques.....	72
1.9.	Utilisation des batteries .....	75
1.9.1.	Utilisations hors réseau ou micro-réseaux.....	75
1.9.2.	Utilisations sur le réseau .....	75
1.9.3.	Commerce de l'énergie .....	77
1.9.4.	Vehicle to grid.....	78
1.10.	Méthodes de modélisation des batteries .....	79
1.10.1.	Méthode mathématique .....	79
1.10.2.	Méthode à circuit équivalent .....	80
1.10.3.	Méthode électrochimique.....	82
1.11.	Etude de marché .....	84
2.	Partie pratique.....	87
2.1.	Méthodologie .....	87
2.1.1.	Modèles TRNSYS existants .....	87
2.1.2.	Modèle proposé par HTW Saar .....	96
2.1.3.	Choix de la méthode de modélisation.....	103
2.2.	Résultats .....	105
2.2.1.	Description du modèle Matlab.....	105
2.2.2.	Vérification du fonctionnement du modèle.....	125
2.3.	Discussion .....	132
	Conclusions.....	136
	Bibliographie.....	138
	Annexes .....	I
	Annexe I : Fiche technique cellule Panasonic NCR18650B [144] .....	I
	Annexe II : Intégralité du code FORTRAN du Type47 TRNSYS [141] .....	II
	Annexe III : Intégralité du code Matlab du modèle de batterie lithium-ion .....	VII

## Liste des abréviations

Dénomination	Définition	Unité
$a_{max}$	Coefficient de la régression linéaire $y=ax=b$ permettant de calculer le $U_{max}$	-
$a_{min}$	Coefficient de la régression linéaire $y=ax=b$ permettant de calculer le $U_{min}$	-
$b_{max}$	Coefficient de la régression linéaire $y=ax=b$ permettant de calculer le $U_{max}$	-
$b_{min}$	Coefficient de la régression linéaire $y=ax=b$ permettant de calculer le $U_{min}$	-
$Eff_{Ch}$	Rendement énergétique	-
$Eff_{Ondul}$	Rendement de l'onduleur	-
$Eff_{Regul}$	Rendement du régulateur	-
$I_0$	Intensité initiale	A
$I_{Batt}$	Intensité de la batterie	A
$I_{Cell}$	Intensité de la cellule	A
$I_{coup, c}$	Intensité correspondant au voltage de coupure, en charge	A
$I_{coup, d}$	Intensité correspondant au voltage de coupure, en décharge	A
$N_s$	Nombre de cellules en série	-
$N_p$	Nombre de cellules en parallèle	-
OCV	Voltage à circuit ouvert – Open Circuit Voltage	V
$P_{Batt}$	Puissance appliquée à la batterie	W
$P_{Cell}$	Puissance appliquée à une cellule	W
$P_{Gen}$	Puissance du générateur	W
$P_{Lack}$	Puissance déficitaire	W
$P_{Load}$	Puissance de la charge	W
$P_{Over}$	Puissance excédentaire	W
$Q_{Batt}$	Capacité de la batterie à un temps t	Ah
$Q_{Cell}$	Capacité de la cellule à un temps t	Ah
$Q_{nom, batt}$	Capacité nominale de la batterie	Ah
$Q_{nom, cell}$	Capacité nominale d'une cellule	Ah
$Q_{t0, cell}$	Capacité de la cellule au début du pas de temps	Ah
$R_i$	Résistance interne	$\Omega$
$R_{i, c}$	Résistance interne, à charge complète	$\Omega$
$R_{i, d}$	Résistance interne, à décharge complète	$\Omega$
SEI	Interface électrolytique solide	-
SOC	Etat de charge	-
$SOC_{bis}$	Etat de charge fictif permettant de calculer la tension de la cellule	-
$SOC_{max}$	Etat de charge maximum (valeur conseillée : 0,9)	-
$SOC_{min}$	Etat de charge minimum (valeur conseillée : 0,1)	-
$Time_{Step}$	Pas de temps	h
$U_0$	Tension initiale, fonction de $I_0$	V
$U_{100\%}$	Tension de la batterie à 100% de SOC	V
$U_{AC}$	Tension du circuit en courant alternatif	V
$U_{Batt}$	Tension de la batterie	V
$U_{Cell}$	Tension de la cellule	V
$U_{ic}$	Tension de diffusion en charge	V
$U_{id}$	Tension de diffusion en décharge	V
$U_{max}$	Tension d'une cellule correspondant au $SOC_{max}$	V
$U_{min}$	Tension d'une cellule correspondant au $SOC_{min}$	V
$U_{OC}$	Tension à circuit ouvert	V
$\Delta U$	Différence de tension entre $U_{max}$ et $U_{min}$	V

$V_{\text{coup, c}}$	Voltage de coupure, en charge	V
$V_{\text{coup, d}}$	Voltage de coupure, en décharge	V

## Liste des figures

Figure 1 : Pile de Volta [148] .....	9
Figure 2 : Pile de Leclanché [4] .....	9
Figure 3 : Evolution chronologique de l'invention des différents types de batteries [6].....	10
Figure 4 : Comparaison de courbes de décharges d'une cellule avec une anode en coke et un autre avec une anode en graphite [44].....	19
Figure 5 : Structure du graphène [47] .....	21
Figure 6 : Schéma de fonctionnement d'une batterie, dans ce cas il s'agit de la décharge [33] .....	22
Figure 7 : Réaction d'oxydo-réduction [29].....	23
Figure 8 : Schémas de fonctionnement d'une batterie lithium-ion en charge et décharge [20].....	24
Figure 9 : Schéma représentant l'intercalation des ions lithium [44] .....	25
Figure 10 : Courbe de décharge d'une cellule lithium-ion [54].....	26
Figure 11 : Influence du C-rate sur la courbe de décharge [55].....	27
Figure 12 : Influence de la résistance interne sur le voltage [56] .....	29
Figure 13 : Comparaison de l'OCV de trois chimies de cathode différentes [61] .....	30
Figure 14 : Schéma d'une cathode en oxyde de cobalt [40] .....	31
Figure 15 : Structure en spinelle de la cathode d'une cellule LMO [40] .....	32
Figure 16 : Comparaison de l'énergie spécifique des différents types de batteries [40] .....	35
Figure 17 : Comparaison des performances des différents types de batteries Li-ion [40] .....	36
Figure 18 : Représentation graphique de l'effet mémoire d'une batterie [70] .....	40
Figure 19 : Structures du carbure de silicium [72] .....	41
Figure 20 : Exemple de volant d'inertie [77] .....	44
Figure 21 : Schéma du système de stockage d'énergie sous-marin StEnSea [79] .....	45
Figure 22 : Schéma de fonctionnement d'une centrale de pompage-turbinage [80].....	46
Figure 23 : Coupe d'une cellule cylindrique [83].....	47
Figure 24 : Schéma d'une cellule bouton [83].....	48
Figure 25 : Schéma d'une cellule prismatique [83] .....	49
Figure 26 : Exemple de cellule poche [83].....	50
Figure 27 : Configuration 4s2p de cellules [86].....	51
Figure 28 : Mise en série de cellules [85] .....	51
Figure 29 : Mise en parallèle de cellules [85].....	52
Figure 30 : Mise en série et parallèle de cellules [85].....	53
Figure 31 : Perte de capacité en fonction du degré d'appariement des cellules [28] .....	54
Figure 32 : Influence du cyclage et du C-rate sur la perte de capacité [89].....	55
Figure 33 : Sections de la capacité de stockage [91].....	57
Figure 34 : Perte de capacité d'une cellule lithium-ion avec le cyclage [42].....	57
Figure 35 : Perte de capacité en fonction de la température [59].....	59
Figure 36 : Perte de capacité en fonction de la gamme de SOC utilisée [92] .....	61
Figure 37 : Dispositif PTC côté positif d'une cellule cylindrique 18650 [99] .....	64
Figure 38 : Coupe d'un séparateur de cellule de batterie industrielle [31] .....	65
Figure 39 : Exemple de schéma de raccordement d'un système photovoltaïque connecté à des batteries [106] .....	68
Figure 40 : Fonctionnement du contrôleur MPPT.....	70

Figure 41 : Vue intérieure de la batterie Tesla Powerwall 2 AC [113] .....	74
Figure 42 : Exemple de gestion permettant de réduire le pic de charge [116].....	76
Figure 43 : Schéma de principe du "Vehicle to Grid" [120].....	78
Figure 44 : Schéma d'un exemple de modèle mathématique analytique [62] .....	79
Figure 45 : Schéma du modèle à résistance interne [62] .....	81
Figure 46 : Schéma d'un modèle Thevenin [62] .....	81
Figure 47 : Comportement du voltage d'une cellule en fonction du temps, face à de courtes périodes de décharge entrecoupées de pauses [145] .....	96
Figure 48 : Courbes de décharge en fonction du C-rate d'une batterie Panasonic [144].....	97
Figure 49 : Modèle à circuit électrique équivalent proposé par l'HTW Saar [10].....	98
Figure 50 : Modèle à circuit électrique équivalent simplifié proposé par l'HTW Saar [10] .....	98
Figure 51 : Modèle à circuit électrique équivalent proposé par l'HTW Saar avec l'ajout d'une résistance permettant de représenter l'auto-déchargement [10].....	99
Figure 52 : Caractéristiques de décharge permettant de calculer la résistance interne [144].....	100
Figure 53 : Droite de régression sur la courbe de voltage .....	102
Figure 54 : Modèle TRNSYS .....	105
Figure 55 : Diagramme de décharge d'une cellule lithium-ion [144].....	106
Figure 56 : Régression linéaire du voltage en fonction de l'intensité .....	107
Figure 57 : Droites de voltages générées à partir des coefficients "a" et "b" précédemment obtenus .....	108
Figure 58 : Caractéristiques de charge d'une cellule lithium-ion [144] .....	108
Figure 59 : Code Matlab : définition des paramètres et "Inputs" .....	109
Figure 60 : Code Matlab : définition du SOC.....	111
Figure 61 : Modèle TRNSYS .....	111
Figure 62 : Code Matlab : Précautions concernant le SOC.....	112
Figure 63 : Code Matlab : Calcul de la capacité d'une cellule et de la capacité d'une cellule au premier pas de temps .....	112
Figure 64 : Code Matlab : Sélection du Mode "0", calcul de la puissance, de l'intensité initiale et du voltage initial .....	113
Figure 65 : Code Matlab : Boucle itérative permettant de faire converger le couple tension/intensité avec la puissance.....	116
Figure 66 : Code Matlab : Définition de la tension et de l'intensité de la cellule .....	117
Figure 67 : Code Matlab : Comportement de la cellule en charge, lorsque le SOC est compris entre le $SOC_{max}$ et le $SOC_{min}$ , en Mode « 0 » .....	118
Figure 68 : Code Matlab : Comportement de la cellule en charge lorsque le SOC est égal au $SOC_{max}$ , en Mode « 0 » .....	119
Figure 69 : Comportement de la cellule en décharge lorsque le SOC est compris entre $SOC_{min}$ et $SOC_{max}$ , en Mode « 0 » .....	119
Figure 70 : Comportement de la cellule en décharge lorsque le SOC est égal au $SOC_{min}$ , en Mode « 0 » .....	120
Figure 71 : Comportement de la cellule lorsque la puissance est nulle, en Mode « 0 » .....	120
Figure 72 : Code Matlab : Sélection du Mode « 1 », calcul de la tension en fonction de l'intensité ..	121
Figure 73 : Code Matlab : Comportement de la cellule en charge, lorsque le SOC est compris entre $SOC_{max}$ et $SOC_{min}$ , en Mode « 1 » .....	122
Figure 74 : Code Matlab : Comportement de la cellule en charge, lorsque le SOC est égal au $SOC_{max}$ , en Mode « 1 » .....	122
Figure 75 : Code Matlab : Comportement de la cellule en décharge, en Mode « 1 » .....	122

Figure 76 : Code Matlab : Comportement de la cellule en lorsque l'intensité est nulle, en Mode « 1 » .....	123
Figure 77 : Code Matlab : Définition des « Outputs » et fin du code.....	123
Figure 78 : Résultats de la simulation, en Mode « 0 », en charge .....	125
Figure 79 : Résultats de la simulation, en Mode « 0 », en décharge .....	126
Figure 80 : Résultats de la simulation, en Mode « 0 », à puissance nulle.....	127
Figure 81 : Résultats de la simulation, en Mode « 1 », en charge .....	127
Figure 82 : Résultats de la simulation, en Mode « 1 », en décharge .....	128
Figure 83 : Résultats de la simulation, en Mode « 1 », en intensité nulle .....	128
Figure 84 : Simulation de la tension à différents C-rates .....	129
Figure 85 : Impact du pas de temps sur les résultats : pas de temps d'1 minute .....	130
Figure 86 : Impact du pas de temps sur les résultats : pas de temps de 5 minutes .....	130
Figure 87 : Impact du pas de temps sur les résultats : pas de temps de 15 minutes .....	131
Figure 88 : Fiche technique : Perte de capacité en fonction du nombre de cycles [144] .....	133
Figure 89 : Fiche technique : Influence de la température sur la tension de la cellule .....	134

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison des différents types de batteries [9] .....	11
Tableau 2 : Temps de décharge/charge en fonction du C-rate [13] .....	12
Tableau 3 : Tableau récapitulatif de la composition d'une cellule lithium-ion [30].....	21
Tableau 4 : Caractéristiques habituelles de voltage [16] .....	26
Tableau 5 : Exemples de voltages de fin de décharge pour différentes chimies de cellules [19].....	27
Tableau 6 : Exemples de valeurs de résistances internes [56] .....	28
Tableau 7 : Tableau comparatif des différentes chimies de batteries lithium-ion [40].....	37
Tableau 8 : Utilisation des types de batteries lithium-ion dans certains véhicules électriques [62] ....	38
Tableau 9 : Avantages et inconvénients des batteries lithium-ion [44][67][68].....	39
Tableau 10 : Exemples de voltages pour différentes applications [85] .....	52
Tableau 11 : Comparaison de la perte de capacité due à la température de deux cellules Panasonic [55] .....	58
Tableau 12 : Gammes de températures de charge et de décharge pour différentes chimies de batteries [59] .....	58
Tableau 13 : Influence de la profondeur de décharge sur le nombre de cycles [92].....	60
Tableau 14 : Influence du SOC et de la température sur la perte de capacité [92] .....	60
Tableau 15 : Auto-déchargement pour différentes chimies de cellules [93].....	61
Tableau 16 : Influence du SOC et de la température sur l'auto-déchargement [93].....	62
Tableau 17 : Comparatif des batteries lithium-ion disponibles sur le marché [25][113][129][130][131][132][133][134][135][136][137][138][139] .....	85
Tableau 18 : Paramètres internes calculées par le Type47 TRNSYS [140] .....	89
Tableau 19 : Signification des termes de l'équation de détermination de l'intensité correspondant au voltage de coupure, en charge [141] .....	90
Tableau 20 : « Outputs » des Types TRNSYS de simulation de panneaux photovoltaïques .....	132

## Liste des équations

Équation 1 : Formule de calcul du SOC .....	13
Équation 2 : Exemple d'équations de demi-réaction pour une batterie lithium-ion [52][53] .....	24
Équation 3 : Equation du modèle électrique de Thevenin [62] .....	81
Équation 4 : Equation de calcul du voltage de coupure du Type47 TRNSYS [140] .....	89
Équation 5 : Code Fortran du Type47 : Calcul de la puissance d'une cellule à partir de la puissance de la batterie [141].....	90
Équation 6 : Code Fortran du Type47 : Calcul de l'intensité correspondant au voltage de coupure, en charge [141].....	90
Équation 7 : Code Fortran du Type47 : Calcul de l'intensité correspondant au voltage de coupure, en décharge [139] .....	91
Équation 8 : Code Fortran du Type47 : Calculs des paramètres a et b, en décharge [139] .....	91
Équation 9 : Code Fortran du Type47 : Calculs des paramètres a et b, en charge [139] .....	91
Équation 10 : Code Fortran du Type47 : Calcul de l'intensité de la batterie [139] .....	91
Équation 11 : Code Fortran du Type47 : Calcul de la tension de la batterie [139] .....	92
Équation 12 : Code Fortran du Type47 : Formule de Shepherd de calcul de la tension de la batterie, en charge et décharge [139] .....	92
Équation 13 : Code Fortran du Type47 : Calcul de la limite inférieure de tension de la batterie [139] .....	93
Équation 14 : Code Fortran du Type47 : Calcul de la limite supérieure de tension de la batterie [139] .....	93
Équation 15 : Code Fortran du Type47 : Formule de Shepherd de calcul de la tension de la batterie, en charge [139].....	93
Équation 16 : Code Fortran du Type47 : Formule de Shepherd de calcul de la tension de la batterie, en décharge [139] .....	94
Équation 17 : Equations de calcul de la tension de la batterie, en charge et décharge [10] .....	100
Équation 18 : Formule de calcul du $\Delta I$ [10] .....	100
Équation 19 : Formule de calcul de la tension de diffusion en décharge [10] .....	101
Équation 20 : Formule de calcul de la tension de diffusion en charge [10] .....	101
Équation 21 : Formule de calcul de la tension de la batterie en fonction du SOC.....	102
Équation 22 : Formule originale de calcul de la tension à circuit ouvert de la batterie en fonction du SOC [10].....	102
Équation 23 : Formule de calcul de la capacité de la batterie [10] .....	102
Équation 24 : Formule de calcul du SOC [10] .....	102
Équation 25 : Calcul de la capacité nominale d'une cellule en fonction de la capacité nominale de la batterie.....	113
Équation 26 : Calcul de la capacité en début de pas de temps en fonction de la capacité nominale et du SOC .....	113
Équation 27 : Calcul de la puissance appliquée à la batterie en fonction de la puissance du générateur et de la charge .....	113
Équation 28 : Calcul de la puissance appliquée à une cellule sur base de la puissance appliquée à la batterie.....	114
Équation 29 : Calculs des tensions maximum et minimum.....	114
Équation 30 : Formule simple du calcul de la tension en fonction du SOC.....	115
Équation 31 : Formules de calcul de la pente et de l'ordonnée à l'origine d'une droite .....	115
Équation 32 : Formules de calcul des coefficients a et b de la régression linéaire.....	115
Équation 33 : Formule permettant de calculer le SOC <sub>bis</sub> .....	115
Équation 34 : Calcul de la tension initiale en fonction du SOC <sub>bis</sub> .....	116

Équation 35 : Formule de calcul de la puissance à partir de la tension et de l'intensité .....	116
Équation 36 : Formule de calcul de la capacité de la cellule en charge .....	118
Équation 37 : Formule de calcul du SOC .....	118
Équation 38 : Formule de calcul de la capacité de la cellule, en décharge .....	120

## Introduction

Nous vivons actuellement dans un monde basant fortement la production d'énergie sur les ressources fossiles, telles que le charbon, le pétrole et le gaz. Cependant, ces ressources ne sont pas renouvelables et il adviendra un jour où elles s'épuiseront, que ce soit dans quelques dizaines voire centaines d'années en fonction de la ressource. De plus, l'utilisation à outrance de ces énergies fossiles pollue la planète et provoque un changement climatique, dont nous commençons déjà à ressentir les conséquences, notamment au niveau météorologique.

La transition énergétique est une démarche qui s'avère de plus en plus nécessaire. Celle-ci doit s'organiser autour de deux objectifs fondamentaux. Le premier est l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique. Il est indispensable de réduire efficacement les émissions de polluants en se concentrant sur la production d'énergie verte, utilisant par exemple le soleil, le vent, ou encore l'eau comme moyens de produire de l'énergie. Le second objectif est de réduire notre consommation d'énergie. Cela ne signifie pas forcément réduire notre confort mais plutôt mieux utiliser l'énergie afin de consommer moins à confort équivalent.

C'est dans cet optique que l'Europe a mis en place l'objectif 20-20-20. Celui-ci fixe trois objectifs pour l'année 2020 :

- Une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 20% ;
- Une consommation énergétique provenant pour 20% des énergies renouvelables ;
- Une amélioration de l'efficacité énergétique de 20%. [1]

Une façon de mieux utiliser les énergies renouvelables est l'utilisation de batteries domestiques. Celles-ci permettraient en effet d'être chargées la journée, à l'aide de panneaux photovoltaïques par exemple, lorsque l'énergie solaire est abondante ; et déchargée la nuit, lorsque l'énergie solaire n'est plus disponible. Elles pourraient également être couplées à de l'éolien afin de toujours avoir une certaine quantité d'énergie stockée lorsque les éoliennes ne produisent pas.

Le déploiement des batteries domestiques, couplées à des panneaux photovoltaïques, permettrait ainsi de jouer un rôle de régulation du réseau électrique global. Elles ont, en effet, tout à fait leur place dans l'optique d'amélioration du réseau, c'est-à-dire dans les « Smart Grids », encore appelés « réseaux intelligents ».

Les batteries présentent également un réel avantage en ce qui concerne la sécurité face aux pannes électriques. En effet, ces dernières années en Belgique, nous entendons parler de « Blackout », de production insuffisante pour satisfaire la demande en hiver. L'utilisation de batteries permettrait ainsi de limiter ces inconvénients.

Ce travail s'inscrit dans cette optique d'utilisation des batteries lithium-ion en tant que batteries domestiques. Celui-ci a tout d'abord pour objectif de mieux comprendre la théorie derrière les batteries, leur fonctionnement, leurs caractéristiques, ... Ensuite, ce mémoire vise à étudier la possibilité de simuler le comportement de batteries lithium-ion à l'aide du logiciel de simulation dynamique TRNSYS.

Dans cette optique, ce mémoire se décompose en deux parties : une partie théorique et une partie pratique.

La partie théorique propose tout d'abord un bref historique de l'évolution des batteries ainsi qu'un certain nombre de définitions qui sont nécessaires à la bonne compréhension de ce domaine particulier : les batteries. Elle s'attarde ensuite sur la composition et le fonctionnement des batteries et présentera certaines chimies utilisées dans les batteries lithium-ion. Nous verrons alors comment agencer les différentes cellules d'une batterie entre elles ainsi que divers phénomènes liés aux conditions d'utilisation et de fonctionnement des batteries, tels que le vieillissement, la perte de capacité ou encore l'auto-déchargement. Nous parlerons ensuite de la connexion d'un système de stockage par batterie ainsi que diverses utilisations. Nous terminerons par une courte description des méthodes de simulation disponibles ainsi que par une petite étude de marché.

La seconde partie de ce mémoire s'intéressera davantage à la simulation d'un tel système. Pour ce faire, les modèles proposés dans TRNSYS seront passés en revue afin de déterminer la possibilité ou non de les utiliser dans le cadre de la simulation de batteries lithium-ion. Nous avons eu l'occasion de rencontrer le responsable du laboratoire en électronique de puissance de l'HTW Saar, nous aborderons donc les informations que nous avons pu tirer de cette rencontre ainsi que la description du modèle qui nous a été proposé.

Nous en viendrons alors plus spécifiquement à la réalisation d'un nouveau modèle, qui est basé sur l'utilisation du logiciel « Matlab », un logiciel de programmation [2]. Le code réalisé dans ce programme est alors utilisé dans le logiciel de simulation dynamique énergétique « TRNSYS » [3]. Nous décrirons ainsi le fonctionnement du code et terminerons par une discussion.

Pour terminer, précisons que le titre de ce mémoire, « Modélisation de systèmes de stockage électrique et leur intégration dans un réseau électrique intelligent », correspondait au projet initial. Cependant, à la vue de la prise de connaissances sur le sujet, l'objectif du mémoire a évolué. Nous aborderons donc assez peu l'intégration de ces systèmes dans les réseaux intelligents. Cela reste néanmoins l'objectif final du projet dans sa globalité : étudier plus efficacement la rigueur nécessaire à la mise en place de tels réseaux, ou « Smart Grids », à l'aide du logiciel de simulation TRNSYS.

# 1. Partie théorique

## 1.1. Historique

Pour commencer, intéressons-nous à l'histoire de la batterie, depuis son invention jusqu'à nos jours. En effet, la batterie lithium-ion n'a pas été la première ; beaucoup d'autres matériaux ont été utilisés avant d'en arriver aux batteries que nous connaissons aujourd'hui.

Il semblerait que l'invention de la pile puisse remonter à environ 2500 ans. En effet, certains objets qui ressemblent à des piles ont été découverts, comme par exemple la « pile de Bagdad ». Celle-ci contenait une tige en fer dans un cylindre en cuivre et utilisait probablement du vinaigre comme électrolyte. De telles piles auraient pu servir à des bijoutiers pour recouvrir certains métaux par de l'or ou de l'argent. [4]



Figure 1 : Pile de Volta [148]

C'est en 1800 que le physicien italien, Alessandro Volta, inventa la première pile électrique primaire, c'est-à-dire non-rechargeable [5]. Celle-ci était composée d'un empilement alternatif de plusieurs disques : un premier en zinc, un second en argent et un troisième en carton imbibé d'eau salée et ainsi de suite, en recommençant avec un disque de zinc. Napoléon commanda alors à Volta la première pile voltaïque qui comptait 600 cellules de cuivre et de zinc. [4]

En 1829, le français Antoine César Becquerel proposa une évolution de la pile de Volta, permettant d'éviter les phénomènes de polarisation provoquant la formation de petites bulles d'hydrogène sur l'électrode de cuivre, entravant le passage du courant électrique. Pour ce faire, il élaborait un agencement différent : la plaque de zinc baignant dans de l'eau acidulée était enfermée dans un sac de baudruche, fabriqué à partir du gros intestin d'un bœuf, ce qui permettait d'obtenir une pellicule très fine. En plongeant ce dispositif dans une solution de sulfate de cuivre on évitait le mélange entre les deux liquides, qui était indésirable pour le bon fonctionnement de la pile, sans pour autant gêner le passage du courant électrique. Il s'agit de la première pile à courant électrique constant. [4]

La pile de Daniell, en 1836, reprend le principe de celle de Becquerel mais échange la baudruche contre un vase en terre cuite poreuse.

En 1868, Georges Leclanché propose une pile qui aura beaucoup de succès. Celle-ci était composée d'un bocal en verre dans lequel se trouvaient un crayon en zinc et un cylindre en terre cuite poreuse contenant notamment du charbon ainsi que des éléments dépolarisants, le tout baignant dans un électrolyte à base de chlorure d'ammonium. [4]

La première pile secondaire, c'est-à-dire rechargeable, que nous appelons plus communément « batterie », fut inventée par Gaston Planté, chimiste français, en 1859. Il s'agissait d'une batterie au plomb. Malgré son prix attractif, cette batterie présentait des utilisations assez limitées du fait de sa faible énergie spécifique (c'est-à-dire la quantité d'énergie stockée par unité de masse) et du nombre de cycles assez limité qu'elle permettait d'atteindre. Ce dispositif est, de ce fait, principalement utilisé dans les voitures utilisant un moteur thermique. [4][6]



Figure 2 : Pile de Leclanché [4]

C'est en 1899 que Waldemar Jungner inventa la première batterie au nickel-cadmium [4]. Plusieurs versions dérivées de cette pile suivirent, comme par exemple les nickel-zinc, nickel-fer ou encore nickel-hydrogène. Ces batteries permettent d'atteindre de bien meilleures performances en termes de nombre de cycles réalisables ainsi que d'énergie spécifique. En 1988, une nouvelle batterie dérivée de la nickel-cadmium voit le jour : la batterie nickel-métal hydrure. Ce principe ouvre la voie aux batteries lithium-ion qui sont énormément utilisées à l'heure actuelle. En effet, ce type de batterie a amené l'utilisation d'une électrode d'insertion, cela signifie qu'au lieu de « consommer » une des électrodes au cours de la réaction, une électrode, dans ce cas l'anode, est capable d'absorber et de désorber les ions actifs dans les réactions électrochimiques. Cela permet de ne pas consommer de métal. Cette technologie a été utilisée pour la première voiture hybride, la Toyota Prius, malgré son coût plus élevé et son énergie spécifique inférieure. [6]

La première batterie alcaline primaire a été développée au milieu des années 1960 [4]. Dans cette pile, le charbon de la pile Leclanché est remplacé par du dioxyde de manganèse et le chlorure d'ammonium par de l'hydroxyde de potassium, le potassium étant un élément alcalin. Cette batterie présente certains avantages par rapport à celle proposée par Georges Leclanché : elle permet de fournir une intensité plus élevée pendant une plus longue période. [7]

Les premières batteries au lithium métallique sont alors apparues en 1973. Grâce au développement des électrodes d'intercalation, le matériau actif est absorbé ou désorbé à l'intérieur même de l'électrode au lieu de consommer celle-ci ; le lithium s'est avéré être un bon matériau étant donné qu'il s'agit du plus petit des métaux. L'énergie spécifique d'une batterie lithium-métal est plus que doublée par rapport aux chimies précédemment utilisées. Ainsi une telle batterie peut présenter une énergie spécifique de 200 Wh/kg, là où une batterie au plomb présentera une énergie spécifique de 20 à 35 Wh/kg, 50 à 80 Wh/kg pour une batterie nickel-cadmium et 80 Wh/kg pour une batterie nickel-métal hydrure. [6]

La production de ces batteries lithium-métal a cependant été arrêtée suite à certains problèmes de sécurité. Cependant des solutions ont été trouvées : la batterie lithium-polymère et la batterie lithium-ion. [4][6]

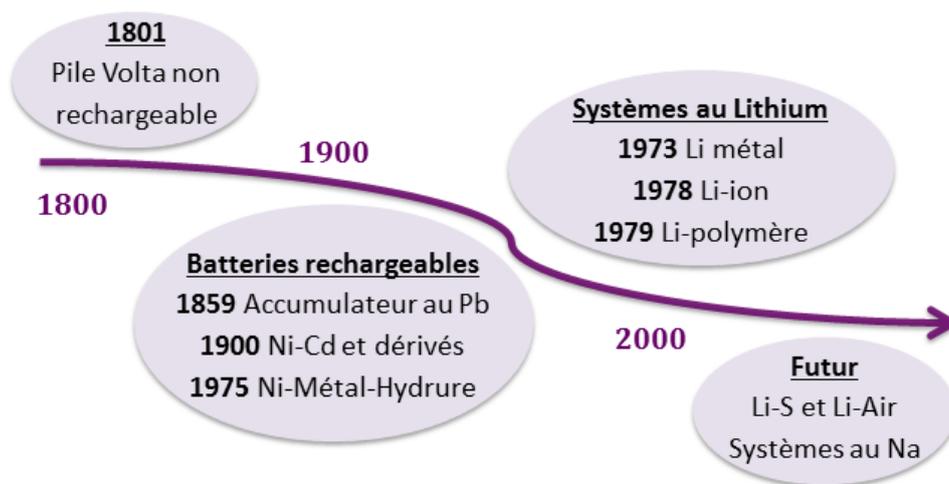


Figure 3 : Evolution chronologique de l'invention des différents types de batteries [6]

C'est Sony qui lança la production en masse des batteries lithium-ion en 1991. Elles sont, depuis lors, largement utilisées dans toute une série de domaines tels que les GSM, les ordinateurs portables, les caméras, ... [8]

Notons que la plupart de ces batteries sont toujours utilisées à l'heure actuelle, le choix de la chimie dépendant de l'application qui sera faite de la batterie. Ainsi certaines applications préféreront un coût plus faible, d'autres une sécurité optimale ou encore une capacité plus grande.

Voici un tableau récapitulatif des caractéristiques que les différents types de batteries peuvent avoir à l'heure actuelle :

Tableau 1 : Comparaison des différents types de batteries [9]

	Plomb	Nickel-cadmium	Nickel-métal hydrure	Alcaline rechargeable	Lithium-ion	Lithium-polymère
<b>Energie spécifique (Wh/kg)</b>	30 – 50	45 – 80	60 – 120	80	110 – 160	100 – 130
<b>Cycles de vie</b>	200 – 300	1500	300 – 500	50	500 – 1000	300 – 500
<b>Voltage par cellule (V)</b>	2	1,25	1,25	1,5	3,6	3,6
<b>Température de fonctionnement (°C)</b>	-20 à 60	-40 à 60	-20 à 60	0 à 65	-20 à 60	0 à 60

Comme nous pouvons le voir dans ce tableau, c'est bel et bien la batterie lithium-ion qui présente l'énergie spécifique la plus élevée par rapport à toutes les autres chimies de batteries. C'est pour cela que l'intérêt est très important pour ce type de batterie. En effet, elle permet de stocker plus d'énergie pour une masse équivalente, ce qui est très utile notamment en ce qui concerne les véhicules Généralités

Cette partie a pour but de décrire les différents constituants d'une batterie ainsi que son fonctionnement. Néanmoins, afin de mieux comprendre certaines notions, ainsi que la nomenclature qui sera utilisée dans la suite de ce travail, il est nécessaire de commencer par définir une série de dénominations qui seront utilisées par après.

### 1.1.1. Définitions

Pour commencer, il faut bien différencier ce que nous appelons une **cellule**, une **batterie**, ou encore un **pack de batteries**.

La **cellule** est la plus petite unité ; elle est constituée de deux électrodes (l'anode et la cathode), d'un séparateur et de l'électrolyte. C'est l'unité qui permet de produire un voltage.

Lorsque des **cellules** sont connectées entre elles, nous obtenons une **batterie** ; celle-ci est donc constituée de plusieurs cellules.

Et enfin, un **pack de batteries** est un agencement de batteries entre elles. De la même manière que nous connectons des **cellules** pour obtenir une **batterie**, nous connectons des **batteries** pour obtenir un **pack**. [10]

Comme précisé plus haut, une **cellule primaire** est définie comme étant une cellule qui ne peut pas être rechargée. A l'opposé, une cellule qui peut l'être est appelée **cellule secondaire**. [11]

Ensuite, le **C-rate** est une notion très importante que nous pourrions traduire par « courant de charge/décharge ». Cette valeur est exprimée en « C (pour capacité) » et permet de caractériser le courant électrique en fonction de la capacité de la batterie. Le C-rate permet également de définir le temps nécessaire pour décharger ou charger une batterie. Ainsi, si nous prenons comme exemple une batterie d'une capacité de 1000 mAh, un C-rate de 1C signifie qu'en décharge par exemple, la batterie fournira une intensité de 1 mA pendant 1h.

$$1C = \frac{1000 \text{ mA}}{1000 \text{ mAh}}$$

Un C-rate de 0,5C signifie que la batterie se déchargera à 500 mA mais pendant une durée de 2h.

$$0,5C = \frac{500 \text{ mA}}{1000 \text{ mAh}}$$

A l'opposé, un C-rate de 2C représente un déchargement de la batterie à 2000 mA mais pendant seulement 30 minutes.

$$2C = \frac{2000 \text{ mA}}{1000 \text{ mAh}}$$

Le tableau suivant illustre différents temps de décharge (ou de charge) en fonction de ces C-rate. [12]

Tableau 2 : Temps de décharge/charge en fonction du C-rate [13]

C-rate	Temps
5C	12 min
2C	30 min
1C	1h
0,5C ou C/2	2h
0,2C ou C/5	5h
0,1C ou C/10	10h
0,05C ou C/20	20h

Attardons-nous maintenant plus spécifiquement aux caractéristiques internes, physiques de la batterie.

Une donnée très importante est l'état de charge que nous appellerons ici « **SOC** » (pour « State Of Charge »), cette valeur est exprimée en pourcent. Il s'agit tout simplement de la capacité actuelle (Q) de la batterie exprimée en fonction de sa **capacité nominale** ( $Q_{max}$ ), c'est-à-dire lorsqu'elle est chargée à 100% de SOC. [11]

*Équation 1 : Formule de calcul du SOC*

$$SOC (\%) = \frac{Q (Ah)}{Q_{max} (Ah)}$$

A l'inverse, nous pouvons parler de la profondeur de décharge, « **DOD** » (pour « Depth Of Discharge »). Il s'agit également d'un pourcentage représentant l'inverse du SOC. Ainsi, une batterie ayant un SOC de 100% présentera un DOD de 0% alors qu'un SOC de 0% correspondra à un DOD de 100%. Lorsque le DOD dépasse les 80%, nous pouvons parler de décharge profonde de la batterie.

Le **voltage** ou la **tension** de la batterie représente simplement le voltage (en V) que la batterie présente lorsqu'elle est connectée à une charge, c'est-à-dire un appareil électrique. Cette tension varie en fonction du SOC et de l'**intensité** électrique (en A), appliquée à la batterie. Le voltage augmente avec le SOC mais diminue lorsque l'intensité augmente.

Une autre tension importante est la tension à circuit ouvert, ou voltage à circuit ouvert, que nous appellerons ici « **OCV** » (pour « Open Circuit Voltage »). Il s'agit donc du voltage de la batterie lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge, c'est-à-dire lorsque le circuit électrique n'est pas fermé, est ouvert. L'OCV augmente également avec le SOC. [11] Ce voltage à circuit ouvert est généralement 5 à 7% plus élevé que le voltage lorsque la batterie est connectée à une charge [14].

Ensuite, chaque cellule présente une **résistance interne**. Il s'agit d'une opposition au passage du courant à l'intérieur même de la batterie. Cette résistance est composée de deux parties : la **résistance électronique** et la **résistance ionique**. La première correspond à la résistivité des différents matériaux utilisés dans la batterie ainsi qu'aux contacts entre eux. La seconde partie de la résistance est due à certains facteurs électrochimiques tels que la conductivité de l'électrolyte ou encore la mobilité des ions. [15] Cette résistance interne est généralement différente en ce qui concerne la charge et la décharge, elle varie également en fonction du SOC. Une résistance interne élevée réduit les performances de la batterie puisqu'une partie de l'énergie de rechargement est transformée en chaleur. [11]

Nous pouvons ensuite citer quelques spécifications techniques des batteries.

Celles-ci sont tout d'abord définies en fonction de leur **voltage nominal**. Il s'agit généralement du voltage pris à 50% de SOC, étant donné que la tension d'une batterie varie avec l'état de charge de celle-ci. Ainsi, pour une cellule lithium-ion le voltage nominal est d'environ 3,6 V. [10][11][16]

Un autre voltage pris en compte est le **voltage de coupure en décharge**. Il s'agit du voltage minimum qu'une cellule peut atteindre : c'est celui-ci qui définit lorsqu'une cellule est considérée comme vide, déchargée complètement. Il n'est pas conseillé de descendre sous ce voltage de coupure, en effet, si tel était le cas, il ne serait plus possible de recharger la cellule. [11][17]

A l'opposé, nous pouvons également définir le **voltage de coupure en charge**. Dans ce cas, c'est le voltage qu'atteint la batterie lorsqu'elle est chargée à 100% de SOC.

Ensuite, un élément très important définissant les batteries est la **capacité nominale**. Cette capacité est exprimée en ampère-heure (Ah) et définit la charge maximale de la batterie, c'est-à-dire la quantité de charges électriques que la batterie peut contenir [18]. Cette capacité est déterminée en déchargeant la batterie à un certain C-rate de 100% de SOC jusqu'au voltage de coupure. La capacité peut alors être calculée en multipliant l'intensité du courant de décharge (exprimé en ampères) par le temps qu'il a fallu pour décharger la batterie. [11] Plus la capacité est importante et plus la période de fonctionnement sera longue [14].

Nous pouvons également parler de l'**énergie nominale**. Il s'agit de la quantité maximale d'énergie que la batterie peut contenir, elle est exprimée en wattheure (Wh). De la même manière que la capacité nominale, l'énergie nominale est calculée en multipliant la puissance de décharge (en W) par le temps qu'il a fallu pour décharger la batterie. [11] Il est également possible de déterminer l'énergie nominale en fonction de la capacité nominale, cette énergie est obtenue en multipliant cette capacité par le voltage nominal de la batterie. Ainsi une batterie d'une capacité nominale de 3,25 Ah et d'un voltage nominal de 3,6 V présentera une énergie nominale de 11,7 Wh. [10]

Nous parlerons également du nombre de **cycles de charge**. Il s'agit du nombre de cycles de charge – décharge complets que la batterie peut endurer avant de ne plus pouvoir satisfaire les exigences de performance. [11] Ce nombre de cycles peut varier en fonction de l'utilisation de la batterie. Différentes manipulations pouvant modifier ce nombre de cycles seront abordées plus tard dans ce travail. [11] Précisons qu'un cycle de charge – décharge est généralement défini comme la décharge complète d'une batterie initialement chargée à 100%, suivie d'un rechargement complet. Ce n'est cependant pas toujours le cas. En effet, les fabricants se limitent souvent à 80% de DOD afin d'évaluer la batterie, 80% de l'énergie stockée est donc délivrée et 20% ne sont pas utilisés. Cela permet d'augmenter la durée de vie de la batterie. [19]

Certaines caractéristiques peuvent alors être rapportées à une unité de masse afin de pouvoir comparer les différentes batteries entre elles.

C'est tout d'abord le cas pour l'énergie, qui peut donc être exprimée en **énergie spécifique** exprimée en Wh/kg. Elle peut également être appelée « densité énergétique gravimétrique » [14].

De la même manière, la **puissance spécifique** est exprimée en W/kg. Elle peut être appelée « densité de puissance gravimétrique » [14].

Ces deux caractéristiques peuvent également être exprimées par unité de volume. Il s'agira alors de la **densité énergétique** (ou « densité énergétique volumétrique » [14]), exprimée en Wh/L, et de la **densité de puissance**, exprimée en W/L. Ces unités permettent donc de comparer les différentes batteries en fonction de leur encombrement. [11]

Précisons également qu'une batterie présente un **rendement faradique**. Ce rendement représente le rapport entre l'énergie (en Ah) récupérée lors de la décharge par rapport à l'énergie qui a été incorporée dans la batterie lors de la charge. En effet, une batterie n'accepte pas 100% de la charge, il y a quelques pertes. Les cellules lithium-ion sont très efficaces et peuvent présenter des rendements faradiques de plus de 99%. Notons que les pertes augmentent avec l'intensité de rechargement et avec la température, la batterie perd donc en efficacité. [20][21][22][23][24]

Un second rendement entre également en jeu : le **rendement énergétique**. Il s'agit également d'un rapport entre l'énergie récupérée lors de la décharge par rapport à celle qui a été incorporée dans la batterie lors de la charge. Là où une batterie lithium-ion présente généralement un rendement faradique de plus de 99%, le rendement énergétique est plus faible et est fonction du C-rate utilisé.

Lorsque celui-ci est de 0,05C ce rendement énergétique est de 99% mais lorsque le C-rate augmente, ce rendement chute. Ainsi, avec un C-rate de 0,5C ce rendement descend à 97%. Le rendement énergétique est également réduit lorsque la chaleur augmente. Cependant, les batteries commerciales semblent présenter des rendements plus faibles. Par exemple, la batterie du véhicule électrique « Tesla Roadster » présente un rendement énergétique de 86%. Cela est dû aux conditions de rechargement rapide, utilisant donc un C-rate plus élevé. [24] La batterie domestique « Tesla Powerwall 2 » présente quant à elle un rendement de 89%. [25][26]

Finalement, le terme « **charge** » peut désigner deux principes différents :

- Simplement le procédé de rechargement de la batterie ;
- La désignation d'un appareil connecté à la batterie, extrayant du courant de celle-ci.

Avec ces différentes définitions à l'esprit, la compréhension de la suite de ce travail sera plus aisée.

### 1.1.2. La batterie octogonale

Afin qu'une batterie présente de bonnes performances et qu'elle propose une qualité suffisante afin de pouvoir correctement subvenir aux besoins des consommateurs, huit conditions basiques doivent être rencontrées. Ces huit conditions permettent de définir ce que nous pouvons appeler la « batterie octogonale ».

- Pour commencer, la première caractéristique que la batterie peut présenter est une **haute énergie spécifique**. L'augmentation de la capacité des batteries permet d'atteindre des durées de fonctionnement importantes. En général nous imaginons qu'une batterie lithium-ion propose intrinsèquement une énergie spécifique élevée, mais ce n'est pas forcément le cas. En effet, en fonction de l'utilisation prévue certaines batteries peuvent atteindre 250 Ah/kg, celles-ci présentent alors des capacités élevées mais des puissances relativement faibles ; alors que d'autres atteindront 150 Ah/kg pour la même chimie ; ces batteries proposent dès lors des capacités plus faibles mais des puissances élevées. Certaines batteries lithium-ion utilisées dans des groupes motopropulseurs permettent d'atteindre de longues durées de vie mais en ne proposant qu'une énergie spécifique de 60 Ah/kg. [27]
- La seconde caractéristique est une **puissance spécifique élevée**. Les batteries utilisées dans les outils électriques ou dans les groupes motopropulseurs électriques doivent proposer des capacités de chargement/déchargement élevées mais, de ce fait, l'énergie spécifique est basse. [27]
- Un **prix abordable** est également un élément à prendre en compte. En effet, les matériaux, le raffinage, la fabrication, le contrôle qualité ainsi que l'appariement des cellules sont des coûts importants. Il est possible de diminuer ces coûts en produisant à grande échelle ou encore en produisant des appareils n'utilisant qu'une seule cellule. L'étape d'appariement des cellules n'est alors plus nécessaire. L'appariement consiste à utiliser des cellules ayant des caractéristiques (capacité, ...) les plus proches possibles lorsqu'elles sont connectées entre elles, afin d'éviter certains problèmes techniques [28]. [27]

- Principalement en ce qui concerne les packs de batteries de grandes tailles, il est important de proposer une **longue durée de vie**. A l'heure actuelle, une batterie utilisée dans une voiture électrique n'a qu'une longévité de 8 à 10 ans. S'il était possible d'étendre cette durée jusqu'à 20 ans, l'utilisation d'une voiture électrique pourrait être davantage valorisée, malgré le coût d'investissement plus élevé. En effet, le remplacement des batteries est généralement un processus très onéreux. Cependant, la longévité d'une batterie n'est pas seulement liée à sa conception mais également à son utilisation. Certaines conditions, telles que des températures défavorables, des recharges rapides ou encore de mauvaises conditions de décharge peuvent stresser la batterie. [27]
- La **sécurité** doit évidemment être étroitement surveillée. Lorsque les batteries lithium-ion proposent une énergie spécifique élevée, le système est généralement plus instable, et peut ainsi présenter certains risques pour la sécurité. Les batteries lithium-ion au nickel ou encore au lithium métallique sont d'autres exemples ; la fabrication de ces batteries a été arrêtée à cause de problèmes de sécurité. Néanmoins, lorsque les batteries lithium-ion sont utilisées correctement, elles sont très sûres. [27]
- Les batteries ne fonctionnent pas toutes dans les mêmes conditions ; un **domaine d'utilisation étendu** est une caractéristique intéressante. Ainsi, les batteries présentent leurs performances optimales à température ambiante (20-25°C) tandis que les températures faibles ralentissent les réactions électrochimiques, quel que soit le type de batterie. Les batteries lithium-ion ne peuvent pas être rechargées lorsque les températures sont inférieures à 0°C, c'est pourquoi des couvertures chauffantes sont utilisées lorsque c'est nécessaire, afin de permettre le rechargement. A l'opposé, des températures élevées diminuent la longévité de la batterie et compromettent sa sécurité. [27]
- Une attention particulière doit également être portée à la **toxicité** de ces batteries. Afin de protéger l'environnement, le cadmium ou le mercure utilisés dans certaines batteries ont été remplacés par d'autres matériaux. L'Europe vise à bannir les batteries au plomb mais aucune alternative n'est actuellement disponible, en termes de coûts et performances similaires. Le stockage doit également être surveillé. S'il est fait dans de mauvaises conditions, les batteries au nickel ou au lithium peuvent devenir dangereuses, même si elles ne contiennent que peu de matériaux toxiques. [27]
- Enfin, la dernière caractéristique intéressante concerne le **rechargement rapide**. Certaines conceptions de batteries au lithium permettent le rechargement rapide. Cette conception doit cependant être étudiée spécifiquement pour cela. De plus ces batteries doivent être en bon état et chargées à température ambiante (20-25°C). Le rechargement rapide n'est pas possible lorsque les cellules sont âgées ou lorsque l'appariement n'a pas été fait correctement. A l'heure actuelle, seules les batteries au nickel-cadmium acceptent des charges ultra-rapides tout en ne subissant qu'un stress minimum. [27]

Certaines conditions secondaires peuvent également être réunies afin de proposer une batterie de qualité. Ainsi, un **auto-déchargement faible** permet de stocker de l'énergie sur des longues durées ; la possibilité d'un **démarrage instantané** est également intéressante, comme l'est celle d'avoir une bonne durée de vie tout en gardant des **performances équivalentes**. En effet, une batterie n'est pas éternelle : elle vieillit ! Ainsi, certaines batteries telles que les alcalines peuvent être stockées pendant 10 ans en gardant toujours 70% de leur capacité alors que la plupart des batteries secondaires ont un auto-déchargement plus important que les batteries primaires et ne permettent de ce fait de stocker l'énergie que sur des durées plus courtes. Les batteries secondaires perdent de façon permanente en capacité avec l'âge, même lorsqu'elles ne sont pas utilisées. [27]

### 1.1.3. Constituants d'une cellule

Afin de comprendre le fonctionnement d'une batterie, nous allons tout d'abord nous attarder sur la composition de celle-ci.

Une batterie est constituée de différents éléments dont les principaux sont : les deux électrodes (positive et négative), un séparateur et l'électrolyte. [29][8]

Une cellule est composée de deux chemins : le premier est emprunté par les électrons et est constitué d'un circuit électrique, tandis que le second est utilisé par les ions qui se déplacent entre les électrodes. [30]

#### 1.1.3.1. Le séparateur

Le séparateur sert d'isolant entre les deux électrodes, laissant passer les ions mais empêchant le passage des électrons. [30]

L'électrolyte humidifie le séparateur pour former un catalyseur favorisant le passage des ions, ceux-ci se dirigeant de la cathode vers l'anode en charge et inversement en décharge. Le séparateur est un isolant qui ne présente pas de conductivité électrique, bien que les ions soient capables de le traverser librement.

Une petite quantité de courant peut tout de même traverser ce séparateur ; c'est ce que l'on appelle l'auto-déchargement. Cela signifie que la batterie se décharge d'elle-même lorsqu'elle n'est pas utilisée. Ce phénomène se produit quel que soit le type de batterie, et à des niveaux plus ou moins importants.

En cas de rupture de ce séparateur, les électrons peuvent migrer librement d'une électrode à l'autre, ce qui crée alors un court-circuit. [31]

La composition du séparateur a bien évidemment évolué. Il était tout d'abord fabriqué en caoutchouc, en fibre de verre, en cellulose et en polyéthylène. En ce qui concerne les batteries au nickel, il s'agissait de films poreux de polyoléfines, nylon ou cellophane.

Les batteries actuelles au lithium-ion utilisent comme séparateur des polyoléfines. [31] Il s'agit d'un polymère d'éthylène d'oléfine ayant pour formule générale «  $-(CH_2-CRR')_n-$  » dans laquelle R et R' peuvent correspondre à un atome d'hydrogène (H) ou à des groupements tels que  $-CH_3$ ,  $-CH_2-CH_3$  ou encore  $-CH_2-CH(CH_3)_2$  [32]. Ce polymère est issu de la pétrochimie. Ce matériau a pour avantages de présenter d'excellentes propriétés mécaniques, une bonne stabilité chimique et un coût faible.

L'électrolyte étant imprégné dans le séparateur, celui-ci doit être assez perméable et présenter une taille de pores allant de 30 à 100 nm avec une porosité recommandée de 30 à 50%. [31]

### 1.1.3.2. L'électrolyte

L'électrolyte agit comme un catalyseur et permet le transport des ions  $\text{Li}^+$  entre les deux électrodes, dans le cas d'une batterie lithium-ion, bien entendu, au cours des réactions de charge et de décharge. Un circuit électrique externe, situé entre les deux électrodes, permet alors de faire transiter les électrons afin d'assurer la neutralité de celles-ci. [33]

L'électrolyte peut être constitué de sels solubles, d'acides ou encore de bases, sous forme liquide, gélifiée ou sèche. Il peut également s'agir d'un polymère ou encore d'une céramique solide dans certains cas.

En ce qui concerne les batteries lithium-ion, l'électrolyte peut se retrouver sous la forme d'un liquide, d'un gel ou encore d'un polymère sec.

Lorsque l'électrolyte est liquide, il s'agit d'une solution de sels de lithium à laquelle sont ajoutés des solvants organiques qui permettent d'augmenter la conductivité et d'étendre la gamme de températures de fonctionnement. [34] Cet électrolyte est alors incorporé dans un séparateur poreux. [35]

L'électrolyte gélifié n'est pas très différent d'un électrolyte liquide puisqu'il s'agit simplement d'une membrane sèche qui est imprégnée par cet électrolyte liquide. [36]

Les électrolytes polymère peuvent présenter des compositions très différentes : il s'agit de composés organiques polymérisés. [37] Dans ce cas, le séparateur poreux des batteries lithium-ion classiques est remplacé par un séparateur microporeux. [35] Il en existe beaucoup de sortes différentes mais ce n'est pas le but de ce travail d'entrer dans ces détails.

Précisons simplement qu'à l'heure actuelle la majorité des cellules lithium-polymère incorporent un séparateur microporeux humide. Ces systèmes peuvent fonctionner avec beaucoup de types de chimies différentes telles que les cellules lithium au cobalt, au phosphate ou encore au manganèse. Malgré toutes les configurations possibles des batteries au lithium, elles portent toutes le nom de batteries « lithium-ion ». [35]

Pour les différentes chimies de batteries, l'électrolyte est généralement stable, mais ce n'est pas le cas pour les batteries au lithium-ion. En effet, un film se forme sur l'anode, celui-ci est appelé l'interface électrolytique solide (SEI). Cette couche agit un peu à la manière du séparateur puisqu'elle isole l'anode de la cathode tout en permettant aux ions de transiter au travers. Elle est nécessaire au bon fonctionnement de la batterie. Ce film permet de stabiliser la batterie tout en prolongeant sa durée de vie. La SEI réduit cependant la capacité de la batterie. [8][34][38][39]

Il ne faut cependant pas que ce film ne devienne trop important car il réduirait l'accès des ions à l'anode. [24] Pour éviter cela, des additifs sont mélangés à l'électrolyte. Ceux-ci sont consommés lors de la formation de la couche SEI. Un exemple d'additif est le carbonate de vinylène (VC) qui permet d'améliorer la durée de vie de la batterie tout en gardant une résistance interne basse et limitant le vieillissement. [34]

### 1.1.3.3. Les électrodes

Une batterie est donc composée de deux électrodes : une électrode positive, appelée la cathode, et une électrode négative, appelée l'anode.

La composition de l'électrode positive peut varier d'une conception de batterie à une autre. Il existe beaucoup de compositions d'électrodes positives différentes : les électrodes LFP (Lithium Fer Phosphate,  $\text{LiFePO}_4$ ), NMC (Lithium Nickel Manganèse Cobalt Oxyde,  $\text{LiNiMnCoO}_2$ ), NCA (Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxyde,  $\text{LiNiCoAlO}_2$ ), LCO (Lithium Cobalt Oxyde,  $\text{LiCoO}_2$ ), LMO (Lithium Manganèse Oxyde,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ), LTO (Lithium Titanate,  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ), LNO (Lithium Nickel Oxyde,  $\text{LiNiO}_2$ ) [8]. [40][41][42] Une description de ces différentes chimies sera proposée un peu plus tard dans ce travail.

Précisons néanmoins que le cobalt est le matériau le plus utilisé dans la fabrication des cathodes des batteries lithium-ion commerciales. Cependant, à cause de son prix relativement élevé, les fabricants ont tendance à modifier la composition de la cathode en mélangeant le cobalt avec d'autres matériaux tels que le nickel, le manganèse ou encore l'aluminium. Cela permet de réduire les coûts mais également de proposer de meilleures performances par rapport à des cathodes en cobalt pur. [43]

Afin d'augmenter l'énergie spécifique des cellules, le cobalt peut être remplacé en partie par du nickel. Cependant, ce matériau est plus cher et provoque une perte de stabilité du système, et donc une sécurité moindre. [44]

Venons-en maintenant au cas de l'électrode négative : l'anode. Lorsque Sony proposa la première batterie lithium-ion commerciale, au début des années 1990, l'anode était composée de coke, un produit du charbon. Mais depuis 1997, les fabricants se sont plutôt orientés vers une anode en graphite. Cela permet d'obtenir une courbe de décharge plus plate, comme nous pouvons le voir dans la Figure 4. La courbe de décharge représente le comportement du voltage de la batterie en fonction de l'état de charge. Plus la batterie est déchargée et plus le voltage diminue.

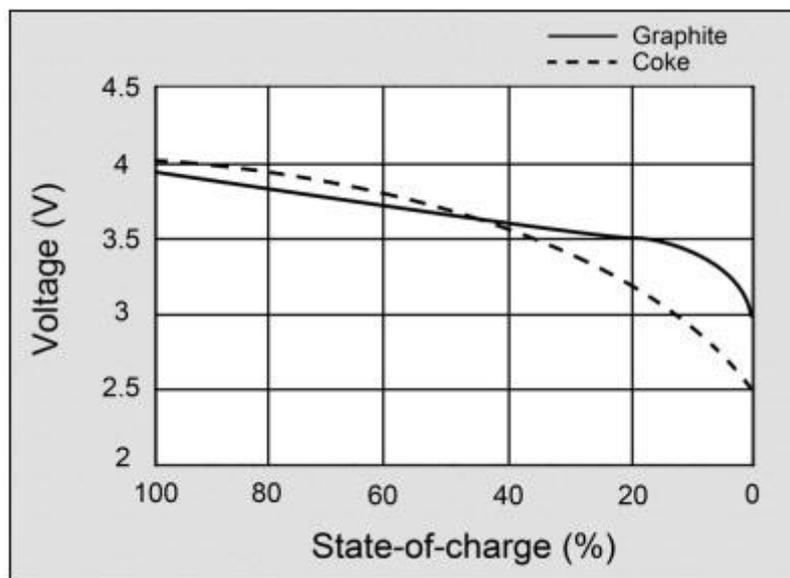


Figure 4 : Comparaison de courbes de décharges d'une cellule avec une anode en coke et un autre avec une anode en graphite [44]

Il est en effet plus intéressant d'avoir une courbe de décharge la plus plate possible dans la gamme utilisable de SOC [44]. La raison est qu'une courbe de décharge plate permet d'avoir une tension relativement constante pendant toute la durée d'un cycle de décharge. Cela permet d'éviter certains problèmes liés à des chutes de tension et permet de délivrer une énergie constante, contrairement à d'autres batteries telles que celles au plomb qui ne permettent pas de délivrer une énergie constante en continu. [45]

Actuellement l'électrode négative est le plus généralement composée de graphite. [8] Celui-ci s'organise en feuillets permettant l'intercalation des ions lithium. L'intercalation est un processus pendant lequel les ions comblent les interstices disponibles dans le graphite tout au long de la réaction [46]. Ce matériau permet de rendre réversible cette réaction d'intercalation. [29]

Le graphite est du carbone présentant une structure différente, c'est la forme de carbone la plus stable. Ce matériau est résistant à la chaleur et permet de la conduire ; il permet également de conduire l'électricité tout en résistant à la corrosion et en étant léger. Il est cependant onéreux à cause des procédés de purifications nécessaires à sa production. Il existe deux sortes de graphites : le graphite naturel, extrait de mines, et le synthétique, produit à partir de coke de pétrole. Les deux entrent dans la composition des anodes à hauteur de 55% de graphite synthétique et 45% de graphite naturel.

Le graphite synthétique avait tendance à être préféré par les fabricants car il présentait une pureté supérieure par rapport au graphite naturel. C'est cependant en train de changer grâce aux nouvelles techniques de purification qui permettent d'obtenir du graphite naturel présentant une pureté supérieure au graphite synthétique, de 99,9% contre 99%. De plus le graphite naturel purifié permet de conduire plus efficacement l'électricité et la chaleur tout en réduisant les coûts de production. Cela permettra donc de proposer des batteries lithium-ion présentant des performances égales ou supérieures par rapport à celles fonctionnant principalement à l'aide de graphite synthétique. [47]

Afin d'augmenter les performances de cette anode en graphite, plusieurs additifs ont été testés tels que des alliages à base de silicium. En effet, six carbones sont nécessaires dans le graphite pour pouvoir lier un seul atome de lithium tandis qu'un seul atome de silicium permet de lier quatre ions lithium. Une anode en silicium pourrait de ce fait stocker plus de dix fois l'énergie qu'une anode en graphite est capable de stocker. Cependant, le silicium pose un problème d'expansion. Il n'est donc pas possible d'utiliser des anodes en silicium pur, c'est pourquoi il est généralement ajouté 3 à 5% de silicium aux anodes conventionnelles afin d'augmenter les performances en termes de durée de vie de la batterie.

Une autre piste d'amélioration de l'anode est l'utilisation, comme additif, de nanostructures de titanate de lithium qui permettraient d'améliorer la durée de vie, la capacité de rechargement, les performances à basse température ainsi que la sécurité. Cependant l'énergie spécifique s'en verrait réduite et le coût serait élevé.

Chaque amélioration apportée permet de renforcer certaines caractéristiques mais il peut arriver qu'une augmentation de performance dans un domaine cache une diminution dans un autre. C'est ce qui se produit par exemple avec ce qu'on appelle les « Energy Cells » et les « Power Cells. Dans le premier cas, nous pourrions proposer comme traduction « cellules d'énergie » ; cela signifie que c'est l'énergie spécifique (la capacité) qui est améliorée, afin d'augmenter les temps de fonctionnement ; dans ce cas les puissances spécifiques sont plus simples. A l'opposé, nous trouvons les « Power Cells », ce qui pourrait être traduit par « cellules de puissance », qui proposent des puissances spécifiques supérieures mais des capacités moindres. Nous pouvons également rencontrer des « Hybrid Cells » (cellules hybrides) qui permettent d'offrir un compromis entre les deux types de cellules précédents. [44]

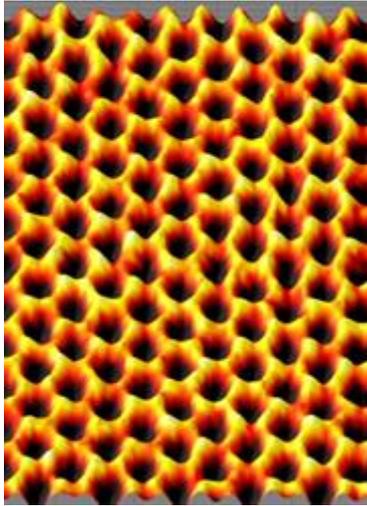


Figure 5 : Structure du graphène [47]

Un autre matériau pourrait remplacer l’anode en graphite dans les batteries lithium-ion : il s’agit du graphène [44]. Il permettrait d’améliorer les performances de nombreux appareils, ce qui inclut les batteries. Le graphène se présente sous la forme d’un treillis hexagonal ne faisant qu’un seul atome d’épaisseur. Ses propriétés physiques sont très intéressantes : il est flexible, transparent, imperméable à l’humidité, plus résistant que le diamant et plus conducteur que l’or. [47]

Ce matériau pourrait contenir plus d’énergie que les anodes en graphite, permettre un rechargement dix fois plus rapide et également améliorer la durée de vie des batteries lithium-ion.

Dans les anodes en graphite traditionnelles, les ions lithium s’accumulent à la surface du matériau, le graphène permettrait d’incorporer ces ions directement dans les trous du maillage mesurant entre 10 et 20 nm.

Bien que ce matériau semble miraculeux, aucune utilisation commerciale n’est à ce jour proposée. [47]

#### 1.1.3.4. Composition globale

La composition d’une batterie lithium-ion peut être résumée comme suit :

Tableau 3 : Tableau récapitulatif de la composition d’une cellule lithium-ion [30]

	<b>Cathode (sur une feuille de cuivre)</b>	<b>Anode (sur une feuille d’aluminium)</b>	<b>Electrolyte</b>
<b>Matériau</b>	Oxydes métalliques dérivés du cobalt, nickel, manganèse, fer ou aluminium	Basée sur du carbone	Sel de lithium dans un solvant organique
<b>Complètement chargée</b>	Oxyde métallique avec des structures d’intercalation	Ions lithium qui ont migré vers l’anode	
<b>Déchargée</b>	Ions lithium revenant vers l’électrode positive	Principalement du carbone	

Ainsi, lorsque la batterie est complètement chargée, la cathode présente des structures d’intercalation, c’est-à-dire des « interstices » permettant l’insertion et la récupération d’ions actifs, dans ce cas des ions lithium [48] ; et l’anode en carbone contient une accumulation d’ions lithium.

Lorsque la batterie est déchargée, les ions lithium retournent vers l’électrode positive, vidant l’électrode négative des ions lithium, la laissant principalement composée de carbone.

#### 1.1.4. Fonctionnement d'une cellule

Tout d'abord, une batterie a pour objectif de stocker de l'énergie afin de la restituer, par la suite, à l'aide de réactions électrochimiques.

Nous pouvons parler de « pile » lorsque le dispositif de stockage est chargé une seule fois et ne peut plus être rechargé par la suite, lorsque la pile a été totalement déchargée. La réaction est donc irréversible.

Nous parlons alors de « batterie » lorsque les réactions électrochimiques sont réversibles. Dans ce cas, en fournissant un courant électrique au système, la réaction inverse au déchargement se produit. Elle permet de recharger la batterie en énergie en ramenant les électrodes à l'état qu'elles avaient avant la décharge.

Venons-en maintenant plus spécifiquement aux réactions électrochimiques qui se produisent à l'intérieur d'une batterie.

Les réactions s'y produisant sont des réactions chimiques dites d'oxydo-réduction. Celles-ci se produisent au niveau des deux électrodes : la cathode et l'anode.

La Figure 6 ci-dessous présente le fonctionnement d'une cellule électrochimique en mode décharge.

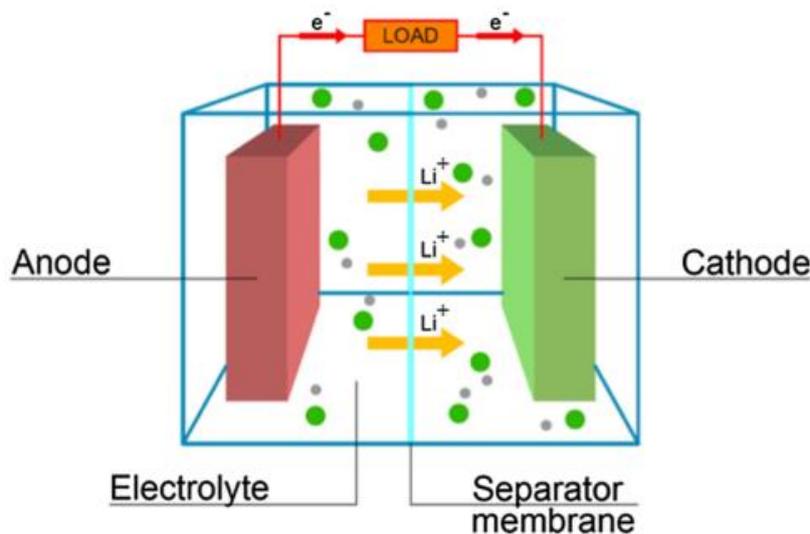


Figure 6 : Schéma de fonctionnement d'une batterie, dans ce cas il s'agit de la décharge [33]

Le choix du matériau des deux électrodes est très important. En effet, c'est ce choix qui va fixer la différence de potentiel, c'est-à-dire la tension de la batterie, exprimée en « Volts » [49]. Les matériaux constituant les électrodes sont choisis en fonction de leur potentiel standard d'oxydo-réduction. Plus la différence entre ces potentiels sera élevée et plus la batterie sera intéressante. En d'autres mots, il convient de choisir un matériau pour l'électrode négative ayant le potentiel standard le plus bas possible, et un potentiel standard pour l'électrode positive le plus haut possible. [33] La force électromotrice est alors définie par la tension à vide de la batterie, c'est-à-dire lorsqu'aucune charge n'est connectée [50]. C'est la mise en contact de ces matériaux avec un acide qui va provoquer l'apparition d'un voltage, à cause du transfert d'ions, et ainsi d'électrons. [18]

Les matériaux des deux électrodes sont chacun caractérisés par leur propre couple d'oxydo-réduction (aussi appelé « couple rédox »). A chaque couple est associé un potentiel standard exprimé en volts. Notons que le potentiel standard d'un couple est défini en fonction d'un couple de référence :  $H^+/H_2$ . Le potentiel standard de ce couple est défini comme étant égal à 0 V. [50]

Afin de mieux comprendre ces notions, il convient d'expliquer ce qu'est une réaction d'oxydo-réduction ainsi qu'un couple rédox.

Une réaction d'oxydo-réduction est une réaction chimique pendant laquelle des électrons sont transférés entre deux espèces chimiques. Ces deux espèces sont nommées :

- Le réducteur : celui-ci subit l'oxydation, il est oxydé en cédant des électrons à l'autre espèce ;
- L'oxydant : il subit la réduction, il est réduit en recevant des électrons de la première espèce.

Le couple rédox correspond alors à un ensemble formé par l'oxydant et le réducteur d'une même espèce chimique. Ces couples sont notés sous la forme « Oxydant/Réducteur » comme par exemple  $Cu^{2+}/Cu$ ,  $Zn^{2+}/Zn$  ou encore  $Li^+/Li$ . [51]

La réaction d'oxydo-réduction peut ainsi s'écrire comme suit :

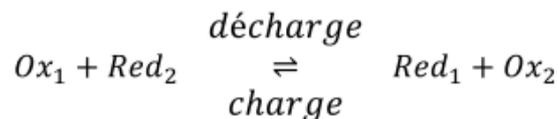
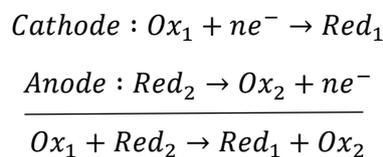
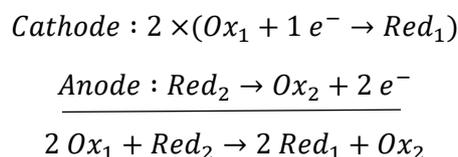


Figure 7 : Réaction d'oxydo-réduction [29]

Dans ce cas, les deux couples envisagés sont «  $Ox_1/Red_1$  » et «  $Ox_2/Red_2$  ». Lors de la décharge, l'oxydant (1) est réduit à la cathode et le réducteur (2) est oxydé à l'anode, cela se produit par l'intermédiaire des demi-réactions suivantes :

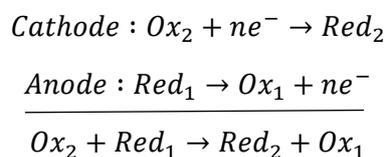


Précisons que si le nombre d'électrons échangés n'est pas identique dans chaque demi-réaction, celles-ci sont pondérées en fonction du nombre d'électrons. Par exemple, si le nombre d'électrons de la première demi-réaction vaut 1 et celui de la seconde demi-réaction vaut 2, alors il faut multiplier les espèces de la première demi-réaction par deux, comme suit :



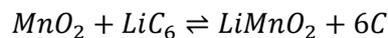
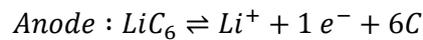
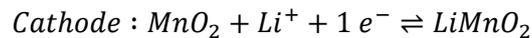
Ainsi l'équilibre électronique est conservé.

Lors de la charge, la réaction inverse se produit, c'est-à-dire que c'est le composé (1) qui est oxydé et le composé (2) qui est réduit. Les équations deviennent alors :



Ainsi, dans le cas d'une batterie lithium-ion, les deux demi-réactions peuvent par exemple être :

Équation 2 : Exemple d'équations de demi-réaction pour une batterie lithium-ion [52][53]



Ceci n'est bien entendu qu'un exemple parmi tant d'autres étant donné que les matériaux utilisés dans la cathode d'une batterie au lithium peuvent varier d'une conception à une autre. Les différents types de batteries lithium-ion, et donc les différents types de cathodes, seront abordés dans la suite de ce travail.

Ainsi, en ce qui concerne les batteries lithium-ion : en phase de décharge, des ions lithium  $\text{Li}^+$  transitent à partir de l'électrode négative vers l'électrode positive au travers de l'électrolyte. En charge, les processus inverses se produisent, les ions se déplacent de l'électrode positive vers l'électrode négative. [30][33]

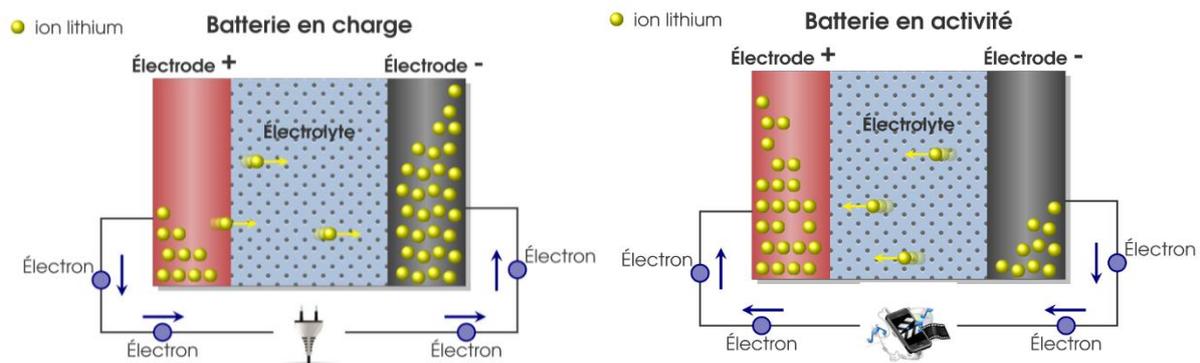


Figure 8 : Schémas de fonctionnement d'une batterie lithium-ion en charge et décharge [20]

En ce qui concerne les électrons, ceux-ci circulent dans le même sens que les ions lithium, afin de maintenir la neutralité des électrodes, étant donné que les ions lithium sont positifs. Lors du déchargement de la batterie, des électrons sont accumulés sur la cathode, ce qui produit un potentiel électrique entre les deux électrodes. Ces électrons sont ainsi libérés en faisant passer un courant à partir de la cathode, au travers d'une charge externe, et vers l'anode. (Précisons que le courant circule dans un sens opposé aux électrons [48].) En charge l'inverse se produit : le courant circule de l'anode vers la cathode et les électrons de la cathode vers l'anode. [30]

Dans une cellule lithium-ion une intercalation des ions lithium se produit. Cela peut être plus facilement visualisé à l'aide de la Figure 9 ci-dessous.

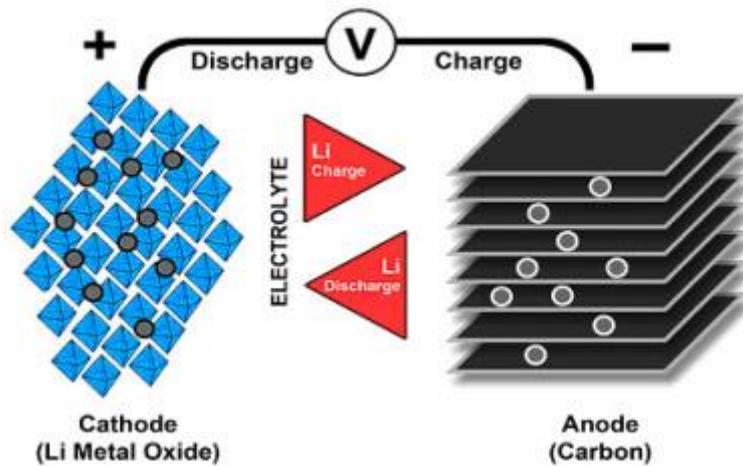


Figure 9 : Schéma représentant l'intercalation des ions lithium [44]

Comme nous pouvons le voir, les ions lithium s'intercalent dans les interstices entre les feuillets en graphite.

#### 1.1.5. Informations sur le voltage

Intéressons-nous maintenant au voltage que présentent les cellules électrochimiques. Ainsi, une cellule au plomb présente habituellement un voltage de 2 V ; une cellule nickel-cadmium ou nickel-métal hydrure environ 1,2 V et en ce qui concerne les cellules au lithium, ce voltage est d'environ 3,6 V.

Certains producteurs de cellules lithium-ion indiquent un voltage nominal de 3,7 V ou plus. Cette pratique a pour but d'augmenter les ventes étant donné que la capacité sur papier (en Wh) sera plus élevée (la capacité en Wh est égale à la tension en V multipliée par la capacité en Ah). Cette notation à 3,7 V produit également certaines valeurs inhabituelles de voltages de batteries lorsque celles-ci sont composées de 3 à 4 cellules en série. Les valeurs ainsi obtenues sont de 11,1 V et 14,8 V au lieu des valeurs habituelles de 10,8 V et 14,4 V. Cependant, la plupart des fabricants utilisent le voltage nominal de 3,6 V. [16]

Nous pouvons nous poser la question de savoir pourquoi les fabricants utilisent soit un voltage nominal de 3,6 V soit de 3,7 V. Cela vient du fait que ce voltage nominal est calculé sur base d'un point moyen entre une recharge complète à 4,2 V et une décharge menée jusqu'à la tension de coupure de 3,0 V (la moyenne entre 4,2 V et 3,0 V est bien égale à 3,6 V). Cette valeur de 3,6 V est dès lors obtenue dans le cas des cellules lithium-cobalt. Cependant, dans le cas d'une cellule lithium-manganèse, étant donné que sa résistance interne est plus faible, le voltage moyen obtenu est plutôt de 3,7 V. Notons également que le voltage correspondant à la charge complète est souvent fixé arbitrairement, cela n'affecte cependant pas le fonctionnement des appareils, à certaines exceptions près.

Certaines batteries utilisant la chimie LCO ont une couche de surface et un ajout d'additifs dans l'électrolyte qui permettent d'augmenter le voltage nominal de la cellule et permettent ainsi d'atteindre de plus hauts voltages à charge complète. Le Tableau 4 présente des exemples de voltage habituellement rencontrés dans le cas des cellules lithium-ion. [16]

Tableau 4 : Caractéristiques habituelles de voltage [16]

Voltage nominal de la cellule	Fin de décharge typique	Voltage maximum de charge	Notes
3,6 V	2,8 – 3,0 V	4,2 V	Voltage nominal classique des batteries Li-ion au cobalt.
3,7 V	2,8 – 3,0 V	4,2 V	Atout commercial. Résistance interne faible.
3,8 V	2,8 – 3,0 V	4,35 V	Couche de surface et additifs dans l'électrolyte.
3,85 V	2,8 – 3,0 V	4,4 V	Couche de surface et additifs dans l'électrolyte.

Ainsi, le voltage nominal habituel d'une cellule lithium-ion est de 3,6 V. La valeur de 3,7 V est plutôt un atout commercial, afin d'essayer d'augmenter les ventes de ces cellules grâce au fait que les chiffres indiquent une capacité et un voltage plus importants.

#### 1.1.5.1. Comportement du voltage

Pendant toute la durée de la décharge ou de la charge, le voltage de la cellule/batterie ne reste pas constant, il varie.

La Figure 10 ci-dessous illustre une courbe de décharge d'une batterie lithium-ion. Nous pouvons voir sur cette figure que lorsque la batterie est en phase de décharge, son voltage diminue. Nous voyons que la courbe est assez linéaire pendant la majeure partie de la décharge et présente une brusque chute lorsque la cellule approche de 0% de SOC. A l'inverse, lorsque la cellule est en charge, la tension de celle-ci remonte. [10][16][19]

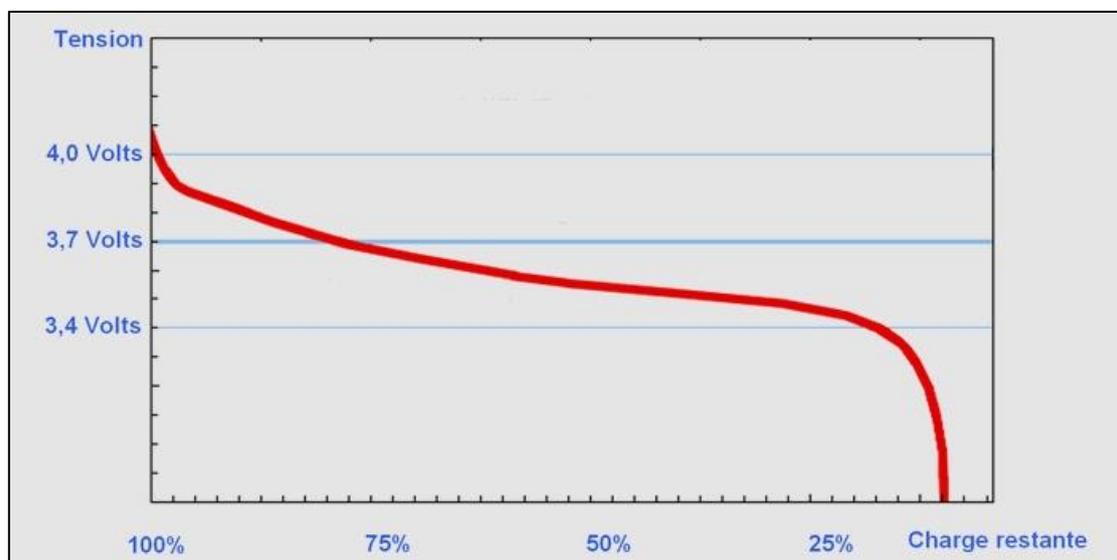


Figure 10 : Courbe de décharge d'une cellule lithium-ion [54]

Ainsi, les cellules au plomb se déchargent jusqu'à 1,75 V ; celles au nickel jusqu'à 1,0 V ; et la plupart des cellules lithium-ion descendent jusqu'à 3,0 V. A ce niveau de voltage environ 95% de l'énergie disponible dans la cellule a été consommée et le voltage commence à chuter rapidement. La plupart des appareils évitent de descendre sous ces voltages afin d'éviter de stresser la batterie avec des décharges excessives. Celles-ci peuvent l'endommager et, si la cellule descend sous un certain voltage critique (environ 2,5 V dans le cas des cellules lithium-ion), la cellule est perdue, elle ne pourra plus être rechargée [17]. Notons que la tension de la cellule est également diminuée lorsque la température baisse. [10][19]

Le tableau ci-dessous présente certains voltages typiques obtenus (par cellule) en fin de décharges pour différentes chimies de cellules.

Tableau 5 : Exemples de voltages de fin de décharge pour différentes chimies de cellules [19]

Fin de décharge	Li-manganèse	Li-phosphate	Acide-plomb	NiCd/NiMH
Voltage nominal	3,60 V	3,20 V	2,00 V	1,20 V
Décharge normale	3,0 – 3,3 V	2,70 V	1,75 V	1,00 V
Forte décharge ou basse température	2,70 V	2,45 V	1,40 V	0,90 V

La cellule lithium-titanate présente quant à elle un voltage nominal de 2,4 V. [16]

#### 1.1.5.2. Principes influençant le voltage

Certains principes influencent l'allure de cette courbe de décharge. Il s'agit principalement du C-rate, de la résistance interne et de la température. [16]

Tout d'abord, comme nous pouvons le voir dans la Figure 11, lorsque le C-rate augmente, ce qui est équivalent à une augmentation de l'intensité, le voltage de la batterie diminue.

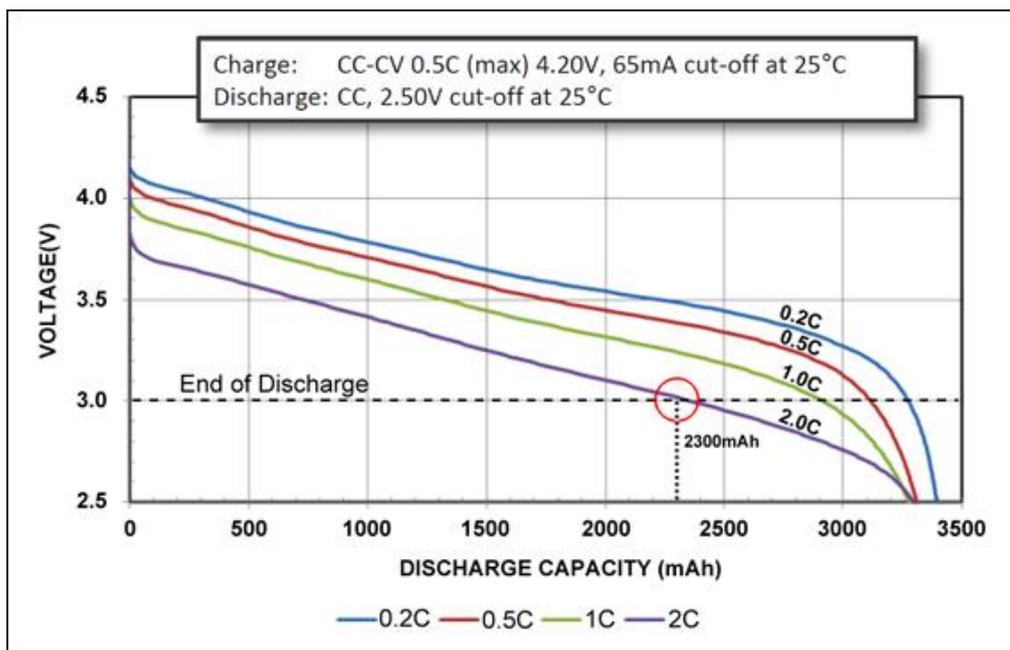


Figure 11 : Influence du C-rate sur la courbe de décharge [55]

Ce phénomène est dû à l'augmentation de la résistance interne de la cellule. Cette augmentation provoque un échauffement de la cellule qui provoque alors la chute de voltage. [56]

Tous les phénomènes sont donc liés : lorsque l'intensité augmente, la résistance interne augmente également et provoque une élévation de la température qui, à son tour, diminue la tension de la cellule. [56]

Ensuite, une résistance interne élevée provoquera de fortes variations du voltage tandis qu'une résistance faible produira de petites fluctuations. [16]

La résistance interne de la cellule n'est pas seulement liée à la cellule elle-même mais inclut également tous les autres circuits, tels que les interconnexions, les fusibles, les circuits de protection ainsi que le câblage. Dans la majorité des cas, ces éléments supplémentaires augmentent significativement la résistance interne, elle est plus que doublée. [56]

Le tableau suivant présente certains exemples de valeurs de résistance interne.

Tableau 6 : Exemples de valeurs de résistances internes [56]

<b>Résistance interne d'une batterie de GSM</b>		
Cellule seule, haute capacité, prismatique <sup>1</sup>	50 mΩ	Augmentation avec l'âge
Connexions, soudures	1 mΩ	
PTC <sup>2</sup> , soudé au câble, cellule	25 mΩ	18 – 30 mΩ selon les spécifications
Circuit de protection, circuit imprimé	50 mΩ	
<b>Résistance interne totale</b>	<b>Environ 130 mΩ</b>	
<b>Résistance interne d'un Power Pack pour les outils électriques</b>		
Cellules 4s2p <sup>3</sup> à 2Ah/cellule	18 mΩ	Augmentation avec l'âge
Connexion, soudure	0,1 mΩ par connexion/soudure	
Circuit de protection, circuit imprimé	10 mΩ	
<b>Résistance interne totale</b>	<b>Environ 80 mΩ</b>	

Les graphiques présentés dans la Figure 12 ci-dessous permettent d'observer l'influence d'une augmentation de la résistance interne sur les courbes de décharge d'une cellule nickel-cadmium. Le phénomène est similaire dans le cas d'une cellule lithium-ion.

<sup>1</sup> Une cellule prismatique correspond à un format, un conditionnement possible de cellule. Ceci sera décrit au point 1.3.

<sup>2</sup> PTC : Positive Temperature Coefficient. Il s'agit d'un système de sécurité utilisé dans les cellules lithium-ion [99]. Ceci sera décrit dans le point 1.5.5.

<sup>3</sup> 4s2p signifie « 4 cellules en série et 2 cellules en parallèle », il s'agit d'une configuration lorsque des cellules sont mises en série/parallèle. Ceci sera décrit au point 1.4.1.

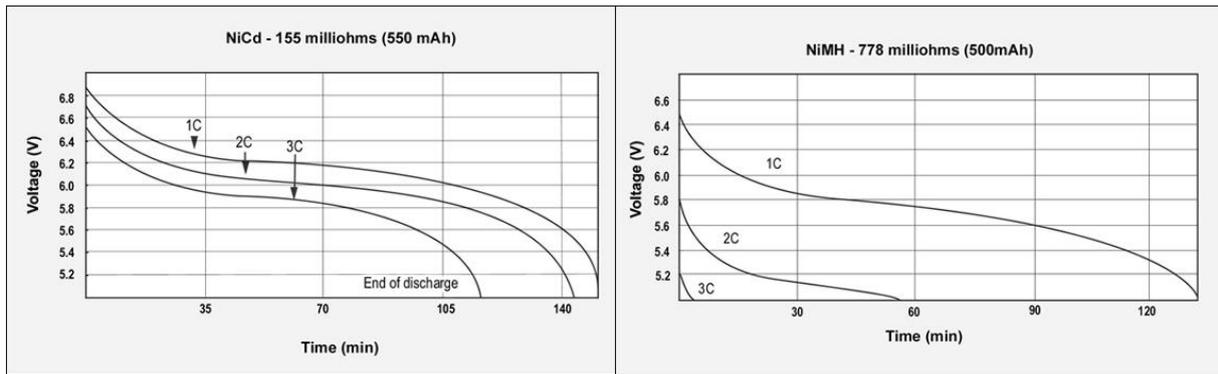


Figure 12 : Influence de la résistance interne sur le voltage [56]

Nous voyons donc l'importance de garder une résistance interne la plus basse possible, d'autant plus lorsque l'intensité augmente, afin que la batterie garde des performances intéressantes.

Finalement les batteries lithium-ion fonctionnent mieux à température ambiante (20-25°C). Une température plus élevée permettra d'augmenter les performances mais il est préférable d'éviter cela car une exposition prolongée réduit la durée de vie de la batterie. Cette température élevée provoquera également une augmentation du voltage de la cellule. [16][42][57]

C'est donc à une température d'utilisation de 20°C (ou un peu moins) que les batteries présentent leur durée de vie optimale. Un fonctionnement à 30°C aura tendance à réduire la longévité de la batterie d'environ 20% ; 40% à 40°C et jusqu'à 50% à 45°C.

En ce qui concerne des températures plus froides, celles-ci augmentent la résistance interne et diminuent la capacité. Ainsi, une batterie fournissant 100% de capacité à 27°C ne fournira plus qu'environ 50% de cette capacité à -18°C. Cette perte de capacité varie en fonction de la chimie et du type de batterie utilisée. Des températures froides auront également tendance à diminuer la tension de la batterie, les vitesses de réaction étant réduites. [57][16][58] La perte de capacité sera décrite dans la partie 1.5.

A l'opposé, une température élevée permet un bon fonctionnement de la batterie, alors qu'une utilisation prolongée dans de telles conditions de chaleur réduit sa longévité. Une température plus élevée augmente la tension de la batterie, les réactions électrochimiques étant accélérées. [59][57]

Il est donc nécessaire, pour le bon fonctionnement et pour la longévité de la batterie, de l'utiliser à des températures se rapprochant des 20-25°C.

## 1.2. Types de batteries lithium-ion et futures

Venons-en maintenant aux différents types et chimies de batteries lithium-ion. Tout d'abord, le lithium est un choix intéressant car il s'agit du métal le plus léger. Il présente le potentiel électrochimique le plus élevé et permet d'atteindre l'énergie spécifique la plus élevée comparativement aux autres chimies existantes.

Les batteries à base de lithium se distinguent en trois catégories différentes :

- Les batteries Li-métal ;
- Les batteries Li-ion ;
- Les batteries Li-polymère. [33]

Les batteries au lithium métallique permettraient d'atteindre des énergies spécifiques très élevées. Ce type de batterie rencontre cependant des problèmes très importants. En effet, l'utilisation de ces cellules produit des dendrites (c'est-à-dire des ramifications cristallines qui se développent [60]) sur l'anode, qui pénètrent le séparateur en grandissant. Cela crée donc des courts-circuits provoquant une élévation rapide de la température, approchant le point de fusion du lithium, causant alors un emballement thermique.

C'est pourquoi cette chimie du lithium métallique a été écartée au profit des batteries actuelles en lithium-ion ou lithium polymère. [44]

A l'heure actuelle, ce sont les batteries lithium-ion qui se sont le plus développées. Cette technologie permet en effet d'obtenir l'énergie spécifique (Wh/kg) la plus importante. Ce type de batteries pose néanmoins certains problèmes de sécurité comme des courts-circuits voire même une inflammation du dispositif.

Les batteries lithium-polymère permettent alors d'améliorer leur sécurité. Celles-ci présentent cependant des énergies spécifiques et des durées de vie plus faibles, ce qui est moins avantageux économiquement. [33]

### 1.2.1. Batteries lithium-ion

Il existe beaucoup de types de batteries lithium-ion différentes : celles-ci sont nommées par rapport à leur matériau actif, c'est-à-dire celui de la cathode. Leur dénomination est généralement une abréviation des composants de la cathode. Ces différentes chimies présentent des caractéristiques différentes, comme nous pouvons par exemple le voir dans la Figure 13 ci-dessous. Dans cette figure trois chimies différentes sont comparées par rapport à leur OCV.

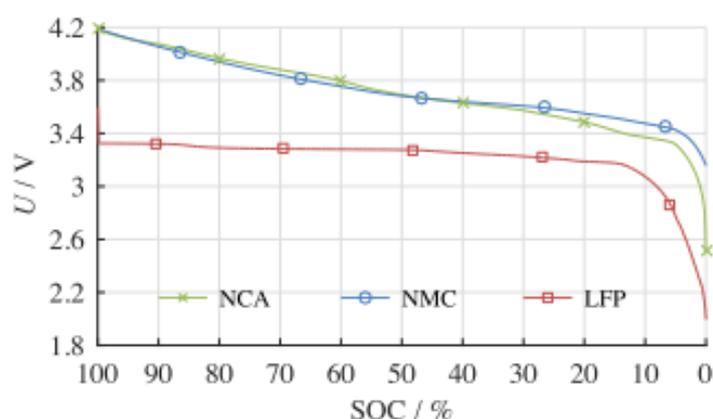


Figure 13 : Comparaison de l'OCV de trois chimies de cathode différentes [61]

Ce n'est ici qu'un exemple parmi d'autres permettant d'illustrer une première fois que les différents types de batteries lithium-ion ne seront pas nécessairement utilisés dans les mêmes applications.

Ainsi pour commencer, nous nous attarderons sur six types de batteries différents, les chimies les plus communes, auxquelles nous pourrions encore par exemple ajouter la batterie LNO (Lithium Nickel Oxyde) [41], remplacée par la NCA. [40]

Après la description des différentes chimies, des comparaisons de celles-ci seront proposées afin d'avoir une meilleure vue des spécificités de chacune.

#### 1.2.1.1. LCO (Lithium Cobalt Oxyde)

La première chimie que nous allons aborder ici est la batterie LCO pour « Lithium Cobalt Oxyde », ce qui correspond à la formule chimique  $\text{LiCoO}_2$ .

Cette batterie est constituée d'une cathode en oxyde de cobalt et d'une anode en graphite. La cathode est composée de couches comme nous pouvons le voir dans la Figure 14.

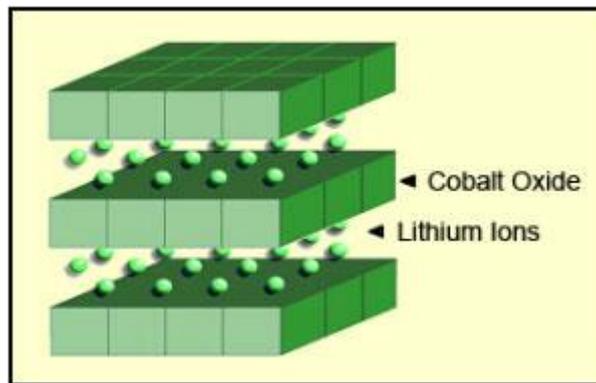


Figure 14 : Schéma d'une cathode en oxyde de cobalt [40]

Cette chimie présente certains inconvénients : une durée de vie relativement courte, une faible stabilité thermique, une puissance spécifique limitée ainsi qu'une moins bonne sécurité. Comme la plupart des chimies, l'anode de ce type de batterie lithium-ion est en graphite, ce qui limite la durée de vie à cause de l'épaississement de l'interface électrolytique solide (SEI). De plus, un plaquage au lithium peut se produire sur l'anode, cela signifie qu'une accumulation de lithium s'y produit, ce qui détériore les performances de la batterie. Cela est principalement dû au rechargement rapide ou à basse température. Cela signifie que pour une bonne utilisation de cette batterie, afin qu'elle ne subisse pas un stress excessif, elle ne devrait pas être chargée à une valeur de C-rate plus élevée que 1C.

A l'heure actuelle cette chimie est de moins en moins utilisée au profit des batteries utilisant du nickel, du manganèse et/ou de l'aluminium. Ces matériaux permettent d'améliorer la longévité, la puissance spécifique ainsi que le coût, le cobalt étant un matériau assez onéreux.

Son énergie spécifique élevée lui permet tout de même de rester un choix répandu en ce qui concerne l'utilisation dans les GSM, ordinateurs portables ou encore appareils photo numériques. [8][40][42][62]

### 1.2.1.2. LMO (Lithium Manganese Oxyde)

La seconde chimie que nous allons aborder ici est la batterie LMO pour « Lithium Manganèse Oxyde », ce qui correspond à la formule chimique  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ .

Dans ce cas la cathode est composée d'oxyde de manganèse présentant une structure en spinelles. Il s'agit d'une structure cristalline en trois dimensions de composition type  $\text{AB}_2\text{O}_4$  dans laquelle « A » correspond à un cation en site tétraédrique, c'est-à-dire entouré de quatre atomes d'oxygène ; et « B<sub>2</sub> » correspond à deux cations en sites octaédriques, ce qui signifie qu'ils sont entourés de 6 oxygènes (le préfixe « octa- » se référant à la structure octogonale du site). Il s'agit d'une structure cubique compacte, souple et très stable. [63] Dans ce cas le spinelle est composée de  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ , elle fournit donc un cadre en trois dimensions qui permet une absorption et désorption d'ions  $\text{Li}^+$  pendant la décharge et la charge de la cellule. Le treillis formé par cette structure permet aux ions lithium d'occuper les interstices situés dans la structure en  $\text{Mn}_2\text{O}_4$ . [40][64]

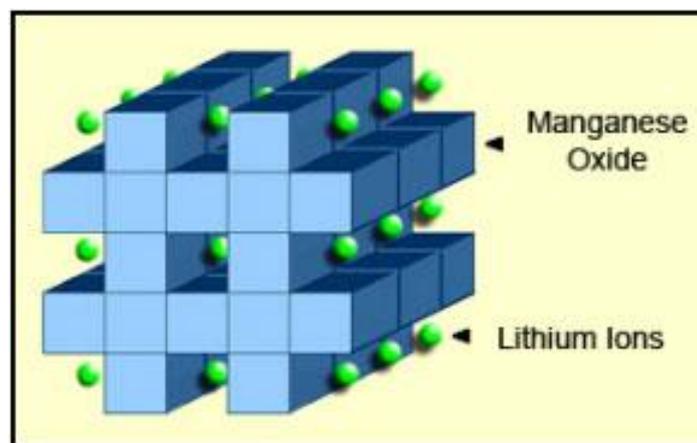


Figure 15 : Structure en spinelle de la cathode d'une cellule LMO [40]

Cette architecture particulière permet donc d'améliorer la migration des ions vers l'électrode, ce qui induit une résistance interne plus faible ainsi qu'une meilleure gestion du courant. Les spinelles permettent également d'améliorer la sécurité étant donné que ces structures présentent une bonne stabilité thermique. La durée de vie de ce type de chimie est cependant limitée.

Cette résistance interne faible permet d'utiliser la cellule en recharge rapide, il est également possible de lui imposer un courant de décharge assez élevé. Ces cellules peuvent être déchargées à l'aide de courants allant jusqu'à 20 à 30 A sans que la cellule ne chauffe trop. En utilisant une recharge par pulsations, il est possible de monter à 50 A pendant une seconde.

Les cellules LMO présentent des capacités d'environ 30% inférieures aux cellules LCO. Cette chimie est assez flexible et permet la conception de cellules maximisant la longévité, la puissance spécifique ou encore l'énergie spécifique. Par exemple une cellule LMO optimisant la longévité présentera une capacité d'environ 1100 mAh tandis qu'une autre optimisant la capacité montera à 1500 mAh.

Cette chimie est généralement utilisée en la combinant avec la chimie NMC (décrite au point suivant) afin d'augmenter son énergie spécifique ainsi que de prolonger sa durée de vie. C'est cette configuration qui est utilisée dans la plupart des véhicules électriques, comme par exemple la Nissan Leaf ou encore la BMW i3. Dans ce cas, la partie LMO de la batterie représente environ 30% du total et permet de fournir un courant élevé, nécessaire à une bonne accélération, tandis que le reste est constitué de la chimie NMC afin d'augmenter l'autonomie de la batterie, et par extension de la voiture.

L'évolution des types de batteries tend vers la combinaison de la chimie LMO avec d'autres matériaux actifs tels que le cobalt, le nickel ou encore l'aluminium. Il est également possible d'ajouter une petite quantité de silicium dans l'anode afin d'augmenter la capacité de la cellule jusqu'à 25%. Ce gain est cependant lié à une perte de durée de vie à cause de l'expansion du silicium pendant la charge et sa contraction en décharge, ce qui provoque un stress mécanique. En fonction des matériaux utilisés il sera possible d'améliorer l'énergie spécifique (donc la capacité), la puissance spécifique ou la longévité.

Les batteries LMO sont souvent utilisées pour les outils électriques, les instruments médicaux, ainsi que dans les véhicules hybrides et électriques. [8][40][42][41][62]

#### 1.2.1.3. NMC (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxyde)

La troisième chimie que nous abordons ici est la batterie NMC pour « Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxyde », ce qui correspond à la formule chimique  $\text{LiNiMnCoO}_2$ .

Dans ce cas, il s'agit d'un système similaire aux LMO. Les batteries NMC peuvent aussi bien être utilisées qu'en tant qu'« Energy Cell » qu'en tant que « Power Cell ». Ainsi certaines cellules NMC optimisées pour l'énergie spécifique peuvent atteindre des capacités d'environ 2800 mAh en délivrant 4 à 5 A ; tandis que d'autres optimisées pour la puissance spécifique ne présentent qu'une capacité de 2000 mAh mais peuvent délivrer jusqu'à 20 A. De plus, en ajoutant du silicium à l'anode, la capacité pourra être portée à 4000 mAh mais en réduisant la puissance spécifique et la longévité à cause de l'expansion et la contraction de ce matériau.

Cette chimie NMC permet d'allier les avantages du nickel, qui permet d'obtenir une énergie spécifique élevée, une longévité accrue et un coût moindre mais présente une plus faible stabilité, et du manganèse, qui propose quant à lui une résistance interne faible mais réduit également l'énergie spécifique. La combinaison de ces deux matériaux permet de combiner les forces de chacun. Ce type de batterie, grâce à sa résistance interne faible, présente un échauffement très bas.

Ces systèmes ont l'avantage de pouvoir être fabriqués à des coûts relativement faibles tout en atteignant de bonnes performances. La limitation de la quantité de cobalt dans la cathode est intéressante économiquement étant donné le prix élevé de ce matériau. Ainsi la composition de la cathode est généralement d'un tiers de nickel, un tiers de cobalt et un tiers de manganèse, il s'agit d'une configuration 1-1-1. Une autre combinaison possible est la 5-3-2, ce qui signifie que la cathode est constituée de cinq unités de nickel, trois unités de cobalt et deux unités de manganèse.

Ce mélange de matériaux dans les NMC convient à une large gamme d'applications allant de l'automobile aux systèmes de stockage d'énergie, ceux-ci nécessitant des cycles fréquents. [40][41][42][61][62]

#### 1.2.1.4. LFP (Lithium Fer Phosphate)

La quatrième chimie que nous abordons ici est la batterie LFP pour « Lithium Fer Phosphate », ce qui correspond à la formule chimique  $\text{LiFePO}_4$ .

La cellule LFP, grâce au phosphate, permet d'obtenir un courant élevé, une bonne stabilité thermique du fait de la faible résistance interne, une sécurité accrue, une plus longue durée de vie et une meilleure tolérance aux conditions de fonctionnement défavorables. Par contre l'énergie spécifique est moyenne est cette chimie présente un auto-déchargement élevé. Cet auto-déchargement élevé peut causer des problèmes de déséquilibre entre les cellules d'une batterie avec le vieillissement.

Les batteries lithium-ion supportent généralement mal le stockage à un voltage élevé, c'est-à-dire à haut SOC, ce qui est moins le cas pour les cellules LFP qui présentent une tolérance accrue. Cet avantage amène cependant un inconvénient : le voltage nominal est plus faible, passant de généralement 3,6 V à 3,2 V par cellule, ce qui réduit l'énergie spécifique.

Les batteries LFP sont souvent utilisées afin de remplacer les batteries au plomb dans les véhicules. [8][40][41][42][61][62][39][65][38]

#### 1.2.1.5. NCA (Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxyde)

La cinquième chimie abordée est la batterie NCA pour « Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxyde », ce qui correspond à la formule chimique  $\text{LiNiCoAlO}_2$ .

Cette chimie partage des similitudes avec les NMC puisqu'elle offre une énergie spécifique élevée, une bonne puissance spécifique et une durée de vie importante. Le gros inconvénient de cette structure est le manque de sécurité ainsi que le coût élevé.

Il s'agit d'une évolution de la chimie LNO (Lithium Nickel Oxyde), de par l'ajout d'aluminium afin d'améliorer la stabilité de la batterie.

L'énergie spécifique, la puissance spécifique et la longévité élevées rendent cette chimie intéressante pour l'utilisation dans les groupes motopropulseurs des véhicules électriques. Cependant son coût élevé ainsi que son manque de sécurité rendent cette utilisation compliquée. [40][41][42][61][39] [65]

#### 1.2.1.6. LTO (Lithium Titanate)

La sixième et dernière chimie abordée est la batterie LTO pour « Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxyde », ce qui correspond à la formule chimique  $\text{LiNiCoAlO}_2$ .

Cette chimie est un peu particulière : contrairement aux autres, l'électrode négative n'est plus constituée de graphite mais de titanate de lithium qui forme une structure en spinelle. La cathode peut alors utiliser une chimie telle que la LMO ou NMC.

La cellule LTO présente un voltage nominal plus faible que les autres cellules lithium-ion : ce voltage est de 2,4 V par cellule, contre 3,6 V habituellement. Un des avantages de cette chimie est qu'elle permet le rechargement rapide et peut délivrer un C-rate en décharge allant jusqu'à 10C. Elle présente également un nombre de cycles plus élevé, elle est sûre, a de très bonnes caractéristiques de décharge à basse température et garde une capacité de 80% à -30°C. De plus cette chimie ne présente aucune formation de film SEI sur l'anode ni de plaquage au lithium sur la cathode en cas de recharge rapide ou à basse température. La cellule LTO présente également une bonne stabilité à haute température.

Bien que cette structure semble présenter beaucoup d'avantages, il y a tout de même des inconvénients : ces batteries sont chères et présentent une faible énergie spécifique (de l'ordre de 65 Wh/kg).

Ces cellules sont habituellement utilisées dans les groupes motopropulseurs électriques, pour l'éclairage urbain solaire ou encore dans les UPS (Uninterruptible Power Supply ou Alimentation Sans Interruption). Un UPS est un appareil permettant de fournir un courant alternatif de manière continue, quoi qu'il se passe sur le réseau, comme une panne de courant par exemple [66]. [40][41]

### 1.2.1.7. Comparaison des différents types de batteries

Nous pouvons observer dans la Figure 16 ci-dessous une comparaison entre certains types de batteries classiques et les six batteries lithium-ion présentées précédemment. Toutes ces batteries sont comparées en termes d'énergie spécifique, c'est-à-dire la quantité d'énergie (en Wh) par unité de masse (par kg).

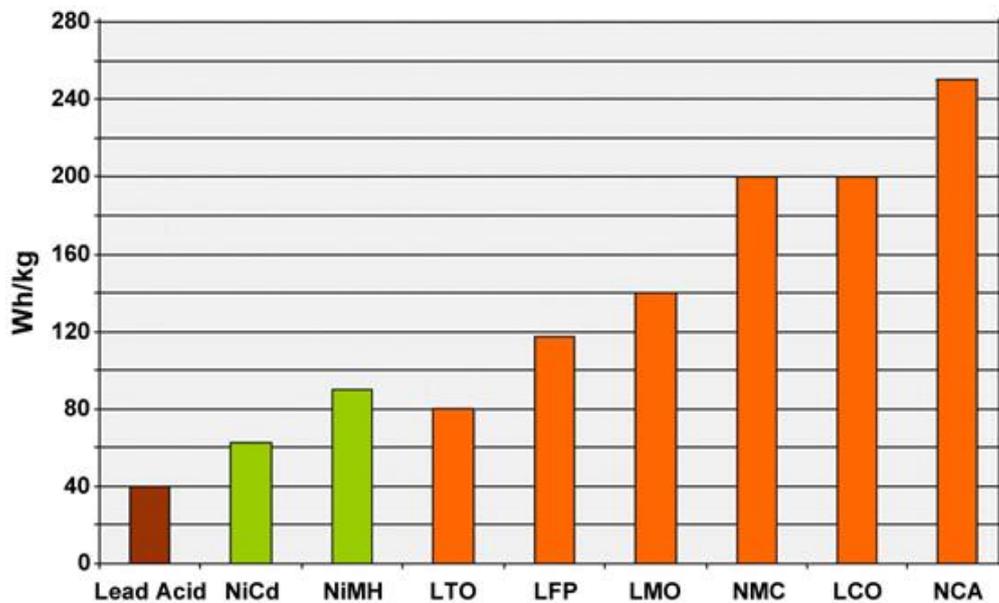


Figure 16 : Comparaison de l'énergie spécifique des différent types de batteries [40]

Comme nous pouvons le voir dans cette figure, les batteries comparées sont les six proposées ci-dessus, ainsi que trois autres chimies : la batterie au plomb, la batterie nickel-cadmium et la batterie nickel-métal hydrure.

En termes d'énergie spécifique c'est clairement la chimie NCA qui est la plus intéressante.

Par contre, si nous nous intéressons à la puissance spécifique et à la stabilité thermique, ce sont les chimies LMO et LFP qui sortent gagnantes.

En ce qui concerne la LTO, celle-ci propose une capacité faible mais surpasse toutes les autres en termes de durée de vie et de performances à basse température. [40]

Nous pouvons également proposer le graphique visible dans la Figure 17 afin de comparer les six chimies de batteries lithium-ion vues précédemment. Dans ce cas six caractéristiques sont prises en compte :

- L'énergie spécifique (Wh/kg) ;
- La puissance spécifique (W/kg) ;
- La sécurité ;
- Les performances (à basse et haute températures) ;
- La durée de vie ;
- Le coût.

Chacune de ces caractéristiques a reçu une cote comprise entre 0 et 4 afin de pouvoir comparer les différentes chimies entre elles.

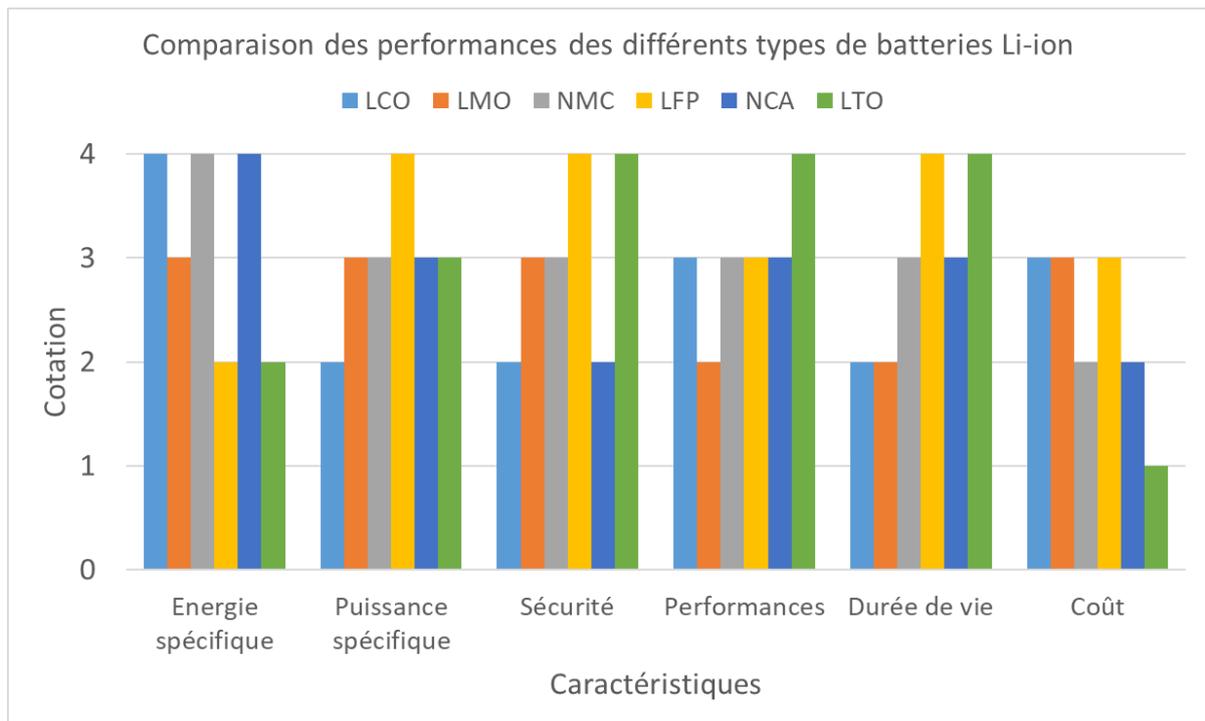


Figure 17 : Comparaison des performances des différents types de batteries Li-ion [40]

Nous pouvons ainsi observer dans ce graphique qu'en termes d'énergie spécifique ce sont les cellules LCO, NMC et NCA qui sont les plus intéressantes.

En ce qui concerne la puissance spécifique c'est la chimie LFP qui est la plus avantageuse.

Les chimies LFP et LTO présentent les meilleures caractéristiques en termes de sécurité ainsi que de durée de vie.

La cellule LTO propose également les meilleures performances en fonctionnement à basses ou hautes températures.

Et finalement ce sont les cellules LCO, LMO et LFP qui sont les moins onéreuses. [40]

Une comparaison plus détaillée est disponible à la page suivante, dans le

Tableau 7. Celle-ci reprend beaucoup de caractéristiques techniques telles que l'année de création, les matériaux utilisés à la cathode et à l'anode, les voltages, énergies spécifiques, C-rates, nombre de cycles, ...

Tableau 7 : Tableau comparatif des différentes chimies de batteries lithium-ion [40]

Types de batteries	Année	Composition		Voltages par cellule (V)		Energie spécifique (Wh/kg)	Charge		Décharge		Cycles (nombre)	Emballage thermique (°C)	Applications	Avantages	Inconvénients	Type de cellule
		Cathode	Anode	Nominal	Minimum - Maximum		C-rate	Voltage max (V)	C-rate	Voltage min (V)						
LCO	1991	LiCoO <sub>2</sub> ≈ 60% Co	Graphite	3,6	3,0 - 4,2	150 - 200	0,7 - 1C (diminution longévité à plus de 1C)	4,2	1C (diminution longévité à plus de 1C)	2,5	500 - 1000	150	GSM, tablettes, ordinateurs portables, APN	Haute énergie spécifique	Puissance spécifique limitée	Energy Cell
LMO	1996	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Graphite	3,7	3,0 - 4,2	100 - 150	0,7 - 1C (max 3C)	4,2	1C (10C pour certaines cellules)	2,5	300 - 700	250	Outils électriques, appareils médicaux, groupes motopropulseurs électriques	Puissance élevée, sécurité	Capacité faible	-
NMC	2008	LiNiMnCoO <sub>2</sub>	Graphite	3,7	3,0 - 4,2	150 - 220	0,7 - 1C (diminution longévité à plus de 1C)	4,2	1C (2C pour certaines cellules)	2,5	1000 - 2000	210	Vélos électriques, appareils médicaux, voitures électriques, industrie	Capacité et puissance élevées	-	Hybrid Cell
LFP	1996	LiFePO <sub>4</sub>	Graphite	3,3	2,5 - 3,65	90 - 120	1C	3,65	1C (25C pour certaines cellules)	2,5 (diminution longévité sous 2V)	1000 - 2000	270	Appareils portables et stationnaires nécessitant des courants de charge élevés et de l'endurance	Courbe de voltage en décharge très plate, très sûre	Capacité faible	-
NCA	1999	LiNiCoAlO <sub>2</sub>	Graphite ≈ 9% Co	3,6	3,0 - 4,2	200 - 260	0,7C	4,2	1C	3,0	500	150	Appareils médicaux, industriels, groupes motopropulseurs électriques (Tesla)	-	-	Energy Cell
LTO	2008	LMO ou NMC	Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (titanate)	2,4	1,8 - 2,85	70 - 80	1C (max 5C)	2,85	10C	1,8	3000 - 7000	Une des batteries Li-ion les plus sûres	UPS, groupes motopropulseurs électriques (Mitsubishi i-MiEV, Honda Fit EV), éclairage public solaire	Longue vie, charge rapide, gamme de température étendue, parmi les plus sûres	Energie spécifique faible, onéreuse	-

En ce qui concerne les véhicules électriques, le Tableau 8 reprend le type de batterie lithium-ion utilisé dans différents modèles. Il reprend également les capacités utilisées dans ces véhicules ainsi que les autonomies approximatives. Ces autonomies sont calculées dans des conditions normales d'utilisation [62].

Tableau 8 : Utilisation des types de batteries lithium-ion dans certains véhicules électriques [62]

Type de chimie	Fabricant du pack de batteries	Fabricant et modèle de véhicule électrique	Capacité (kWh)	Autonomie approximative (km)
<b>LCO</b>	Panasonic	Tesla – Roadster	56	392
	Tesla	Daimler Benz – Smart EV	16,5	134
<b>LMO</b>	AESC	Think – Think EV Nissan – Leaf EV	23	159
	EnerDel GS Yuasa Hitachi LG Chem Toshiba		24	168
<b>LFP</b>	A123	BYD – E6 Mitsubishi – iMiEV	57	398
	BYD GS Yuasa Lishem Valence		16	159
<b>NMC</b>	Hitachi LG Chem Samsung	BMW – Mini E	35	240

Comme nous pouvons le voir dans ce tableau, ce sont les véhicules Tesla et BYD qui proposent les packs de batteries les plus conséquents, permettant ainsi d'atteindre des autonomies intéressantes. Ces deux constructeurs utilisent cependant des chimies de cathodes différentes. Ainsi Tesla utilise des batteries LCO, qui proposent comme avantage majeur une énergie spécifique élevée ; tandis que BYD utilise des batteries LFP qui présentent plutôt une bonne puissance spécifique ainsi qu'une sécurité élevée.

L'utilisation d'une batterie présentant une énergie spécifique élevée, dans le cas de Tesla, permet ainsi à ce fabricant d'alléger le véhicule pour une même capacité.

### 1.2.2. Avantages et inconvénients des batteries lithium-ion

Pour terminer le passage en revue des différentes technologies de batteries lithium-ion, le Tableau 9 ci-dessous présente certains avantages et inconvénients de ces batteries.

Tableau 9 : Avantages et inconvénients des batteries lithium-ion [44][67][68]

Avantages	Inconvénients
Densité énergétique élevée	Problèmes de sécurité – risque d’explosion en cas d’emballement thermique
Cycle de vie important	Déchargement à haute température ou lorsque stockée à haut voltage
Voltages élevés	Les batteries LCO ne peuvent pas être déchargées à courant élevé
Vitesses de chargement et de déchargement élevées	Nécessite des protections contre les surcharges ou décharges excessives
Résistance interne faible	Sujettes au vieillissement
Auto-déchargement assez faible	Pas de recharge rapide sous 0°C
Pas de conditions particulières lors de la première utilisation ni de maintenance nécessaire	Coûts de production élevés
Pas d’effet mémoire	
Gamme de températures de fonctionnement étendue	
Absence de métaux lourds par rapport à d’autres types de batteries (Pb, Hg, Cd, ...)	
Légereté	

Nous pouvons préciser certaines choses reprises dans ce tableau.

Ces batteries lithium-ion, contrairement à la plupart des autres chimies, ne nécessitent qu’une faible maintenance pour rester en bon état. En effet, certaines chimies comme les batteries au plomb se détériorent et certaines manipulations sont nécessaires. Par exemple, la quantité d’électrolyte présente dans les batteries au plomb, qui ne sont pas scellées, diminue lors des cycles à cause d’une perte d’eau, il faut donc en rajouter à intervalles réguliers [69]. [44]

Cette chimie ne présente pas d’effet mémoire, celui-ci ne se produit qu’avec les batteries nickel-cadmium ou nickel-métal hydrure. Lorsque la batterie est déchargée périodiquement jusqu’à une même valeur de SOC, au bout d’un certain temps la batterie ne peut plus être déchargée sous ce seuil même s’il reste de la capacité disponible. Elle agit comme si elle considérait ce SOC récurant comme étant le nouveau SOC minimum. Elle semble donc garder en mémoire une utilisation habituelle et répétitive. Les batteries lithium-ion n’ont pas non plus besoin de décharges complètes pour rester en bon état. [44][70]

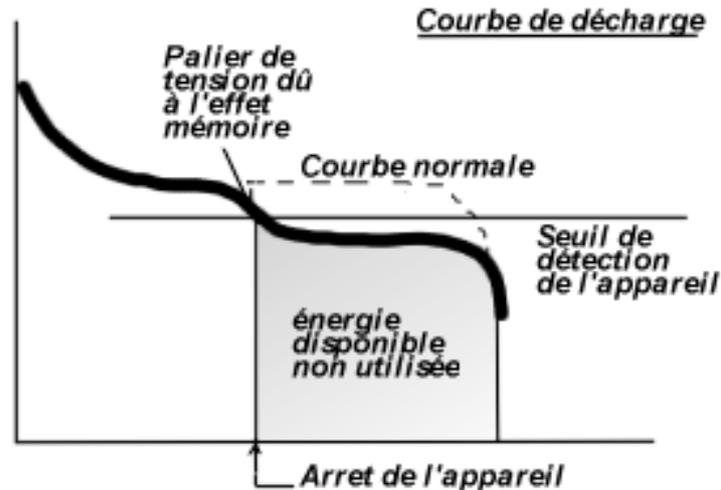


Figure 18 : Représentation graphique de l'effet mémoire d'une batterie [70]

Enfin, le voltage nominal de 3,6 V est très utile car il permet d'alimenter directement certains appareils tels que des GSM, tablettes ou appareils photo numériques. Il n'est donc pas nécessaire d'apparier les cellules entre elles, ce qui diminue les coûts de fabrication. [44]

### 1.2.3. Futurs types de batteries

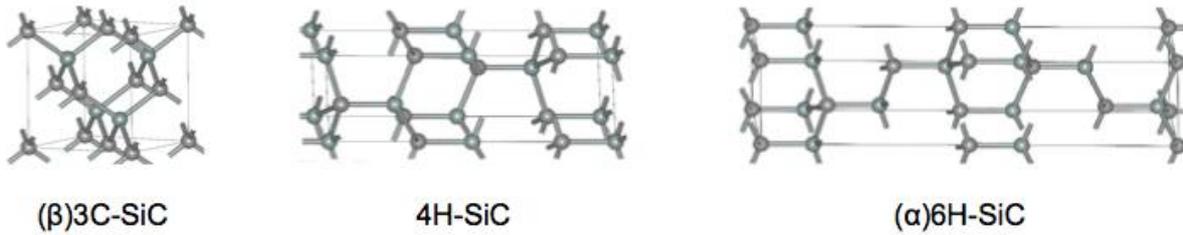
Outres les différentes chimies de cellules au lithium décrites au point précédent, d'autres cellules sont en cours de développement à l'heure actuelle. La plupart des batteries expérimentales au lithium disposent d'une anode en lithium métallique afin d'obtenir des énergies spécifiques plus élevées que les batteries disponibles actuellement.

Comme nous l'avons précisé précédemment, la batterie au lithium métallique posait à l'origine des problèmes de sécurité dus au développement de dendrites risquant de percer le séparateur et ainsi provoquer des courts-circuits. Ces courts-circuits pouvant alors mener à un emballement thermique. [40] [71] Peu de fabricants proposent encore des batteries au lithium métallique, et si c'est le cas il s'agit souvent de batteries primaires, donc non rechargeables, ne pouvant pas faire de cycles et donc présentant moins de risques de sécurité. Cependant, la recherche continue dans l'optique de trouver des solutions afin de pouvoir utiliser cette structure.

La recherche s'oriente également vers une nouvelle structure de l'anode des batteries au lithium-ion, en remplaçant le graphite constituant généralement celle-ci par un nouveau matériau nano-composite : du carbure de silicium. [71]

Le carbure de silicium est une structure tridimensionnelle formée de carbone et de silicium s'arrangeant en tétraèdres réguliers pouvant présenter des structures différentes :

- Une structure cubique, comme la représentation ( $\beta$ ) le montre dans la Figure 19 ;
- Une structure hexagonale ou rhomboédrique, comme la représentation ( $\alpha$ ).



*Figure 19 : Structures du carbure de silicium [72]*

Ce matériau présente plusieurs avantages : une bonne conductivité électrique et thermique. [72]

Une anode composée de ce matériau permettrait de multiplier par dix la capacité de stockage de l'anode, en comparaison avec une anode graphite. Cependant, ce matériau subit une expansion et contraction pendant les cycles de charge et décharge, ce qui rend le système instable. Afin de stabiliser les performances, du graphite est ajouté à l'anode afin de stabiliser les performances, l'augmentation de la capacité serait alors multipliée par cinq par rapport à une anode graphite. La durée de vie serait cependant limitée à cause de certains problèmes structurels causés par l'absorption/désorption du lithium dans cette anode. [71]

Certaines de ces nouvelles structures de cellules sont présentées ci-après.

Il existe également d'autres chimies qui sont actuellement en développement telles que la sodium-soufre [73], zinc-air, argent-zinc ou encore alcaline réutilisable [74].

#### 1.2.3.1. *Lithium-air*

La technologie lithium-air permettrait de stocker beaucoup plus d'énergie qu'il est actuellement possible avec les lithium-ion. L'idée de cette batterie provient notamment de la pile à combustible, en utilisant l'air. Cette cellule est composée d'une cathode à l'air permettant de fournir de l'oxygène, d'un électrolyte et d'une anode en lithium. [71]

Une telle batterie pourrait atteindre une énergie spécifique théorique de 13 kWh/kg, ce qui est très nettement supérieur aux batteries lithium-ion actuelles ne proposant qu'environ 250 Wh/kg maximum. Une technologie aluminium-air est également testée et permettrait d'atteindre 8 kWh/kg, théoriquement. Cela serait équivalent à la densité énergétique de l'essence, qui est d'environ 13 kWh/kg. Il s'agit bien entendu de valeurs théoriques, alors, même s'il était possible d'atteindre ne serait-ce qu'un quart de ces énergies spécifiques, un moteur électrique présentant un rendement de plus de 90% pourrait compenser cette perte de capacité en comparaison avec un moteur à combustion interne ne présentant un rendement thermique ne s'élevant qu'à environ 30%. [71][75][76]

En fonction des matériaux utilisés, une cellule lithium-air atteindrait des voltages compris entre 1,7 et 3,2 V. Cependant, la puissance spécifique serait assez basse, principalement à basse température. De plus la pureté de l'air jouerait un rôle étant donné que l'air que nous respirons n'est pas assez pur pour cette batterie, elle nécessiterait dès lors l'utilisation de filtres. Une telle batterie serait donc similaire à une pile à combustible, utilisant des compresseurs, pompes et filtres, ces éléments auxiliaires consommant environ 30% de l'énergie produite.

Une autre limitation sur laquelle travaillent les scientifiques est la formation d'un film empêchant le déplacement des électrons. Cela produit alors une rapide chute de capacité de stockage. Le nombre de cycles réalisables n'est que d'environ 50 à l'heure actuelle, cela doit donc être amélioré avant de voir un jour cette structure arriver sur le marché. [71]

#### 1.2.3.2. *Lithium-métal*

Malgré les nombreux problèmes que présente cette chimie de cellules au lithium, la recherche ainsi qu'une fabrication limitée continuent. Ainsi, en 2010, un véhicule électrique de test embarquait ce type de batterie d'une énergie spécifique de 300 Wh/kg. Le fabricant de cette batterie clamait 2500 cycles, des temps de recharge courts et un prix compétitif dans le cas où cette technologie serait produite en masse.

Avec une énergie spécifique de 300 Wh/kg, la batterie lithium-métal se place en tête de toutes les batteries lithium-ion. En effet, la batterie NCA utilisée dans la Tesla S 85 présente une énergie spécifique de 250 Wh/kg tandis que la batterie LMO de la BMW i3 atteint seulement 120 Wh/kg et la même chimie utilisée dans la Nissan Leaf n'atteint quant à elle que 80 Wh/kg. [71] Cela illustre très bien l'intérêt d'une telle technologie.

La sécurité reste cependant toujours un problème à cause de la formation de dendrites risquant de percer le séparateur et ainsi provoquer des courts-circuits menant à un emballement thermique. [71]

#### 1.2.3.3. *Lithium-état solide*

Le graphite utilisé comme matériau de l'anode dans les cellules lithium-ion réduit l'énergie spécifique. Cette technologie dite « état solide » remplace dès lors le graphite par du lithium pur et substitue également l'électrolyte liquide imprégné dans le séparateur poreux par un polymère solide ou un séparateur en céramique. Cette structure présente donc des similitudes avec la batterie lithium-métal. L'utilisation de ce type d'électrolytes solides a pour objectif de régler le problème de formation des dendrites occasionnant des dégâts aux cellules.

Actuellement ces cellules ne permettent pas d'atteindre une conductivité suffisante à basse température et ne permettent d'atteindre qu'une centaine de cycles. Cette architecture nécessite donc encore des améliorations.

Cette technologie permettrait de stocker deux fois plus d'énergie qu'une cellule lithium-ion ordinaire, ces nouvelles cellules présenteraient cependant des puissances faibles, étant de ce fait peu adaptées aux véhicules électriques. Ces batteries permettraient une régulation de la production des énergies renouvelables et pourraient tout de même être incorporées aux véhicules électriques en utilisant l'avantage que ce type de batterie fournit : un temps de recharge court. [71]

#### 1.2.3.4. *Lithium-soufre*

Dans cette technologie, le graphite est remplacé par du lithium métallique, permettant à la fois de jouer le rôle d'électrode et de fournisseur d'ions lithium. La cathode est quant à elle remplacée par du soufre.

Le soufre présente de nombreux avantages :

- Il est léger et permet donc de se débarrasser d'un poids mort qu'était la cathode en oxyde métallique ;
- Un atome de soufre permet de retenir deux atomes de lithium, ce qui n'est pas le cas dans les cellules lithium-ion ;
- Il est peu onéreux.

Grâce à l'allègement de la batterie, l'énergie spécifique peut être accrue et ainsi atteindre des valeurs élevées allant jusqu'à 550 Wh/kg, environ deux fois plus qu'une cellule lithium-ion classique. La cellule lithium-soufre permet également d'atteindre des puissances spécifiques intéressantes de l'ordre de 2500 W/kg. Elle permettrait de fournir un voltage de 2,1 V par cellule. De plus, elle présente une large gamme de températures de fonctionnement : en effet, celle-ci peut même être rechargée à -60°C. De plus cette technologie offre une sécurité améliorée et un faible coût (grâce à l'abondance du soufre). Ces batteries sont prometteuses pour l'utilisation dans les véhicules électriques.

Dans ce type de cellule, le lithium de l'anode se dissout pendant la décharge et s'y redépose en charge.

Cette architecture est actuellement limitée par une perte de soufre. En effet, celui-ci se sépare de la cathode et réagit avec le lithium de l'anode. A cause de cela le nombre de cycles est actuellement limité à seulement 40 à 50. La batterie lithium-soufre est également limitée par sa conductivité réduite et présente une stabilité faible à haute température ainsi qu'un auto-déchargement important. [62][71]

#### 1.2.3.5. *Ion-sodium*

La technologie ion-sodium (Na-ion) est une autre alternative aux batteries lithium-ion. Elle permettrait notamment de réduire les coûts étant donné que le sodium est un élément bon marché et disponible abondamment.

Ce type de batterie présente l'avantage qu'elle peut être complètement déchargée sans rencontrer de stress, ce qui est le cas pour les cellules lithium-ion. Elles présentent un voltage de 3,6 V (identique à la plupart des batteries lithium-ion), ont une énergie spécifique d'environ 90 Wh/kg pour un coût avoisinant celui des batteries au plomb.

Ces batteries sont actuellement limitées par leur faible nombre de cycles ainsi que par des contraintes mécaniques importantes liées à l'expansion/contraction de la batterie en charge/décharge. [71]

#### 1.2.4. Méthodes alternatives de stockage

En ce qui concerne le stockage d'électricité, l'utilisation des batteries n'est pas la seule solution. Il existe en effet d'autres systèmes, dont nous n'entrerons pas dans les détails ici, mais qu'il est tout de même intéressant de connaître.

Outre le stockage de combustible ou le stockage de chaleur dans des réservoirs d'eau chaude, par exemple, l'électricité peut être stockée en utilisant des systèmes alternatifs aux cellules électrochimiques. Elle peut être stockée sous forme mécanique, par le biais de volants d'inertie ; grâce à des réservoirs sous-marins ; ou encore sous forme d'énergie potentielle de pesanteur, grâce au pompage-turbinage par exemple.

##### 1.2.4.1. *Volant d'inertie*

Le premier système alternatif de stockage d'énergie que nous aborderons ici est le stockage sous forme mécanique, à l'aide d'un volant d'inertie.

Ce système peut être utilisé pour plusieurs applications telles que la régulation de fréquence, le lissage de la production éolienne ou solaire ou encore la récupération d'énergie au freinage de certains véhicules.

Le volant d'inertie est formé d'une masse et d'un moteur électrique. La masse prend la forme d'un anneau ou d'un tube en fibre de carbone, dans le cas des systèmes récents.

Le stockage de l'énergie est réalisé en faisant entrer la masse en rotation à des vitesses très élevées, de 8000 à 16 000 tr/min ; certains volants d'inertie à haute vitesse peuvent même atteindre des rotations de 50 000 tr/min. Lorsque le système n'est plus alimenté, la masse reste en rotation ; c'est cette rotation qui permet le stockage de l'énergie, sous forme d'énergie cinétique. Celle-ci pourra alors être récupérée instantanément à l'aide du moteur, en l'utilisant en tant que générateur électrique. Ce moteur récupère l'énergie en ralentissant la masse.

Afin d'optimiser le système, la masse est placée dans une enceinte sous vide et sur des roulements magnétiques. Cela permet d'augmenter la durée de rotation et donc de prolonger le stockage.

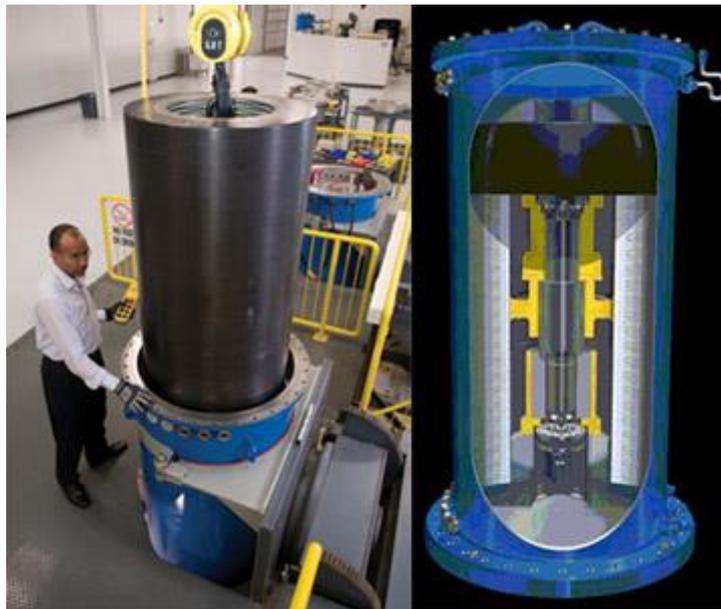


Figure 20 : Exemple de volant d'inertie [77]

Les avantages de ce système sont :

- Un rendement assez important, de l'ordre de 80% ;
- Un stockage rapide de l'énergie ;
- Un temps de réponse très court ;
- Pas de pollution ;
- Fiable et nécessitant peu d'entretien.

Ce système n'étant pas parfait, il a également des inconvénients :

- Le temps de stockage est limité à environ 15 minutes ;
- Il sert plutôt de régulation ou d'optimisation énergétique d'un système et n'est pas destiné à remplacer un système électrochimique. [77]

#### 1.2.4.2. Stockage par réservoirs sous-marins

Un autre système alternatif de stockage de l'énergie est le projet StEnSea pour « Stored Energy in the Sea ».

Le principe est d'utiliser la mer en interaction avec un réservoir sphérique vide déposé au fond de l'eau. La mer est utilisée comme réservoir « supérieur » et la sphère comme réservoir « inférieur ». Le principe est de pomper l'eau hors de la sphère afin de « charger » le système, lorsque de l'énergie est disponible, et de le remplir afin de récupérer l'énergie. En « décharge » l'eau de mer est autorisée à entrer dans le réservoir sphérique, celle-ci fait alors tourner une turbine qui fait elle-même tourner un générateur. [78]

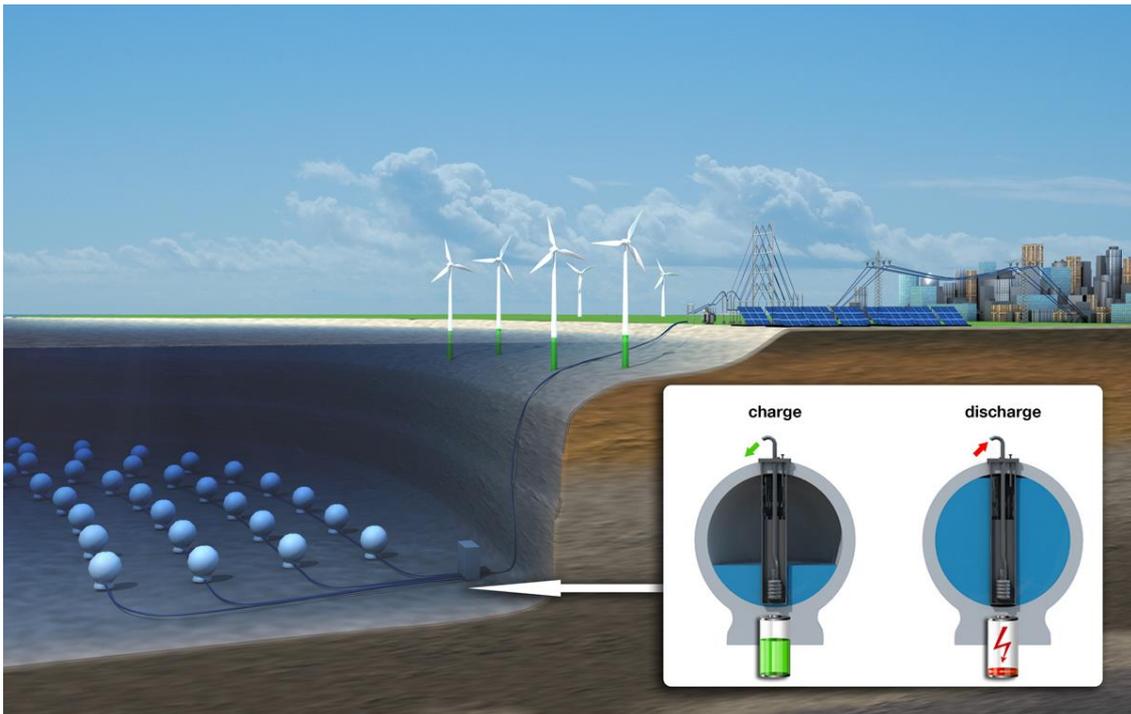


Figure 21 : Schéma du système de stockage d'énergie sous-marin StEnSea [79]

Le projet s'oriente vers une sphère vide d'un diamètre interne de 30 m, immergé à 700 m de profondeur. C'est alors l'énergie potentielle de l'eau qui sera utilisée dans les cycles de stockage/récupération de l'énergie.

La sphère actuellement à l'étude présente une capacité d'environ 20 MWh, ce qui représente 4 heures de décharge pour une turbine de 5 MW. [79]

#### 1.2.4.3. Pompage-turbinage

Le principe du pompage-turbinage est d'utiliser l'énergie potentielle d'un réservoir de stockage d'eau afin de la transformer en énergie électrique.

Le système est ainsi constitué d'un réservoir supérieur, d'une centrale hydroélectrique et d'un réservoir inférieur.

Le fonctionnement est assez simple : lorsque du courant est disponible sur le réseau la centrale hydroélectrique pompe l'eau du réservoir inférieur afin de l'amener dans le réservoir supérieur. Il s'agit de la phase de « charge ». A l'inverse, lorsque nous voulons récupérer l'énergie, il suffit alors de vider le réservoir supérieur en passant par une turbine, elle-même raccordée à un générateur permettant de produire du courant.

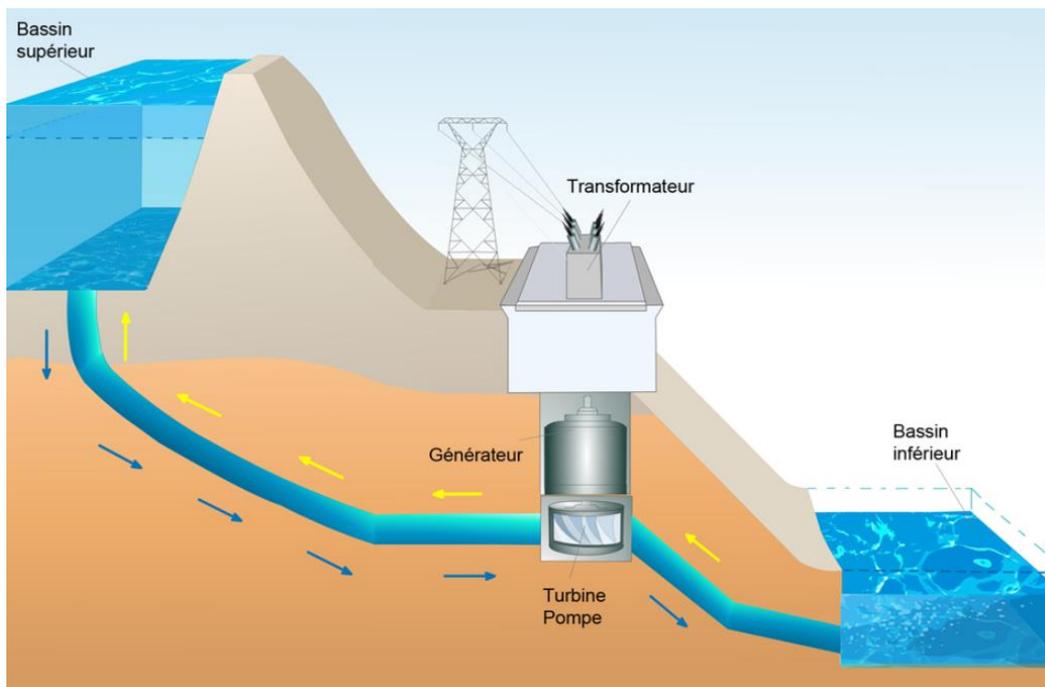


Figure 22 : Schéma de fonctionnement d'une centrale de pompage-turbinage [80]

Cette opération n'est pas parfaite et engendre 15 à 30% de pertes. Cela a néanmoins le net avantage de pouvoir stocker de l'énergie qui n'aurait pas été utilisée, et qui aurait donc été perdue.

Cette technologie a plusieurs avantages :

- Elle permet de sécuriser le réseau électrique ;
- Elle est simple et bien connue ;
- Elle permet d'optimiser la production d'énergie en stockant le surplus produit.

En ce qui concerne ses inconvénients :

- Le système peut avoir un impact paysager et hydrologique ;
- Il présente des pertes allant de 15 à 30%. [81][82]

### 1.3. Conditionnement des batteries

Revenons-en maintenant aux batteries. Celles-ci peuvent se présenter sous différentes formes, conditionnements qui seront brièvement décrits ci-après.

Les cellules peuvent ainsi prendre une architecture cylindrique, de bouton, de poche ou encore une forme dite prismatique.

Les cellules lithium-polymère utilisent généralement les formats poche ou prismatique, tandis que les cellules standard nécessitent un conditionnement rigide permettant de presser les électrodes entre elles, ce qui correspond plutôt à un format cylindrique. [35]

#### 1.3.1. Cylindre

Une première architecture de conditionnement est la cellule cylindrique. Dans ce type de cellule les différentes couches sont enroulées sur elles-mêmes comme nous pouvons le voir dans la Figure 23 ci-dessous.

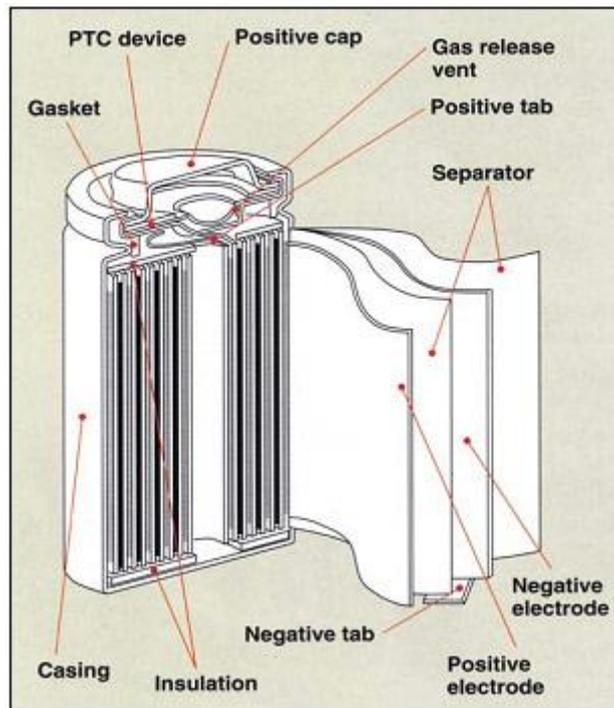


Figure 23 : Coupe d'une cellule cylindrique [83]

Un avantage important de ce type de cellule est sa bonne stabilité. En effet, le cylindre permet une résistance aux hautes pressions sans déformation. De plus, la fabrication de ce type d'architecture est facile. La cellule cylindrique présente également une bonne résistance face aux cycles ainsi qu'une longue durée de vie. Elle est également économique.

Cependant, ces cellules sont lourdes et leur densité est faible à cause des cavités présentes à l'intérieur de celle-ci.

Les cellules cylindriques n'ont pas toutes la même taille et ce sont les cellules 18650 qui sont les plus classiques. Ce nombre signifie que la cellule mesure 18 mm de diamètre pour 65 mm de long. Le dernier 0 signifie que la cellule respecte les normes IEC (International Electrotechnical Commission [84]). Cette taille est très optimisée puisqu'elle permet d'atteindre des coûts très faibles au Wh et présente une bonne fiabilité.

D'autres formats existent néanmoins : 20700, 21700 et 22700. Tesla, Panasonic et Samsung ont décidé d'opter pour le format 21700 pour plusieurs raisons : notamment sa facilité de production et sa capacité optimale.

En effet, une cellule 18650 présente un volume de  $66 \text{ cm}^3$  pour une capacité d'environ 3000 mAh, tandis que son homologue de format 21700 présente un volume de  $97 \text{ cm}^3$  permettant d'atteindre 6000 mAh, soit un doublement de la capacité pour une augmentation de volume de seulement 50%. Cela lui permet de proposer une bonne densité énergétique pour un prix très attractif.

Malgré les cavités que ce type de cellule présente, réduisant sa densité énergétique, ce paramètre est tout de même plus élevé dans le cas d'une cellule 18650 que dans une cellule prismatique ou poche. Une cellule 18650 permet de proposer 248 Ah/kg tandis que les cellules poche ne montent qu'à environ 140 Ah/kg. Cette meilleure densité énergétique permet de compenser l'agencement moins efficace des cellules entre elles, laissant des espaces vides vacants. Ceux-ci peuvent néanmoins être utilisés afin de mieux gérer la chaleur et ainsi refroidir les cellules. En plus de cela, les espaces permettent d'éviter la propagation lors de la défaillance d'une cellule. Finalement, ces cellules ne présentent pas d'expansion/contraction grâce à leur conditionnement rigide, tandis que les cellules prismatiques, par exemple, peuvent gonfler.

Ce type de cellule est habituellement utilisé dans les outils électriques, instruments médicaux, ordinateurs portables ou encore vélos électriques. [83]

### 1.3.2. Bouton

Le second format de cellule dont nous pouvons parler est ce que nous appelons la cellule bouton, comme visualisé dans la Figure 24 ci-dessous.

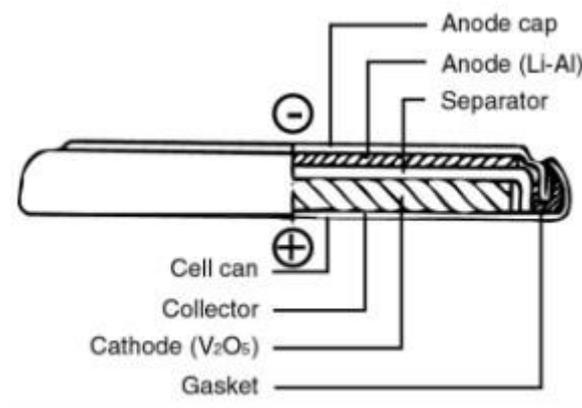


Figure 24 : Schéma d'une cellule bouton [83]

Grâce à la forme de ces cellules, elles peuvent être empilées les unes sur les autres afin d'obtenir des voltages élevés. Certains GSM, appareils médicaux ou autres détecteurs de métaux dans les aéroports utilisent ce type de format. Les cellules bouton les plus utilisées ne sont pas rechargeables et se retrouvent dans les implants médicaux, montres, appareils auditifs, clés de voitures, ... Soit des dispositifs nécessitant des cellules de faibles tailles.

Ces cellules sont petites et ne coûtent pas cher. Elles sont cependant de moins en moins utilisées et sont remplacées par des formats plus classiques. Ces cellules ont certains inconvénients : elles gonflent lorsqu'elles sont chargées trop rapidement et elles ne présentent pas de dispositif de sécurité. [83]

### 1.3.3. Prismatique

Le troisième format que nous aborderons est celui de la cellule prismatique.

Ce type de cellule présente un conditionnement assez élégant qui permet d'optimiser l'espace en utilisant une approche couche par couche. Elle a l'avantage d'être assez fine et peut être flexible.

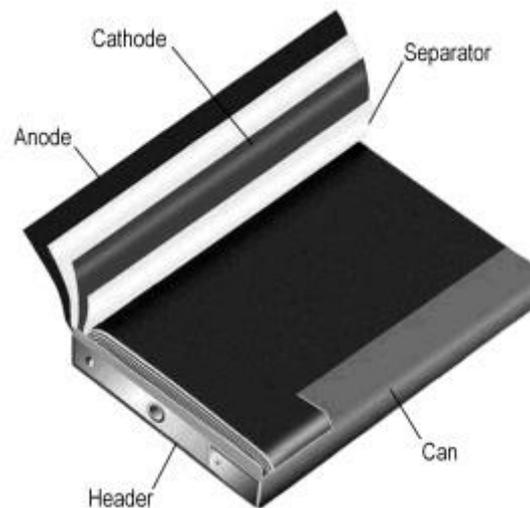


Figure 25 : Schéma d'une cellule prismatique [83]

En ce qui concerne les cellules prismatiques, il n'existe pas de formats universels comme c'est le cas pour les cellules cylindriques par exemple.

Elles sont utilisées dans des GSM, tablettes ou encore ordinateurs portables proposant des capacités de 800 mAh à 4000 mAh. Il existe également des cellules prismatiques de grandes tailles utilisées dans les groupes motopropulseurs des véhicules électriques ou hybrides. Ces cellules peuvent atteindre des capacités de 20 à 50 Ah.

Ce type de cellule est cependant plus cher et gère moins efficacement la chaleur. Il présente également des longévités inférieures aux cellules cylindriques.

Il est possible que ces cellules présentent un certain gonflement, passant par exemple de 5 mm d'épaisseur à 8 mm après 500 cycles. Cela doit être pris en compte dans la conception de l'appareil. [83]

### 1.3.4. Poche

Le dernier format présenté ici est appelé la cellule « poche ».

La cellule poche représente une solution simple, flexible et légère. Cette cellule présente également un certain gonflement qui doit être pris en compte. Les petites cellules de ce type peuvent connaître un gonflement de l'ordre de 8 à 10% après 500 cycles tandis que les plus grandes atteignent ce gonflement après 5000 cycles. Il est donc recommandé de ne pas empiler les cellules mais plutôt de les disposer à plat, les unes à côté des autres. Si, toutefois, elles devaient être empilées, il est nécessaire de garder un certain espace vacant entre chacune d'entre elles.



Figure 26 : Exemple de cellule poche [83]

Ce format utilise très efficacement l'espace et permet d'atteindre un remplissage du conditionnement de l'ordre de 90 à 95%, il s'agit du conditionnement le plus efficace à ce niveau-là. La cellule poche n'utilisant pas d'emballage métallique, sa masse s'en voit réduite. Elle nécessite cependant un support afin de prendre en compte l'expansion.

Les cellules poche sont généralement des cellules lithium-polymère et, à l'instar des cellules prismatiques, il n'existe pas de format universel.

Cette technologie s'étant sophistiquée, ces cellules présentent maintenant des capacités supérieures aux cellules cylindriques. Elles sont cependant plus chères que ces dernières mais cela est en train de changer. En effet, la conception sous format plat (prismatique et poche) devient compétitive et il est prévu que ce type de cellules prenne le pas sur les cellules cylindriques, plus particulièrement si les performances de ces systèmes peuvent être équivalentes.

Les cellules poche sont utilisées dans les applications grand public, militaires ou encore dans l'automobile. Dans ce cas, de grandes batteries plates sont utilisées dans les groupes motopropulseurs électriques. Elles servent également dans des systèmes de stockage d'énergie.

Les plus petites cellules permettent de faire fonctionner des appareils portables nécessitant des courants élevés, tels que des drones par exemple. Les cellules de plus grandes tailles, de l'ordre de 40 Ah, permettent de simplifier les batteries utilisées dans les systèmes de stockage d'énergie étant donné que celles-ci permettent de réduire le nombre de cellules à connecter entre elles. [83]

## 1.4. Conception d'une batterie

### 1.4.1. Agencement des cellules entre elles

Il est possible d'utiliser une cellule seule, c'est la configuration la plus simple. C'est le cas de certains appareils tels que les GSM ou les tablettes par exemple. Ceux-ci n'utilisent qu'une seule cellule lithium-ion permettant de fournir un voltage nominal de 3,6 V, qui est suffisant pour le bon fonctionnement de ces appareils.

Cependant ce n'est certainement pas le cas pour toutes les applications, la plupart nécessitant des voltages et des capacités plus importants. Il est donc nécessaire de connecter plusieurs séries entre elles afin d'atteindre les caractéristiques souhaitées. Ainsi, la connexion en série permet d'augmenter le voltage tandis que la connexion en parallèle permet d'augmenter la capacité.

Par exemple, les ordinateurs portables nécessitent une combinaison de connexions en série et parallèle. La batterie est habituellement constituée de quatre cellules lithium-ion (de 3,6 V chacune) connectées en série et de deux cellules connectées en parallèle pour pouvoir arriver au voltage et à la capacité désirés. Une telle configuration est ainsi constituée de 8 cellules (4 multiplié par 2) et peut être notée 4s2p (quatre cellules en série et deux en parallèle). [85] La Figure 27 illustre cette configuration.

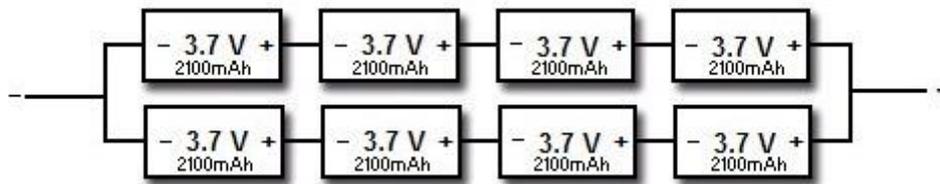


Figure 27 : Configuration 4s2p de cellules [86]

La plupart des chimies permettent ce type de connexions en série et parallèle. Il est cependant important de ne connecter que des cellules identiques, présentant des voltages et des capacités égaux. [85]

#### 1.4.1.1. Connexion en série

Certains appareils nécessitent des voltages plus élevés que ceux proposés par une cellule unique. Afin d'y parvenir, la solution consiste à connecter plusieurs cellules en série comme nous pouvons le voir dans la Figure 28 ci-dessous. Dans ce cas la borne positive de la première cellule est connectée à la borne négative de la cellule suivante, et ainsi de suite [87].



Figure 28 : Mise en série de cellules [85]

Lorsque des cellules identiques sont connectées en série, les voltages s'additionnent tandis que la capacité reste la même. Dans cet exemple, quatre cellules, de 3,6 V et 3400 mAh chacune, connectées en série, gardent une capacité de 3 400 mAh mais acquièrent une tension de 14,4 V (quatre fois 3,6 V).

Le voltage final de la batterie ne doit cependant pas nécessairement être exactement égal à ce que nécessite l'appareil, il faut cependant qu'il soit plus élevé. Ainsi un appareil de 9 V fonctionnera très bien avec une batterie de 12 V par exemple. Cette surtension ne doit pas être trop importante. Par contre il est important de respecter le voltage de fin de décharge ; en effet lorsqu'une batterie se décharge, son voltage diminue.

Le tableau suivant propose certains exemples de voltages pour différentes applications. [85]

Tableau 10 : Exemples de voltages pour différentes applications [85]

Appareil	Gamme de voltage
Outil électrique	12 – 18 V
Outil haut de gamme	24 – 36 V
Vélo électrique	36 – 48 V
Batterie de voiture	12 – 36 V
Voiture hybride	48 V
Premières voitures hybrides	148 V
Voiture électrique	450 – 500 V

#### 1.4.1.2. Connexion en parallèle

Certains appareils peuvent nécessiter des courants plus importants. Si des cellules plus grandes ne sont pas disponibles, il est possible d'en connecter plusieurs en parallèle afin de parvenir aux performances souhaitées.

La plupart des chimies permettent les configurations en parallèle. Cette configuration est présentée dans la Figure 29. Ici, les bornes positives sont reliées entre elles, il en va de même pour les bornes négatives [87].

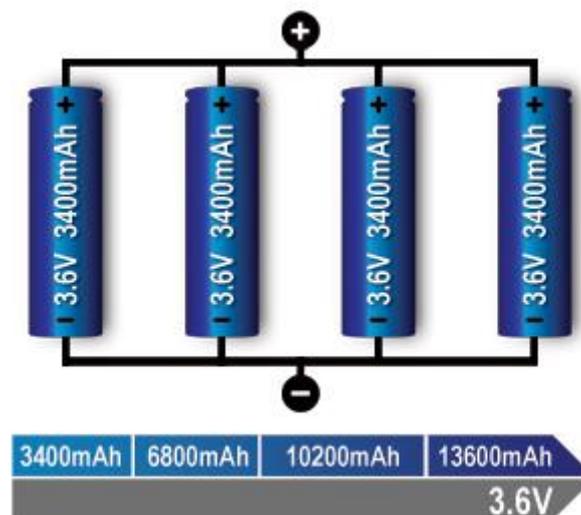


Figure 29 : Mise en parallèle de cellules [85]

Lorsque des cellules identiques sont connectées en parallèle, les capacités s'additionnent tandis que le voltage reste le même. Dans cette figure, quatre cellules de 3,6 V et 3400 mAh chacune sont connectées en parallèle. Nous pouvons observer que la batterie présente un voltage final de 3,6 V (inchangé), tandis que les capacités ont été additionnées et atteignent alors 13 600 mAh (quatre fois 3400 mAh). Le temps de fonctionnement de cette batterie est ainsi également multiplié par quatre. [85]

### 1.4.1.3. Configuration série/parallèle

Finalement certains appareils nécessitent aussi bien un voltage élevé qu'une capacité importante. Une configuration en série et parallèle est donc nécessaire.

La Figure 30 présente une telle configuration. Dans ce cas il s'agit d'une configuration 2s2p, signifiant donc deux cellules connectées en série et deux en parallèle. Le nombre de cellules en série est toujours précisé en premier et le nombre de cellules en parallèle en second.

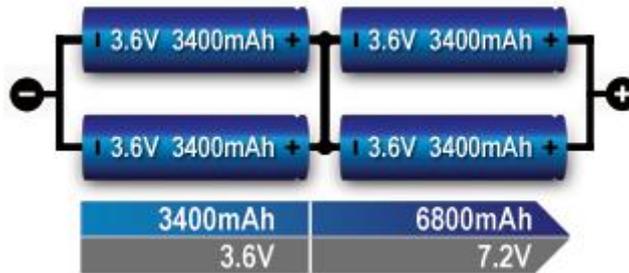


Figure 30 : Mise en série et parallèle de cellules [85]

Ainsi, le calcul de la tension finale n'étant liée qu'aux cellules mises en série, nous obtenons deux séries de 7,2 V qui sont mises en parallèle, cette mise en parallèle ne modifiant pas la tension de la batterie.

En ce qui concerne la capacité, celle-ci n'est liée qu'aux cellules mises en parallèle. Nous avons donc deux séries de deux cellules qui sont mises en parallèle. Etant donné que la mise en série ne modifie pas la capacité, nous avons deux groupes de 3400 mAh, ce qui donne une capacité totale de 6800 mAh.

Lors de la connexion de plusieurs cellules lithium-ion entre elles, les chaînes parallèles sont connectées en premier ; ces chaînes sont alors connectées en série. [85]

### 1.4.2. Appariement des cellules dans une batterie

Il est très important de respecter l'appariement lorsque plusieurs cellules sont connectées entre elles afin de construire une batterie.

En effet, lorsqu'une cellule sort de la ligne de fabrication, sa capacité ne peut pas être prédite exactement. Même si la production est tout à fait automatisée, deux cellules fabriquées de la même manière peuvent présenter des performances légèrement différentes. Ainsi, lors de l'étape de contrôle qualité, chaque cellule est contrôlée et elles sont triées en fonction de leur capacité. [28]

Aucune correspondance parfaite n'est possible mais l'appariement est nécessaire pour la longévité de la batterie. Ainsi des cellules de bonne qualité présentant des différences de capacité pourront fonctionner plus longtemps que s'il s'agissait de cellules de moins bonne qualité, pour lesquelles le déclin sera plus rapide.

Dans une conception en série, lorsqu'une cellule est plus faible que les autres, celle-ci sera déchargée plus rapidement que les autres. Cette cellule faible sera la première à être déchargée, pendant que les autres cellules continueront la décharge, ce qui risque de pousser la cellule faible en inversion de polarité ; elle présentera alors un voltage négatif, ce qui risque de provoquer un court-circuit.

A l'opposé, en charge, cette cellule faible atteindra sa recharge complète en première également, elle chauffera alors à cause de la surcharge. Pendant ce même temps, les autres cellules, plus fortes, seront toujours en train de se recharger tout en restant fraîches.

Cette cellule affaiblie est donc stressée dans les deux sens : que ce soit en charge ou en décharge ; jusqu'au moment où elle lâchera. Cet appariement est donc directement lié à la longévité de la batterie. [28][39][85]

La Figure 31 illustre la perte de capacité d'une batterie lithium-ion en fonction du degré d'appariement des cellules.

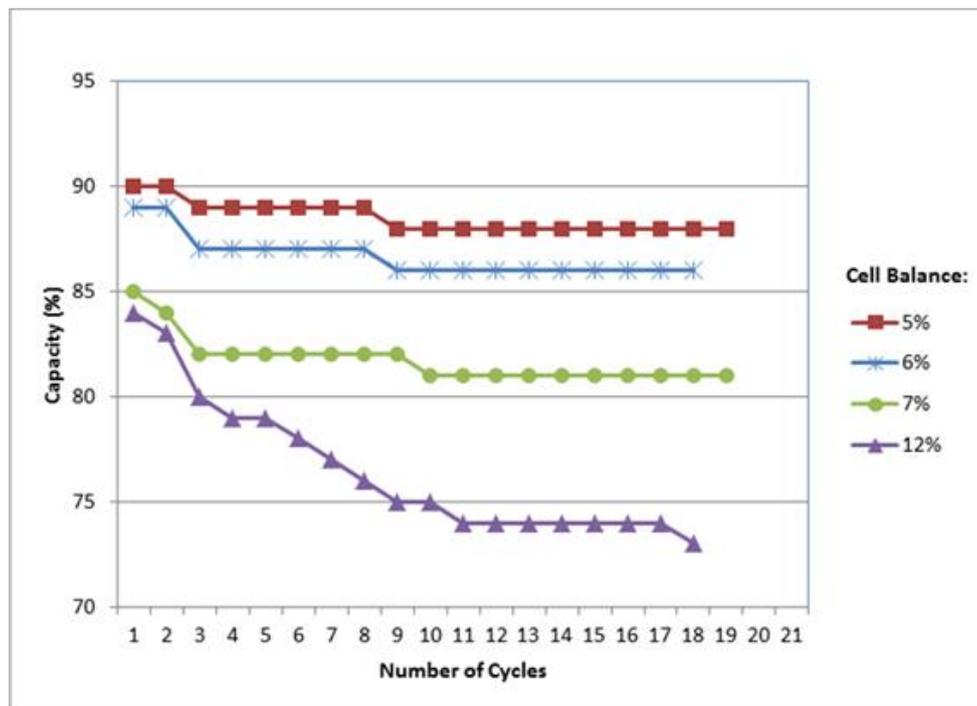


Figure 31 : Perte de capacité en fonction du degré d'appariement des cellules [28]

Comme nous pouvons le constater dans ce graphique, les différences de capacités dans ces différentes batteries sont de 5, 6, 7 et 12%. Nous pouvons ainsi observer que moins l'appariement des cellules est bon et plus la perte de capacité au cours des cycles est importante. Il est ainsi conseillé, dans le cas des batteries industrielles, d'avoir une différence de maximum 2,5% entre les cellules de la batterie. Dans certains packs de haut voltage, il est même conseillé de réduire encore plus cette tolérance. [28][85]

Les cellules ont également tendance à se déséquilibrer avec le temps et l'utilisation. Cela fait partie intégrante du vieillissement de la batterie.

Un gros avantage des GSM et tablettes par exemple, est que ces appareils ne nécessitent qu'une seule cellule pour pouvoir fonctionner. L'appariement n'est donc plus nécessaire, ce qui permet de réduire les coûts de fabrication. [28]

Outre ces problèmes de défaillance liés au mauvais appariement des cellules, des problèmes de performances apparaîtront également.

En effet, dans une configuration en série, la cellule faible déterminera les performances de la batterie : une batterie est seulement aussi performante que la cellule la plus faible de la série. [85]

Lorsqu'une cellule défectueuse apparaît dans un pack vieillissant, le pack est généralement remplacé en totalité. En effet, la cellule défectueuse présenterait une capacité plus faible que les autres et nous aurions tendance à dire qu'il suffit de la remplacer par une nouvelle. Mais les autres cellules du pack ont également vieilli ; la nouvelle cellule présenterait donc une capacité plus importante que les autres. Ce qui mènerait également à un déséquilibre. [85]

## 1.5. Détérioration, perte de performances et sécurité

### 1.5.1. Phénomènes de vieillissement et de détérioration de la batterie

Pour commencer, il existe deux types d'événements responsables de la défaillance d'une batterie. Celle-ci peut tout d'abord survenir à cause d'une mauvaise conception de la batterie, dans les électrodes, l'électrolyte ou encore le séparateur. Par exemple la présence de particules métalliques apportées lors de la fabrication peut provoquer des courts-circuits. La seconde cause de défaillance concerne des événements aléatoires, difficilement prévisibles. Elle peut être liée à un stress trop important appliqué sur la cellule, des vibrations ou encore un accident. [39][65][88]

Un premier phénomène responsable du vieillissement de la batterie est le **cyclage** de celle-ci, c'est-à-dire le fait de réaliser des cycles de charge/décharge.

Toutes les chimies de batteries ne sont pas égales face au cyclage. Ainsi, la batterie nickel-cadmium présente la meilleure résistance face aux cycles. De plus cette batterie peut être rechargée avec un rechargement « ultra rapide » en occasionnant seulement un stress réduit. Sa résistance interne reste faible et son auto-déchargement, modéré.

Une batterie nickel-métal hydrure, quant à elle, présente une perte de capacité après 300 cycles. De plus, sa résistance interne augmente rapidement après 700 cycles et une augmentation de l'auto-déchargement après 1000 cycles. [89]

En ce qui concerne les batteries lithium-ion, la Figure 32 ci-dessous représente un exemple de perte de capacité qui est fonction du cyclage ainsi que du C-rate.

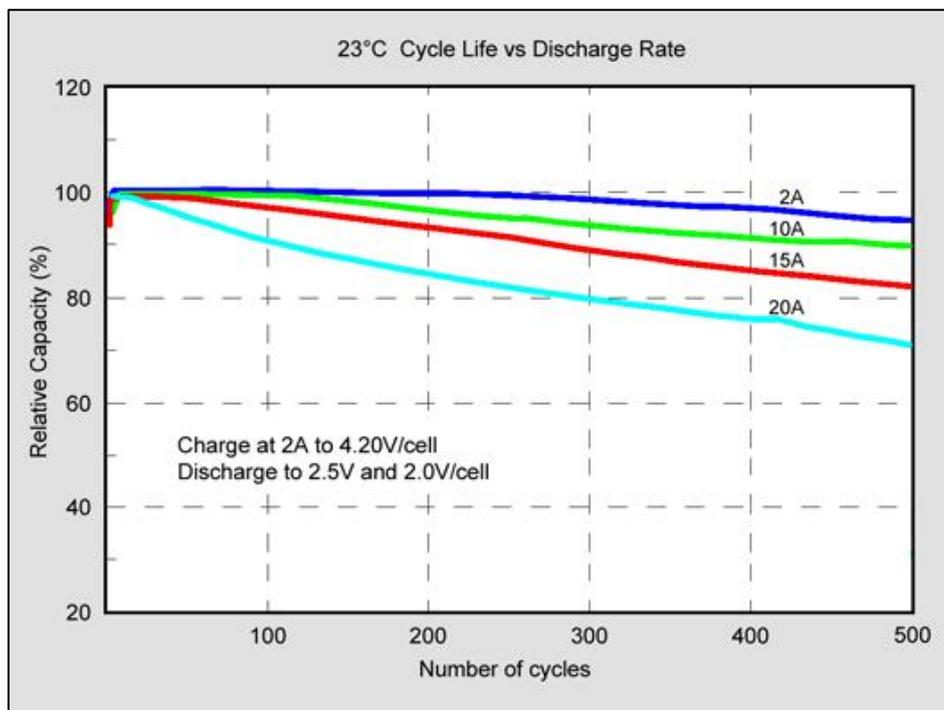


Figure 32 : Influence du cyclage et du C-rate sur la perte de capacité [89]

Comme nous pouvons le voir dans cette figure, la capacité de la cellule diminue avec le nombre de cycles. Cependant, celle-ci chute d'autant plus que le courant utilisé est élevé ; en effet, un courant plus important provoque plus de stress sur la cellule. [89]

Ensuite, les cellules lithium-ion qui ne sont pas chargées dans des conditions idéales, surchargées ou surchauffées par exemple, peuvent présenter un **gazage** menant à un **gonflement** de la cellule. Les gaz produits sont principalement du CO et du CO<sub>2</sub> et sont liés à une détérioration de l'électrolyte. Ce gonflement ne se produit que dans le cas des cellules prismatique ou poche, les autres formats sont rigides et ne peuvent donc pas gonfler [35]. La décomposition de l'électrolyte devrait être limitée en utilisation normale. Elle est accélérée par une mauvaise utilisation et par le vieillissement. [83][90]

Ainsi, un chargement à un voltage supérieur à 4,3 V pendant une trop longue période générera du plaquage de lithium métallique sur l'anode. La cathode devient alors oxydante et produit du gaz, en perdant en stabilité. Afin d'éviter un risque de surpression dans la cellule, certaines comportent un dispositif CID permettant de couper le courant lorsque la pression interne dépasse un certain seuil. Si rien n'était fait pour contrer cette pression, la cellule risquerait de prendre feu ou même d'exploser. [22]

Les batteries peuvent généralement supporter des surcharges brèves. Cependant, la longévité de la batterie est toujours liée aux stress qui lui sont infligés : plus ces stress sont importants ou se multiplient et plus la longévité diminuera. Les mauvaises conditions de charge et de décharge ainsi que la température inadéquate sont les principales causes de stress. [19]

Ensuite, certains petits courts-circuits, dus à la présence de particules métalliques par exemple, peuvent provoquer une augmentation de l'auto-déchargement ainsi qu'une légère augmentation de chaleur. L'endroit de la batterie qui s'échauffe est alors affaibli, ce qui peut endommager le séparateur de la cellule et ainsi provoquer un court-circuit conséquent. Un emballement thermique peut alors se produire, atteignant environ 500°C, et causer un enflamment de la cellule voire même une explosion. [88]

Un autre facteur de stress pour la cellule est l'utilisation de celle-ci sur toute sa gamme de capacité. En effet, il n'est pas conseillé de décharger complètement une batterie lithium-ion et, à l'opposé, une charge à 100% de SOC peut également la stresser. Il est donc conseillé de recharger la batterie plus souvent plutôt que de travailler entre 0% et 100% de SOC. [91]

Les performances de la batterie sont également limitées par la croissance de l'interface électrolytique solide (SEI). Pendant la charge, le lithium se fixe sur l'anode en graphite. Cependant, lors de la décharge, l'intégralité du lithium n'est pas récupérée de la surface de l'anode. C'est ce qui forme la SEI. Ce film a tendance à s'épaissir au cours du temps et des cycles, ce qui rend plus difficile l'interaction entre les ions lithium et l'anode en graphite et réduit donc les performances de la batterie. [24][39][42]

La cathode peut également développer une couche similaire connue sous le nom d'oxydation de l'électrolyte. Cela est dû à un voltage ou une température trop élevée. Ce phénomène est plus nuisible pour la batterie que le cyclage de celle-ci. Ainsi, plus la batterie reste à haut voltage (donc haut SOC) ou à haute température pendant de longues périodes, et plus la dégradation est rapide. [24]

L'épaississement de la SEI ainsi que l'oxydation de l'électrolyte sont deux procédés qui ne sont pas réversibles. [91]

Le vieillissement de la batterie est un phénomène naturel et inévitable. Il est cependant possible de le ralentir en adoptant des comportements produisant moins de stress sur celle-ci et permettant donc d'augmenter sa durée de vie.

### 1.5.2. Perte de capacité

L'évaluation de la durée de vie de la batterie est une chose compliquée. Celle-ci pourrait être estimée en comptant le nombre de cycles réalisés mais cela ne serait pas assez précis. En effet, la batterie n'est pas toujours chargée/déchargée de la même manière, ce qui rend le comptage des cycles compliqués. Certains fabricants proposent également d'indiquer une date de péremption sur la batterie, ce qui ne prendrait pas en compte l'utilisation ; une batterie pourrait ainsi durer plus ou moins longtemps que ce qu'il est indiqué sur l'étiquette. La résistance interne et l'auto-déchargement pourraient également être utilisés mais ils ne sont pas suffisamment précis. La batterie est dès lors suivie grâce à la capacité. [92]

Nous pouvons diviser la capacité de stockage d'une batterie en trois sections différentes :

- L'énergie disponible, qui peut donc être récupérée ;
- La zone vide, qui peut être rechargée ;
- La zone inutilisable : il s'agit de la partie du stockage qui a été perdue à cause du vieillissement et de l'utilisation. [91]

Lorsque cette zone inutilisable s'étend, la capacité de stockage de la batterie diminue, ainsi que le temps de rechargement. Généralement, cette perte de capacité est linéaire et est fonction du nombre de cycles ainsi que de l'âge de la batterie. Un pack de batterie est généralement remplacé lorsque la capacité devient inférieure à 80% de la capacité initiale. Bien entendu, cette limite de 80% variera en fonction de l'utilisation et des besoins de l'utilisateur, la batterie étant encore tout à fait utilisable. [42][91]

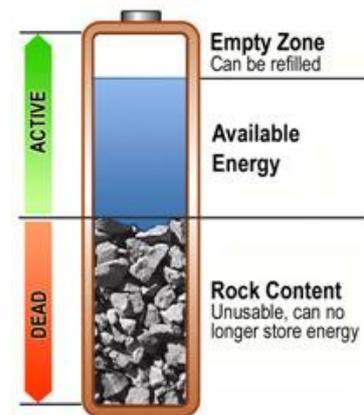


Figure 33 : Sections de la capacité de stockage [91]

Notons également que la perte de capacité est linéaire jusqu'à environ 80% de celle-ci et entre ensuite dans une phase non-linéaire sous ces 80% ; comme nous pouvons le voir dans la Figure 34.

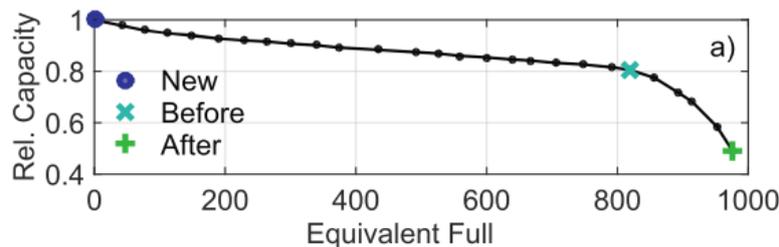


Figure 34 : Perte de capacité d'une cellule lithium-ion avec le cyclage [42]

Cette détérioration non-linéaire peut être due à la perte en matériaux actifs due au vieillissement. Cette perte ainsi que le plaquage de lithium sur l'anode amplifient la croissance de la SEI qui détériore d'autant plus les réactions électrochimiques. Le plaquage s'accroît encore et crée donc un effet boule de neige qui accélère la perte de capacité. [42]

Cette perte de capacité peut donc avoir plusieurs causes, une première étant la température. En effet, lorsque la batterie est utilisée à des températures trop basses, ou trop élevées, la capacité diminue.

Ainsi, à basses températures, les performances des batteries chutent. A  $-20^{\circ}\text{C}$ , la plupart des batteries ne fonctionnent plus. Certaines batteries lithium-ion spécialisées sont capables de fonctionner à  $-40^{\circ}\text{C}$  mais seulement en mode décharge, et à des C-rates très réduits, la recharge est impossible à de telles températures. [57] En charge, la résistance interne de la cellule produit une légère augmentation de la température qui peut, en partie, compenser le froid ambiant. [59]

Le Tableau 11 propose une comparaison de deux cellules Panasonic de chimies identiques. L'une est utilisée comme Energy Cell et l'autre comme Power Cell. La capacité résiduelle en fonction de la température diffère entre ces deux cellules.

Tableau 11 : Comparaison de la perte de capacité due à la température de deux cellules Panasonic [55]

Capacité restante en fonction de la température	Energy Cell	Power Cell
25°C	100%	100%
0°C	≈ 83%	≈ 92%
-10°C	≈ 66%	≈ 85%
-20°C	≈ 53%	≈ 80%

L'Energy Cell proposée ci-dessus présente une capacité de 3200 mAh et peut être déchargée jusqu'à maximum 2C, il s'agit cependant d'un C-rate assez élevé qui ne permet pas de récupérer toute la capacité, il est donc plus intéressant de travailler à 0,5C ou 1C.

La Power Cell présente une capacité de 2000 mAh et peut être déchargée jusqu'à 5C tout en affichant une perte de capacité minimale. [55]

Lorsque nous parlons de l'influence de la température sur le comportement de la batterie, il est nécessaire de préciser que la recharge est plus sensible que la décharge. En effet, des températures extrêmes (très froides ou au contraire très élevées) réduisent la capacité de la cellule à accepter les charges. Les nouvelles batteries au lithium sont plus sensibles aux températures extrêmes que les anciennes technologies, comme les batteries au plomb par exemple. [59] Le Tableau 12 illustre ces phénomènes en comparant les gammes de températures de charge et de décharges pour différentes chimies de batteries. Ce tableau reprend également certaines limitations relatives à ces conditions particulières d'utilisation.

Tableau 12 : Gammes de températures de charge et de décharge pour différentes chimies de batteries [59]

Type de batterie	Température de charge	Température de décharge	Informations de charge
Plomb	-20 à 50°C	-20 à 50°C	Charger à 0,3C ou moins quand il gèle.
NiCd, NiMH	0 à 45°C	-20 à 65°C	Charger à 0,1C entre -18 et 0°C. Charger à 0,3C entre 0 et 5°C. L'acceptation de la charge à 45°C est de 70%. L'acceptation de la charge à 60°C est de 45%.
Li-ion	0 à 45°C	-20 à 60°C	Pas de recharge permise en cas de gel. Bonnes performances de charge/décharge à plus haute température mais vie plus courte.

Comme nous pouvons le voir, une batterie est beaucoup plus souple en phase de décharge qu'en phase de charge. Elle tolère des températures plus extrêmes en décharge. [59]

Lorsque les batteries sont utilisées dans des climats plutôt froids, il est parfois nécessaire d'utiliser des éléments chauffants afin de garder des performances acceptables. [57] Ainsi, certaines batteries industrielles incluent une couverture thermique permettant de porter la batterie à une température acceptable ; certains chargeurs permettent également d'adapter les C-rates en fonction de la température ambiante. Les chargeurs proposés dans le commerce ne proposent cependant pas ce genre de fonctions et c'est donc à l'utilisateur de recharger sa batterie dans de bonnes conditions.

Une batterie lithium-ion ne peut pas être rechargée lorsque la température est inférieure à 0°C. En effet, un rechargement sous cette limite de température provoque un plaquage du lithium métallique sur l'anode, ce qui détériore la cellule. Ce plaquage est permanent et augmente le risque de défaillance de la cellule.

Certains progrès sont tout de même faits afin de permettre le rechargement de cette chimie de cellules sous 0°C, les courants utilisés sont cependant très limités. Il est ainsi possible de recharger une telle cellule à un C-rate de 0,02C lorsque la température est de -30°C, ce C-rate étant très faible et le temps de recharge s'élèverait à plus de 50 heures. [59]

Ensuite, la Figure 35 illustre la perte de capacité de la batterie occasionnée par un fonctionnement à température trop élevée. Dans ce cas, il s'agit d'une élévation de la température sur une batterie lithium-cobalt. Celle-ci est tout d'abord utilisée à température ambiante (20-25°C) et est ensuite chauffée à 130°C pendant 90 minutes. Elle est de nouveau utilisée à différents SOC : 20, 50 et 100%. La perte de capacité est observée en fonction du nombre de cycles de charge/décharge réalisés.

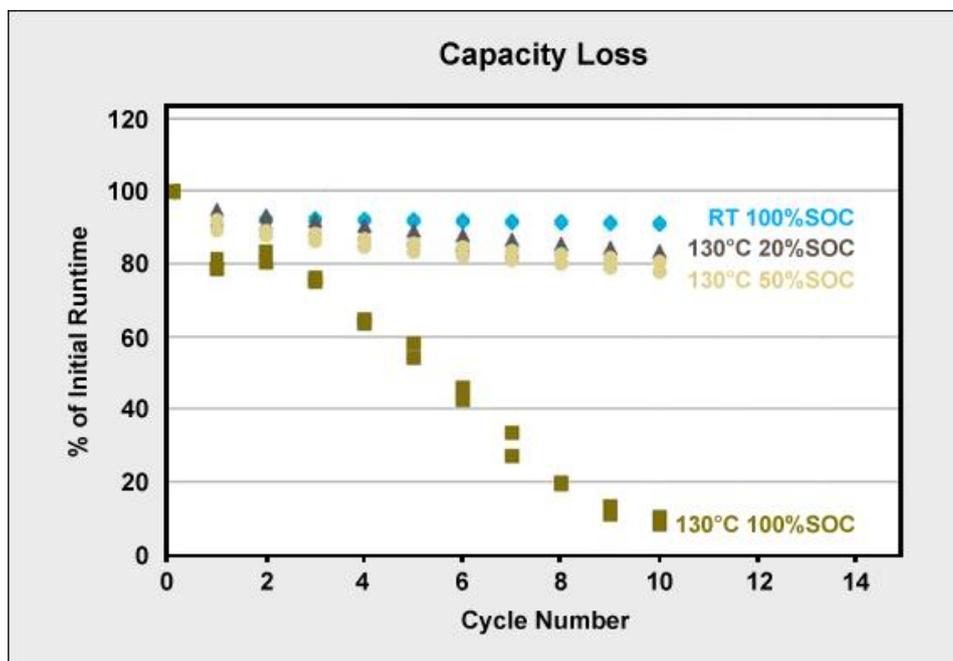


Figure 35 : Perte de capacité en fonction de la température [59]

Nous pouvons observer que la batterie ne présente pas de perte de capacité lorsqu'elle est utilisée à température ambiante (20-25°C). Cependant à haute température, plus le SOC est élevé et plus la perte de capacité est importante. Ainsi, plus la batterie est utilisée à charge élevée (SOC élevé) et plus nous observons une perte de capacité au fil des cycles, due à l'augmentation de la température. [59]

La profondeur de décharge joue également un rôle important sur la perte de capacité. Les batteries lithium-ion ne présentant pas d'effet mémoire, il n'est pas nécessaire de les décharger complètement à chaque cycle, elles dureront plus longtemps avec des décharges partielles. [92]

Le Tableau 13 ci-dessous illustre l'influence de la profondeur de décharge sur le nombre de cycles pouvant être réalisés par la batterie avant que la capacité de celle-ci ne tombe sous les 70%.

Tableau 13 : Influence de la profondeur de décharge sur le nombre de cycles [92]

<b>DOD</b>	<b>Cycles (NMC/LiPO<sub>4</sub>)</b>
100%	≈ 300 / 600
80%	≈ 400 / 900
60%	≈ 600 / 1500
40%	≈ 1500 / 3000
20%	≈ 1500 / 9000
10%	≈ 10000 / 15000

La capacité est également réduite lorsque la batterie est gardée à un SOC élevé, c'est-à-dire un voltage élevé. Ainsi, un voltage de 4,1 V pour une cellule lithium-ion est considéré comme étant un voltage élevé. Cette perte de capacité due au voltage élevé est d'autant plus accentuée lorsque la température est élevée, à partir d'environ 30°C. Ceci est illustré dans le Tableau 14, la capacité restante est calculée après 3 mois.

Tableau 14 : Influence du SOC et de la température sur la perte de capacité [92]

<b>Température</b>	<b>40% de charge</b>	<b>100% de charge</b>
<b>0°C</b>	98%	94%
<b>25°C</b>	96%	80%
<b>40°C</b>	85%	65%
<b>60°C</b>	75%	60%

La plupart des cellules lithium-ion se rechargent jusqu'à un voltage de 4,2 V. Il n'est cependant pas conseillé de les recharger jusqu'à ce voltage. Chaque diminution du voltage maximum de 0,1 V permet de doubler le nombre de cycles réalisables. Par exemple, une cellule chargée à 4,2 V délivre typiquement 300 à 500 cycles ; si elle n'était chargée qu'à 4,1 V elle pourrait atteindre 600 à 1000 cycles.

En termes de longévité, le voltage optimal est obtenu lorsque la cellule est chargée jusqu'à 3,92 V. Ceci représente une capacité récupérable d'environ 65 à 70%. Elle pourrait alors réaliser environ 2400 à 5000 cycles. [92]

La capacité est donc aussi bien réduite par la profondeur de décharge que par un rechargement à SOC élevé. Il est donc nécessaire, afin de préserver la batterie le plus longtemps possible, de travailler dans une gamme de SOC qui n'est pas trop étendue et qui ne se rapproche pas trop des extrêmes. La Figure 36 montre la perte de capacité en fonction de la gamme de SOC utilisée.

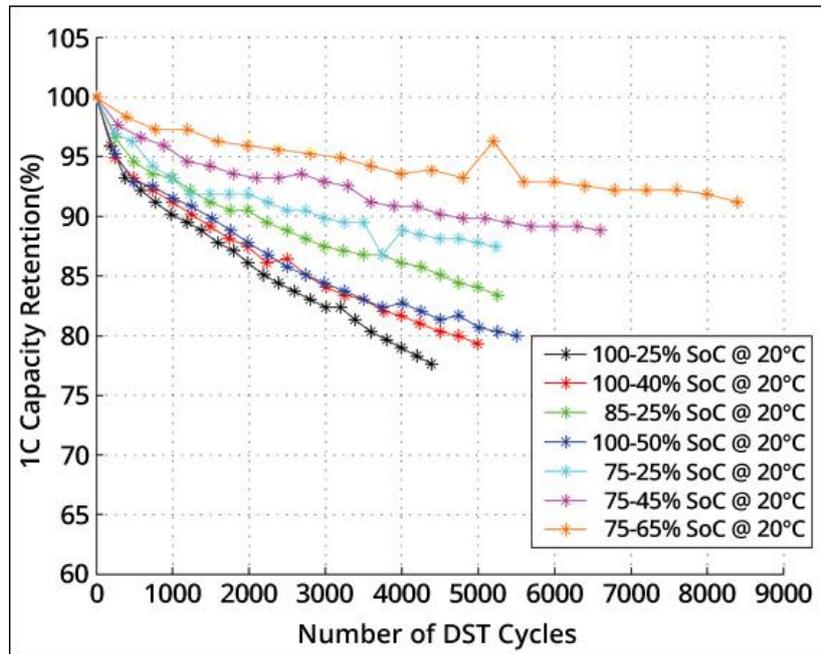


Figure 36 : Perte de capacité en fonction de la gamme de SOC utilisée [92]

Nous pouvons ainsi observer que la perte de capacité est plus importante lorsque la gamme de SOC est proche des extrêmes ; dans ce cas, lorsqu'elle est chargée à 100% ou déchargée à 25%. La batterie perd moins en capacité lorsqu'elle fonctionne entre 85% et 25% plutôt qu'entre 100% et 50%, alors que la gamme de capacité est plus étendue dans le premier cas que dans le second. [92]

Il est important de trouver un compromis entre une faible perte de capacité et un temps de fonctionnement acceptable. En effet, c'est pour une gamme de SOC comprise entre 75% et 65% que la plus faible perte de capacité est observée, une telle gamme n'est cependant pas utilisable dans la réalité, elle n'utiliserait que 10% de la capacité réelle de la batterie.

### 1.5.3. Auto-déchargement

L'auto-déchargement d'une batterie est un phénomène variant en fonction des conditions d'utilisation.

Celui-ci est généralement de 5% le premier jour après la recharge et descend alors à 1 ou 2% par mois. Le circuit de protection augmente également cet auto-déchargement d'environ 3% par mois.

Ce phénomène peut être accentué par un séparateur défectueux. Si tel est le cas, du courant peut circuler dans la cellule, ce qui génère également de la chaleur. C'est le passage de ce courant qui augmente le phénomène. [93]

Le Tableau 15 présente des valeurs d'auto-déchargement pour différentes chimies de cellules.

Tableau 15 : Auto-déchargement pour différentes chimies de cellules [93]

Système de batterie	Auto-déchargement estimé
Lithium-métal	10% en 5 ans
Alcaline	2 – 3% par an
Acide-plomb	5% par mois
Nickel	10 – 15% en 24h, puis 10 – 15% par mois
Lithium-ion	5% en 24h, puis 1 – 2% par mois (plus 3% pour le circuit de sécurité)

Quelle que soit la chimie de cellule, l'auto-déchargement augmente avec une élévation de la température. En règle générale, il double à chaque augmentation de 10°C. Le nombre de cycles, un SOC élevé ainsi que le vieillissement de la batterie augmentent également ce phénomène. En ce qui concerne les batteries lithium-ion, l'auto-déchargement reste relativement constant pendant toute leur durée de vie. [93]

Le tableau suivant présente des taux d'auto-déchargement en fonction de la température et du SOC.

Tableau 16 : Influence du SOC et de la température sur l'auto-déchargement [93]

SOC	0°C	25°C	60°C
<b>Charge complète</b>	6%	20%	35%
<b>40-60% de charge</b>	2%	4%	15%

Le développement de dendrites dues à un déchargement trop profond, donc à un voltage trop bas (typiquement sous 2,5 V), est également une cause d'augmentation de l'auto-déchargement.

Il est important de contrôler cette caractéristique lors de la fabrication, et ce pour chaque cellule. En effet, des cellules dans un même lot peuvent avoir été contaminées ou non par des impuretés, augmentant l'auto-déchargement. [93]

#### 1.5.4. Solutions

Tous ces phénomènes de vieillissement et de détérioration de la batterie peuvent être atténués grâce à l'ajout de certains éléments dans la batterie ou en utilisant la batterie de manière à augmenter sa durée de vie.

Il est ainsi possible d'ajouter des additifs dans l'électrolyte afin d'améliorer les performances de la batterie. Les fabricants gardent généralement secrète la nature des différents composants ajoutés. Ces additifs permettent néanmoins de diminuer la résistance interne grâce à une réduction de la corrosion, de diminuer le gazage et d'améliorer les performances à hautes et basses températures. Par exemple, un ajout de 1 à 2% de vinylène dans l'électrolyte permet de limiter la formation de la SEI sur l'anode, de limiter l'oxydation de l'électrolyte sur la cathode et d'optimiser le rendement faradique. [24][56][89]

Une durée de vie plus longue est également obtenue en n'utilisant pas toute la capacité de la batterie. Ainsi, les véhicules électriques ou hybrides fonctionnent entre 30 et 80% de SOC, lorsqu'elles sont neuves, afin d'augmenter la durée de vie. Lorsque la batterie vieillit, cette gamme de capacité est régulièrement élargie afin de garder une même autonomie. [19][94]

Ensuite, le choix du type de batterie se fera en fonction de l'objectif d'utilisation. Par exemple, la BMW i3 et la Nissan Leaf mettent l'accent sur la fiabilité du pack de batterie, en utilisant des Power Cells permettant de fournir la puissance demandée, tandis que Tesla s'intéresse plutôt à une énergie spécifique élevée, en utilisant des Energy Cells. Dans ce cas, un surdimensionnement est nécessaire afin de limiter le stress occasionné sur les packs. La multiplication des Energy Cells permet de réduire le C-rate appliqué à chaque batterie, tout en gardant une intensité globale intéressante. Le temps de fonctionnement des batteries utilisées dans le véhicules Tesla devient, dès lors, très intéressant ; mais le coût et le poids deviennent importants. De plus, ce poids supplémentaire augmente la consommation du véhicule. [24][55][95]

### 1.5.5. Sécurité

Les batteries lithium-ion sont sûres mais des défaillances peuvent survenir étant donnée la quantité énorme de batteries de ce type qui sont produites. Par exemple, en 2006, Sony a dû rappeler presque 6 millions de batteries à cause de courts-circuits dus à la présence de particules métalliques. [88]

Etant donné les risques dus à certains dysfonctionnements, au vieillissement ou à de mauvaises utilisations, ces risques pouvant amener la batterie à être dangereuse (par exemple un risque d'explosion), il est nécessaire de mettre en place des systèmes de protection afin d'éviter au maximum de telles extrémités.

Ainsi, les cellules au nickel et au lithium sont harmonisées à l'aide des standards de tests IEC 62133 [96]. Les cellules sont ainsi testées afin de présenter le moins de risques possible, que ce soit en ce qui concerne le transport, le stockage ou le fonctionnement des batteries. Ce standard a été mis en application en 2012. [97]

Avant de pouvoir être commercialisées, les batteries doivent passer les tests UN 38.3. Les tests doivent porter sur le produit fini. C'est-à-dire que si les cellules seules sont approuvées, mais qu'elles sont connectées dans une batterie, la batterie elle-même doit également satisfaire aux exigences. Ainsi ces tests vérifient différents points :

- Simulation d'altitude ;
- Test thermique ;
- Résistance face aux vibrations ;
- Résistance face aux chocs ;
- Comportement face à un court-circuit externe ;
- Résistance en cas d'impact ;
- Comportement en cas de surcharge ;
- Comportement en cas de décharge forcée.

Les cellules/batteries testées doivent passer ces tests sans provoquer de dommages. Elles ne doivent cependant pas être nécessairement fonctionnelles après, ces tests étant uniquement destinés à la sécurité d'utilisation. [98]

Un premier outil de sécurité, également le plus basique, est un fusible qui s'ouvre lorsque le courant est trop élevé. En fonction du type de fusible, celui-ci peut, soit rester ouvert de façon permanente, rendant la batterie inutilisable, soit se réinitialiser. [97]

Ensuite, un système de sécurité possible est le PTC (Positive Thermal Coefficient). Ce dispositif permet également de protéger la cellule lorsque le courant est trop élevé. Si tel est le cas, cet outil crée une résistance élevée, freinant le courant. Ce dispositif est réversible et retrouve son état premier lorsque les conditions retournent à la normale. [97] Un tel dispositif est visible dans la Figure 37.

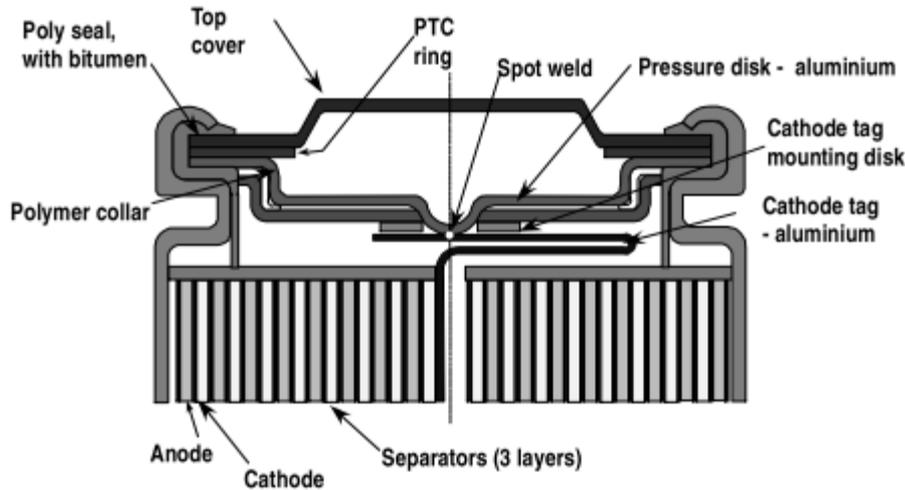


Figure 37 : Dispositif PTC côté positif d'une cellule cylindrique 18650 [99]

Le dispositif PCT consiste en un anneau composé en polyéthylène laminé comprenant un métal situé de part et d'autre. Lorsqu'une surtension survient, ce polymère, normalement conducteur, s'échauffe et devient bien plus résistif. Une fois que la surtension est terminée, le PCT refroidit et redevient conducteur. [99]

Il est également possible d'ajouter des « commutateurs à état solide ». Ceux-ci mesurent le courant et le voltage et détectent si ces valeurs sont trop élevées, ils déconnectent alors le circuit. Ce circuit de protection fonctionne en mode « tout ou rien » dans les batteries lithium-ion.

Tous ces outils permettant de protéger la cellule présentent une petite résistance ; celle-ci augmente légèrement la résistance globale de la batterie, ce qui induit une petite baisse de voltage. [97]

Toutes les cellules lithium-ion nécessitent un circuit de protection permettant d'éviter toute surtension dans les cellules connectées en série lorsque la batterie est en charge. Ce circuit a également pour objectif de déconnecter les cellules lorsque la cellule la plus faible de la batterie, du pack, chute sous son voltage de coupure. Cela permet d'éviter qu'une cellule faible ne passe en inversion de polarité. [28] Les grands packs de batteries incluent souvent un fusible permettant de déconnecter une cellule défectueuse, afin d'éviter une inversion de polarité ou la croissance de dendrites. [85]

Ainsi, ce circuit de protection empêche la cellule de dépasser 4,3 V en phase de rechargement et de ne pas chuter sous 2,2 V lors de la décharge. Notons que la décharge d'une cellule l'amène normalement jusqu'à 3,0 V ; elle peut descendre jusqu'à 2,5 V avant la coupure. Il n'est cependant pas conseillé de stocker la cellule à ce voltage car l'auto-déchargement pourrait amener la cellule sous cette tension ; cette cellule ne serait dès lors plus utilisable.

Chaque cellule de la série nécessite une gestion indépendante du voltage, chaque cellule doit rester dans ses limites de fonctionnement. De ce fait, plus il y aura de cellules et plus le circuit de protection deviendra compliqué. Il est plus complexe de contrôler le voltage dans une configuration en série que de vérifier le courant dans une configuration en parallèle.

Cependant, ces circuits ne sont efficaces qu'en cas d'abus extérieurs. Si un défaut apparaissait à l'intérieur même de la cellule, comme une contamination par des particules métalliques par exemple, le circuit de protection ne pourrait pas arrêter la réaction. C'est par exemple le rôle du séparateur de sécuriser les réactions internes à la cellule. [17]

Comme précisé ci-dessus, le séparateur de la cellule a également un rôle de protection de celle-ci. Il agit comme un fusible. Ainsi, lorsque la cellule surchauffe, les pores du séparateur se referment grâce à la fusion de celui-ci. Dans le cas d'un séparateur en polyéthylène par exemple, cette fusion se produit à 130°C. Le transport des ions est alors stoppé, éteignant la cellule par la même occasion. Sans ce système de protection, l'augmentation de la température pourrait s'emballer et ainsi mener à une explosion. [17][31]

Dans le cas des petites batteries pour GSM ou tablettes par exemple, le séparateur est composé d'une couche unique en polyéthylène. Cependant, certaines batteries industrielles nécessitent une protection améliorée. C'est pourquoi leur séparateur est composé de trois couches, comme nous pouvons le voir dans la Figure 38 ci-dessous.

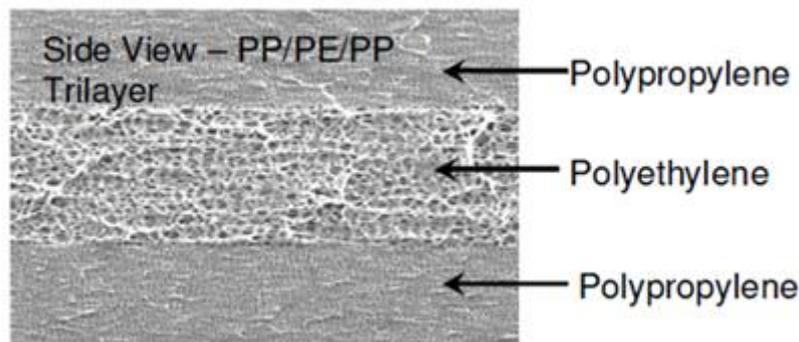


Figure 38 : Coupe d'un séparateur de cellule de batterie industrielle [31]

Le séparateur de ces cellules est composé d'une couche en polyéthylène, fondant à 130°C, entourée de deux couches en polypropylène restant solides jusqu'à 155°C. Il est également possible d'ajouter une couche de céramique : celle-ci ne fond pas et permet de fournir un niveau de sécurité supplémentaire. Afin de ne pas ajouter trop de volume inutilement à la cellule, ce séparateur devrait être le plus fin possible. Les séparateurs les plus communs ont une épaisseur de 25,4  $\mu\text{m}$  mais certains peuvent descendre jusqu'à 12  $\mu\text{m}$ . Cependant, ces séparateurs très fins peuvent présenter certains risques. Rarement, des particules métalliques peuvent entrer en contact avec des autres parties de la cellule, menant ainsi à un court-circuit. [31][88]

Le séparateur doit également présenter une disposition équilibrée des pores et permettre une humidification simple par l'électrolyte. En effet, des zones sèches créeraient des points chauds, augmentant la résistance et menant à une défaillance de la cellule. [31][88]

La majorité des batteries lithium-ion contiennent également un mécanisme de sécurité en cas de pression trop élevée dans la cellule, il s'agit du système CID (« Circuit Interrupt Device »). La conception la plus simple de ce système consiste en une membrane se déchirant lorsque la pression dépasse un certain seuil. Lorsque cette membrane se déchire, des fuites peuvent survenir ainsi qu'un dessèchement de certaines parties de la cellule. La conception la plus utilisée fonctionne à l'aide d'une valve montée sur ressort. De plus, dans certaines batteries lithium-ion, cette valve est connectée à un fusible qui ouvre le circuit lorsque la pression augmente dangereusement. [83] Cette augmentation de pression survient à cause de l'accumulation de gaz de la cellule, due à une perte d'électrolyte amorcée par un courant trop important. [100]

## 1.6. Détermination de l'état de charge de la batterie

Certaines batteries ne nécessitent pas une connaissance exacte de l'état de charge, comme par exemple dans le cas de simples piles rechargeables. Mais certaines applications nécessitent une connaissance du SOC, comme dans le cas de n'importe quel appareil électrique par exemple.

L'OCV pourrait être une caractéristique permettant d'estimer ce SOC, étant donné que lorsque l'OCV diminue, le SOC diminue également, et inversement. Cette tension n'est cependant pas un indicateur assez précis, en effet, la capacité de la batterie varie avec les conditions d'utilisation, le vieillissement, ... De ce fait, nous verrions par exemple la batterie comme étant chargée à 100%, même si sa capacité disponible n'est plus que la moitié de la capacité initiale. De plus, le voltage varie avec la température, ce qui rendrait la lecture du SOC d'autant plus imprécise.

Ainsi, l'estimation est plutôt réalisée à l'aide du « comptage de coulomb » (« coulomb counting »). Un ampère est défini comme étant le passage d'une charge électrique de 1 coulomb pendant 1 seconde, un ampère équivaut à 1 coulomb par seconde [101]. L'idée est de compter le nombre de coulombs entrant et sortant de la cellule afin d'estimer l'état de charge de celle-ci [102]. Le comptage de coulomb fonctionne bien en ce qui concerne les batteries lithium-ion car elles présentent un très bon rendement faradique ainsi qu'un auto-déchargement assez faible. [61][103][104][105]

Des systèmes améliorés, basés sur le comptage de coulomb, permettent de prendre en compte le vieillissement de la batterie ainsi que l'auto-déchargement (en fonction de la température). [102]

Les batteries utilisant de tels systèmes sont alors appelées « batteries intelligentes ». Elles présentent les avantages suivants :

- Fournit le SOC et la capacité à charge complète ;
- Enregistre l'historique de la batterie, c'est-à-dire des données telles que le nombre de cycles, l'utilisation, les erreurs, ... ;
- Configure le chargeur à l'aide d'un algorithme ;
- Protège la batterie des utilisations problématiques.

Elles présentent cependant quelques inconvénients :

- Coût : 25% plus cher ;
- Chargeur plus compliqué ;
- Calibration périodique nécessaire ;
- Indication sur le SOC mais non sur le temps de fonctionnement estimé. [103]

## 1.7. Eléments externes

Afin de pouvoir utiliser la batterie, il faut évidemment penser aux systèmes de chargement et de déchargement. Ainsi, la batterie peut être rechargée à l'aide d'un simple chargeur, dans le cas des GSM, tablettes, ... ou en la connectant à un générateur, comme des panneaux solaires par exemple.

A l'opposé, une batterie fournit un courant électrique continu. Il sera donc nécessaire, dans de nombreuses applications, de convertir ce courant continu en courant alternatif pouvant par exemple être utilisé afin de fournir de l'électricité à une habitation ou encore être réinjecté sur le réseau électrique.

### 1.7.1. Chargeur

Le chargeur d'une batterie doit assurer la durabilité et le bon fonctionnement de celle-ci. Le chargeur doit être compatible avec la batterie.

Les chargeurs sont généralement classés en fonction de leur vitesse de rechargement. Les chargeurs disponibles pour le grand public sont généralement plus simples et sont conçus pour bien fonctionner lorsqu'ils sont utilisés comme indiqué sur les notices d'utilisation. D'autres chargeurs plus sophistiqués, pour les industries, peuvent inclure certaines caractéristiques supplémentaires telles qu'une option permettant le rechargement à des températures défavorables. [21]

Certains chargeurs incluent également une fonction « réveil » ou « boost » permettant de recharger la batterie lithium-ion même si son voltage est descendu sous la tension de coupure, et qu'il n'est théoriquement plus possible de la recharger. Un chargeur classique ne sera pas capable de recharger une telle batterie mais cette fonction spéciale permet d'appliquer un courant de charge très faible qui augmente le voltage, à partir de 2,2 V et jusqu'à 2,9 V par cellule. A partir de cette valeur, le rechargement normal peut reprendre.

Par contre, si la cellule est restée trop longtemps à un voltage trop faible, des dendrites peuvent s'être développées, ce qui compromettrait la sécurité de la cellule.

Les chargeurs pour batteries lithium-ion fonctionnent en utilisant un courant et un voltage continus, ceci est noté « CC/CV » pour « Constant Current/Constant Voltage ». Après avoir atteint la limite de stockage de la batterie, celle-ci entre dans une phase de saturation. Ainsi le courant chute jusqu'à ce que la batterie ne soit plus capable d'accepter de charges supplémentaires, ce qui détermine la fin de la charge. L'étape de saturation n'est cependant pas nécessaire dans le cas des batteries lithium-ion. Il est même recommandé de ne pas recharger complètement ce type de batterie. L'étape de saturation peut donc être évitée afin de diminuer le stress occasionné à la batterie. La durée de fonctionnement sera donc réduite, par contre la durée de vie de la batterie sera améliorée. [21][22]

Il est recommandé de garder la batterie fraîche d'éviter une augmentation de 10°C lors de la recharge, si tel est le cas il est conseillé d'arrêter le rechargement. Une fois qu'une batterie lithium-ion est pleine, elle n'absorbe pas de surcharge, il n'est donc pas obligatoire de la débrancher alors du chargeur. [21]

Il existe différents types de chargeurs : allant des chargeurs lents jusqu'aux chargeurs ultra-rapides. Un chargeur lent présentera un C-rate d'environ 0,1C ; un chargeur « classique » rechargera à 0,3C à 0,5C ; un chargeur rapide à 1C et un ultra-rapide pourront monter jusqu'à 10C. C'est le secteur du véhicule électrique qui est le plus demandeur de la recharge ultra-rapide. Cela est compréhensible étant donné le temps actuel très court nécessaire pour remplir un réservoir de carburant par rapport à la longue durée de recharge d'une batterie. Précisons qu'une batterie est lente par nature, la recharge rapide présente donc un stress supplémentaire pour celle-ci. [21][58]

Toutes les batteries ne peuvent évidemment pas être rechargées ultra-rapidement, elles doivent respecter certaines conditions :

- La batterie doit avoir été conçue pour pouvoir accepter la charge ultra-rapide ;
- Elle doit être en bon état de fonctionnement ;
- La charge ultra-rapide ne représente pas la totalité du cycle de rechargement, une fois un SOC de 70% atteint, le courant de recharge diminue ;
- L'appariement des cellules doit être bon et la batterie doit présenter une résistance très faible ;
- La température ambiante doit être modérée. [58]

Les bons chargeurs vérifient les caractéristiques de la batterie avant la charge afin de réaliser le meilleur protocole de rechargement possible, en stressant la batterie au minimum. Il est cependant conseillé de n'utiliser une charge ultra-rapide que quand c'est nécessaire, afin de stresser la batterie le moins possible. Ainsi, la durée de vie est augmentée lorsque le C-rate ne dépasse pas 1C ; une valeur de 0,8C est recommandée. [58][22]

### 1.7.2. Systèmes de connexion

Lorsque la batterie est connectée à un générateur externe ou au réseau, des systèmes auxiliaires sont nécessaires. Ces générateurs externes peuvent par exemple être des panneaux solaires photovoltaïques ou encore un système de cogénération.

Il est donc souvent nécessaire de devoir intégrer un régulateur entre le générateur et la batterie, qui peut elle-même être suivie d'un onduleur permettant de transformer le courant continu, généré par la batterie, en courant alternatif, utilisable dans un bâtiment ou pouvant être envoyé sur le réseau par exemple.

Prenons un exemple classique de raccordement de batteries stationnaires, aussi appelées batteries domestiques, à un système photovoltaïque. Le schéma suivant représente un tel raccordement.

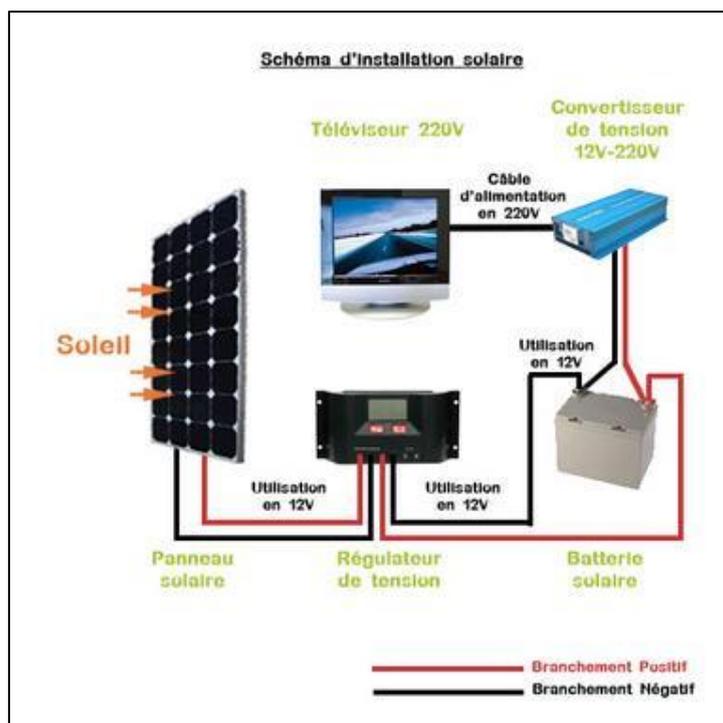


Figure 39 : Exemple de schéma de raccordement d'un système photovoltaïque connecté à des batteries [106]

Comme nous pouvons le voir dans ce schéma, le système est composé des éléments suivants :

- La surface de panneaux photovoltaïques permettant de transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique ;
- Un régulateur de tension ayant pour objectif de transformer la tension électrique générée par les panneaux en une tension utilisable par les batteries ;
- Les batteries stationnaires elles-mêmes ;
- Un convertisseur de tension, également appelé un onduleur, permettant de transformer le courant continu, utilisé par les panneaux et les batteries, en courant alternatif ;
- La charge, connectée au circuit. L'électricité stockée dans la batterie servira généralement, dans le cas de batteries domestiques, à alimenter la maison, lorsque les panneaux solaires photovoltaïques ne sont pas capables de subvenir aux besoins en énergie.

#### 1.7.2.1. Régulateur

Commençons par le système placé en amont de la batterie : le régulateur, ou contrôleur de charge.

Cet appareil a pour objectif de convertir le voltage de l'énergie produite par le panneau solaire, ou tout autre générateur électrique, en un voltage approprié au chargement des batteries. Le régulateur doit être choisi en fonction du type de batterie à charger. En effet, la batterie déterminera le voltage approprié à atteindre, une batterie au plomb ne présentant pas le même voltage qu'une batterie au lithium. L'utilisation d'un régulateur inadapté pourrait compromettre la sécurité et réduire la longévité des batteries, les algorithmes de charge ainsi que les paramètres de voltage n'étant dès lors pas adaptés à la batterie à recharger. [107]

Il existe plusieurs types de contrôleurs de charge solaire. Les contrôleurs à bas prix ne permettent pas d'utiliser les panneaux de façon optimale. En effet, ils ne permettent de produire un voltage de sortie que quand la luminosité dépasse une certaine limite, ils ne fonctionnent pas à l'aube et au crépuscule par exemple. Le régulateur s'éteint lorsque la luminosité n'est plus suffisante et se rallume lorsqu'elle retrouve un niveau acceptable.

Les meilleurs contrôleurs utilisent le principe MPPT (Multi Power Point Tracking [108]). Ce système a pour objectif d'extraire le maximum de puissance des panneaux solaires avec les conditions lumineuses présentes. Le système mesure le voltage et ajuste le courant afin d'obtenir la puissance maximale. [107] La Figure 40 illustre le fonctionnement d'un tel système.

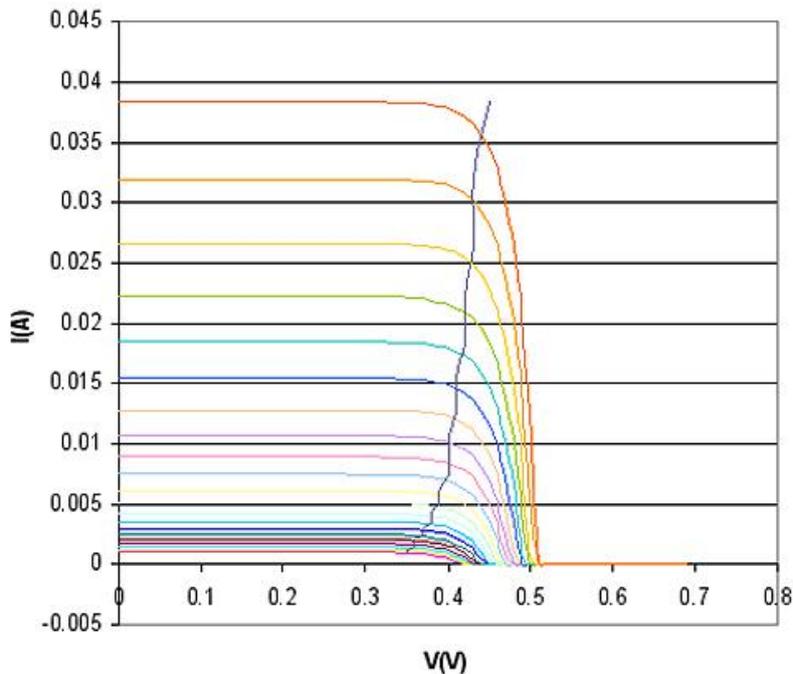


Figure 40 : Fonctionnement du contrôleur MPPT

Cette figure montre les valeurs de courant et de voltage d'un système photovoltaïque en fonction de la luminosité qu'il reçoit. L'objectif du système MPPT est de déterminer le point correspondant à la puissance maximale. Ce point est situé au niveau du coude des différentes courbes. La puissance étant égale à l'intensité multipliée par la tension. L'utilisation de ce type de régulateur permet un gain de production de 5 à 30% par rapport à un régulateur classique. [107][108]

Nous pourrions avoir tendance à vouloir directement connecter les panneaux aux batteries par exemple. Cela pourrait fonctionner mais ce n'est pas recommandé. En effet, le voltage des panneaux solaires varie en fonction de l'intensité lumineuse. Ainsi, des panneaux de 12 V pourraient monter à 40 V un jour très ensoleillé, ce qui endommagerait les batteries. Il est donc conseillé d'utiliser un système intermédiaire permettant de réguler le voltage afin de ne pas endommager les appareils connectés en aval du générateur. [107]

Ces systèmes de conversion fonctionnent donc en DC-DC, c'est-à-dire qu'ils passent d'un courant continu présentant une certaine tension à un courant continu en présentant une autre. Il est important de noter que ce type de système présente un certain rendement. En effet, il y a une perte d'énergie entre l'entrée du régulateur et la sortie. Le rendement est généralement situé entre 80 et 95%. Il varie en fonction du modèle de régulateur utilisé mais également en fonction de la puissance, de la tension en entrée et en sortie ainsi que du courant. [109]

#### 1.7.2.2. Onduleur

Afin de pouvoir utiliser correctement une batterie domestique, il est nécessaire d'utiliser un onduleur. Cet appareil est placé en aval de la batterie, entre celle-ci et une connexion au réseau par exemple. La batterie fonctionnant en courant continu, ce système a pour objectif de transformer ce courant en courant alternatif, utilisable par la plupart des appareils électriques d'une maison ou encore permettant d'être réinjecté sur le réseau électrique.

Le rôle de l'onduleur ne s'arrête cependant pas à la seule conversion du courant continu en courant alternatif, il assure également les objectifs suivants :

- Il sert de connexion directe entre des panneaux photovoltaïques et le réseau (en l'absence de batterie), il est alors utilisé pour la recherche du point de fonctionnement maximal, le MPPT ;
- Il se synchronise avec le réseau électrique afin de pouvoir injecter le courant généré. Il doit ainsi adapter la tension, la fréquence et l'impédance<sup>4</sup> ;
- Il permet de découpler automatiquement l'installation en cas de chute de tension sur le réseau ;
- Il enregistre les caractéristiques de fonctionnement du système afin d'assurer sa maintenance ainsi que son bon fonctionnement.

De plus, l'onduleur doit être choisi en fonction du système auquel il est raccordé. En effet, un onduleur fonctionne selon des plages de travail bien définies : une puissance maximale, des tensions maximales et minimales et une intensité maximum.

L'onduleur, comme le régulateur de tension, n'est pas un système parfait, il présente un rendement. A l'heure actuelle, les onduleurs permettent d'atteindre des rendements de 95%. [110]

---

<sup>4</sup> L'impédance est une notion particulière au courant alternatif, correspondant à la résistance lorsque nous parlons de courant continu. En courant alternatif, la résistance varie en fonction du type de charge qui est connectée, cette résistance est appelée « impédance ». [147]

## 1.8. Batteries domestiques

Intéressons-nous maintenant plus spécifiquement aux batteries stationnaires, ou domestiques.

Le marché des batteries stationnaires était détenu à l'origine par les batteries au plomb. Les perfectionnements apportés aux batteries lithium-ion rendent cependant ces batteries de plus en plus intéressantes, malgré le coût plus élevé à l'achat.

Ainsi, en termes de caractéristiques techniques, les batteries lithium-ion présentent beaucoup d'avantages par rapport aux batteries au plomb :

- Une énergie spécifique bien supérieure : 30 à 50 Wh/kg pour les batteries au plomb contre 90 à 190 Wh/kg (voire plus pour certaines chimies) pour les batteries lithium-ion ;
- Pas de maintenance régulière nécessaire pour les batteries lithium-ion alors que certains types de batteries au plomb en nécessitent une ;
- Une résistance au cyclage plus importante ;
- Une gamme de SOC plus importante : les batteries ne sont pas chargées et déchargées complètement afin de limiter le vieillissement. Ainsi, une batterie lithium-ion utilise environ 80% de sa gamme de SOC contre 50% pour les batteries au plomb ;
- Une meilleure résistance à la température : dégradation au-dessus de 25°C pour les batteries au plomb contre 45°C pour les lithium-ion ;
- Un rendement énergétique bien meilleur : celui-ci diminue lorsque le C-rate augmente, ainsi il chute à 60% à 1C dans le cas des batteries au plomb alors qu'une batterie lithium-ion garde un rendement de 92% au même C-rate ;
- Un voltage plus élevé : 3,7 V contre 2,0 V ;
- Une toxicité plus faible : les batteries au plomb sont très toxiques et ont un grand impact environnemental comparé aux batteries lithium-ion, bien que ces dernières ne sont pas parfaites : elles présentent également un certain impact dû notamment à l'extraction des différents minerais nécessaires à leur fabrication. [26][65][111][112][105]

Le principal inconvénient des batteries lithium-ion est donc le coût : ils ont cependant tendance à diminuer. A l'heure actuelle, le coût s'élève de 660 à 1200€/kWh. Ce prix devrait chuter à 200€/kWh d'ici 2020. [41]

Ces batteries présentent également un risque à l'emballage thermique en cas de dysfonctionnement, plus élevé. Cela est notamment dû à la quantité d'énergie plus importante stockée dans un plus petit volume. [112]

De plus, les utilisateurs des batteries au plomb se plaignent généralement de leur courte espérance de vie, notamment due à un cyclage excessif. Ce type de batterie a un nombre de cycles limité et se détériore lorsqu'elle n'est pas périodiquement chargée complètement. De plus, une batterie au plomb se recharge pendant une longue période à cause de la phase de saturation de la batterie. Les systèmes photovoltaïques ne sont pas capables de délivrer de l'énergie pendant une durée assez longue.

Les batteries lithium-ion permettent de limiter ces phénomènes étant donnée leur plus grande résistance face aux cycles et le fait qu'elles n'ont pas besoin d'être rechargées complètement. Une batterie lithium-ion reste cependant 2 à 3 fois plus chère à l'investissement qu'une batterie au plomb. Mais en fonction de l'usage fait, le coût global d'une batterie lithium-ion peut devenir plus intéressant. [82][112]

De plus, en règle générale, les batteries sont remplacées lorsque leur capacité résiduelle chute sous les 80%, à cause de l'utilisation et du vieillissement. Dans le cas des batteries stationnaires, ce n'est pas nécessairement le cas. En effet, la batterie est toujours utilisable sous ces 80% de capacité, elle pourra donc toujours être utilisée et ce sera à l'utilisateur de décider si cette capacité reste suffisante. Il pourra ainsi décider de continuer à l'utiliser telle quelle, de la changer, ou même d'ajouter des batteries supplémentaires afin de compenser cette perte de capacité ; ce qui représente un coût inférieur par rapport au remplacement pur et simple de la batterie. [41]

En ce qui concerne les chimies utilisées dans les batteries stationnaires, celles-ci ne sont pas les mêmes que celles des batteries utilisées dans les véhicules électriques. En effet, ceux-ci utilisent majoritairement les chimies NCA ou NMC pour leur puissance et densité énergétiques favorables. Les batteries stationnaires n'ont cependant pas nécessairement de limites de taille ou de poids et la densité énergétique n'est donc pas un critère décisif. Dans ce cas, les paramètres les plus importants sont la durée de vie et la sécurité. Ainsi, la chimie LFP est avantageuse grâce à longue durée de vie et sa bonne stabilité face aux cycles répétés. Ses standards de sécurité sont également très élevés. [41]

A l'heure actuelle, nous entendons beaucoup parler de la batterie lithium-ion « Tesla Powerwall ». La première version de cette batterie était proposée en deux configurations : une proposant une capacité de 7 kWh et l'autre de 10 kWh. Ces packs contiennent le même nombre de cellules ; la batterie de 7 kWh utilise une chimie NMC, plus robuste, tandis que la version 10 kWh utilise la NCA, offrant une énergie spécifique supérieure et un temps de recharge court. Nous remarquons que Tesla utilise les mêmes chimies, que ce soit dans ses véhicules électriques ou dans ses batteries stationnaires. La NMC permet de délivrer un nombre de cycles élevé à un C-rate plus faible. Ces deux chimies de batteries sont des Energy Cells dont la puissance est limitée à 2 kW. Cette puissance ne permet pas d'alimenter tous les appareils électriques, certains nécessitant une puissance supérieure. C'est donc le réseau électrique qui prend le relais lorsque la batterie n'est pas suffisante. Cette batterie permet néanmoins de réduire la facture énergétique d'1/3 à 1/2. [82]

Tesla propose maintenant une batterie dite « AC » : la Tesla Powerwall 2 AC. Le « AC » est là pour spécifier « courant alternatif ». En réalité, la batterie elle-même ne produit pas un courant alternatif, cela serait impossible. Cela signifie simplement que la batterie intègre un onduleur permettant de transformer le courant continu généré par la batterie, en courant alternatif utilisable sur le réseau. Nous pouvons voir cet onduleur dans la Figure 41 ci-dessous.

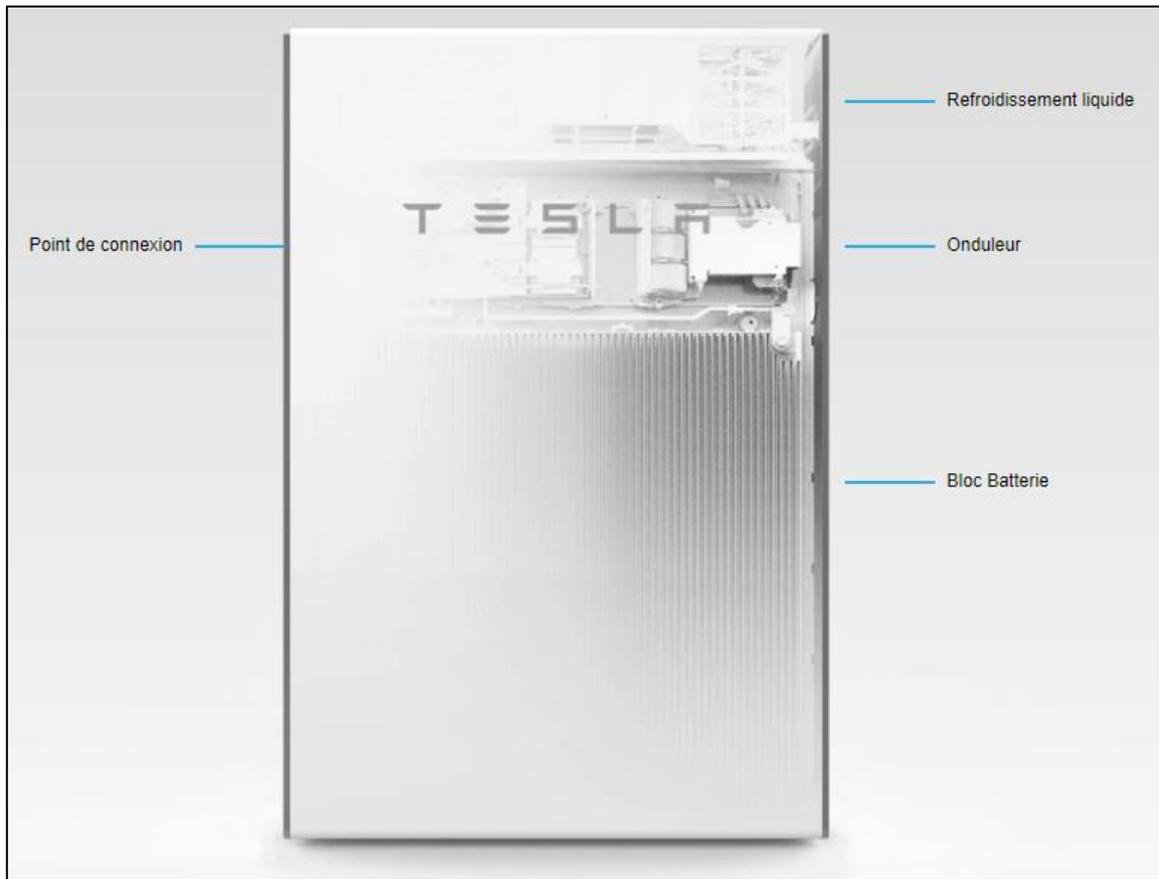


Figure 41 : Vue intérieure de la batterie Tesla Powerwall 2 AC [113]

Cette batterie est proposée avec une capacité de 13,5 kWh. Elle présente une puissance supérieure par rapport à la version précédente : 5 kW en charge et décharge mais elle peut monter à 7 kW pendant 10 secondes en décharge uniquement. Cette batterie est garantie pendant 10 ans. [25]

D'autres fabricants proposent des batteries domestiques, nous en parlerons davantage dans le point 1.11.

## 1.9. Utilisation des batteries

Il existe beaucoup d'utilisations possibles des systèmes de stockage d'énergie par batterie. Nous parlerons tout d'abord d'utilisations plus classiques : des batteries connectées au réseau ou hors réseau ; et ensuite d'autres applications plus spécifiques : le commerce de l'énergie ainsi que le principe « Vehicule to Grid ».

### 1.9.1. Utilisations hors réseau ou micro-réseaux

Cette utilisation des batteries en micro-réseaux peut également être appelée « ilotage ». Les batteries sont utilisées afin de permettre au micro-réseau d'être autonome en énergie. Ce réseau n'est donc pas raccordé au réseau électrique global.

Ce réseau utilise dès lors des systèmes de génération d'énergie indépendants, tels que des panneaux photovoltaïques ou de l'énergie éolienne par exemple. Ces systèmes ne pouvant pas générer de l'électricité en continu, il est indispensable de la stocker afin d'en disposer lorsque les générateurs ne fonctionnent pas. C'est-à-dire la nuit dans le cas des panneaux photovoltaïques, ou lorsqu'il n'y a pas de vent dans le cas de l'éolien.

Certains économistes prédisent que ces utilisations hors-réseau vont rapidement se développer grâce à l'utilisation des batteries. Les pays qui s'intéressent à l'ilotage sont par exemple l'Allemagne ou le Japon qui, en effet, s'intéressent beaucoup aux questions environnementales. De plus, cela serait également intéressant dans certaines zones d'Afrique où le réseau électrique ne permet pas de supporter la demande : l'utilisation de panneaux et de batteries est dès lors une solution possible. [41][82]

### 1.9.2. Utilisations sur le réseau

Commençons par préciser que le réseau électrique européen est divisé en quatre niveaux de voltage :

- Le réseau extra haute tension : celui-ci présente une tension de 380 kV ;
- Le réseau haute tension : tension de 110 kV ;
- Le réseau moyenne tension : tension comprise entre 10 et 30 kV ;
- Le réseau basse tension : tension comprise entre 230 et 400 V ; c'est sur ce réseau que sont connectés la majorité des systèmes de stockage d'énergie électrique, utilisant des batteries.

[41][114]

Les batteries stationnaires ont pour objectif initial de permettre de fournir de l'énergie en cas de panne de courant. [115] Mais avec l'évolution des systèmes de stockage, d'autres utilisations possibles ont vu le jour.

Elles peuvent ainsi être utilisées afin de compenser le réseau électrique lorsque celui-ci est saturé. La batterie agit alors comme un tampon qui permet de réduire le stress sur le réseau. Dans ce cas, il est important de bien gérer la batterie, celle-ci doit en effet se charger en dehors des périodes de pics de consommation afin de soulager le réseau. Les batteries peuvent donc soit être chargées directement à partir du réseau, en dehors des pics de consommation, soit à l'aide de panneaux photovoltaïques par exemple. Les panneaux permettront ainsi également de réduire le stress sur le réseau électrique. [82][115]

A l'opposé, lorsqu'un système photovoltaïque est directement connecté au réseau, sans batteries donc, l'énergie non utilisée est renvoyée sur celui-ci et permet de faire tourner le compteur électrique à l'envers. Cela peut néanmoins poser des problèmes : la multiplication de petits producteurs renvoyant leur électricité sur le réseau risque de surcharger celui-ci, rendant le système instable. Ces instabilités peuvent se manifester par une fluctuation du voltage risquant de surcharger le réseau et ainsi mener à des pannes. Il est donc nécessaire de respecter certaines limites de puissance et de voltage afin de ne pas endommager le réseau électrique. Ces systèmes de stockage permettent donc de stabiliser le réseau électrique, en réduisant les pics de puissance. [41][82]

Les batteries domestiques ont un très grand intérêt dans la réduction de la consommation électrique des ménages. Si elles sont connectées à un générateur utilisant des énergies renouvelables, des panneaux photovoltaïques par exemple, elles permettent de stocker de l'énergie lorsque le générateur produit plus que ce qui est utilisable, et de la récupérer lorsque ces mêmes générateurs ne permettent plus de fournir la puissance nécessaire : la nuit par exemple dans le cas des panneaux photovoltaïques. Le générateur peut également être une éolienne ; dans ce cas, la batterie permettra de compenser les périodes d'absence de vent. Les batteries permettent donc d'augmenter l'autosuffisance des foyers et ainsi d'économiser de l'argent sur l'achat de l'électricité au réseau. [41][82]

Une utilisation efficace de la combinaison entre des panneaux solaires photovoltaïques et un système de stockage d'énergie par batteries peut par exemple être celle présentée dans la Figure 42 ci-dessous.

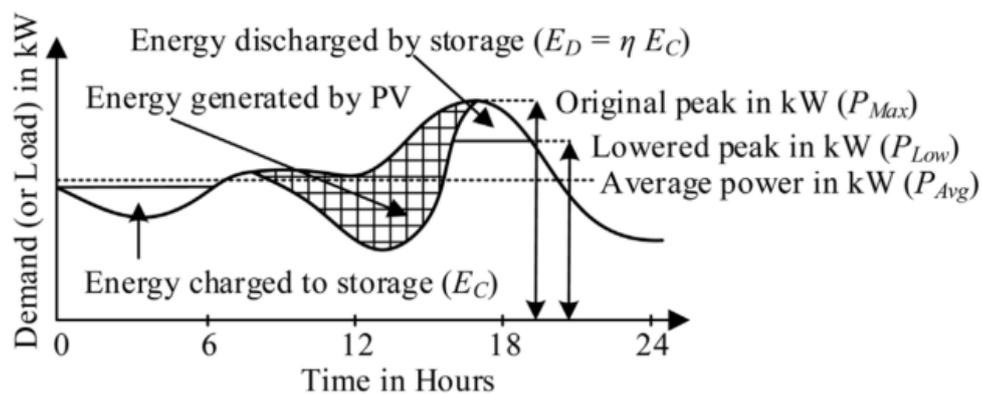


Figure 42 : Exemple de gestion permettant de réduire le pic de charge [116]

Comme nous pouvons le voir dans ce graphique, en été, le pic de charge apparaît généralement en fin d'après-midi, lorsque la production des panneaux photovoltaïques commence à chuter. La gestion vise donc à charger les batteries pendant la nuit, lorsque l'énergie est disponible sur le réseau, afin de l'utiliser pendant le pic de charge, lorsque les panneaux ne sont plus capables de fournir la puissance nécessaire et que le réseau est saturé. Cela permet donc de réduire le pic de charge. Les batteries sont donc chargées la nuit, lorsque le coût de l'électricité est plus faible, et déchargées pendant le pic, lorsque le coût est élevé. [116]

Tous ces principes d'utilisation des batteries, afin de soulager le réseau électrique notamment, s'intègrent dans l'optique des « Smart Grids » ou « réseaux intelligents ». Le but de ces réseaux est d'apporter une meilleure coordination entre production, distribution et consommation.

Cette coordination serait atteinte en associant l'infrastructure électrique actuelle avec des technologies numériques permettant de recevoir et d'analyser les données de production, de transport, de distribution ainsi que de consommation en temps réel. Afin de pouvoir anticiper les besoins du réseau et ainsi éviter le stress occasionné sur celui-ci. Le fonctionnement des Smart Grids se ferait autour de quatre axes principaux :

- Le contrôle des flux d'énergie en temps réel : des capteurs, appelés « Smart Meters », seraient installés à tous les niveaux du réseau afin de récupérer en temps réel toutes les données de production, de consommation, ... L'énergie pourrait alors être réorientée en fonction de la demande et les prix seraient adaptés en temps réel en fonction de la consommation ;
- La coordination entre les réseaux : le réseau est divisé entre les réseaux de transport qui lient les producteurs aux zones de consommation et les réseaux de distribution qui acheminent alors l'électricité jusqu'aux consommateurs finaux. Les Smart Grids permettraient ainsi de favoriser la coordination entre ces réseaux ;
- L'intégration des énergies renouvelables : les Smart Grids seraient capables de prévoir la production générée par les différents systèmes de production renouvelables tels que l'éolien et le photovoltaïque par exemple. Ces systèmes étant dépendant des conditions météorologiques, ils pourraient ainsi être mieux gérés afin de réguler plus efficacement le réseau électrique ;
- La responsabilisation des consommateurs : l'installation de compteurs communicants permettrait de fournir automatiquement aux consommateurs des informations leur permettant de mieux réguler leur consommation. Des informations telles que l'évolution des prix de l'électricité, les pics de consommation, ... [117]

Les Smart Grids permettraient ainsi d'améliorer la sécurité sur les réseaux, en diminuant le risque de pannes. Ils équilibreraient l'offre et la demande, permettant ainsi de réduire le nombre de producteurs et incorporant plus efficacement les systèmes de stockage d'énergie.

L'investissement nécessaire à la mise en place de tels réseaux intelligents restent néanmoins important. [117][118]

### 1.9.3. Commerce de l'énergie

L'utilisation de systèmes de stockage d'énergie électrique peut également être perçue d'un point de vue purement financier.

En effet, l'idée serait d'installer des systèmes de batteries ayant pour objectif d'acheter de l'électricité sur le réseau lorsque le prix est bas, pour ensuite la revendre lorsque le prix est plus élevé. Les batteries peuvent également être utilisées conjointement avec des panneaux photovoltaïques afin de stocker l'énergie produite par ces panneaux lorsque le prix du marché est bas et la revendre lorsque le prix remonte.

La mise en place de ce système n'est cependant pas nécessairement une chose aisée. En effet, la durée de vie du stockage étant fonction notamment de la profondeur de décharge, il est nécessaire de trouver le compromis entre une bonne gestion du marché, afin de maximiser les profits, et une utilisation du système générant le moins de stress possible sur celui-ci. Ainsi, le système de contrôle estime la quantité d'énergie qui peut être échangée à chaque intervalle de temps, tout en prenant en compte l'état de vieillissement du stockage. Le système tente donc de répartir équitablement la charge sur les différentes batteries disponibles afin d'obtenir la longévité du système la plus importante possible.

Le rendement énergétique doit également être pris en compte afin d'optimiser au mieux le fonctionnement du système.

La rentabilité d'un tel système dépend de la taille de celui-ci ; un petit système sera plus rentable. Cela s'explique par le fait que le coût d'investissement supplémentaire d'un système plus conséquent ne permet pas d'augmenter suffisamment les bénéfices réalisés ; l'investissement évité est supérieur aux revenus de la revente, la capacité d'un stockage plus petit étant mieux utilisée.

A l'heure actuelle, la rentabilité d'un tel système, basé uniquement sur les prix du marché de l'électricité, est encore trop limitée. Cependant, avec l'évolution des technologies et la baisse des prix des batteries lithium-ion, la rentabilité devrait augmenter dans les prochaines années. [65][119]

#### 1.9.4. Vehicle to grid

Le principe « vehicle to grid » (V2G), que nous pourrions traduire par « véhicule vers le réseau », a pour objectif d'utiliser la batterie des voitures électriques comme une sorte de batterie stationnaire pouvant soulager le réseau.

A l'heure actuelle, le marché de la voiture s'oriente progressivement vers les véhicules électriques. De plus, nos voitures passent la majeure partie de leur vie dans un garage, soit environ 95% de leur temps. L'objectif de V2G serait donc de pouvoir utiliser les batteries contenues dans ces véhicules lorsqu'ils sont en stationnement, tout en assurant une gestion permettant de faire en sorte qu'ils soient toujours rechargés lorsque nous avons besoin de les utiliser.

Ainsi, lorsque le véhicule serait stationné, il pourrait aider le réseau, de la même manière qu'une batterie stationnaire, en se rechargeant pendant les périodes creuses, donc de faible consommation, et en se déchargeant pendant les pics de charge, lorsque le réseau est surchargé. Cela permettrait donc de soulager le réseau électrique, d'avoir certains avantages des batteries stationnaires, sans pour autant devoir investir là-dedans.

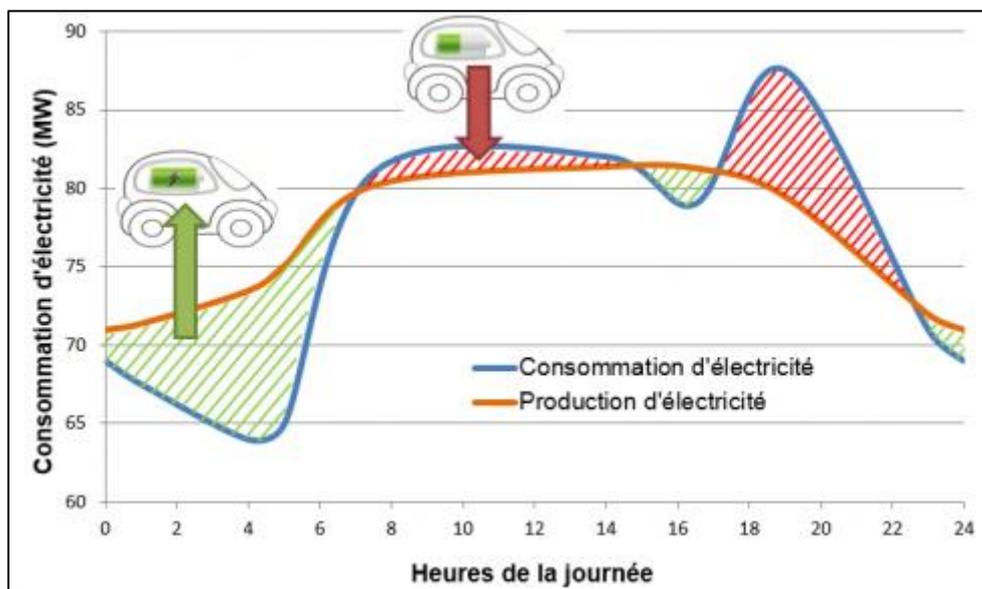


Figure 43 : Schéma de principe du "Vehicle to Grid" [120]

Cela permettrait également de participer à la gestion intelligente de l'énergie et entre donc tout à fait dans la vision des Smart Grids. [120][121]

## 1.10. Méthodes de modélisation des batteries

Il existe beaucoup de méthodes différentes permettant de modéliser le comportement des batteries. Cette modélisation peut devenir très complexe en fonction des besoins de l'utilisateur.

Ainsi, certaines méthodes ont pour but de modéliser jusqu'aux réactions se produisant à l'intérieur même de la cellule, afin de connaître les concentrations en composés à n'importe quel moment de la réaction.

Quoi qu'il en soit, la modélisation des batteries est une tâche très importante dans leur développement, ou encore dans certaines applications nécessitant une modélisation de l'état de la batterie en temps réel par exemple. [62]

Cette partie a pour objectif de donner une vue globale de différentes méthodes de modélisation de batteries lithium-ion existantes.

### 1.10.1. Méthode mathématique

Pour commencer, la méthode de modélisation la plus simple est ce qui est appelé méthode mathématique qui peut être soit analytique soit stochastique. [62]

#### 1.10.1.1. Analytique

Une première méthode de modélisation possible est donc l'utilisation d'un modèle mathématique, dit analytique.

Dans ce cas, le modèle utilise quelques équations mathématiques afin de modéliser les propriétés de la batterie.

Un exemple de modèle de ce type est le modèle KiBaM (Kinetic Battery Model [122]). Dans ce cas, la capacité de la batterie est modélisée comme étant constituée de deux réservoirs contenant un liquide comme nous pouvons le voir dans la Figure 44.

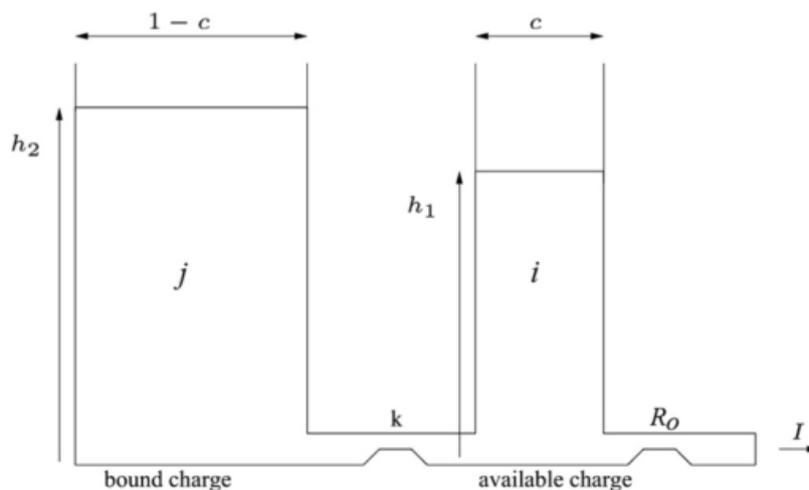


Figure 44 : Schéma d'un exemple de modèle mathématique analytique [62]

Le premier réservoir (« available charge ») correspond à la capacité disponible. Ce réservoir est directement connecté à la charge, aux appareils prenant l'énergie de la batterie. Le second réservoir (« bound charge ») est le réservoir de charge liée, celui-ci permet de fournir de l'énergie au premier réservoir. [62]

Dans cette figure, le « c » correspond à un ratio de l'énergie entre les deux réservoirs ; le paramètre  $h_1$  correspond au SOC de la batterie et  $R_0$  correspond à la résistance interne de la batterie. Les deux réservoirs sont connectés entre eux à l'aide d'une vanne « k ».

Lorsque le courant de charge « I » est extrait de la batterie, l'état de charge «  $h_1$  » diminue et crée une différence entre «  $h_1$  » et «  $h_2$  ». Sur base du principe des vases communicants, un flux apparaît entre les deux réservoirs jusqu'à ce que les deux paramètres « h » redeviennent égaux. [123]

Un tel modèle fonctionne donc assez simplement en intégrant l'évolution du volume de liquide, équivalant à la capacité de la batterie, au cours du temps. Ce type de modèle permet également de modéliser, de manière simplifiée, le comportement du voltage, à l'aide des différents paramètres pris en compte et notamment de la résistance. Il est par contre limité en ce qui concerne les phénomènes secondaires se produisant dans la cellule électrochimique.

#### 1.10.1.2. Stochastique

Un second type de modèle mathématique pouvant être utilisé est le modèle stochastique.

Un modèle mathématique stochastique fonctionne sur le principe de la chaîne de Markov. Ce principe permet de prédire l'étape suivante en connaissant uniquement l'état précédent du système, et ce en fonction de probabilités.

Ce modèle est également basé sur deux réservoirs se vidant et se remplissant en fonction du courant extrait ou injecté dans la batterie. Il utilise donc les mêmes paramètres que le modèle analytique : la contenance des deux réservoirs, et ajoute un paramètre : le temps depuis le moment où du courant a été extrait de la batterie.

Dans le cadre du processus de Markov, le fait que la batterie passe d'un état à un autre est appelé une « transition », lorsque la batterie se trouve dans un certain état, chaque état voisin de l'état présent a une certaine probabilité de se produire.

Ainsi, en fonction des conditions rencontrées dans l'état dans lequel la batterie se trouve au temps « t », la chaîne de Markov permettra de décider, à l'aide de probabilités, dans quel état se trouvera la batterie au temps « t+1 ». [62]

#### 1.10.2. Méthode à circuit équivalent

Les cellules peuvent également être modélisées à l'aide des modèles à circuit électrique équivalent. Il s'agit d'une approche dont la complexité se trouve à mi-chemin entre les modèles mathématiques (présentés précédemment) et les modèles électrochimiques (qui seront décrits au point suivant). Ce modèle permet donc de fournir une précision suffisante sans pour autant être inutilement compliqué.

Ce type de modèle est le plus utilisé et peut servir pour beaucoup d'applications différentes et pour des types de batteries variés.

Les modèles à circuit équivalent sont construits en assemblant des résistances, des capacités électriques et des sources de voltage dans un circuit. [8][62]

Le modèle de ce type le plus simple est le modèle à résistance interne. Ce modèle est constitué d'une source de voltage et d'une résistance comme nous pouvons le voir dans la Figure 45.

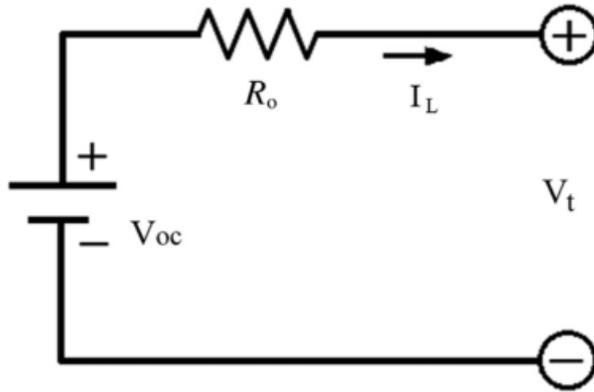


Figure 45 : Schéma du modèle à résistance interne [62]

Dans ce modèle, «  $V_{OC}$  » correspond au voltage à circuit ouvert ; «  $R_o$  » à la résistance ; «  $V_t$  » au voltage de la batterie et «  $I_L$  » à l'intensité du courant électrique. La précision de ce modèle peut être améliorée avec l'ajout d'une capacité électrique en parallèle de la résistance (formant un réseau « RC ») afin de prendre en compte les caractéristiques de polarisation de la batterie. Les modèles utilisant cette capacité supplémentaire sont connus sous le nom de modèles « Thevenin ». La Figure 46 propose un schéma de ce type de modèle.

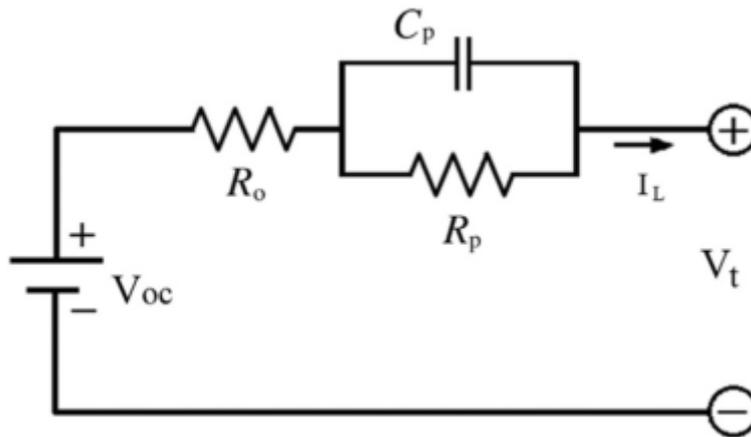


Figure 46 : Schéma d'un modèle Thevenin [62]

Dans ce cas, «  $C_p$  » et «  $R_p$  » sont respectivement la capacité de polarisation et la résistance de polarisation.

L'équation du modèle Thevenin prend alors la forme suivante :

Équation 3 : Equation du modèle électrique de Thevenin [62]

$$V_t(s) = V_{OC}(s) - I_L(s) \times \left( \frac{R_p}{1 + R_p C_p s} \right)$$

Dans laquelle «  $s$  » correspond à l'état de charge de la batterie.

La précision d'un tel modèle peut être améliorée grâce à l'ajout de réseaux « RC ». Cependant, cela augmente également la complexité du modèle, augmentant le temps de calcul nécessaire à la résolution de celui-ci. Un compromis est donc nécessaire entre complexité et précision. [61][62]

Ce type de modèle peut cependant être trop complexe pour certaines utilisations, par exemple pour les véhicules électriques, qui nécessitent une modélisation des caractéristiques de la batterie en temps réel. Des modèles d'« ordre réduit » peuvent alors être utilisés afin de soulager les efforts de calculs nécessaires. La précision sera bien évidemment réduite par rapport au modèle complet.

Il est également important de prendre en compte certaines caractéristiques qui peuvent modifier le comportement de la batterie telles que le SOC, la température, l'âge de la batterie, ... [62][124]

L'état de charge est un paramètre qui modifie significativement le comportement de la batterie. Chaque paramètre doit donc être considéré en fonction de celui-ci. Dans une moindre mesure, il en va de même pour la température, le C-rate et l'âge de la batterie. L'influence sur le comportement de la batterie de tous ces paramètres est généralement prise en compte à l'aide de tableaux de données ou d'équations polynomiales. [125][126]

Dans un tel modèle, les variables les plus importantes à prendre en compte sont donc :

- L'état de charge de la batterie ;
- La température de l'environnement dans laquelle elle est placée ;
- Le C-rate ;
- Le vieillissement de la batterie.

Ce type de modèle est utilisé dans beaucoup d'applications utilisant un calcul en temps réel des caractéristiques de la batterie, grâce à la relative simplicité, vitesse et précision de ce type de modèle.

Une fois que la structure du modèle à circuit équivalent est choisie, il est nécessaire de déterminer les paramètres du modèle. Pour ce faire, la méthode « Electrochemical Impedance Spectroscopy » (EIS) est la plus utilisée. Cette méthode a pour objectif de lier le modèle théorique à des données réelles. Pour ce faire, un courant alternatif est appliqué à la cellule, le courant est alors mesuré afin de calculer l'impédance à une certaine fréquence de courant alternatif. L'impédance électrochimique étant la réponse de la cellule électrochimique lorsqu'un potentiel électrique lui est appliqué. La fréquence varie alors petit à petit afin de mesurer l'impédance correspondante. Ces mesures doivent être réalisées en régime stationnaire, c'est-à-dire en gardant constants certains paramètres tels que le SOC, la température, ... Le test peut être recommencé en faisant varier ces paramètres, afin de prendre en compte leur influence. [61][62]

Ainsi, dans beaucoup d'applications, la connaissance de caractéristiques internes à la batterie est superflue par rapport à l'importance de modéliser le SOC par exemple. C'est pourquoi ce type de modèle présente un intérêt pour de nombreuses applications. [62]

### 1.10.3. Méthode électrochimique

Un dernier type de modèle utilisable est le modèle électrochimique. Ce type de modèle utilise une approche en se basant sur la physique.

Les modèles électrochimiques sont beaucoup plus complexes et permettent de fournir des informations très complètes sur les caractéristiques internes de la batterie, sur la dynamique des réactions s'y produisant.

Un tel modèle se base sur la résolution d'équations à dérivées partielles. Toutes ces équations permettent d'expliquer comment le potentiel électrique produit par la cellule est affecté par les différentes réactions électrochimiques prenant place à l'intérieur de celle-ci.

Un exemple de modèle de ce type est la loi de diffusion de Fick. Ce modèle est utilisé afin d'obtenir les concentrations en éléments actifs à chaque électrode ainsi que dans l'électrolyte de la batterie. Une équation est disponible afin de décrire le comportement des éléments aux différents sites actifs : le comportement des charges dans l'électrolyte ainsi qu'en phase solide ; et le comportement des espèces chimiques dans l'électrolyte et dans la phase solide également. [127]

Les modèles électrochimiques sont sûrement les plus précis de tous les modèles étant donné qu'ils permettent d'expliquer les comportements internes à la cellule à l'échelle microscopique à l'aide des réactions électrochimiques s'y produisant. Ces modèles peuvent, de ce fait, être utilisés afin d'évaluer et de valider d'autres modèles moins précis, ou, en tout cas, ne modélisant pas les comportements internes de la cellule aussi précisément.

Un autre avantage important de ce type de modèle est qu'il permet de modéliser les états internes, qui ne sont pas mesurables en pratique. En effet, des mesures sur des cellules réelles ne peuvent que nous informer sur des caractéristiques « externes », mesurables, et non sur des caractéristiques internes telles que les concentrations en éléments actifs par exemple.

Ces modèles électrochimiques peuvent également être couplés à des équations thermiques. Ces modèles sont donc très détaillés et ne mettent en place aucune simplification. Cette complexité rend donc ces modèles très compliqués à résoudre ; il faut, pour ce faire, utiliser des outils de calculs très puissants. [62]

Ce type de modèle étant très complexe, il est principalement utilisé pour l'évaluation d'autres modèles ou le développement de nouvelles cellules. Il n'est pas utilisé dans le cadre de simulations plus « simples » telles que les batteries contenues dans les véhicules électriques ou les batteries stationnaires.

### 1.11. Etude de marché

Dans cette partie, une petite étude de marché a été réalisée afin de se rendre compte des batteries domestiques au lithium-ion actuellement disponibles à la vente. Le Tableau 17 reprend certaines caractéristiques de batteries lithium-ion de différentes marques.

Il existe beaucoup de marques proposant des batteries lithium-ion domestiques, celles qui ont été comparées ici sont les suivantes : Telsa, Mercedes-Benz, Fronius, LG Chem, Hoppecke, Victron et Enphase. Chacune de ces marques propose un ou plusieurs modèles présentant des capacités différentes. La marque « BatterX » propose également des batteries lithium-ion domestiques utilisant la chimie LFP, cependant très peu d'informations sont disponibles à leur sujet [128]. Il est très probable que d'autres marques proposent également de telles batteries, les recherches réalisées ont cependant été limitées aux marques et modèles proposés ici.

Le tableau compare les différents modèles sur un certain nombre de paramètres techniques et économiques tels que la capacité, la puissance, le voltage ou encore le coût de tels systèmes.

Dans le cadre de ce point, une partie importante était la comparaison du coût des différents systèmes. Pour chaque modèle, le coût au kWh de capacité a été calculé. Ce calcul a été effectué sur base de la capacité utilisable lorsqu'elle était disponible. Une colonne « différence de prix » permet alors de comparer le coût au kWh des différents modèles en fonction du coût au kWh de la batterie Tesla Powerwall, la batterie stationnaire dont nous entendons le plus parler à l'heure actuelle.

Comme nous pouvons le voir dans ce tableau comparatif, c'est la batterie proposée par Tesla qui présente le coût au kWh le plus faible, avec une valeur de 510 €/kWh. LG Chem propose des batteries qui se situent dans la même gamme de prix avec ses batteries RESU10 et RESU10H. Le coût est cependant très variable ; ainsi certaines marques proposent des batteries à un coût au kWh doublé voire triplé par rapport à la batterie Tesla. Le coût d'une batterie domestiques lithium-ion varie donc de 500 à 1500 €/kWh environ.

En ce qui concerne le coût au kWh, nous pouvons observer que celui-ci diminue lorsque la capacité de la batterie augmente. Cela paraît logique, les coûts de fabrication diminuant lorsque la batterie est plus grosse.

Précisons également que seules les marques Tesla et Enphase proposent une batterie intégrant un onduleur, ces batteries sont donc dites « AC » (courant alternatif). L'ajout d'un onduleur augmente dès lors au coût d'investissement. Le prix d'un onduleur varie de 1000 à 1500€. Précisons cependant que les batteries au plomb sont, quant à elles plutôt disponibles, entre 200 à 300 €/kWh. [129]

Tableau 17 : Comparatif des batteries lithium-ion disponibles sur le marché [25][113][129][130][131][132][133][134][135][136][137][138][139]

Marque	Modèle	Chimie	Capacité (kWh)	Capacité utilisable (kWh)	Part utilisable (%)	Puissance (kW)	Voltage (V)	Nbre cycles	Température (°C)	Rendement énergétique (%)	Prix (€)	€/kWh	Différence de prix (%)	Garantie (ans)	Durée de vie (ans)
<b>Tesla</b>	Powerwall 2 AC	-	14	13,5	96%	5 à 7	50	-	-20 à 50	>90	6880	510	0%	10	-
<b>Mercedes</b>	Energy Storage Home	NMC	2,5	2,3	92%	1,5	39,7 à 54	8000	6 à 44	97	2199	956	88%	10	-
	Energy Storage Home	NMC	5	4,6	92%	2,5	39,7 à 55	8000	6 à 44	97	3899	848	66%	10	-
	Energy Storage Home	NMC	7,5	6,9	92%	3,75	39,7 à 56	8000	6 à 44	97	4990	723	42%	10	-
	Energy Storage Home	NMC	10	9,2	92%	4,6	39,7 à 57	8000	6 à 44	97	6390	695	36%	10	-
	Energy Storage Home	NMC	12,5	11,5	92%	4,6	39,7 à 58	8000	6 à 44	97	7949	691	36%	10	-
	Energy Storage Home	NMC	15	13,8	92%	4,6	39,7 à 59	8000	6 à 44	97	9360	678	33%	10	-
	Energy Storage Home	NMC	17,5	15,6	89%	4,6	39,7 à 60	8000	6 à 44	97	10770	690	35%	10	-
	Energy Storage Home	NMC	20	18	90%	4,6	39,7 à 61	8000	6 à 44	97	12090	672	32%	10	-
<b>Fronius</b>	Solar Battery	LFP	4,5	3,6	80%	2,4	120 à 170	8000	5 à 35	-	5730	1592	212%	-	>20
	Solar Battery	LFP	6	4,8	80%	3,2	160 à 230	8000	5 à 35	-	6784	1413	177%	-	>20
	Solar Battery	LFP	7,5	6	80%	4	200 à 290	8000	5 à 35	-	7840	1307	156%	-	>20
	Solar Battery	LFP	9	7,2	80%	4,8	240 à 345	8000	5 à 35	-	8894	1235	142%	-	>20
	Solar Battery	LFP	10,5	8,4	80%	5,6	280 à 400	8000	5 à 35	-	9949	1184	132%	-	>20
	Solar Battery	LFP	12	9,6	80%	6,4	320 à 460	8000	5 à 35	-	10999	1146	125%	-	>20
<b>LG Chem</b>	RESU3.3	LCO	3,3	2,9	88%	3	42 à 58,8	6000	15 à 30	95	2550	879	73%	10	25
	RESU6.5	LCO	6,5	5,9	91%	4,2	42 à 58,8	6000	15 à 30	95	3890	659	29%	10	25
	RESU10	LCO	9,8	8,8	90%	5	42 à 58,8	6000	15 à 30	95	5179	589	15%	10	25
	RESU7H	LCO	7	6,6	94%	3,5	350 à 450	6000	15 à 30	95	4790	726	42%	10	25
	RESU10H	LCO	9,8	9,3	95%	5	350 à 450 ou 385 à 550	6000	15 à 30	95	5399	581	14%	10	25

Marque	Modèle	Chimie	Capacité (kWh)	Capacité utilisable (kWh)	Part utilisable (%)	Puissance (kW)	Voltage (V)	Nbre cycles	Température (°C)	Rendement énergétique (%)	Prix (€)	€/kWh	Différence de prix (%)	Garantie (ans)	Durée de vie (ans)
<b>Hoppecke</b>	sun   Powerpack premium Lithium 5kWh	LFP	5	4	80%	5 à 7	51,2	7000	0 à 45	98	5299	1060	108%	2	20
	sun   Powerpack premium Lithium 7,5kWh	LFP	7,5	6	80%	5 à 7	51,2	7000	0 à 45	98	7699	1027	101%	2	20
	sun   Powerpack premium Lithium 10kWh	LFP	10	-	-	5 à 7	51,2	7000	0 à 45	98	-	-	-	2	20
	sun   Powerpack premium Lithium 15kWh	LFP	15	-	-	5 à 7	51,2	7000	0 à 45	98	-	-	-	2	20
	sun   Powerpack premium Lithium 20kWh	LFP	20	-	-	5 à 7	51,2	7000	0 à 45	98	-	-	-	2	20
	sun   Powerpack premium Lithium 30kWh	LFP	30	-	-	5 à 7	51,2	7000	0 à 45	98	-	-	-	2	20
<b>Victron</b>	LFP-BMS 12,8/60	LFP	0,768	-	-	0,768	12,8	2500	-20 à 50	92	1032	1344	164%	-	-
	LFP-BMS 12,8/90	LFP	1,152	-	-	1,152	12,8	2500	-20 à 50	92	1389	1206	137%	-	-
	LFP-BMS 12,8/160	LFP	2,048	-	-	2,048	12,8	2500	-20 à 50	92	2520	1230	141%	-	-
	LFP-BMS 12,8/200	LFP	2,56	-	-	2,56	12,8	2500	-20 à 50	92	3033	1185	132%	-	-
	LFP-BMS 12,8/300	LFP	3,84	-	-	3,84	12,8	2500	-20 à 50	92	-	-	-	-	-
<b>Enphase</b>	AC Battery	LFP	1,2	-	-	0,27	25,6	7300	-20 à 45	96	1949	1624	219%	10	20

## 2. Partie pratique

Nous en venons à présent à la partie pratique de ce travail. Le but était donc de se renseigner sur les modèles de batteries inclus dans le logiciel de simulation dynamique TRNSYS [3] afin de déterminer s'il est possible de les utiliser afin de simuler des batteries lithium-ion ou non. Un passage en revue des différents modèles existants a été réalisé. Cette partie décrira ensuite la réalisation d'un nouveau modèle ainsi que les différents problèmes qui se sont posés. Une discussion sera alors suggérée par rapport au modèle proposé actuellement et aux améliorations qu'il conviendra de lui apporter par la suite.

### 2.1. Méthodologie

Dans cette partie, nous commencerons par passer en revue les différents modèles, Types, de simulation de batteries, proposés par le logiciel TRNSYS. Cela permettra de définir si, oui ou non, ces modèles peuvent être utilisés dans le cadre de la simulation de batteries lithium-ion.

Nous avons eu l'occasion de rencontrer Mr Stefan Winternheimer, responsable du laboratoire en électronique de puissance situé à l'Université HTW Saar, en Allemagne. Mr Winternheimer nous a proposé un modèle à circuit électrique équivalent qui sera décrit ensuite dans cette partie.

Pour terminer, plusieurs méthodes permettent de développer un modèle dans TRNSYS. Ces méthodes seront présentées et le choix de la méthode finalement utilisée sera expliqué.

#### 2.1.1. Modèles TRNSYS existants

Précisons pour commencer que la version de TRNSYS qui a été utilisée est la version 17. Le travail a tout d'abord débuté sur la version 18, mais suite à quelques petits bugs présents dans cette version, notamment dans le Type62 (dont nous parlerons dans le point 2.1.3.2), la version 17 a été préférée. Notons que les outils de TRNSYS utilisés dans ce travail n'ont subi aucune modification entre ces deux versions.

Ensuite, deux bibliothèques de Types sont disponibles dans la version de TRNSYS utilisée :

- La bibliothèque présente de base dans le programme ;
- La bibliothèque TESS (Thermal Energy Systems Specialists [140]). Celle-ci est en supplément et ajoute un certain nombre de Types spécifiques.

Ces deux bibliothèques ont été passées en revue afin de trouver tous les Types TRNSYS permettant de simuler le comportement d'une batterie. Ceux-ci sont au nombre de 7 et font tous partie de la bibliothèque de base de TRNSYS. Aucun Type traitant des batteries n'est disponible dans la bibliothèque TESS.

Les Types disponibles sont les suivants :

- Types 47 : Type47a, Type47b, Type47c, Type47d et Type47e ;
- Types 185 : Type185 et Type185a.

Tous ces Types font partie de la section « Electrical » de la bibliothèque TRNSYS.

Le code « FORTRAN » de certains de ces Types a été étudié afin de mieux comprendre leur fonctionnement [141]. Le « FORTRAN » est un langage de programmation, c'est celui qui est généralement utilisé pour l'écriture du code des Types TRNSYS.

En ce qui concerne la lecture du code des différents modes du Type47, nous ne nous attarderons ici que sur les versions « a », « b » et « d », représentant respectivement un simple équilibre énergétique de la batterie, une résolution par les équations de Shepherd en utilisant la puissance comme « Input » et enfin une résolution également basée sur les équations de Shepherd, mais en utilisant cette fois directement l'intensité comme « Input ».

Les versions « c » et « e » utilisent, quant à elles, les équations de Hyman, celles-ci correspondent aux équations de Shepherd avec certains ajouts. Cette partie ayant pour but de mieux comprendre les étapes et le fonctionnement de la simulation d'une batterie, il a semblé superflu de s'attarder sur un code plus compliqué qui n'apporterait, finalement, pas d'informations supplémentaires.

Notons également que le code « FORTRAN » complet du Type47 est disponible en Annexe II.

#### 2.1.1.1. Type47a

Le premier modèle proposé par TRNSYS est donc le Type47a ; il s'agit également du modèle le plus simple proposé par le logiciel.

Le Type47a est la première version du Type47 TRNSYS de modélisation d'une batterie acide-plomb. Ce type est le plus simple de ceux proposés par TRNSYS dans le cadre de la simulation de batteries.

Ce modèle intègre la puissance en fonction du temps afin de déterminer l'état de charge de la batterie. Ce modèle ne propose ni tension, ni courant en output. [140] Il s'agit donc, en quelque sorte, d'un simple réservoir se vidant et se remplissant.

A la lecture du code FORTRAN, cette version du Type 47 n'utilise que deux fonctions : « SetNumericalDerivative » et « getNumericalSolution ». La première fonction permet de démarrer la résolution d'une équation différentielle, qui permet l'intégration de la puissance en fonction du temps. La seconde est alors utilisée afin de récupérer la solution à cette équation. [142]

Il intègre donc la puissance afin de calculer ensuite le SOC ; il permet également de calculer une puissance en « Output » ainsi que la puissance perdue pendant la charge. En effet, en décharge, le Type considère que toute la puissance demandée est extraite ; par contre, en charge, le Type prend en compte le rendement énergétique, la valeur de base est de 0,9 (90%). Cela signifie que les 100% de l'énergie envoyés à la batterie afin de la recharger ne sont pas utilisés : il y a 10% de pertes liées à la recharge. De ce fait, seuls 90% de l'énergie totale qui a été injectée dans la batterie est réellement utilisable. Sur base de ce rendement de rechargement, ce modèle propose un « Output » représentant l'énergie qui a été perdue lors de la recharge.

Ce Type prend également en compte le nombre de cellules en parallèle et en série afin de calculer la puissance. Cette prise en compte est cependant assez limitée. En effet, ce Type n'utilise pas les informations d'intensité ni de voltage, la puissance d'une cellule est donc simplement multipliée par le nombre de cellules en série et en parallèle afin d'avoir la puissance totale de la batterie. Normalement le nombre de cellules en série sert à calculer le voltage total, tandis que le nombre de cellules en parallèle sert à calculer la tension totale de la batterie.

Ainsi, d'après la lecture du code FORTRAN du Type47a, celui-ci semble fonctionner d'une manière assez limitée, en ne prenant en compte qu'une simple intégration de la puissance au cours du temps, il s'agit donc d'une simple évolution linéaire qui ne permet en aucun cas de modéliser les pertes de performances de la batterie liées à une augmentation de l'intensité par exemple.

### 2.1.1.2. Type47b

Il s'agit de la seconde version du Type47 de TRNSYS permettant de modéliser une batterie acide-plomb. Dans ce cas la modélisation est basée sur les équations de Shepherd et utilise comme « Input » une puissance, à partir de laquelle il calcule ensuite l'intensité et le voltage de la batterie. [140]

Afin de pouvoir réaliser les différentes opérations, ce Type nécessite tout d'abord plusieurs paramètres qui sont identiques au Type47a, il s'agit de la capacité nominale de la cellule, du nombre de cellules en parallèle, en série ainsi que du rendement énergétique.

Ce Type demande alors, en plus, une information en ce qui concerne l'intensité maximale ainsi que l'intensité minimale acceptées par la cellule. Dans ce cas, l'intensité maximale ne peut pas dépasser le double de la capacité de la cellule et l'intensité minimale ne peut pas être inférieure à la valeur négative du double de cette capacité. Il s'agit bien, dans ce cas, de données liées à une batterie acide-plomb, ces valeurs ne sont donc pas nécessairement utilisables dans le cadre de batteries lithium-ion.

Un paramètre de détermination du voltage de coupure en charge est présent, la valeur doit être comprises dans certaines limites ; et un second paramètre de détermination du voltage de coupure en décharge doit également être précisé, à une différence près : dans ce cas, soit nous indiquons une valeur positive, qui sera alors utilisée comme voltage de coupure en décharge, soit nous indiquons « - 1 » et ce voltage sera alors calculé selon l'équation :

Équation 4 : Equation de calcul du voltage de coupure du Type47 TRNSYS [140]

$$V_{coup,d} = ed - |I| \times R_{i,d}$$

Dans cette équation : « ed » correspond à un paramètre interne au code, valant 1,8. Nous ne disposons d'aucune information supplémentaire concernant ce paramètre. Ce voltage de coupure en décharge doit également être compris dans certaines limites, fixées dans le code.

Certains paramètres internes supplémentaires sont alors calculés :

Tableau 18 : Paramètres internes calculées par le Type47 TRNSYS [140]

$qc = -0,035 \times Q_{nom}$	Où : - qc est un paramètre de capacité en charge ; - $Q_{nom}$ correspond à la capacité nominale
$qd = \frac{Q_m}{0,85}$	Où : - qd est un paramètre de capacité en décharge ; - $Q_m$ correspond à la capacité nominale
$R_{i,c} = \frac{3}{Q_m}$	Où : - $R_{i,c}$ est la résistance interne à charge complète en charge ; - $Q_m$ correspond à la capacité nominale
$R_{i,d} = \frac{0,5}{Q_m}$	Où : - $R_{i,d}$ est la résistance interne à charge complète en décharge ; - $Q_m$ correspond à la capacité nominale

Dans la première partie du code FORTRAN, tous les paramètres sont récupérés, calculés et toutes les limites du système sont définies. Cela permet de ne pas dépasser les limites techniques de la batterie et ainsi évite d'obtenir des résultats incohérents par rapport à la réalité.

Ensuite le code vérifie le mode dans lequel nous nous trouvons, cette partie décrit le mode 2, et, dans ce cas, l'« Input » correspondant à la puissance est récupéré du Type TRNSYS. Cette puissance, correspondant à la batterie complète et donnée en kJ/h, est alors convertie en W et réduite à une seule cellule à l'aide de la formule suivante :

Équation 5 : Code Fortran du Type47 : Calcul de la puissance d'une cellule à partir de la puissance de la batterie [141]

$$P_{cell} = \frac{P_{batt}}{3,6 \times N_p \times N_s}$$

Dans cette équation « P<sub>cell</sub> » correspond à la puissance d'une seule cellule et « P<sub>batt</sub> » à la puissance de la batterie complète ; la valeur de 3,6 permet la conversion des kJ/h en W ; « N<sub>p</sub> » correspond au nombre de cellules en parallèle et « N<sub>s</sub> » au nombre de cellules en série.

Les calculs commencent alors tout d'abord par la récupération de l'état de charge de la cellule, à l'aide de la fonction « getNumericalSolution », qui est alors divisée par la capacité nominale de la cellule afin d'obtenir l'état de charge (SOC). Le programme calcule ensuite la profondeur de décharge (DOD) en tant que « H = 1 – SOC ».

La première étape importante est alors de calculer le courant correspondant à la valeur du voltage de coupure en charge. Pour ce faire, l'équation suivante est utilisée :

Équation 6 : Code Fortran du Type47 : Calcul de l'intensité correspondant au voltage de coupure, en charge [141]

$$I_{coup,c} = \frac{V_{coup,c} - OCV_{extra,c} + gc \times H}{R_{i,c} \times \left( 1 + \frac{Mc \times H}{\frac{q_c}{Q_{nom}}} - H \right)}$$

Dans cette équation les différents termes correspondent à :

Tableau 19 : Signification des termes de l'équation de détermination de l'intensité correspondant au voltage de coupure, en charge [141]

<b>I<sub>coup, c</sub></b>	Courant correspondant au V <sub>coup, c</sub>
<b>V<sub>coup, c</sub></b>	Voltage de coupure en charge
<b>OCV<sub>extra, c</sub></b>	Voltage à circuit ouvert extrapolé en charge et valant 2,25
<b>gc</b>	Coefficient de « H » dans les formules de V, ce coefficient vaut 0,08
<b>R<sub>i, c</sub></b>	Résistance interne à charge complète, calculée précédemment
<b>Mc</b>	Paramètre du type de cellule qui détermine les formes des caractéristiques I – V – Q et valant 0,864
<b>q<sub>c</sub></b>	Paramètre de capacité en charge, calculé précédemment
<b>Q<sub>nom</sub></b>	Capacité nominale de la cellule (et non de la batterie)

De la même manière le courant correspondant au voltage de coupure en décharge est calculé :

Équation 7 : Code Fortran du Type47 : Calcul de l'intensité correspondant au voltage de coupure, en décharge [139]

$$I_{coup,d} = \frac{V_{coup,d} - OCV_{extra,d} + gd \times H}{R_{i,d} \times \left( 1 + \frac{Md \times H}{\frac{q_d}{Q_m}} - H \right)}$$

Les différents termes sont comparables à ceux utilisés dans le cas de la charge, mais, il s'agit dans ce cas des termes correspondant à la décharge. Ainsi, le voltage à circuit ouvert vaut 2,10 ; le terme « gd » vaut également 0,08 et le terme « Md » vaut 1.

Le calcul de ces intensités de coupure en charge et en décharge ne sont utiles que dans le cadre du calcul des puissances de coupure, valeurs calculées en « Output » du Type47b. Dans ces formules, les voltages de coupure, en charge et en décharge, sont des paramètres introduits dans le Type TRNSYS.

La partie du code permettant réellement de calculer la puissance, le voltage et l'intensité commence à partir de ce point. Bien entendu, le début du code, correspondant à la définition des paramètres et à la mise en place de certaines limites, est nécessaire à ces étapes. Cependant, la partie ci-dessus, permettant de calculer les intensités de coupure, n'est pas nécessaire lorsque nous désirons seulement calculer la puissance, le voltage et l'intensité de la batterie.

Nous en venons donc aux conditions, à savoir s'il s'agit de la charge ou de la décharge. Pour commencer, le code vérifie si la batterie est en décharge : si  $P < 0$ . Il calcule alors deux paramètres, a et b :

Équation 8 : Code Fortran du Type47 : Calculs des paramètres a et b, en décharge [139]

$$a = R_{i,d} \times \left( 1 + \frac{Md \times H}{\frac{q_d}{Q_m}} - H \right)$$

$$b = OCV_{extra,d} - gd \times H$$

En charge les équations deviennent :

Équation 9 : Code Fortran du Type47 : Calculs des paramètres a et b, en charge [139]

$$a = R_{i,c} \times \left( 1 + \frac{Mc \times H}{\frac{q_c}{Q_m}} - H \right)$$

$$b = OCV_{extra,c} - gc \times H$$

Le programme définit ensuite :  $c = -P$ .

L'intensité est alors calculée en fonction des termes « a », « b » et « c » calculés ci-dessus. L'équation utilisée est la suivante :

Équation 10 : Code Fortran du Type47 : Calcul de l'intensité de la batterie [139]

$$I = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \times a \times c}}{2 \times a}$$

Comme nous pouvons le voir, cette formule correspond tout à fait à la résolution d'une équation du second degré du type «  $ax^2 + bx + c = 0$  ». En effet, pour résoudre une telle équation deux étapes sont nécessaires :

- Tout d'abord calculer le coefficient  $\Delta$  comme suit :

$$\Delta = b^2 - 4 \times a \times c$$

- Et ensuite résoudre l'équation :

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2 \times a}$$

Dans ce cas, le code n'utilise néanmoins qu'une seule solution : celle ajoutant la racine de  $\Delta$ , et ne prend pas en compte la seconde solution, qui soustrait cette racine. La résolution d'une telle équation devrait retourner deux solutions à cause du carré présent. En effet, la solution obtenue à l'aide de la soustraction ne refléterait pas une réalité physique, et c'est pourquoi elle serait écartée.

Une vérification s'ensuit alors afin de vérifier que l'intensité calculée ne dépasse pas les limites, ainsi si  $I > I_{max}$  alors  $I = I_{max}$  ; et si  $I < I_{min}$  alors  $I = I_{min}$ .

La tension de la cellule est alors calculée à l'aide d'une fonction linéaire de l'intensité, qui prend en compte les coefficients « a » et « b » calculés juste avant :

Équation 11 : Code Fortran du Type47 : Calcul de la tension de la batterie [139]

$$V = b + I \times a$$

En remplaçant « a » et « b » dans cette équation nous retrouvons la formule de base de calcul de la tension, en condition de charge ou de décharge, il s'agit ici de l'équation de Shepherd, typique aux Type47b et Type47d.

Équation 12 : Code Fortran du Type47 : Formule de Shepherd de calcul de la tension de la batterie, en charge et décharge [139]

$$V = OCV_{extra,c\ ou\ d} - g_{c\ ou\ d} \times H + I \times R_{i,c\ ou\ d} \times \left( 1 + \frac{Mc\ ou\ d \times H}{\frac{Q_{c\ ou\ d}}{Q_m}} - H \right)$$

La partie du code permettant de calculer réellement le voltage et l'intensité de la cellule, permettant par la suite de calculer la puissance de la batterie, prend fin à ce point. Le reste du code permet de calculer d'autres variables et de déterminer les « Outputs ».

De la même manière que pour l'intensité, le Type vérifie alors les limites de voltage. Ainsi, si  $V > V_{coup,c}$  alors  $V = V_{coup,c}$  ; et si  $V < V_{coup,d}$  alors  $V = V_{coup,d}$ . Cela afin de rester dans les limites de fonctionnement de la cellule.

Une fois la tension et l'intensité connues, nous pouvons enfin calculer la puissance :  $P = I \times U$ .

Ensuite, la fonction « SetNumericalDerivative » est utilisée afin de fixer la première valeur des équations différentielles. Dans le cas de la décharge cette valeur est fixée comme étant égale à l'intensité, et dans le cas de la charge, cette valeur vaut  $I \times eff$ , « eff » correspondant au rendement énergétique de la batterie.

Pour terminer, les limites de tension sont calculées grâce aux équations suivantes :

Équation 13 : Code Fortran du Type47 : Calcul de la limite inférieure de tension de la batterie [139]

$$V_{min} = OCV_{extra,d} - g_d \times H + I_{min} \times R_{i,d} \times \left( 1 + \frac{Md \times H}{\frac{Q_d}{Q_m}} - H \right)$$

Équation 14 : Code Fortran du Type47 : Calcul de la limite supérieure de tension de la batterie [139]

$$V_{max} = OCV_{extra,c} - g_c \times H + I_{max} \times R_{i,c} \times \left( 1 + \frac{Mc \times H}{\frac{Q_c}{Q_m}} - H \right)$$

Ces valeurs de tensions maximum (en charge) et minimum (en décharge), de la cellule, ne sont utilisées qu'afin de calculer les puissances maximum et minimum de la batterie, qui sont des « Outputs » du Type47b. Dans ces formules,  $I_{min}$  et  $I_{max}$  sont des paramètres introduits dans le Type TRNSYS.

### 2.1.1.3. Type47d

Il s'agit dans ce cas de la quatrième version du Type47, c'est-à-dire qu'il fonctionne également à l'aide des équations de Shepherd, cependant l'« Input » est cette fois-ci l'intensité et non plus la puissance. [140]

En ce qui concerne ce mode, il est identique au Type47b jusqu'à la fin de l'étape de calcul des courants de coupure (en charge et en décharge), et donc avant les conditions sur la puissance, c'est-à-dire les étapes de calcul des coefficients « a » et « b ».

Il y a tout de même une différence dans cette première partie : l'« Input » n°1 dans TRNSYS ne correspond pas dans ce cas à la puissance mais à l'intensité. Le modèle récupère donc l'intensité reçue ou envoyée par la batterie et la convertit en intensité reçue ou envoyée par une seule cellule. Il suffit donc de diviser l'intensité de la batterie par le nombre de cellules en parallèle. En effet, l'intensité varie avec le nombre de cellules mises en parallèle mais le voltage, lui, ne varie pas dans ce cas. Le voltage varie quant à lui avec le nombre de cellules mises en série.

Ainsi, après le calcul des courants de coupure, le code émet directement une condition sur l'intensité. Pour commencer, si l'intensité est supérieure ou égale à 0, ce qui correspond à la charge, une limite est fixée : si  $I > I_{max}$  alors  $I = I_{max}$ .

Il s'ensuit du calcul du voltage à l'aide de l'équation suivante, identique à celles utilisées par le mode 2 :

Équation 15 : Code Fortran du Type47 : Formule de Shepherd de calcul de la tension de la batterie, en charge [139]

$$V = OCV_{extra,c} - g_c \times H + I \times R_{i,c} \times \left( 1 + \frac{Mc \times H}{\frac{Q_c}{Q_m}} - H \right)$$

Des conditions sont alors émises afin de ne pas dépasser les limites de fonctionnement : si  $V > V_{coup,c}$  alors  $V = V_{coup,c}$  et  $I = I_{coup,c}$ .

Si nous ne nous trouvons pas en conditions de charge, il s'agit donc de la décharge. Des limites sont également fixées : si  $I < I_{min}$  alors  $I = I_{min}$ . Le calcul du voltage est alors réalisé de manière identique :

Équation 16 : Code Fortran du Type47 : Formule de Shepherd de calcul de la tension de la batterie, en décharge [139]

$$V = OCV_{extra,d} - g_d \times H + I \times R_{i,d} \times \left( 1 + \frac{Md \times H}{\frac{Q_d}{Q_m}} - H \right)$$

De nouveau, des conditions sont émises afin de rester dans les limites : si  $V \leq V_{coup,d}$  alors  $V = V_{coup,d}$  et  $I = I_{coup,d}$ .

Les dernières étapes de cette version sont alors identiques à celles du Type47b : la première valeur des équations différentielles en décharge et en charge est fixée, les voltages maximum et minimum sont calculés et, pour terminer, la puissance est également calculée.

Ce mode de fonctionnement du Type47 permet ainsi de travailler directement à partir de l'intensité et ne nécessite donc pas le calcul de la tension et du courant par une équation du second degré, sur base d'un « Input » de puissance.

#### 2.1.1.4. Type47c et Type47e

Nous ne nous attarderons pas sur ces deux versions du Type47.

Précisons simplement qu'il s'agit également de deux modèles de simulation de batteries au plomb qui fonctionnent d'une façon similaire aux versions « b » et « d » décrites précédemment.

De la même manière que les versions « b » et « d », la version « c » utilise la puissance comme « Input », tandis que la version « e » utilise l'intensité.

Précisons également que ces deux versions fonctionnent sur base des équations de Hyman. Il s'agit des mêmes équations que celles de Shepherd, cependant celles-ci ont été modifiées afin de prendre en compte plus de caractéristiques. [140]

Nous n'en dirons pas plus sur ces Types étant donné qu'ils ne sont pas utilisables dans le cadre de la simulation de batteries lithium-ion. Nous décrivons les raisons dans le point 2.1.1.6.

#### 2.1.1.5. Types 185

Enfin, le logiciel TRNSYS propose deux derniers modèles de simulation de batteries : le Type185 et le Type185a. Il s'agit également de deux modèles ayant pour objectif de simuler des batteries au plomb.

De la même manière que pour les deux Types précédents, nous ne nous attarderons pas sur ce modèle.

Il s'agit d'un modèle basé sur un circuit électrique équivalent. Ce modèle est cependant plus complexe que le Type47 car il prend en compte davantage de phénomènes. La principale différence est la prise en compte du gazage. Il s'agit d'un comportement particulier des batteries au plomb. Lorsque le courant est trop élevé, l'électrolyte est détérioré et produit des gaz, c'est ce qui est appelé le gazage.

La différence entre ces deux versions est que la première intègre un calcul du gazage tandis que la seconde nécessite énormément de paramètres permettant de prendre en compte ce gazage. [140]

Ces Types ne sont pas non plus utilisables dans le cadre de la simulation de batteries lithium-ion, les raisons seront également décrites au point suivant.

#### 2.1.1.6. Globalement

Le Type47a n'est pas le seul qui fonctionne comme un simple réservoir qui se vide et se remplit, en intégrant la puissance par rapport au temps, et en fonction de la capacité de la cellule, ce qui permet d'obtenir le SOC. Les deux autres Types47, le « b » et le « d », fonctionnent de la même manière. Ils obtiennent également le SOC de cette façon et en fonction de celui-ci, les différentes intensités et tensions sont recalculées. Celles-ci ne jouent cependant aucun rôle dans le calcul du SOC, ces valeurs sont uniquement calculées afin de fournir des informations sur les voltages et les intensités à chaque pas de temps de la simulation.

Le seul paramètre pris en compte ici, permettant de rendre compte des inefficacités de la cellule ou batterie, est le rendement énergétique. Celui-ci n'est utilisé que dans le cas de la recharge, afin de prendre en compte le fait que la batterie n'absorbe pas toute l'énergie qui lui est fournie. Et par conséquent, elle ne rend pas non plus la totalité de cette énergie, elle ne rend que ce qu'elle a pu emmagasiner.

Ensuite, nous avons pu voir dans l'étude du code FORTRAN des Types47 « b » et « d » que leur utilisation n'est pas possible quant à la modélisation de batteries lithium-ion. En effet, ces Types prennent en compte un grand nombre de paramètres internes qui ont été obtenus empiriquement [143] et qui ne sont donc pas applicables aux cellules au lithium. De plus, nous devons fixer les limites de tension de la cellule dans les paramètres. Cette limite a une valeur par défaut de 2,5 V et la valeur maximale que nous pouvons entrer est 2,8 V. Cette tension est correcte en ce qui concerne les batteries au plomb mais ne représente pas la tension d'une cellule lithium-ion, généralement comprise entre 3,0 V et 4,0 V.

Il en va de même pour les versions « c » et « e » de ce même Type. Ces versions sont cependant encore plus complexes et présentent un nombre plus important de paramètres empiriques, spécifiques aux batteries au plomb.

La même conclusion peut être tirée en ce qui concerne les Types 185, ceux-ci sont spécifiques au fonctionnement des batteries au plomb et ne peuvent pas être utilisés afin de simuler le fonctionnement de batteries lithium-ion.

De ce fait, dans tous les Types existants dans TRNSYS, seul le Type47a est assez simple pour permettre son utilisation afin de simuler le fonctionnement d'une batterie lithium-ion. Précisons cependant que ce Type doit être couplé à un Type48 « Regulator/Inverter » permettant de simuler le régulateur et l'onduleur nécessaires au bon fonctionnement du système de stockage d'énergie électrique par batteries. Le Type47a fonctionne alors en complément avec le Type48b. Ce dernier permet de prendre en compte le rendement du régulateur et de l'onduleur. Ce Type48b permet également d'effectuer des vérifications sur le SOC de la batterie afin de rester dans ses conditions de fonctionnement. Il va par exemple permettre à la batterie de se recharger si le SOC est compris dans les limites de SOC autorisées. [140]

Cette combinaison du Type47a et du Type48b ne permettent cependant pas de prendre en compte tous les phénomènes liés aux conditions de fonctionnement des batteries lithium-ion. Des phénomènes tels que le vieillissement de la batterie, l'impact de la température ou encore l'auto-déchargement.

### 2.1.2. Modèle proposé par HTW Saar

Pendant la réalisation de ce mémoire, nous avons eu l'occasion de visiter le laboratoire en électronique de puissance de l'université HTW Saar. Nous avons pu y rencontrer Mr Stefan Winterheimer, professeur à l'HTW Saar et responsable de ce laboratoire.

La rencontre avec Mr Winterheimer nous a permis d'en apprendre énormément sur les batteries. Cette partie du travail a donc pour but de présenter certaines informations que nous avons pu obtenir grâce à cette rencontre et aux contacts que nous avons eus avec lui. Nous présenterons également, dans cette partie, le modèle de batterie qui nous a été proposé.

Notons que cette rencontre n'est pas décrite en totalité dans cette partie, en effet beaucoup d'informations théoriques sont décrites dans d'autres parties de ce travail.

#### 2.1.2.1. Mesures réalisées par le laboratoire

Le laboratoire étant spécialisé dans les batteries, ils ont pu réaliser des tests sur le fonctionnement de certaines cellules lithium-ion. Les informations suivantes proviennent de tests réalisés sur une cellule Panasonic NCR18650B [144] et permettent d'illustrer certaines caractéristiques techniques des batteries.

Pour commencer, la Figure 47 présente le comportement du voltage d'une cellule lithium-ion Panasonic, en fonction du temps, lorsqu'elle est soumise à plusieurs phases de décharges à 1C entrecoupées de phases de repos.

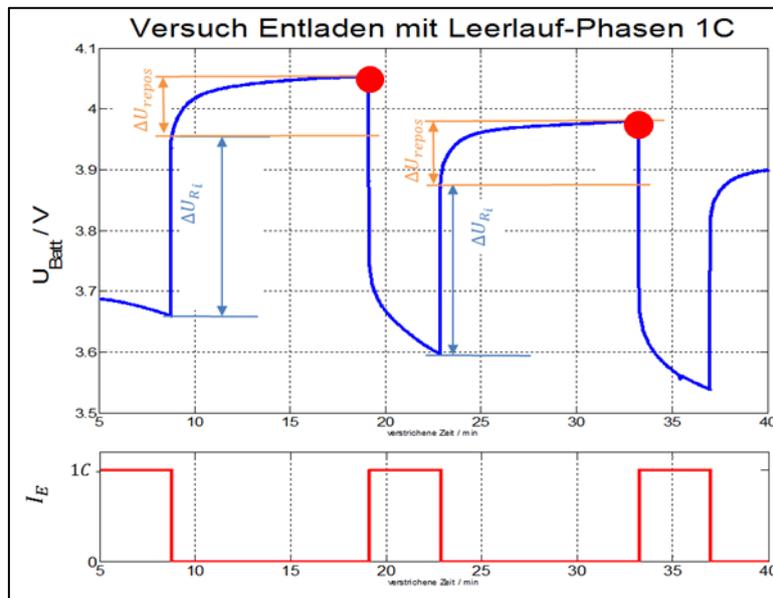


Figure 47 : Comportement du voltage d'une cellule en fonction du temps, face à de courtes périodes de décharge entrecoupées de pauses [145]

Dans ce graphique, les points rouges correspondent au voltage à circuit ouvert (OCV). Lorsque la batterie est en décharge, une chute de tension s'opère. L'OCV est le voltage que la batterie atteint après une période de repos : il est plus élevé d'environ 280 mV par rapport au voltage de la batterie, lorsqu'elle est connectée.

Nous pouvons ensuite observer que ce saut de tension est composé de deux parties :

- Une partie verticale ( $\Delta U_{Ri}$ ) : celle-ci est due à la partie ohmique de la résistance de la batterie. Cette partie ohmique est responsable de la diminution de la tension lorsque le C-rate augmente. L'écart de tension entre deux C-rates est proportionnel à celui-ci. En effet, l'écart entre 0,5C et 1C par exemple est deux fois plus faible que l'écart entre 1C et 2C. Nous pouvons observer ce phénomène dans la Figure 48 ;
- Une partie plutôt logarithmique ( $\Delta U_{repos}$ ) : celle-ci est plutôt due à la part chimique de la résistance. [10]

Dans le cadre de ce mémoire, il ne sera pas nécessaire de modéliser un tel comportement [10]. En effet, celui-ci est négligeable à l'échelle de fonctionnement que nous utiliserons.

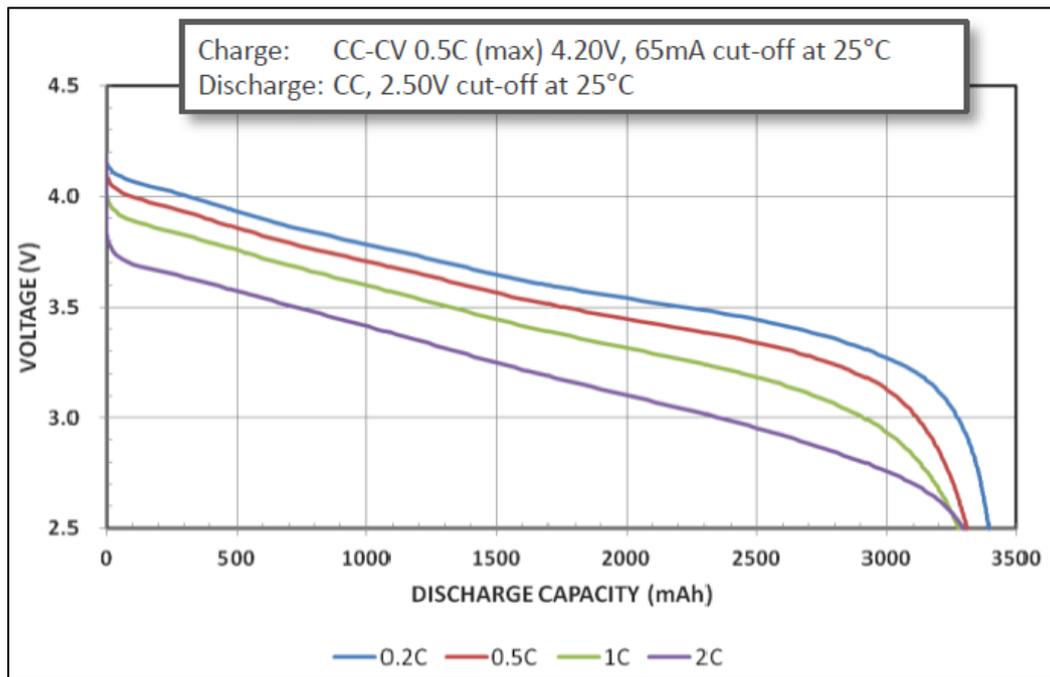


Figure 48 : Courbes de décharge en fonction du C-rate d'une batterie Panasonic [144]

#### 2.1.2.2. Modèle proposé par le laboratoire

Une des caractéristiques principales que le modèle TRNSYS devra avoir est sa simplicité d'utilisation. En effet, il est indispensable que les paramètres et les « Inputs » utilisés par ce modèle soient accessibles facilement, notamment dans la fiche technique de la batterie/cellule. Certains modèles nécessitent des informations qu'il n'est possible d'obtenir que par l'intermédiaire de mesures réelles, ce qui n'est pas envisageable dans notre cas.

Lorsque nous cherchons à modéliser le comportement d'une batterie, la modélisation d'une seule cellule est suffisante. En effet, il suffit d'extrapoler les résultats en fonction du nombre de cellules composant la batterie, celles-ci étant connectées soit en série, soit en parallèle. Il n'existe pas de modèles pour une batterie entière, les cellules ne réagissant pas nécessairement toutes de la même façon, un tel modèle serait beaucoup trop compliqué à mettre en place et la demande en calculs serait trop importante. [10]

Le modèle proposé par le laboratoire à l'HTW Saar est basé sur le principe du circuit électrique équivalent.

Celui-ci peut être modélisé comme présenté dans la Figure 49, avec la partie à gauche de la mesure de la tension de la batterie ( $U_{Batt}$ ) représentant l'onduleur (inverter), et la partie à droite représentant la batterie elle-même. Dans ce modèle, le «  $U_{AC}$  » correspond à la tension du circuit en courant alternatif, le «  $U_{Batt}$  » correspond à la tension de la batterie, «  $R_i$  » à la résistance interne, «  $U_{OC}$  » à la tension à circuit ouvert et «  $U_{ic}$  » et «  $U_{id}$  » correspondent à des voltages de diffusion, respectivement en charge et en décharge.

En ce qui concerne le voltage de diffusion, celui-ci se produit s'il y a une concentration élevée de porteurs de charges mobiles, comme les ions lithium, d'un côté, et une concentration faible de l'autre. De ce fait, les porteurs de charge vont se diffuser de la forte concentration vers la basse concentration et vont constituer un champ électrique qui force les porteurs à dériver dans la direction opposée. L'état d'équilibre entre le courant de diffusion et le courant de dérive est déterminé par le voltage de diffusion. [10]

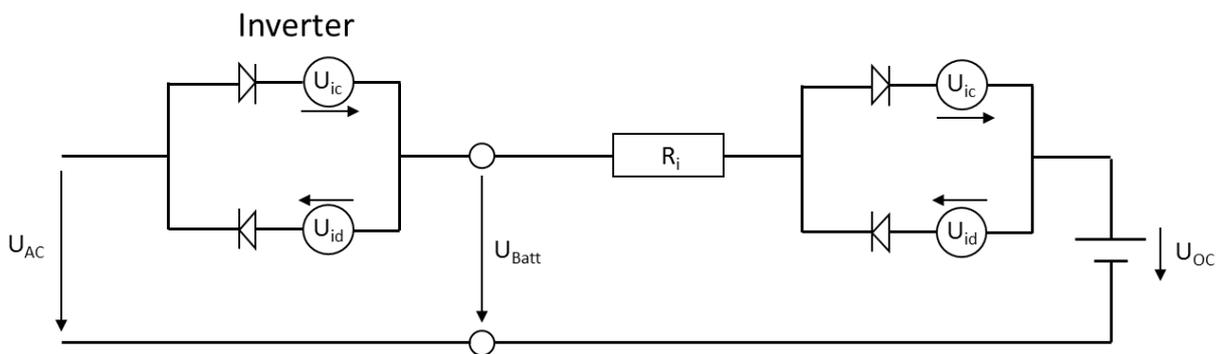


Figure 49 : Modèle à circuit électrique équivalent proposé par l'HTW Saar [10]

Ce modèle représente le comportement d'une seule cellule. Si la batterie est constituée de plusieurs cellules et que nous voulons les modéliser, il suffira d'extrapoler les caractéristiques (comme la résistance par exemple) au nombre de cellules présentes.

Ce modèle peut cependant être simplifié en rassemblant la partie du circuit correspondant à l'onduleur avec la partie correspondant à la batterie ; dans le cas d'un couplage avec des panneaux photovoltaïques par exemple, ce modèle simplifié peut alors ressembler à ce qui est proposé dans la Figure 50.

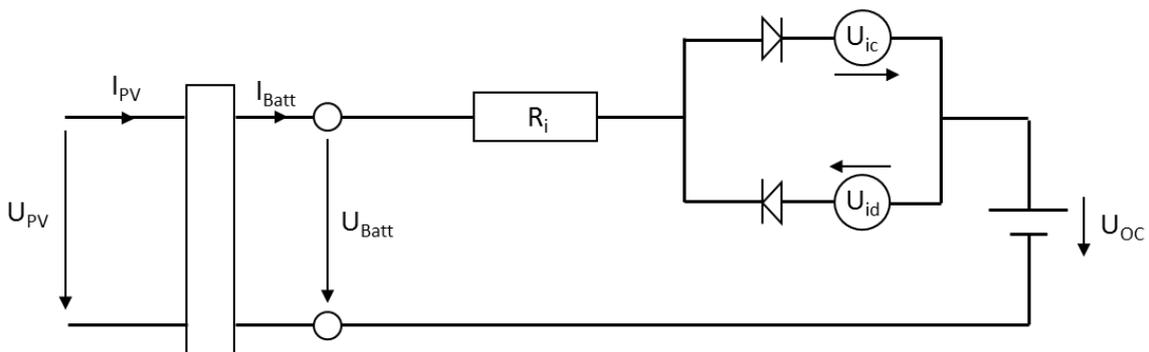


Figure 50 : Modèle à circuit électrique équivalent simplifié proposé par l'HTW Saar [10]

Ensuite, en ce qui concerne le pas de temps de la simulation, c'est souvent un pas de temps de 15 minutes qui est utilisé dans les simulations TRNSYS. Ce temps risque cependant d'être beaucoup trop long pour les simulations de batteries. En effet, un pas de temps trop long risque de produire des valeurs de SOC plus élevées que 100%, ou inférieures à 0%. En seulement 3 à 4 pas de temps de 15 minutes, la batterie serait déjà déchargée.

Il est donc préférable de réduire ce pas de temps : un bon compromis serait par exemple d'utiliser une valeur de 5 minutes. [10] Cette valeur semble cependant encore un peu élevée en ce qui concerne le modèle proposé dans le point 2.2.1 de ce travail, la valeur utilisée est plutôt d'1 minute.

Nous pourrions également imaginer d'ajouter au modèle une résistance représentant l'auto-déchargement de la batterie, comme nous pouvons le visualiser dans la figure suivante.

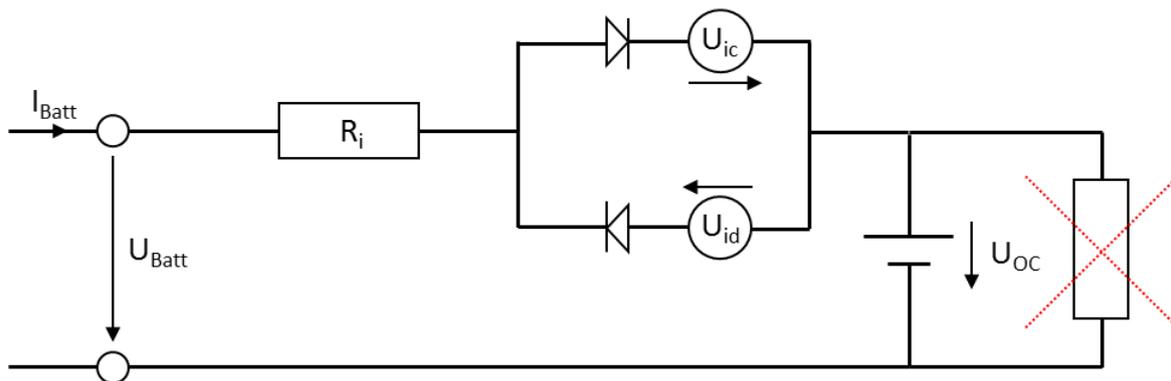


Figure 51 : Modèle à circuit électrique équivalent proposé par l'HTW Saar avec l'ajout d'une résistance permettant de représenter l'auto-déchargement [10]

Cet ajout n'est cependant pas nécessaire dans un premier temps étant donné que cet auto-déchargement, dans le cas des batteries lithium-ion, ne s'élève qu'à environ 1%/mois. Il est par contre davantage nécessaire de le prendre en compte dans le cas des cellules au plomb, pour lesquelles cette valeur est plutôt de 5%/mois. [10]

Nous pouvons ensuite parler de la prise en compte du vieillissement ainsi que l'impact de la température sur la batterie. Tout d'abord, le vieillissement est négligeable par rapport à la température. Si un élément supplémentaire devait être modélisé, le choix se porterait donc en premier lieu sur l'impact de la température plutôt que sur le vieillissement. Pour ce faire, les tensions pourraient être modifiées en fonction de la température.

Ensuite, le modèle proposé serait composé de seulement 4 paramètres :  $R_i$ ,  $U_{id}$ ,  $U_{ic}$  et  $U_{oc}$ . Il est tout de même important de préciser que le SOC de départ doit être connu. En ce qui concerne ces paramètres, nous avons été informés du fait que ces paramètres pouvaient être obtenus par l'intermédiaire des fiches techniques, or ce n'est pas le cas pour chacun d'eux. En effet, si la résistance interne peut être calculée sur base de la fiche technique (nous y reviendrons au point suivant), les tensions de diffusion en charge et en décharge doivent être calculées à partir de la tension à circuit ouvert. Cette dernière n'étant pas disponible dans les fiches techniques.

### 2.1.2.3. Equations du modèle

Nous en venons maintenant aux équations mathématiques permettant de faire fonctionner le modèle à circuit électrique équivalent proposé ci-dessus.

Les premières équations sont celles permettant de calculer la tension de la batterie. Nous disposons d'une équation permettant de calculer le comportement en charge, et l'autre permettant de calculer le comportement en décharge.

Équation 17 : Equations de calcul de la tension de la batterie, en charge et décharge [10]

$$\text{En charge : } U_{Batt} = I_{Batt} \times R_i + U_{ic} + U_{OC}$$

$$\text{En décharge : } U_{Batt} = I_{Batt} \times R_i - U_{id} + U_{OC}$$

Dans cette équation, la tension de la batterie ( $I_{Batt}$ ) est un « Input » de la simulation.

La résistance interne ( $R_i$ ) peut, quant à elle, être calculée sur base des fiches techniques. La résistance est calculée à l'aide des caractéristiques de décharge de la cellule, comme proposé dans la Figure 52.

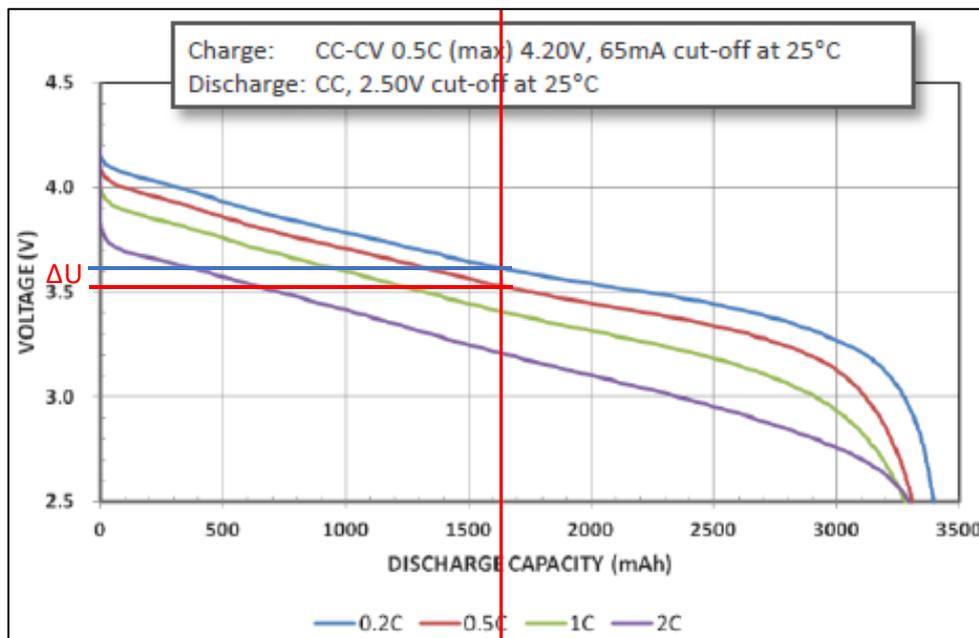


Figure 52 : Caractéristiques de décharge permettant de calculer la résistance interne [144]

Le calcul de la résistance interne est réalisé en plusieurs étapes :

- Déterminer les différences de tension ( $\Delta U$ ) occasionnées par les modifications de C-rate, à 50% de SOC. Dans ce cas, il convient de déterminer le ( $\Delta U$ ) apparaissant entre 0,2C et 0,5C ; 0,5C et 1C ; et 1C et 2C ;
- Calculer la différence d'intensité ( $\Delta I$ ) entre deux C-rates consécutifs, à l'aide de la capacité nominale de la cellule ( $Q_{nom,cell}$ ). Par exemple, entre 0,2C et 0,5C la différence d'intensité sera calculée comme suit :

Équation 18 : Formule de calcul du  $\Delta I$  [10]

$$\Delta I = C_{rate_2} \times Q_{nom,cell} - C_{rate_1} \times Q_{nom,cell}$$

- Calcul de la résistance interne à l'aide de la loi d'Ohm :  $U = R \times I$ . La résistance interne est obtenue en divisant  $\Delta U$  par  $\Delta I$ . [10]

Nous obtenons dès lors une résistance interne pour chaque couple de deux C-rates. Or, dans le modèle, la résistance interne devrait être un paramètre, une constante. Si les résistances internes ne sont pas égales, ce qui est le cas avec cette cellule, il nous a été conseillé d'utiliser la résistance interne obtenue pour des C-rates élevés. Une petite déviation sera dès lors observée pour des courants faibles. [10]

Ensuite, les deux tensions de diffusion sont également calculées à partir des caractéristiques de décharge de la cellule. Pour ce faire, nous avons besoin d'au minimum trois valeurs constantes de courant différentes (par exemple 0,5C ; 1C et 2C). Nous pouvons alors extraire les trois voltages à 50% de SOC et calculer les résistances internes, comme expliqué ci-dessus.

Le calcul de la tension de diffusion en décharge se fait alors à l'aide de la formule suivante :

*Équation 19 : Formule de calcul de la tension de diffusion en décharge [10]*

$$U_{Batt} = U_{OC} - U_{id} - R_i \times I_{Batt}$$

Le calcul de la tension de diffusion en charge nécessite, quant à elle, les caractéristiques de charge. La formule est alors la suivante :

*Équation 20 : Formule de calcul de la tension de diffusion en charge [10]*

$$U_{ic} = U_{Batt} - U_{OC} - R_i \times I_{Batt}$$

Nous voyons cependant apparaître deux problèmes :

- Tout d'abord, nous ne disposons pas des caractéristiques de charge dans les fiches techniques des cellules, ce qui complique certainement l'obtention des données ;
- Ensuite, ces deux formules nécessitent la connaissance de la tension à circuit ouvert, or elle n'est pas non plus donnée dans les fiches techniques.

De plus, l'utilisation des deux équations de calcul de la tension (en charge et en décharge) n'est pas claire. En effet, la tension à circuit ouvert devrait toujours être supérieure à la tension de la batterie. Or, lorsque nous observons ces deux formules, nous nous apercevons que la tension de la batterie est notamment calculée en ajoutant un terme à la tension à circuit ouvert : la multiplication de l'intensité de la batterie par la résistance interne. Cela semble donc donner un OCV inférieur à la tension de la batterie, ce qui ne semble pas logique.

Pour ces différentes raisons, ces deux équations n'ont pas été utilisées dans le modèle de batterie lithium-ion proposé dans ce travail. Une solution alternative a donc été choisie afin de proposer un modèle cohérent, sans l'utilisation de ces formules, en attendant la possibilité de pouvoir obtenir de plus amples informations concernant le fonctionnement de celles-ci.

Cette solution consiste à utiliser les caractéristiques de décharge disponibles dans la fiche technique afin d'en extraire l'évolution de la tension en fonction du C-rate. Nous pouvons ainsi réaliser une régression linéaire de cette relation, pour deux points de la courbe de décharge : le premier à un SOC de 90% (correspondant à une tension élevée) ; et le second à un SOC de 10% (correspondant à une tension plus faible). Nous pouvons ainsi, à l'aide de l'intensité (et donc du C-rate), calculer la tension à ces deux points et ainsi réaliser une régression linéaire entre ces deux points. Cette régression est représentée dans la Figure 53. Nous connaissons donc la droite d'évolution de la tension pour l'intensité en question, nous pouvons alors calculer la tension de la batterie à l'aide du SOC et de l'Équation 21 présentée ci-après.

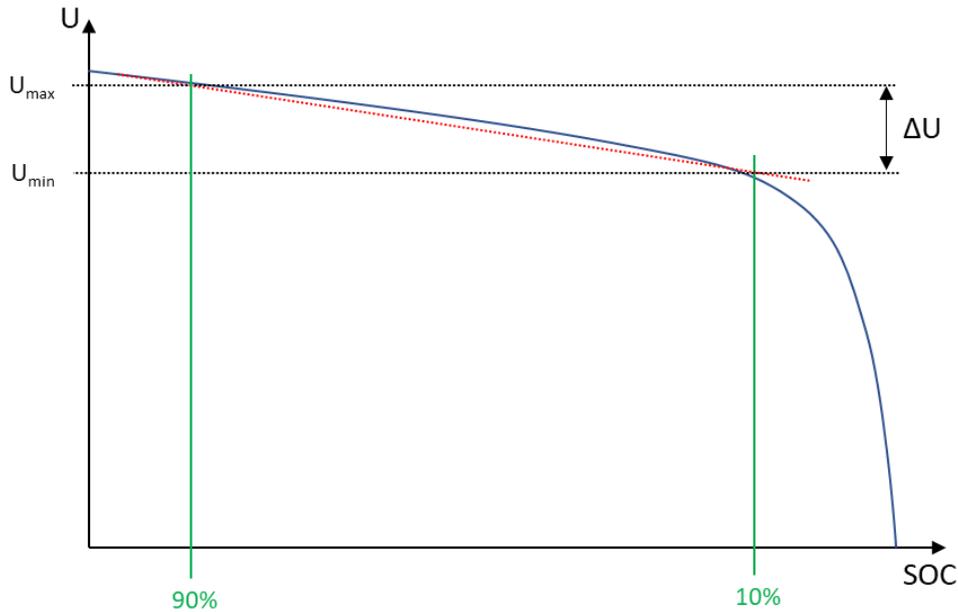


Figure 53 : Droite de régression sur la courbe de voltage

Équation 21 : Formule de calcul de la tension de la batterie en fonction du SOC

$$U_{Batt} = U_{100\%} - \Delta U \times (1 - SOC)$$

Précisons que l'équation ci-dessus est une modification de l'équation normalement utilisée dans le modèle à circuit électrique équivalent, lorsque nous utilisons les deux formules de calcul de la tension et lorsque nous connaissons la tension à circuit ouvert. La formule originale est la suivante :

Équation 22 : Formule originale de calcul de la tension à circuit ouvert de la batterie en fonction du SOC [10]

$$U_{OC} = U_{OC,100\%} - \Delta U_{OC} \times (1 - SOC)$$

D'autres équations seront cependant utilisées dans le modèle.

La première permet de calculer la capacité de la batterie. Il s'agit de l'Équation 23.

Équation 23 : Formule de calcul de la capacité de la batterie [10]

$$Q_{Batt} = \int I_{Batt} dt + Q_0$$

La capacité de la batterie est simplement calculée sur base d'une intégration en fonction du temps de l'intensité appliquée à la batterie. Nous ajoutons alors à cette intégration la capacité initiale de la batterie, avant qu'un courant lui ait été appliqué.

Finalement, le SOC correspond simplement au rapport entre l'énergie actuellement stockée dans la batterie et la capacité nominale de celle-ci.

Équation 24 : Formule de calcul du SOC [10]

$$SOC = \frac{Q_{Batt}}{Q_{nom,batt}}$$

Ces équations seront dès lors utilisées dans le modèle proposé. Son fonctionnement sera décrit dans le point 2.2.1.

### 2.1.3. Choix de la méthode de modélisation

Etant donné que les modèles inclus dans le logiciel de simulation TRNSYS sont particuliers à la simulation de batteries au plomb, à l'exception d'un modèle, le Type47a, la décision a été prise de développer un nouveau modèle utilisable dans TRNSYS. Le Type47a est utilisable dans le cadre de la simulation de batteries lithium-ion mais est cependant très limité.

Ainsi, plusieurs méthodes sont disponibles afin de développer un modèle de batterie lithium-ion utilisable dans TRNSYS :

- Le développement d'un nouveau Type TRNSYS ;
- L'utilisation d'une macro Excel ;
- L'utilisation d'un code Matlab [2].

Cette partie décrira tout d'abord les possibilités qui étaient disponibles, les raisons pour lesquelles elles ont été utilisées ou non, et se terminera par la description du modèle de batterie lithium-ion qui a pu être réalisé.

#### 2.1.3.1. Type TRNSYS

Une première possibilité afin de créer le modèle était donc de développer un nouveau Type TRNSYS.

La réalisation d'un nouveau Type se fait en plusieurs étapes :

- La création de la « coquille » du Type qui sera par la suite utilisable dans TRNSYS ;
- L'export du squelette du code qui pourra être utilisé afin de rédiger le code ;
- La rédaction du code en langage « FORTRAN » ;
- Utiliser un « compiler », il s'agit d'un programme permettant de créer le Type qui sera utilisé par le logiciel TRNSYS ;
- Intégrer le nouveau Type dans TRNSYS. [146]

Cette possibilité n'a pas été utilisée car elle s'avérait trop complexe à mettre en œuvre. En effet, l'unité de recherche BEMS dans laquelle ce mémoire a été réalisé ne disposait que de peu de licences du programme appelé « compiler » et permettant de créer le Type TRNSYS. La compilation du code aurait dès lors dû être réalisée par un employé de l'unité de recherche.

Si cette compilation ne devait être réalisée qu'une seule fois cela n'aurait pas posé de problèmes, mais ce n'était pas le cas. En effet, afin de vérifier le bon fonctionnement du code, une compilation est nécessaire. Or, il est difficile de réaliser un code du premier coup, sans aucune erreur dans celui-ci. Il aurait donc fallu recompiler le code entre chaque essai de correction du code, ce qui aurait représenté une perte de temps trop importante, pour moi-même mais également pour la personne disposant du programme en question.

Cette possibilité a donc rapidement été écartée au profit de l'utilisation d'une macro Excel ou d'un code Matlab. D'autant plus que les deux autres possibilités permettent tout autant de remplir l'objectif voulu.

#### 2.1.3.2. *Macro Excel*

L'utilisation d'une macro Excel dans TRNSYS est possible grâce au Type62 « Calling Excel ». Ce type permet de lier Excel à TRNSYS afin de faire utiliser le code disponible dans une macro Excel par TRNSYS.

Pour ce faire, il est nécessaire de renommer certaines cellules dans Excel afin que celles-ci soient utilisées comme des « Inputs » ou « Outputs » dans TRNSYS. Cela se fait très simplement et il suffit alors de relier les « Inputs » de TRNSYS aux cellules Excel correspondantes et les « Outputs » d'Excel à TRNSYS, et ce par l'intermédiaire du code disponible dans la macro Excel.

Après une formation sur les bases de la réalisation d'une macro Excel, l'écriture d'un premier code de modélisation d'une batterie lithium-ion a été commencée.

Une première ébauche de code a donc été réalisée. Cette macro Excel permettait de simuler le comportement simplifié d'une seule cellule. Ce premier code avait pour objectif de tenter de produire des résultats de décharge ou de charge correspondant à ceux disponibles sur la fiche technique d'une cellule lithium-ion. Il permettait également de prendre en compte l'évolution du SOC par l'intégration de l'intensité électrique extraite ou introduite dans la batterie.

Ce code simplifié fonctionnait mais un problème s'est rapidement posé. En effet, pendant l'écriture du code et les réflexions qui en ont découlé, une limitation de l'utilisation de l'outil « Calling Excel » est apparue : ce Type TRNSYS est limité par le nombre d'« Inputs » et d'« Outputs » qu'il est capable de gérer. Pour chacun de ces deux cas, le nombre limite est fixé à 10. Il s'est donc rapidement avéré qu'en ce qui concernait les « Inputs », ce nombre serait insuffisant étant donné l'évolution du code et la prise en compte de plus de paramètres.

Afin de pallier à ce problème, la seule solution était d'utiliser la dernière méthode permettant de développer un modèle dans TRNSYS : l'utilisation du Type155 « Calling Matlab ».

#### 2.1.3.3. *Modèle Matlab*

L'utilisation du Type155 « Calling Matlab » était donc la solution au développement de ce nouveau modèle de batterie lithium-ion dans le logiciel de simulation TRNSYS.

En effet, ce Type n'est pas limité par le nombre d'« Inputs » ou d'« Outputs », ce qui rend son utilisation possible pour la réalisation de l'objectif.

Une nouvelle formation a dès lors été nécessaire afin d'apprendre les bases de l'utilisation de Matlab dans TRNSYS ainsi que les spécificités du code Matlab afin qu'il puisse être lu dans TRNSYS.

C'est donc finalement cette méthode qui a été choisie afin de réaliser le modèle de simulation d'une batterie lithium-ion à l'aide du logiciel TRNSYS.

## 2.2. Résultats

Cette partie sera consacrée à la description du développement du code Matlab de modélisation de batteries lithium-ion ainsi qu'à l'explication de son fonctionnement. Un dernier point a pour objectif de vérifier le bon fonctionnement de ce code dans le logiciel TRNSYS.

### 2.2.1. Description du modèle Matlab

Pour commencer, le modèle TRNSYS utilisant le code Matlab présenté ci-dessous peut être représenté comme suit :

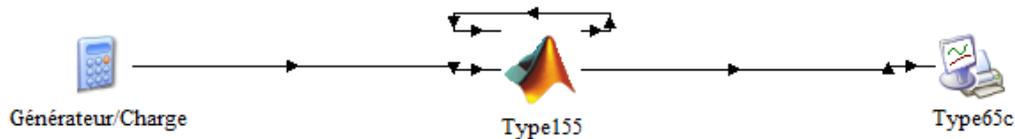


Figure 54 : Modèle TRNSYS

Dans ce modèle, un Type « Equation » est utilisé simplement afin d'injecter dans le Type155 des intensités ou des puissances. Il est utilisé ici uniquement pour les tests et pourra être remplacé par un Types simulant un générateur, comme des panneaux photovoltaïques par exemple ; ainsi que par un Type simulant une charge, par exemple une résistance électrique.

Le Type155 correspond au « Calling Matlab », c'est donc celui-ci qui va permettre l'utilisation et l'intégration du code Matlab dans TRNSYS. La boucle que nous apercevons sera expliquée dans le point 2.2.1.2.

Enfin, le Type65c permet simplement d'afficher les résultats de la simulation sur un graphique. Celui-ci permet également de créer un fichier externe, un fichier texte par exemple, afin d'extraire les résultats de la simulation et ainsi pouvoir les utiliser dans un autre programme, comme Excel.

Ensuite, la description du modèle Matlab est divisée en plusieurs parties :

- La description de la feuille de calcul des paramètres : certains paramètres nécessaires au bon fonctionnement du code sont calculés dans un fichier Excel indépendant, afin de ne pas surcharger le Type155 (« Calling Matlab ») avec trop de paramètres et d'« Inputs » ;
- La description de la partie commune du code Matlab ;
- La description du code lorsque celui-ci utilise une puissance comme « Input » ;
- La description du code lorsque celui-ci utilise une intensité comme « Input ».

#### 2.2.1.1. Feuille de calcul des paramètres

Afin de ne pas surcharger de paramètres et d'« Inputs » le modèle TRNSYS de simulation de la batterie lithium-ion, certains d'entre eux sont calculés à l'aide d'un fichier Excel externe nommé « Calcul des paramètres du modèle ».

Dans cette feuille de calcul, les cellules qui doivent être remplies par l'utilisateur sont colorées en bleu et celles qui correspondent aux paramètres à entrer dans le modèle TRNSYS sont colorées en orange.

Cette feuille de calcul Excel permet tout d'abord de calculer la résistance interne ( $R_i$ ) de la cellule à l'aide des informations de tension à différents C-rates et à partir de la capacité de la cellule. Le calcul correspondant a été décrit dans le point 2.1.2. Cette résistance n'est cependant pas utilisée dans la version du modèle proposée à la fin de ce travail. Cependant, elle s'avérera utile lorsque le modèle sera mis à jour afin de permettre son utilisation.

La partie de la feuille de calcul qui sera utilisée dans le modèle proposé est celle permettant d'obtenir les coefficients « a » et « b » permettant de lier l'intensité et la tension. En effet, Comme nous pouvons le voir dans Figure 55, la tension de la cellule diminue lorsque l'intensité (le C-rate) augmente.

Le but de cette partie est de générer les coefficients « a » et « b » de deux équations de régression linéaire se notant «  $U = a \times I + b$  ». Ces régressions permettront de déterminer les voltages maximum et minimum de la cellule en fonction de l'intensité qui lui est appliquée.

Afin d'y parvenir, le diagramme suivant, présent dans la fiche technique de la cellule, est nécessaire.

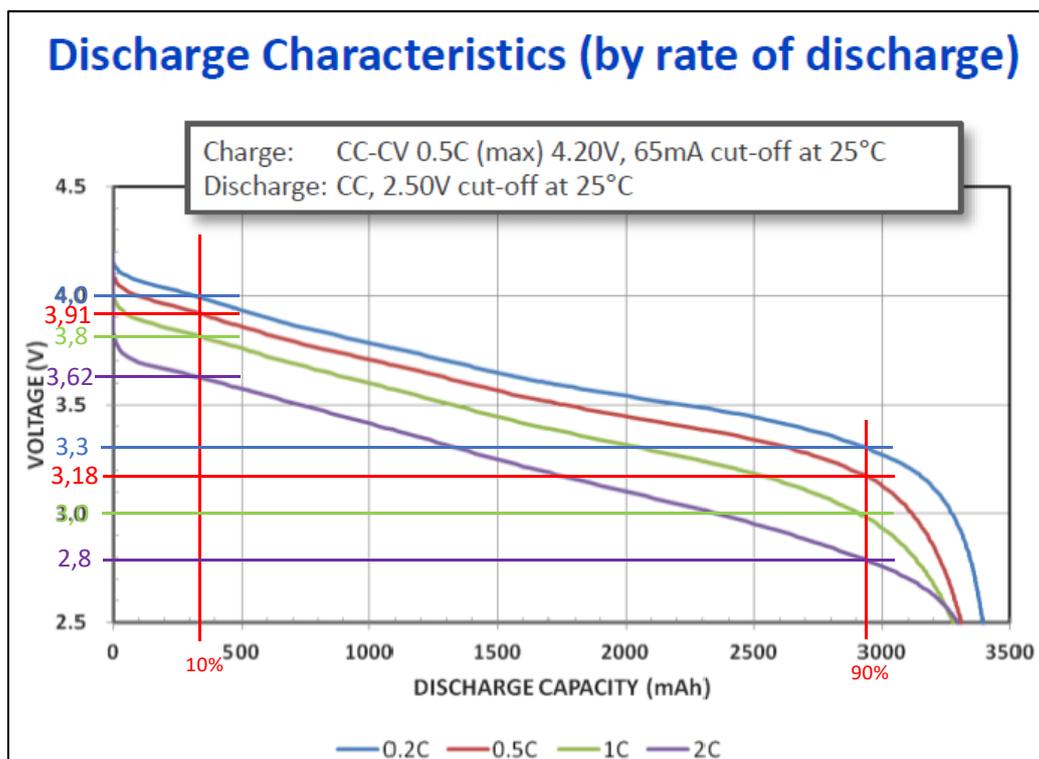


Figure 55 : Diagramme de décharge d'une cellule lithium-ion [144]

Tout d'abord, nous travaillerons entre 10% et 90% de SOC pour deux raisons :

- Pour limiter le stress occasionné à la cellule et ainsi limiter l'impact du vieillissement ;
- Parce que cet intervalle est linéaire et peut donc être représenté plus simplement.

Dans ce graphique, nous n'avons pas d'intensités mentionnées : il est donc nécessaire de les calculer à partir des C-rates. Cela se fait simplement en multipliant le C-rate par la capacité nominale (en Ah) de la cellule. Nous obtenons ainsi l'intensité correspondant à chaque C-rate en A.

Ensuite, pour chaque intensité, nous cherchons dans le graphique la tension correspondant à 10% de DOD ainsi qu'à 90%. Par exemple, pour un C-rate de 0,2C, la tension à 10% de DOD est de 4,0 V tandis que la tension à 90% de DOD est de 3,3 V.

Nous pouvons dès lors réaliser une régression linéaire du voltage en fonction de l'intensité et nous obtenons le graphique suivant :

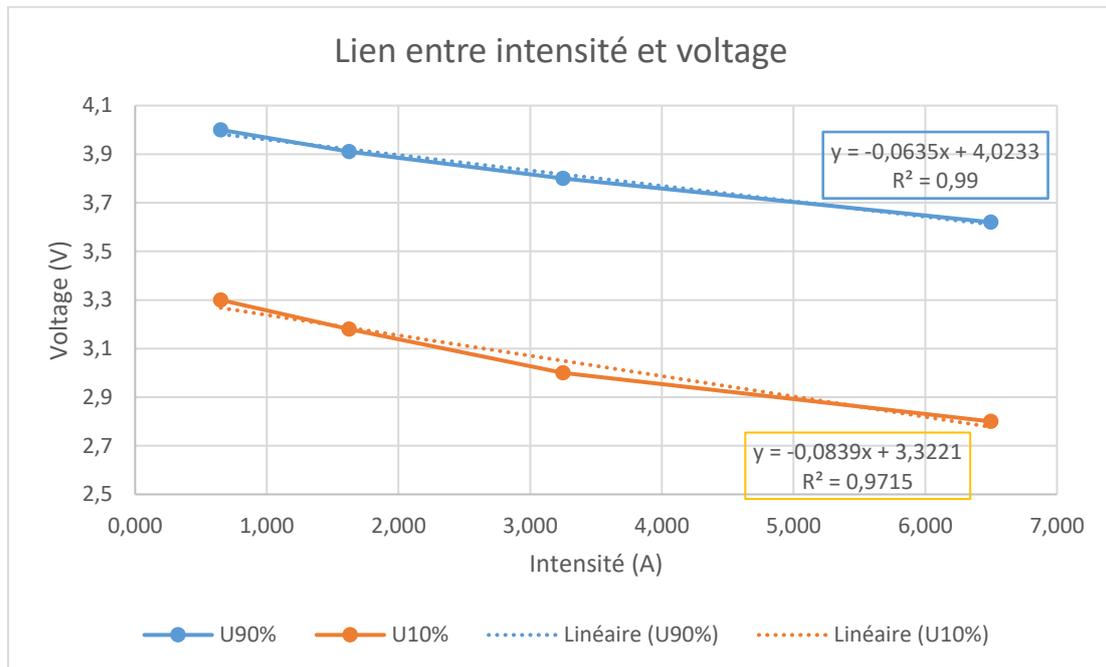


Figure 56 : Régression linéaire du voltage en fonction de l'intensité

Dans ce graphique, la courbe bleue correspond à la tension de la cellule à 90% de SOC et la courbe orange à 10% de SOC. La tension diminue lorsque l'intensité augmente.

Comme nous pouvons le voir, la relation entre tension et intensité n'est pas totalement linéaire. Nous avons cependant estimé que tel était le cas afin de simplifier le modèle. De plus, l'erreur est négligeable étant donné les bons coefficients de corrélation obtenus ( $R^2$ ).

Ce graphique est assez peu important ; ce sont les coefficients de la droite de régression qui nous intéressent. Ceux-ci sont obtenus à l'aide de la fonction Excel « DROITEREG ». Nous obtenons ainsi les coefficients de l'équation  $y = ax + b$  dans les deux cas : 90% de SOC et 10% de SOC. Ainsi, ce sont les coefficients «  $a_{max}$  », «  $a_{min}$  », «  $b_{max}$  » et «  $b_{min}$  » qui seront utilisés dans la simulation TRNSYS.

Le graphique suivant montre les droites de tension obtenues pour différents C-rates (légende du graphique).

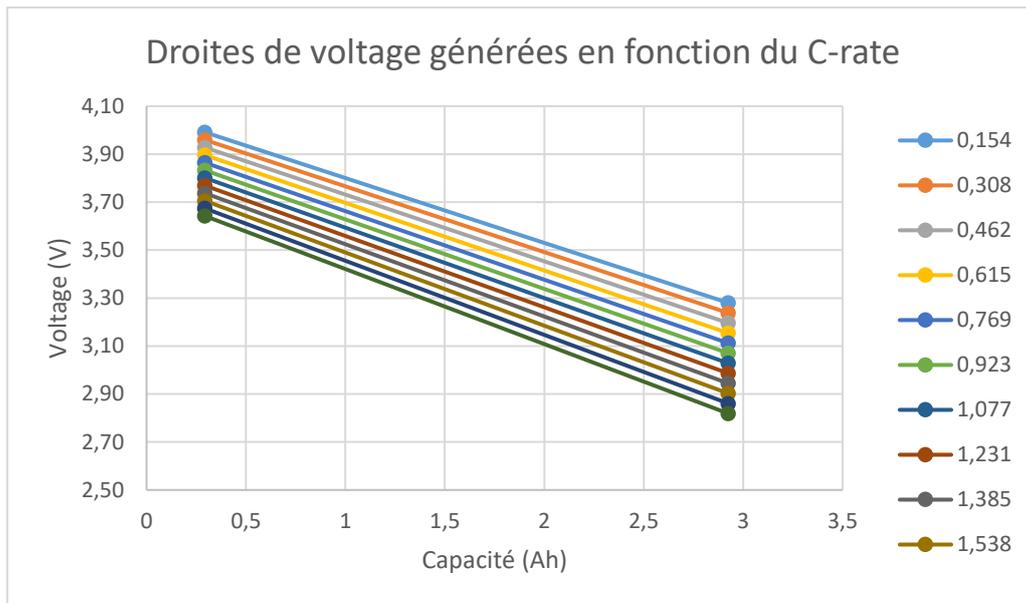


Figure 57 : Droites de voltages générées à partir des coefficients "a" et "b" précédemment obtenus

Notons que nous prenons une hypothèse dans la modélisation de ces droites de voltage : nous considérons que la droite est identique, que nous soyons en charge ou en décharge.

En effet, les fiches techniques proposent des courbes de décharge en fonction du C-rate, comme proposé dans la Figure 55. Elles ne proposent cependant pas les mêmes informations concernant la charge. Les caractéristiques de charge proposées par les fiches techniques sont semblables à la Figure 58.

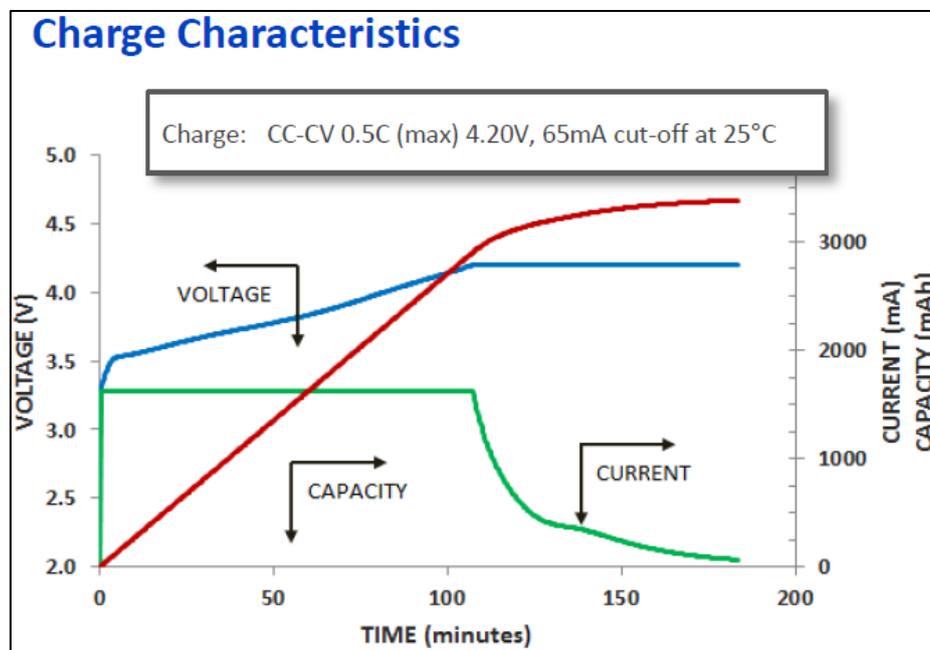


Figure 58 : Caractéristiques de charge d'une cellule lithium-ion [144]

Cette figure ne permet pas d'extrapoler l'influence de l'intensité sur le voltage étant donné que ce graphique ne représente le voltage que pour un seul C-rate : 0,5C.

Des tests réels seraient intéressants afin de pouvoir comparer l'influence du C-rate sur la tension de la batterie en charge ainsi qu'en décharge.

### 2.2.1.2. Partie commune

Nous en venons maintenant au code Matlab à proprement parler.

La première partie du code est commune et est utilisée quels que soient les paramètres définis dans la simulation. Cette partie débute par la définition de tous les paramètres utilisés, comme nous pouvons le voir dans la Figure 59.

```
139 % --- Get TRNSYS Inputs ---
140
141 Mode = trnInputs(1); % Mode
142 Q_100_batt = trnInputs(2); %
143 SOC_max = trnInputs(4); %
144 SOC_min = trnInputs(5); % SOC
145 a_max = trnInputs(6); % Coef
146 a_min = trnInputs(7); % Coef
147 b_max = trnInputs(8); % Coef
148 b_min = trnInputs(9); % Coef
149 P_gen = trnInputs(10); % Pui
150 I_gen = trnInputs(11); % Int
151 P_load = trnInputs(12); % Pu
152 I_load = trnInputs(13); % Ir
153 Ns = trnInputs(14); % Nombre
154 Np = trnInputs(15); % Nombre
155 eff_regul = trnInputs(16); %
156 eff_ondul = trnInputs(17); %
157 eff_ch = trnInputs(18); % Re
158
159 mFileErrorCode = 60; % Aft
```

Figure 59 : Code Matlab : définition des paramètres et "Inputs"

Le nombre d'« Inputs » et de paramètres est défini dans le Type155. Afin que Matlab soit capable de les lire, il est nécessaire de définir dans le code Matlab le numéro du paramètre ou de l'« Input » que nous voulons utiliser. Cela s'effectue à l'aide de la fonction « trnInputs(X) » dans laquelle le « X » correspond au numéro de l'« Input » ou paramètre en question dans le Type155 TRNSYS. Notons que les notations en vert dans cette figure, et les suivantes, ne sont pas importantes ici : il s'agit de commentaires dans le code Matlab qui permettent d'expliquer à quoi correspondent les différents paramètres. Ceux-ci sont expliqués ci-après.

Les différents paramètres qui sont pris en compte dans ce code sont au nombre de 18 et sont les suivants :

- Le **Mode** : il permet de choisir le fonctionnement du code, il prend comme valeur soit « 0 », soit « 1 ».
  - o Si le Mode vaut « 0 » : c'est la puissance qui est utilisée comme « Input », le code recalcule alors une intensité électrique en fonction de cette puissance ;
  - o Si le Mode vaut « 1 » : c'est l'intensité électrique qui est directement utilisée en « Input ».

Le choix du mode dépendra donc des informations disponibles.

- **Q\_100\_batt** : capacité nominale de la batterie, à 100% de SOC. Celle-ci est donnée en **Ah**.
- **SOC\_max** : valeur maximale du SOC, celui-ci est compris entre 0 et 1. Il est conseillé de fixer le SOC<sub>max</sub> à maximum 0,9 afin de réduire le stress occasionné sur la batterie ;
- **SOC\_min** : valeur minimale du SOC, celui-ci est compris entre 0 et 1. Il est conseillé de fixer le SOC<sub>min</sub> à minimum 0,1 afin de réduire le stress occasionné sur la batterie ;
- **a\_max** : coefficient « a » de l'équation de détermination de la courbe de voltage  $y = ax + b$ , pour un SOC de 90%, calculé à partir du fichier Excel « Calcul des paramètres du modèle » ;
- **a\_min** : coefficient « a » de l'équation de détermination de la courbe de voltage  $y = ax + b$ , pour un SOC de 10%, calculé à partir du fichier Excel « Calcul des paramètres du modèle » ;
- **b\_max** : coefficient « b » de l'équation de détermination de la courbe de voltage  $y = ax + b$ , pour un SOC de 90%, calculé à partir du fichier Excel « Calcul des paramètres du modèle » ;
- **b\_min** : coefficient « b » de l'équation de détermination de la courbe de voltage  $y = ax + b$ , pour un SOC de 10%, calculé à partir du fichier Excel « Calcul des paramètres du modèle » ;
- **P\_gen** : puissance fournie par le générateur connecté en entrée du modèle (panneaux photovoltaïques par exemple), dans le cas du Mode 0, la puissance est donnée en **W** ;
- **I\_gen** : cet « Input » est utilisé de deux manières différentes en fonction du mode utilisé :
  - o Si le Mode vaut « 0 » : il s'agit d'un paramètre qui correspond à l'intensité **d'une seule cellule**. Cette intensité est une constante utilisée comme valeur initiale des itérations nécessaires au calcul de l'intensité et du voltage de la cellule. Ces itérations seront décrites au point suivant. Cette valeur est donnée en **A** ;
  - o Si le Mode vaut « 1 » : il s'agit de l'intensité électrique fournie par le générateur, connecté en « Input » au modèle ((panneaux photovoltaïques par exemple). Cette valeur est donnée en **A**.
- **P\_load** : puissance demandée par une charge connectée à la batterie, cette valeur est donnée en **W** ;
- **I\_load** : intensité électrique demandée par une charge connectée à la batterie, cette valeur est donnée en **A** ;
- **Ns** : nombre de cellules connectées en série dans la batterie ;
- **Np** : nombre de cellules connectées en parallèle dans la batterie ;
- **eff\_regul** : rendement du régulateur de tension, placé entre le générateur et le système de stockage par batteries, sa valeur est comprise entre 0 et 1 ;
- **eff\_ondul** : rendement de l'onduleur, placé entre le système de stockage par batteries et une charge connectée en courant alternatif (le compteur électrique de la maison par exemple), sa valeur est comprise entre 0 et 1 ;
- **eff\_ch** : rendement énergétique de la batterie, sa valeur est comprise entre 0 et 1.

La ligne « mFileErrorCode = 60 » sert uniquement à la recherche d'erreurs dans le code Matlab. En effet, ce code n'a pas fonctionné dès le premier essai, des erreurs survenaient lorsque nous tentions de le faire fonctionner. Cette petite ligne de code permet alors d'avoir une précision de l'endroit du code qui pose problème. Lorsque le code rencontre une erreur et s'arrête, il vérifie la dernière fonction « mFileErrorCode » qu'il a rencontré et renvoie le numéro situé après le signe « égal ». Ainsi, lorsqu'une erreur se produit, nous savons qu'elle s'est produite après le numéro d'erreur correspondant et avant le suivant numéro d'erreur, étant donné que le code s'est arrêté avant et ne l'a donc pas encore lu.

Une fois que tous les paramètres et « Inputs » ont été définis, le code peut se poursuivre avec l'étape suivante.

```

161 % Récupérer le SOC au temps t=0 lors du premier pas de temps ou récupérer le SOC enregistré en fin de pas de temps
162
163 if ((trnInfo(7) == 0) && (trnTime-trnStartTime < 1e-6))
164     SOC = trnInputs(3); % Prend la valeur du SOC au temps 0 pour le premier pas de temps
165 else
166     SOC = trnInputs(19); % Récupère le SOC en sortie pour tous les pas de temps sauf le premier
167 end

```

Figure 60 : Code Matlab : définition du SOC

Cette partie a pour objectif de déterminer la valeur du SOC en fonction du pas de temps de la simulation. Comme nous pouvons le voir dans cette partie du code, un 19<sup>ème</sup> « Input » est présent. Celui-ci est présent uniquement afin de permettre la détermination du SOC en début de pas de temps. En effet, à chaque pas de temps de TRNSYS, le programme appelle le Type155 et parcourt le code Matlab. Ce code a besoin de la valeur du SOC au début de chaque pas de temps afin de pouvoir proposer l'évolution de l'état de charge de la batterie au cours du temps.

La partie du code présentée dans la Figure 60 gère la récupération de la valeur du SOC à chaque début de pas de temps.

Pour ce faire, une fonction « if » est utilisée. Celle-ci vérifie deux cas de figure :

- **S'il** s'agit du premier pas de temps de la simulation TRNSYS, alors le SOC est déterminé par le 3<sup>ème</sup> « Input » qui correspond au SOC au temps t=0 (**SOC\_t0**). La partie de code « *trnInfo(7) == 0) && (trnTime=trnStartTime < 1e-6)* » permet de définir le premier pas de temps de la simulation.
- **Sinon** (« else »), c'est-à-dire si nous ne nous trouvons pas dans le premier pas de temps de la simulation, alors le SOC est égal au 19<sup>ème</sup> « Input » dans TRNSYS (**SOC**). Comme nous pouvons le voir dans la Figure 61, le Type155 reboucle sur lui-même.

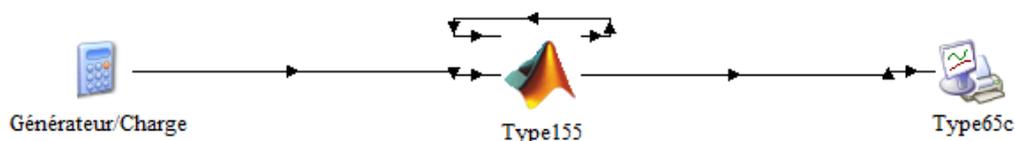


Figure 61 : Modèle TRNSYS

Cette boucle permet de récupérer le SOC calculé en « Output » afin de le réinjecter en « Input ». Cela permet donc de récupérer le SOC du pas de temps précédent, afin de pouvoir l'utiliser dans le pas de temps présent.

La valeur du SOC ainsi obtenue sera utilisée par la suite du code et sera mise à jour à la fin de celui-ci afin de récupérer la nouvelle valeur de SOC. Cette récupération du SOC termine alors la partie correspondant à la récupération des paramètres.

Nous entrons alors maintenant dans la partie permettant de réaliser les calculs numériques.

Pour commencer, les premières étapes sont présentées dans la Figure 62.

```
171 % --- Calculation ---
172
173 if SOC>SOC_max
174     SOC=SOC_max;
175 elseif SOC<SOC_min;
176     SOC=SOC_min;
177 else
178     SOC=SOC;
179 end
180
```

Figure 62 : Code Matlab : Précautions concernant le SOC

Cette partie a uniquement pour objectif d'éviter un arrêt inopiné de la simulation suite à une erreur.

En effet, l'intégration de l'intensité permettant de calculer le SOC n'est pas réalisée sur un pas de temps infinitésimal ; le pas de temps utilisé est celui de la simulation TRNSYS. De ce fait, étant donné que le pas de temps a une durée non négligeable, il est possible que le SOC obtenu en fin de pas de temps dépasse le SOC maximum ou soit inférieur au SOC minimum.

Par exemple si le  $SOC_{max}$  est fixé à 0,9 et que le pas de temps est de 5 minutes. Si le SOC au temps  $t-1$  est déjà à 0,89 ; il est fort possible que le SOC obtenu au temps  $t$  dépasse 0,9 pour autant que la batterie soit en chargement et que l'intensité soit suffisante.

Le SOC pourrait donc dépasser les limites fixées, ce qui risquerait de générer une erreur dans la suite du code.

Afin de pallier à cette éventualité, et étant donné qu'il est recommandé de fixer un pas de temps assez court (par exemple 1 minute), afin d'éviter au maximum ces dépassement, les vérifications proposées dans la Figure 62 sont réalisées. De plus, étant donné que le pas de temps est réduit, ces dépassements seraient minimes, l'erreur engendrée serait donc faible.

Le modèle vérifie donc plusieurs conditions :

- Si le SOC est supérieur au  $SOC_{max}$  : le SOC est fixé comme étant égal au  $SOC_{max}$  ;
- Si le SOC est inférieur au  $SOC_{min}$  : le SOC est fixé comme étant égal au  $SOC_{min}$  ;
- Si le SOC n'est ni inférieur au  $SOC_{min}$ , ni supérieur au  $SOC_{max}$  : nous gardons la valeur de SOC.

La partie commune du code se termine alors par la partie suivante.

```
181 Q_100_cell = Q_100_batt/(Ns*Np) ;
182 Q_t0_cell = Q_100_cell*SOC;
```

Figure 63 : Code Matlab : Calcul de la capacité d'une cellule et de la capacité d'une cellule au premier pas de temps

Cette dernière partie du code a simplement pour objectif de ramener certains paramètres à l'échelle d'une seule cellule, au lieu de rester à l'échelle de la batterie complète. En effet, les opérations réalisées dans le codes le sont sur base d'une seule cellule pour des raisons de simplicité.

Cette partie calcule donc la capacité nominale (SOC = 100%) d'une cellule ( $Q_{100\_cell}$ ) à partir de la capacité nominale de la batterie ( $Q_{100\_batt}$ ). La capacité d'une cellule étant égale à la capacité de la batterie divisée par le nombre de cellule dans celle-ci. Ce nombre étant égal au nombre de cellules en série multiplié par le nombre de cellules en parallèle.

Équation 25 : Calcul de la capacité nominale d'une cellule en fonction de la capacité nominale de la batterie

$$Q_{nom,cell} = \frac{Q_{nom,batt}}{N_s \times N_p}$$

La capacité de la cellule au début du pas de temps ( $Q_{t0\_cell}$ ) est alors calculée en fonction de la capacité nominale de la cellule et du SOC qui a été récupéré précédemment.

Équation 26 : Calcul de la capacité en début de pas de temps en fonction de la capacité nominale et du SOC

$$Q_{t0,cell} = Q_{nom,cell} \times SOC$$

Ceci termine alors la partie commune du code.

### 2.2.1.3. Puissance en entrée

A la suite de la partie commune du code, nous entrons dans la première partie particulière de celui-ci. Cette partie correspond à la sélection du premier Mode, le Mode « 0 ». Dans celui-ci, c'est la puissance qui est utilisée comme « Input ».

Le code commence donc par une fonction « Si » qui vérifie la valeur du Mode dans lequel nous nous trouvons. Comme nous pouvons le voir dans la Figure 64, nous nous trouvons dans le cas où la valeur du Mode a été fixée à « 0 » dans les paramètres.

```

185 if Mode == 0 % Puissance en Input
186
187     P_batt = P_gen*eff_regul - abs(P_load)*eff_ondul; % La puissance circu
188
189     P_cell = P_batt/(Ns*Np); % Calcul de la puissance d'une seule cell
190     I_0 = I_gen; % L'intensité définie comme paramètre dans TRNSYS cor
191     U_max = a_max*I_0+b_max; % Calcul de la tension à 90% de SOC en fc
192     U_min = a_min*I_0+b_min; % Calcul de la tension à 10% de SOC en fc
193     delta_U = U_max-U_min;
194
195     SOC_bis = (1/(SOC_max-SOC_min))*SOC-(SOC_min/(SOC_max-SOC_min));
196
197     U_0 = U_max-delta_U*(1-SOC_bis);

```

Figure 64 : Code Matlab : Sélection du Mode "0", calcul de la puissance, de l'intensité initiale et du voltage initial

Etant donné que nous nous trouvons dans le Mode « 0 », c'est la puissance qui sera utilisée comme variable d'entrée de la simulation.

Rappelons-nous que dans la définition des paramètres, deux puissances ont été amenées : la puissance du générateur et la puissance de la charge. Ainsi, dans le fonctionnement de ce modèle, la puissance utilisée pour charger la batterie ainsi que celle utilisée pour la décharger sont toutes deux des « Inputs ». Ces deux puissances sont utilisées dans cette toute première partie du Mode « 0 » afin de calculer la puissance globale, interagissant avec la batterie.

La puissance extraite ou intégrée dans la batterie ( $P_{batt}$ ) est calculée à l'aide de la formule suivante :

Équation 27 : Calcul de la puissance appliquée à la batterie en fonction de la puissance du générateur et de la charge

$$P_{Batt} = P_{Gen} \times Eff_{Regul} - |P_{Load}| \times Eff_{Ondul}$$

Tout d'abord, dans cette formule, la puissance appliquée à la batterie est calculée en soustrayant à la puissance du générateur, celle demandée par la charge ; nous obtenons ainsi la puissance globale appliquée à la batterie. Ceci permet de simuler le fait que la batterie peut être chargée d'un côté, par des panneaux photovoltaïques par exemple, et en même temps, être déchargée de l'autre côté.

La puissance de la charge est prise en valeur absolue, cela permet de s'assurer que cette puissance soit bien positive et puisse être soustraite de la puissance du générateur. En effet, il est possible que la puissance de la charge soit définie comme étant une valeur négative comme positive, en fonction de la logique utilisée. Cette puissance peut être simplement définie comme « négative » à l'aide de la dénomination qu'elle porte par exemple.

C'est également dans cette équation que les rendements du régulateur ( $Eff_{regul}$ ) et de l'onduleur ( $Eff_{ondul}$ ) sont utilisés. Ainsi, le rendement du régulateur s'applique sur la puissance du générateur, étant donné que le régulateur est placé entre le générateur et la batterie. Le rendement de l'onduleur s'applique, quant à lui, sur la puissance de la charge ; l'onduleur étant placé entre la batterie et la charge.

Une fois que la puissance appliquée à la batterie est calculée, nous en déduisons simplement la puissance appliquée à une seule cellule à l'aide de la formule suivante :

*Équation 28 : Calcul de la puissance appliquée à une cellule sur base de la puissance appliquée à la batterie*

$$P_{Cell} = \frac{P_{Batt}}{N_s \times N_p}$$

De la même manière que dans le calcul de la capacité d'une cellule, le nombre de cellules est obtenu en multipliant le nombre de cellules en série par le nombre de cellules en parallèle.

Comme nous l'avons précisé dans le point 2.2.1.2, dans le cas où nous nous trouvons en Mode « 0 », l'intensité du générateur est utilisée comme valeur initiale du calcul de l'intensité et de la tension en fonction de la puissance. Nous définissons donc à la ligne 190 du code que cette intensité est égale à l'intensité initiale ( $I_0$ ).

Sur base de cette intensité initiale, nous pouvons calculer la droite de tension sur laquelle nous nous trouvons, la tension diminuant lorsque l'intensité augmente. Cette droite de tension a été décrite dans le point 2.2.1.1. Cette intensité permet donc de calculer la tension maximale ( $U_{max}$ ) et la tension minimale ( $U_{min}$ ) de la cellule. Ces tensions correspondant au  $SOC_{max}$  et au  $SOC_{min}$  respectivement. Les formules utilisées sont les suivantes :

*Équation 29 : Calculs des tensions maximum et minimum*

$$U_{max} = a_{max} \times I_0 + b_{max}$$

$$U_{min} = a_{min} \times I_0 + b_{min}$$

Les coefficients « a » et « b » ont donc été calculés préalablement dans la feuille de calcul des paramètres et correspondent aux coefficients de la régression linéaire  $U = a \times I + b$ . La tension est fonction de l'intensité.

Nous calculons ensuite la différence de tension entre les deux valeurs calculées ci-dessus. Nous obtenons ainsi la valeur de  $\Delta U$ .

Cette valeur devrait alors être utilisée dans le calcul de la tension qui, étant considérée comme une fonction linéaire du SOC, devrait être calculée comme suit :

Équation 30 : Formule simple du calcul de la tension en fonction du SOC

$$U = U_{max} - \Delta U \times (1 - SOC)$$

Cette formule signifie que si le SOC vaut 1 (par exemple), alors la tension de la batterie sera égale à la tension maximale ; par contre, s'il vaut 0, elle sera égale à la tension minimale ( $U_{max} - \Delta U$ ).

Le problème qui se pose est que le SOC que nous calculons dans le code est compris entre les limites de SOC ; entre 0,1 et 0,9 dans ce cas. Or, la tension maximum et la différence de tension prennent déjà en compte ces limites de SOC. Si nous utilisons un SOC compris entre  $SOC_{min}$  et  $SOC_{max}$  dans l'Équation 30, cet intervalle de SOC serait pris en compte deux fois ; nous ne pourrions jamais atteindre les valeurs de  $U_{max}$  et  $U_{min}$ .

Le SOC utilisé dans cette formule doit donc être compris entre 0 et 1 et non entre  $SOC_{min}$  et  $SOC_{max}$ .

Afin de pallier à ce problème, un nouvel SOC est alors calculé : le  $SOC_{bis}$ .

Ce nouvel SOC est alors calculé à l'aide d'une régression linéaire qui répond aux conditions suivantes :

- Lorsque  $SOC = SOC_{max}$  alors  $SOC_{bis} = 1$  ;
- Lorsque  $SOC = SOC_{min}$  alors  $SOC_{bis} = 0$ .

La fonction  $y = ax + b$  correspond à une régression linéaire. Dans cette fonction, « a » correspond à la pente et « b » correspond à l'ordonnée à l'origine. Ces deux données sont calculées comme suit :

Équation 31 : Formules de calcul de la pente et de l'ordonnée à l'origine d'une droite

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$b = y_1 - a \times x_1 \text{ ou } b = y_2 - a \times x_2$$

Dans notre cas, les « y » correspondent aux  $SOC_{bis}$  et les « x » aux SOC (classiques). «  $y_2$  » correspond au maximum du  $SOC_{bis}$ , c'est-à-dire 1 ; et «  $y_1$  » correspond à son minimum, c'est-à-dire 0. «  $x_2$  » correspond à  $SOC_{max}$  et «  $x_1$  » à  $SOC_{min}$ . Les formules deviennent donc :

Équation 32 : Formules de calcul des coefficients a et b de la régression linéaire

$$a = \frac{1 - 0}{SOC_{max} - SOC_{min}} = \frac{1}{SOC_{max} - SOC_{min}}$$

$$b = 0 - a \times SOC_{min} \text{ ou } b = 1 - a \times SOC_{max}$$

En remplaçant « a » dans la première formule de « b » :

$$b = - \frac{1}{SOC_{max} - SOC_{min}} \times SOC_{min} = - \frac{SOC_{min}}{SOC_{max} - SOC_{min}}$$

En combinant ces deux formules, nous obtenons dès lors une nouvelle formule permettant de calculer ce  $SOC_{bis}$ . La formule de régression linéaire devenant :  $SOC_{bis} = a \times SOC + b$ .

Équation 33 : Formule permettant de calculer le  $SOC_{bis}$

$$SOC_{bis} = \frac{1}{SOC_{max} - SOC_{min}} \times SOC - \frac{SOC_{min}}{SOC_{max} - SOC_{min}}$$

Une fois que nous avons cette valeur, nous pouvons dès lors transformer l'Équation 30 afin de calculer la tension initiale en fonction des valeurs obtenues à partir de l'intensité initiale ; la formule devient alors :

Équation 34 : Calcul de la tension initiale en fonction du  $SOC_{bis}$

$$U_0 = U_{max} - \Delta U \times (1 - SOC_{bis})$$

A ce point, nous avons dès lors une tension initiale et une intensité initiale. Cependant, ces valeurs ne sont pas encore fonction de la puissance utilisée en « Input ». Nous allons maintenant procéder à des itérations afin de déterminer un couple tension/intensité correspondant à la puissance, et ce, afin de respecter la relation qui lie la puissance à la tension et à l'intensité :

Équation 35 : Formule de calcul de la puissance à partir de la tension et de l'intensité

$$P = U \times I$$

Les itérations, permettant de faire converger le couple tension/intensité avec la puissance, sont réalisées à l'aide d'une boucle « **while** » comme nous pouvons le voir dans la Figure 65.

```

199 while abs(abs(P_cell)-(U_0*abs(I_0)))>0.01 % Vale
200
201     I_cell = P_cell/U_0;
202     U_max = a_max*abs(I_cell)+b_max;
203     U_min = a_min*abs(I_cell)+b_min;
204     delta_U = U_max-U_min;
205     U_cell = U_max-delta_U*(1-SOC_bis);
206     U_0 = U_cell;
207     I_0 = I_cell;
208     mFileErrorCode = 90;
209
210 end

```

Figure 65 : Code Matlab : Boucle itérative permettant de faire converger le couple tension/intensité avec la puissance

Une boucle signifie que le programme restera dans cette partie du code, entre le « **while** » et le « **end** », tant que la condition spécifiée après le « **while** » reste remplie.

Dans ce cas, nous disons que nous continuons les itérations, la boucle, tant que la condition suivante est remplie :

$$P_{cell} - U_0 \times I_0 > 0,01$$

Précisons que cette condition utilise des valeurs absolues (« **abs()** »). Elles permettent de faire en sorte que la condition précisée ci-dessus soit toujours positive. Si les valeurs absolues n'étaient pas utilisées, il serait possible que le nombre converge vers un nombre négatif très proche de 0, mais sans jamais repasser en positif. Les valeurs absolues permettent d'éviter cela et évitent donc un arrêt involontaire de la simulation.

Nous définissons par cette condition que le couple tension/intensité que nous calculons doit se rapprocher au maximum de la puissance appliquée à la cellule. L'erreur admise étant, dans ce cas, fixée à 0,01. Cette valeur est fixée arbitrairement mais est assez petite pour ne pas générer une erreur trop importante ; et assez grande pour ne pas demander un trop grand nombre d'itérations, ce qui ralentirait la simulation.

Chaque itération réalisée dans cette boucle suit les étapes suivantes :

- Nous calculons tout d'abord une nouvelle intensité appliquée à la cellule (l'intensité appliquée précédemment ayant été fixée « arbitrairement » afin d'obtenir une première valeur). Cette nouvelle intensité est calculée en fonction de la tension initiale calculée précédemment et de la puissance appliquée à la cellule (dont nous disposons en « Input ») ;
- A l'aide de cette nouvelle intensité ( $I_{cell}$ ), un nouveau  $\Delta U$  est calculé, de la même manière qu'expliqué précédemment. Ce  $\Delta U$  permet alors de calculer une nouvelle tension de la cellule, en se basant toujours sur le  $SOC_{bis}$ . Notons que le  $SOC_{bis}$  n'est pas recalculé, celui-ci étant constant sur un pas de temps, il n'est pas nécessaire de le recalculer à chaque itération ;
- Nous définissons alors les tension ( $U_{cell}$ ) et intensité ( $I_{cell}$ ) comme étant les nouvelles tension et intensité initiales ;
- La boucle revérifie alors la condition. Si cette condition est toujours remplie, la boucle recommence et si elle n'est plus remplie, c'est-à-dire si la puissance et le couple tension/intensité ont convergé, alors le code sort de cette boucle et continue.

Ainsi, à chaque itération, nous obtenons une nouvelle intensité en fonction de la puissance appliquée à la cellule. Cette nouvelle intensité permet de calculer à quel niveau de voltage la cellule fonctionne (donné par les valeurs de  $U_{max}$  et  $U_{min}$ ). Nous nous trouvons donc sur une nouvelle droite de voltage. La tension de la cellule est alors calculée sur base du SOC.

Chaque itération permet de se rapprocher de plus en plus de la puissance appliquée à la cellule et ainsi les itérations permettent de trouver un couple tension/intensité correspondant à la puissance en « Input » (rapportée à une cellule).

Une fois que nous sommes sortis de la boucle, nous avons enfin calculé la tension et l'intensité de la cellule. Cependant, elles sont toujours appelées «  $U_0$  » et «  $I_0$  ». Elles sont dès lors renommées en «  $U_{cell}$  » et «  $I_{cell}$  », comme nous pouvons le voir dans la Figure 66, pour des raisons de facilité de lecture du code par la suite.

```
212     U_cell = U_0;  
213     U_batt = U_cell*Ns;  
214     I_cell = I_0;  
215     I_batt = I_cell*Np;  
216
```

Figure 66 : Code Matlab : Définition de la tension et de l'intensité de la cellule

La tension et l'intensité de la batterie sont alors calculées. Pour ce faire, la tension de la cellule est multipliée par le nombre de cellules en série (le nombre de cellules en parallèle n'impactant pas la tension) ; et l'intensité de la cellule est multipliée par le nombre de cellules en parallèle (le nombre de cellules en série n'impactant pas l'intensité). Ces valeurs seront utilisées à la fin du code, afin de générer les « Outputs ».

Toute la partie située entre la définition du Mode et cet endroit a uniquement eu pour objectif de calculer la tension et l'intensité de la batterie.

Nous entrons dès lors dans une nouvelle partie du code, celle qui permettra notamment d'intégrer l'évolution du SOC.

Cette partie est principalement basée sur des conditions, utilisant la fonction « **if** ». Le code vérifiera donc à chaque « **if** » (ou « **elseif** ») si la condition est remplie ou non avant de rentrer dans cette partie du code.

```

217     if P_cell > 0 % En charge
218
219         if SOC < SOC_max && SOC >= SOC_min;
220
221             Q_cell = I_cell*trnTimeStep*eff_ch+Q_t0_cell;
222             Q_batt = Q_cell*Np;
223             SOC = (Q_cell*Np)/(Q_100_cell*Np);
224             P_over = 0;
225             P_lack = 0;

```

Figure 67 : Code Matlab : Comportement de la cellule en charge, lorsque le SOC est compris entre le  $SOC_{max}$  et le  $SOC_{min}$ , en Mode « 0 »

Comme nous pouvons le voir dans la Figure 67, la condition pour rentrer dans cette partie du code est que la puissance de la cellule soit supérieure à 0. C'est-à-dire lorsque la batterie est **en charge** (et, toujours, que nous sommes en Mode « 0 »).

Si nous sommes en condition de charge, alors le code vérifie dans quelles conditions de SOC nous nous trouvons.

La première condition de SOC est vérifiée si le SOC actuel est compris entre le  $SOC_{min}$  et le  $SOC_{max}$ . Si tel est le cas, la batterie peut se charger. Le SOC doit être strictement inférieur au  $SOC_{max}$  mais peut être égal au  $SOC_{min}$  pour que la batterie accepte le rechargement.

Si toutes ces conditions sont remplies, nous pouvons alors calculer la nouvelle capacité, la nouvelle quantité d'énergie, présente dans la cellule. Cela est réalisé à l'aide de l'équation suivante :

Équation 36 : Formule de calcul de la capacité de la cellule en charge

$$Q_{Cell} = I_{Cell} \times Time_{Step} \times Eff_{Ch} + Q_{t0,cell}$$

Dans cette étape, nous intégrons l'intensité en fonction du temps, nous obtenons donc une capacité en Ah. C'est également à cette étape que le rendement énergétique est utilisé ( $Eff_{Ch}$ ). Ce rendement permet de prendre en compte le fait que la totalité du courant de recharge n'est pas utilisé pour recharger la batterie, une certaine quantité est perdue. Nous ajoutons alors la capacité qui était disponible au pas de temps précédent ( $Q_{t0,cell}$ ) afin d'obtenir la nouvelle capacité. Cette capacité du pas de temps précédent avait été calculée en début de code Matlab à l'aide du SOC que nous récupérons en « Output » et que nous réinjectons en « Input » dans la simulation TRNSYS.

Précisons également dans cette formule que le pas de temps utilisé est celui de la simulation TRNSYS. Celui-ci est récupéré grâce à la fonction « trnTimeStep ». Il est important de souligner que ce pas de temps est toujours en « heures », quelle que soit l'unité qui a été choisie dans les paramètres de la simulation TRNSYS. Ceci est un avantage étant donné que nous voulons avoir un pas de temps en « heures » afin de calculer une capacité en « Ah ».

La capacité de la batterie ( $Q_{Batt}$ ) est alors calculée à l'aide de la capacité de la cellule, en multipliant simplement celle-ci par le nombre de cellules en parallèle.

Nous pouvons alors enfin calculer le nouveau SOC comme suit :

Équation 37 : Formule de calcul du SOC

$$SOC = \frac{Q_{Cell}}{Q_{nom,cell}}$$

Le SOC étant égal au ratio entre la capacité contenue dans la batterie (ou cellule) et la capacité nominale de celle-ci.

Ce code Matlab permet également de calculer une puissance excédentaire ( $P_{Over}$ ) ainsi qu'une puissance déficitaire ( $P_{Lack}$ ). La puissance excédentaire est une puissance que ni la charge, ni la batterie ne peuvent absorber ; par exemple parce que la batterie est pleine. La puissance déficitaire est, quant à elle, une puissance que ni la batterie, ni le générateur ne sont capables de fournir ; par exemple lorsque la batterie est complètement déchargée et que la charge demande plus de puissance que ce que le générateur est capable de fournir. Notons que la puissance excédentaire retourne une valeur positive alors que la puissance déficitaire retourne une valeur négative.

Dans ce cas, ces deux puissances sont nulles, étant donné que nous sommes dans la condition où la batterie peut se recharger.

La seconde possibilité lorsque la batterie est en charge est la suivante :

```

229         elseif SOC == SOC_max;
230
231             Q_batt = Q_t0_cell*Np;
232             P_over = U_cell*I_cell*Ns*Np;
233             P_lack = 0;
234
235             mFileErrorCode = 110;
236
237         end

```

Figure 68 : Code Matlab : Comportement de la cellule en charge lorsque le SOC est égal au  $SOC_{max}$ , en Mode « 0 »

Si le SOC n'est pas compris entre les limites de SOC et que la batterie est en charge, cela signifie que la batterie est complètement chargée, c'est-à-dire que le SOC est égal au  $SOC_{max}$ . C'est ce cas qui est représenté dans cette condition.

Si tel est le cas, la capacité de la batterie est simplement égale à la capacité d'une cellule multipliée par le nombre de cellules en parallèle. La capacité reste la même étant donné que la batterie est complètement chargée, elle ne peut donc pas accepter un chargement supplémentaire.

Dans ce cas, nous pouvons alors calculer une puissance excédentaire. Celle-ci est simplement calculée en multipliant la tension de la cellule par l'intensité de celle-ci, ainsi que par le nombre de cellules comprises dans la batterie.

La puissance déficitaire est de nouveau nulle dans ce cas.

Nous sommes toujours dans le Mode « 0 », nous ne sommes cependant plus en charge mais en **décharge**.

```

239         elseif P_cell < 0; % En décharge
240
241             if SOC <= SOC_max && SOC > SOC_min
242
243                 Q_cell = Q_t0_cell-abs(I_cell)*trnTimeStep;
244                 Q_batt = Q_cell*Np;
245                 SOC = (Q_cell*Np)/(Q_100_cell*Np);
246                 P_over = 0;
247                 P_lack = 0;

```

Figure 69 : Comportement de la cellule en décharge lorsque le SOC est compris entre  $SOC_{min}$  et  $SOC_{max}$ , en Mode « 0 »

De la même manière que dans le cas de la charge, nous vérifions d'abord le SOC ; s'il est compris entre le  $SOC_{min}$  et le  $SOC_{max}$ .

C'est le cas dans la Figure 69. La première étape est alors de calculer la capacité actuelle de la cellule. La méthode est similaire au cas de la charge, à l'exception que l'intégration de l'intensité est soustraite à la capacité du pas de temps précédent au lieu de lui être ajoutée.

La formule devient alors :

Équation 38 : Formule de calcul de la capacité de la cellule, en décharge

$$Q_{Cell} = Q_{t0,cell} - |I_{Cell}| \times Time_{Step}$$

Dans cette formule l'intensité est prise en valeur absolue afin de s'assurer de la soustraction. Il n'y a pas non plus de prise en compte du rendement énergétique étant donné que celui-ci entre en jeu dans le rechargement.

Une fois que nous avons calculé la capacité de la cellule à ce nouveau pas de temps, nous calculons la capacité de la batterie et le nouveau SOC de la même manière qu'en cas de recharge.

Dans ce cas, les puissances excédentaire et déficitaire sont toutes deux nulles étant donné que la puissance est utilisée par la batterie.

En décharge, si le SOC n'est pas compris entre le SOC<sub>max</sub> et le SOC<sub>min</sub>, c'est qu'il est égal au SOC<sub>min</sub>. Dans ce cas, les opérations disponibles dans la Figure 70 sont réalisées.

```
251 | elseif SOC == SOC_min;
252 |
253 |     Q_batt = Q_t0_cell*Np;
254 |     P_over = 0;
255 |     P_lack = U_cell*I_cell*Ns*Np;
256 |
257 |     mFileErrorCode = 130;
258 |
259 | end
```

Figure 70 : Comportement de la cellule en décharge lorsque le SOC est égal au SOC<sub>min</sub>, en Mode « 0 »

Si la batterie est complètement déchargée, sa capacité est simplement calculée à l'aide de la capacité au pas de temps précédent ; la batterie ne pouvant pas se décharger davantage.

La puissance excédentaire est nulle, étant donné que nous sommes en phase de déchargement.

Par contre, la puissance déficitaire n'est pas nulle. De même que dans le cas de la puissance excédentaire, en charge ; la puissance déficitaire est simplement calculée en multipliant la tension de la cellule par l'intensité de celle-ci, ainsi que par le nombre de cellules contenues dans la batterie.

Et finalement, le dernier cas du Mode « 0 » se présente lorsqu'aucune puissance n'est appliquée à la batterie. C'est-à-dire lorsque le générateur ne produit rien et qu'aucune charge n'est connectée ; ou lorsque le générateur et la charge se compensent. Dans ce dernier cas, la batterie est évitée et l'énergie produite par le générateur est directement utilisée par la charge.

```
261 | elseif P_cell == 0; % Pas de charge ni de décharge
262 |
263 |     Q_batt = Q_t0_cell*Np;
264 |     P_over = 0;
265 |     P_lack = 0;
266 |
267 |     mFileErrorCode = 140;
268 |
269 | end
```

Figure 71 : Comportement de la cellule lorsque la puissance est nulle, en Mode « 0 »

Dans ce dernier cas de figure du Mode « 0 » (puissance en « Input »), la batterie n'est pas utilisée. La capacité de la batterie est donc simplement recalculée en fonction de la capacité au pas de temps précédent.

Les puissances excédentaire et déficitaire sont nulles.

Ceci termine ainsi le comportement du modèle lorsque le Mode « 0 » est utilisé.

#### 2.2.1.4. Intensité en entrée

Cette partie va ainsi décrire le fonctionnement du modèle lorsque c'est le Mode « 1 » qui est utilisé ; c'est-à-dire lorsque c'est l'intensité qui est utilisée comme « Input ».

La première ligne du code dans la Figure 72 permet donc d'entrer dans cette partie du code lorsque la valeur du Mode est fixée à 1.

```
271 elseif Mode == 1; % Intensité en Input
272
273     I_batt = I_gen*eff_regul-abs(I_load)*eff_ondul;
274     I_cell = I_batt/Np;
275     U_max = a_max*abs(I_cell)+b_max; % Calcul de la tension à 90% de :
276     U_min = a_min*abs(I_cell)+b_min; % Calcul de la tension à 10% de :
277     delta_U = U_max-U_min;
278
279     SOC_bis = (1/(SOC_max-SOC_min))*SOC-(SOC_min/(SOC_max-SOC_min));
280
281     U_cell = U_max-delta_U*(1-SOC_bis);
282     U_batt = U_cell*Ns;
```

Figure 72 : Code Matlab : Sélection du Mode « 1 », calcul de la tension en fonction de l'intensité

Ce Mode est plus simple que le Mode « 0 » car, dans ce cas, nous disposons directement de l'intensité. Il n'est donc pas nécessaire de la calculer à partir de la puissance.

Dès lors, l'intensité de la batterie ( $I_{Batt}$ ) est calculée de la même manière que la puissance : en soustrayant l'intensité demandée par la charge à l'intensité produite par le générateur et en multipliant respectivement ces deux intensités par le rendement de l'onduleur et le rendement du régulateur.

L'intensité d'une cellule est alors simplement obtenue en divisant l'intensité de la batterie, obtenue jusque au-dessus, par le nombre de cellules en parallèle.

De la même manière que pour le Mode « 0 », les bords de l'intervalle de tension ( $U_{max}$  et  $U_{min}$ ) sont calculées à l'aide des coefficients « a » et « b » en fonction de l'intensité. Le  $\Delta U$  est alors calculé en fonction de ces deux bornes.

Cette intensité étant directement l'intensité réelle, aucune itération n'est nécessaire.

Le  $SOC_{bis}$  est calculé de la même manière qu'en Mode « 0 ». Celui-ci est également utilisé pour calculer la tension d'une cellule.

La tension de la batterie est alors obtenue en multipliant la tension d'une cellule par le nombre de cellules en série.

Une fois la tension et l'intensité de la cellule obtenues, nous pouvons entrer dans la partie du code correspondant aux conditions de charge et de décharge.

```

284     if I_cell > 0 % En charge
285
286         if SOC < SOC_max && SOC >= SOC_min;
287
288             Q_cell = I_cell*trnTimeStep*eff_ch+Q_t0_cell;
289             Q_batt = Q_cell*Np;
290             SOC = (Q_cell*Np)/(Q_100_cell*Np);
291             P_over = 0;
292             P_lack = 0;

```

Figure 73 : Code Matlab : Comportement de la cellule en charge, lorsque le SOC est compris entre  $SOC_{max}$  et  $SOC_{min}$ , en Mode « 1 »

Ainsi, si la batterie est en charge, c'est-à-dire que l'intensité est supérieure à 0, nous vérifions les conditions de SOC. Dans ce cas le SOC est compris entre  $SOC_{max}$  et  $SOC_{min}$ .

La capacité d'une cellule et de la batterie, ainsi que le SOC, la puissance excédentaire et la puissance ne déficit sont calculés de la même manière que lorsque c'est le Mode « 1 » qui est sélectionné.

Si le SOC n'est pas compris entre les limites maximum et minimum, alors il est égal au  $SOC_{max}$ .

```

296         elseif SOC == SOC_max;
297
298             Q_batt = Q_t0_cell*Np;
299             P_over = U_cell*I_cell*Ns*Np;
300             P_lack = 0;
301
302             mFileErrorCode = 160;
303
304         end
305

```

Figure 74 : Code Matlab : Comportement de la cellule en charge, lorsque le SOC est égal au  $SOC_{max}$ , en Mode « 1 »

Dans ce cas, les étapes sont de nouveau les mêmes que dans le cas du Mode « 0 » : la capacité de la batterie est identique au pas de temps précédent, une puissance excédentaire est calculée et la puissance déficitaire est nulle.

Nous en venons alors au cas où la batterie est en décharge.

```

306         elseif I_cell < 0; % En décharge
307
308             if SOC <= SOC_max && SOC > SOC_min
309
310                 Q_cell = Q_t0_cell-abs(I_cell)*trnTimeStep;
311                 Q_batt = Q_cell*Np;
312                 SOC = (Q_cell*Np)/(Q_100_cell*Np);
313                 P_over = 0;
314                 P_lack = 0;
315
316                 mFileErrorCode = 170;
317
318             elseif SOC == SOC_min;
319
320                 Q_batt = Q_t0_cell*Np;
321                 P_over = 0;
322                 P_lack = U_cell*I_cell*Ns*Np;
323
324                 mFileErrorCode = 180;
325
326             end

```

Figure 75 : Code Matlab : Comportement de la cellule en décharge, en Mode « 1 »

Toujours de la même manière que dans le cas du Mode « 0 » :

- Si le SOC est compris entre  $SOC_{max}$  et  $SOC_{min}$  : la capacité d'une cellule et de la batterie sont calculée, ainsi que le nouveau SOC. Les puissances excédentaire et déficitaire sont nulles.
- Si le SOC est égal au  $SOC_{min}$  : la capacité de la batterie est égale à la capacité au pas de temps précédent, la puissance excédentaire est nulle et une puissance déficitaire est calculée.

Nous en venons enfin au dernier cas de figure : le Mode « 1 » lorsqu'aucune intensité n'est appliquée à la batterie. C'est-à-dire lorsque le générateur ne produit pas et qu'aucune charge n'est connectée ; ou que le générateur et la charge se compensent.

```
328     elseif I_cell == 0; % Pas de charge ni de décharge
329
330         Q_batt = Q_t0_cell*Np;
331         P_over = 0;
332         P_lack = 0;
333
334         mFileErrorCode = 190;
335
336     end
```

Figure 76 : Code Matlab : Comportement de la cellule en lorsque l'intensité est nulle, en Mode « 1 »

Dans ce cas, la capacité est égale à la capacité au pas de temps précédent et les deux puissances sont nulles.

Ceci termine donc le deuxième mode de fonctionnement du modèle : lorsque l'« Input » est une intensité.

#### 2.2.1.5. Définition des paramètres en sortie

Les quelques lignes de code ci-dessous permettent de terminer le modèle Matlab. Celles-ci permettent de définir les données en sortie du modèle, c'est-à-dire les « Outputs ».

```
341     % --- Set outputs ---
342
343     trnOutputs(1) = U_batt;
344     trnOutputs(2) = SOC;
345     trnOutputs(3) = P_over;
346     trnOutputs(4) = P_lack;
347     trnOutputs(5) = I_batt;
348
349     mFileErrorCode = 200;
350
351     % --- Code reset ---
352
353
354     mFileErrorCode = 0; % Tell TRNSYS that we reached the end of the m-file without errors
355     return
```

Figure 77 : Code Matlab : Définition des « Outputs » et fin du code

Ces dernière lignes utilisent la fonction « trnsOutputs(X) » qui permet de relier les « Outputs » du code Matlab à TRNSYS. Le « X » correspond au numéro de l'« Output » défini dans TRNSYS.

Les différents « Outputs » que nous extrayons du code sont donc :

- La tension de la batterie, en V ;
- Le SOC ;
- La puissance excédentaire, en W ;
- La puissance déficitaire, en W ;
- L'intensité de la batterie, en A.

La toute dernière ligne, « return », permet de signaler à TRNSYS la fin du code ; TRNSYS peut donc sortir de celui-ci et continuer ses étapes de simulation.

#### 2.2.1.6. Résumé

Tout d'abord, précisons que la totalité du code Matlab de ce modèle de batterie est disponible en Annexe III.

Pour plus de simplicité, nous pouvons résumer le fonctionnement du code Matlab à l'aide des étapes suivantes :

- Récupération des paramètres et « Inputs » dans TRNSYS ;
- Définition de la manière de récupérer le SOC ;
  - o Premier pas de temps : récupération du SOC au temps  $t=0$  ;
  - o Reste de la simulation : récupération du SOC en « Output » du Type155.
- Vérification de la présence du SOC dans les limites fixées et calcul de la capacité nominale d'une cellule ainsi que de la capacité en début de pas de temps d'une cellule ;
- Vérification du Mode de fonctionnement du code : avec la puissance en « Input » (Mode « 0 ») ou avec l'intensité en « Input » (Mode « 1 ») ;
  - o En Mode « 0 » : la tension et l'intensité sont calculées à l'aide d'une boucle itérative afin que celles-ci correspondent à la puissance appliquée à la batterie en « Input » ;
  - o En Mode « 1 » : la tension de la batterie est directement calculée à partir de l'intensité.
- Vérification des conditions de charge : chargement, déchargement ou aucune tension ou intensité appliquée ;
- Vérification des conditions de SOC si la puissance ou l'intensité ne sont pas nulles : le SOC est-il situé entre le  $SOC_{max}$  et le  $SOC_{min}$  ou est-il égal au  $SOC_{max}$  (en charge) ou au  $SOC_{min}$  (en décharge) ;
- Pour chaque cas de figure, la capacité, la puissance excédentaire, la puissance déficitaire et, dans certains cas, le SOC, sont calculés.
- Définition des « Outputs » : tension, SOC, puissance excédentaire, puissance déficitaire, intensité.

Ajoutons également une chose très importante à prendre en compte dans le Type155 : le paramètre « Calling Mode » doit absolument être fixé à « 10 » ! Ce paramètre définit la façon dont le Type gère les itérations. Ce paramètre fixé à « 0 » (valeur par défaut) fait en sorte que le Type utilise la méthode classique d'itération. La valeur « 10 » fait en sorte que le Type ne soit appelé qu'à la fin de chaque pas de temps.

Il a été remarqué lors des essais du code que si nous laissons la valeur par défaut de « 0 », nous obtenions des résultats incohérents, le Type155 semblant itérer en continu et donnant des résultats extrêmement grands. Le changement de la valeur de ce paramètre à « 10 » a permis de régler le problème, sans que la raison ne soit très claire.

### 2.2.2. Vérification du fonctionnement du modèle

Une fois le code Matlab terminé, plusieurs tests ont été réalisés afin de vérifier le bon fonctionnement du modèle de batterie lithium-ion. Les tests ont été réalisés sur base d'une cellule lithium-ion Panasonic NCR18650B de 3250 mAh de capacité [144].

En Mode « 0 », la puissance a été fixée à 5 W (en charge et en décharge) afin de vérifier le bon fonctionnement du code.

En Mode « 1 », l'intensité a été fixée à 1,625 A, ce qui correspond à un C-rate de 0,5C.

Dans tous les cas, le pas de temps de la simulation a été fixé à 1 minute.

Les différents tests réalisés visaient à vérifier le bon fonctionnement du code dans tous les cas de figures possibles.

Précisons également que dans tous les graphiques qui vont suivre, les « Outputs » sont les suivants :

- Axe de gauche :
  - o Tension de la batterie : courbe rouge ;
  - o SOC : courbe bleue ;
  - o Intensité de la batterie : courbe rose.
- Axe de droite :
  - o Puissance excédentaire : courbe jaune ;
  - o Puissance déficitaire : courbe verte.

Les premiers tests réalisés ont porté sur la vérification du **Mode « 0 »**, c'est-à-dire le Mode utilisant la puissance en « Input ».

La Figure 78 présente les résultats de la simulation en phase de charge.

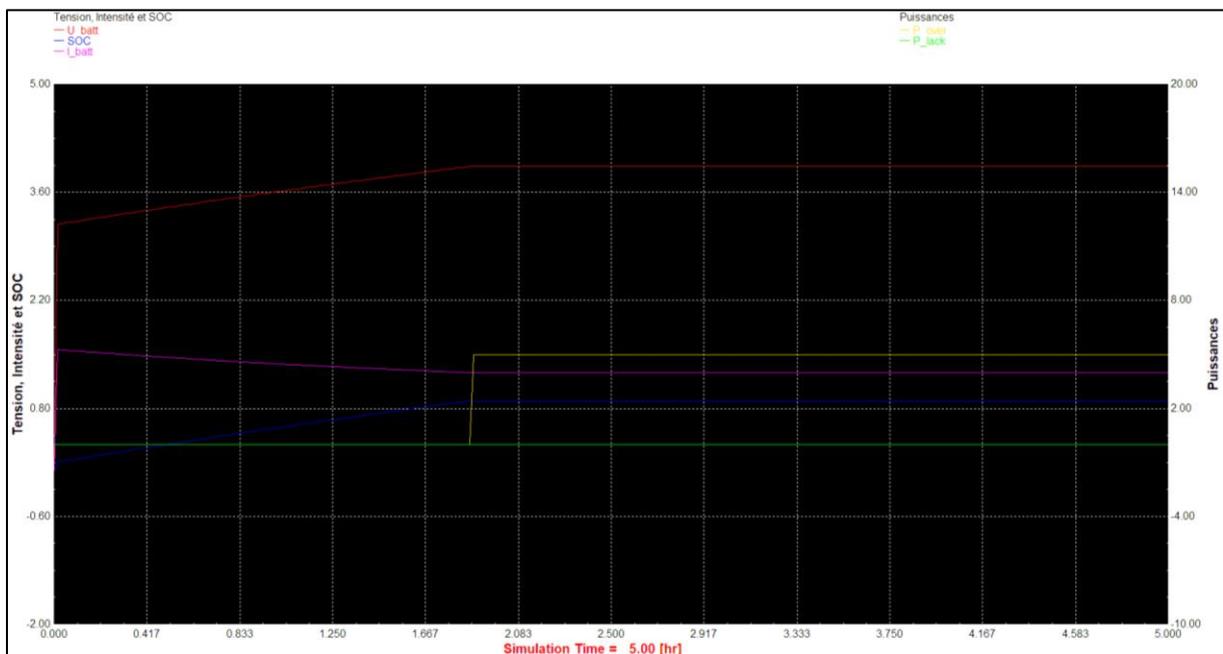


Figure 78 : Résultats de la simulation, en Mode « 0 », en charge

Nous pouvons observer sur cette figure que nous obtenons bien une élévation de la tension de la batterie, ainsi qu'une augmentation du SOC. L'intensité calculée diminue afin de respecter la loi d'Ohm ( $P = U \times I$ ) ; la puissance en « Input » restant constante.

Nous observons une « cassure » à environ 1/3 de la simulation. Il s'agit du moment où la cellule est complètement chargée. La tension, l'intensité ainsi que le SOC restent donc constants. Nous observons également un sursaut de la courbe jaune, correspondant à la puissance excédentaire. En effet, la puissance envoyée vers la batterie reste toujours la même tandis qu'elle est totalement chargée. Cette puissance est donc prise en compte en tant que puissance excédentaire et présente bien une valeur de 5 W, ce qui équivaut à la valeur de la puissance en « Input ».

La courbe verte représente, quant à elle, la puissance déficitaire. Dans ce cas, elle reste toujours à 0 étant donné que nous avons une puissance excédentaire. Nous ne pouvons pas avoir les deux en même temps.

La Figure 79 présente alors le comportement de la cellule en décharge.

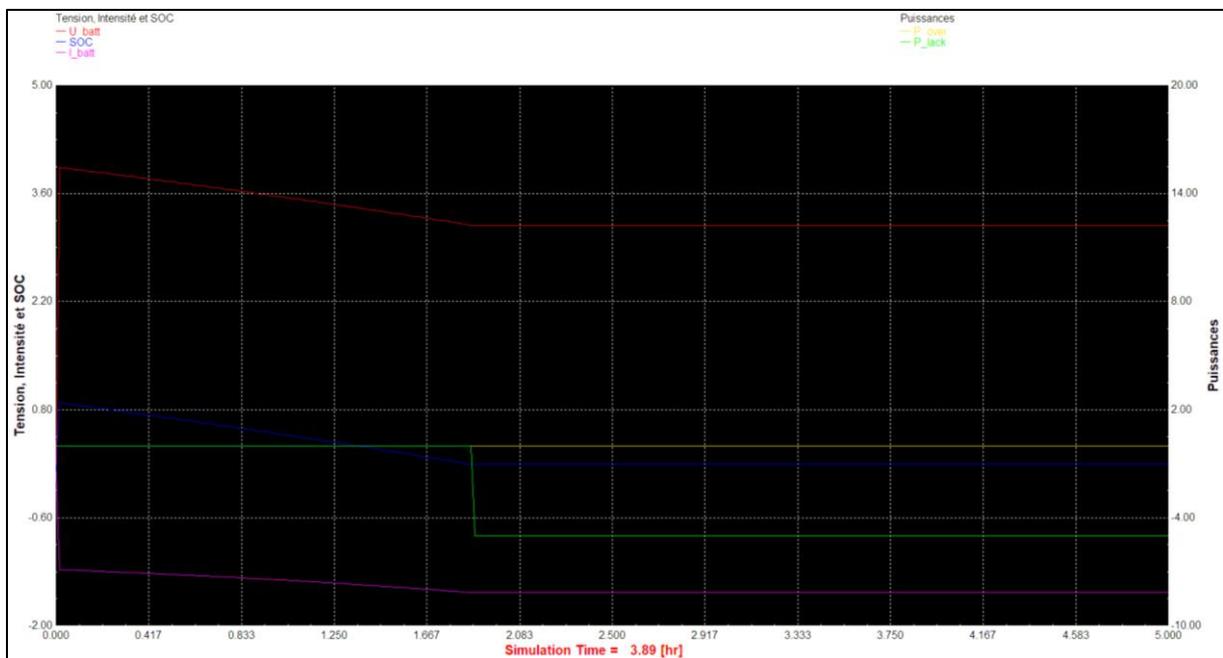


Figure 79 : Résultats de la simulation, en Mode « 0 », en décharge

Nous pouvons observer que, dans ce cas, la tension et le SOC diminuent bien. L'intensité semble quant à elle diminuer, en réalité la valeur de l'intensité en décharge augmente, mais présente une valeur négative, c'est pourquoi la courbe semble diminuer. Mais il s'agit bien d'une augmentation de l'intensité (en décharge).

Dans ce cas, après la « cassure », la puissance déficitaire est bien calculée et est également égale à 5 W (-5 W pour être précis, étant en phase de décharge). La puissance excédentaire est nulle.

La Figure 80 présente alors les résultats de la simulation lorsque la puissance est nulle.

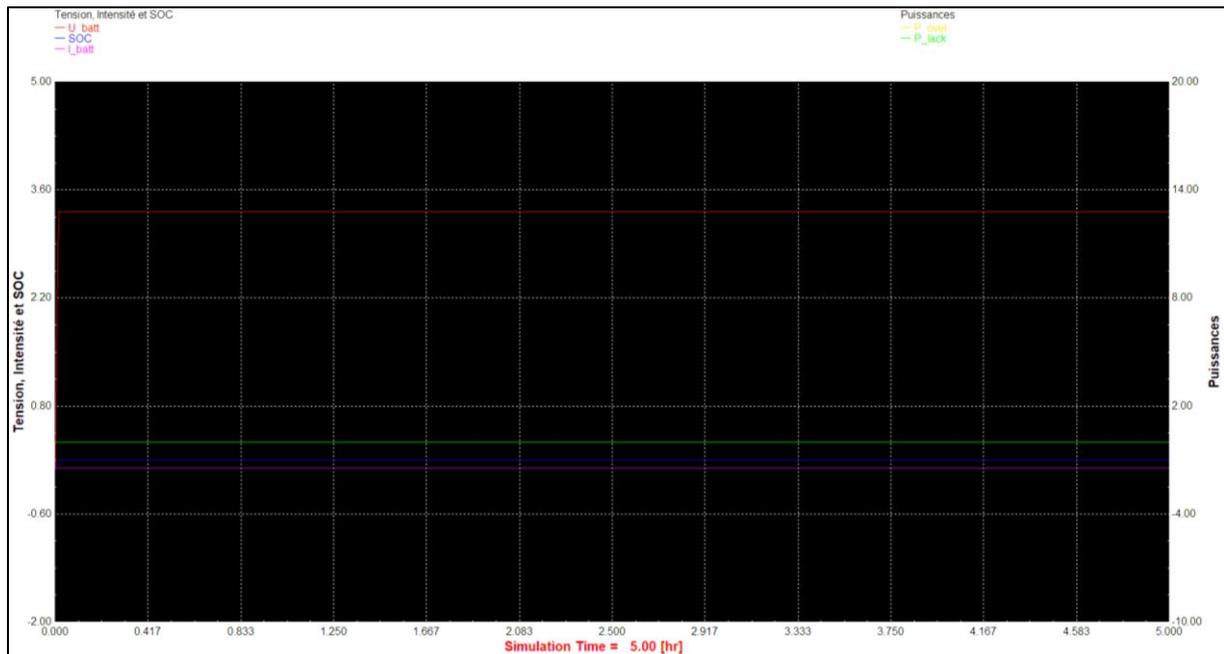


Figure 80 : Résultats de la simulation, en Mode « 0 », à puissance nulle

Comme nous pouvons le constater, aucune évolution n'est observée ; que ce soit de l'intensité, de la tension, du SOC ou des puissances.

Nous avons ensuite pu tester le Mode « 1 » de la simulation, c'est-à-dire lorsque c'est l'intensité électrique qui est utilisées en tant qu' « Input ».

Les premiers tests ont été réalisés en phase de charge, comme illustré dans la Figure 81 ci-dessous.

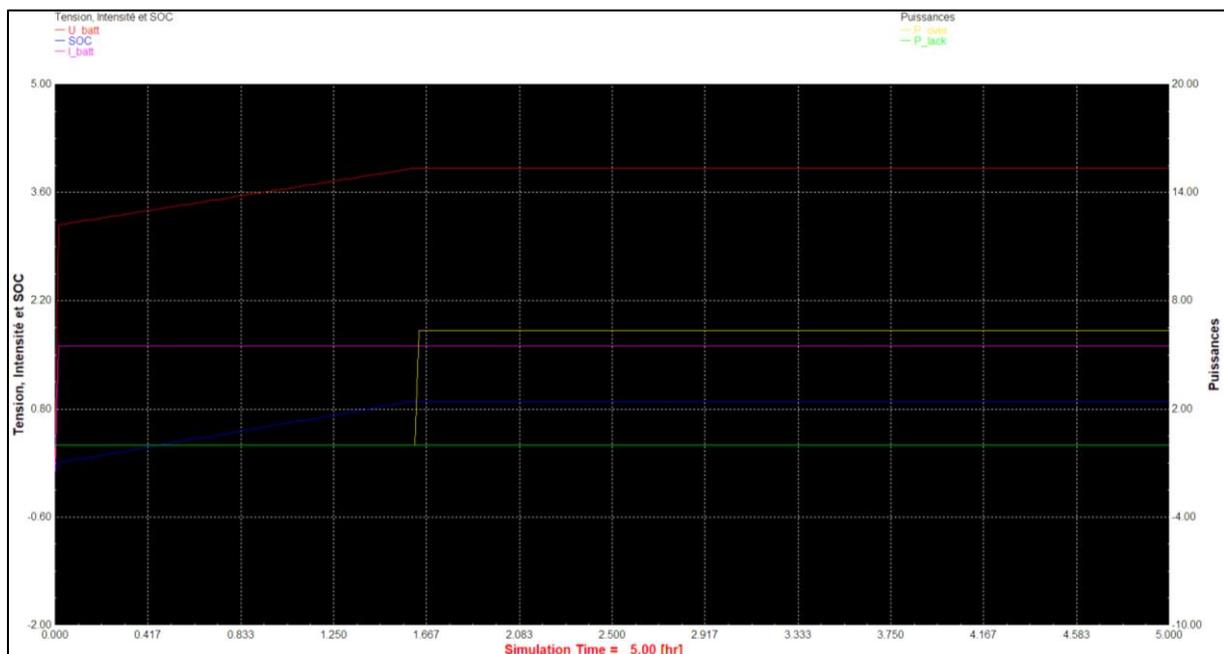


Figure 81 : Résultats de la simulation, en Mode « 1 », en charge

Nous pouvons de nouveau observer que tous les paramètres ont bien été pris en compte : que ce soit l'intensité, la tension, le SOC ou les puissances.

La Figure 82 propose alors les résultats de simulation en utilisant le Mode « 1 » en décharge.

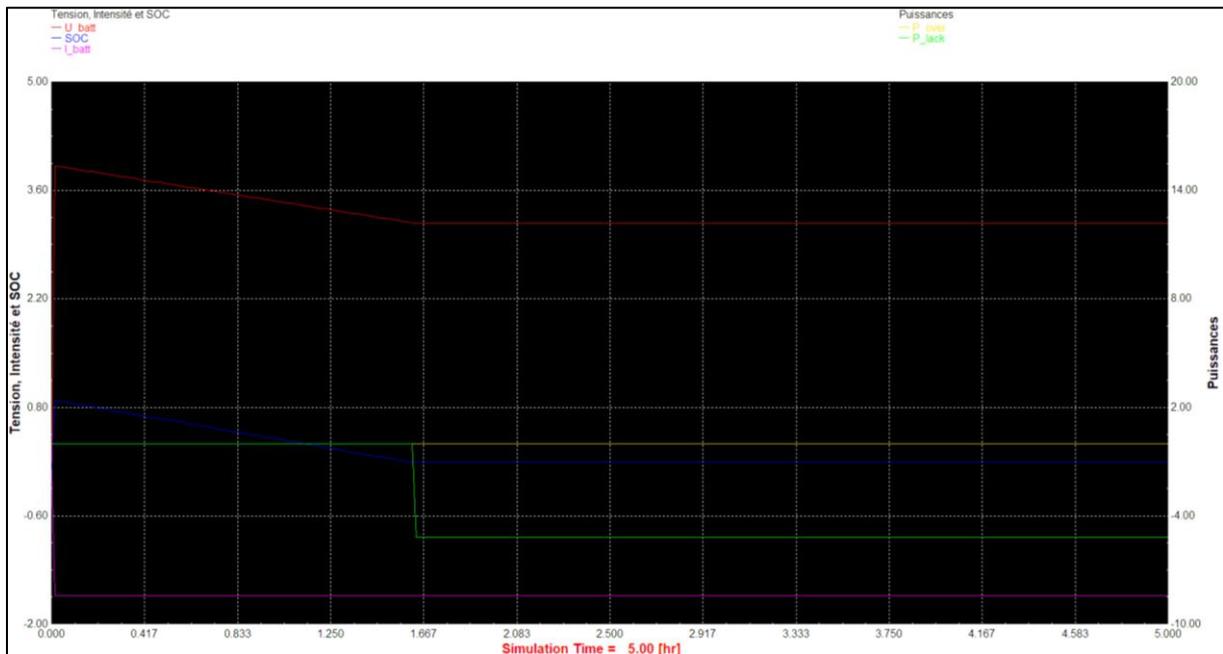


Figure 82 : Résultats de la simulation, en Mode « 1 », en décharge

De nouveau, les résultats sont cohérents avec ce qui était attendu.

Le dernier cas de figure correspond au Mode « 1 » lorsque l'intensité est nulle. Ce cas de figure est illustré dans la Figure 83 suivante.

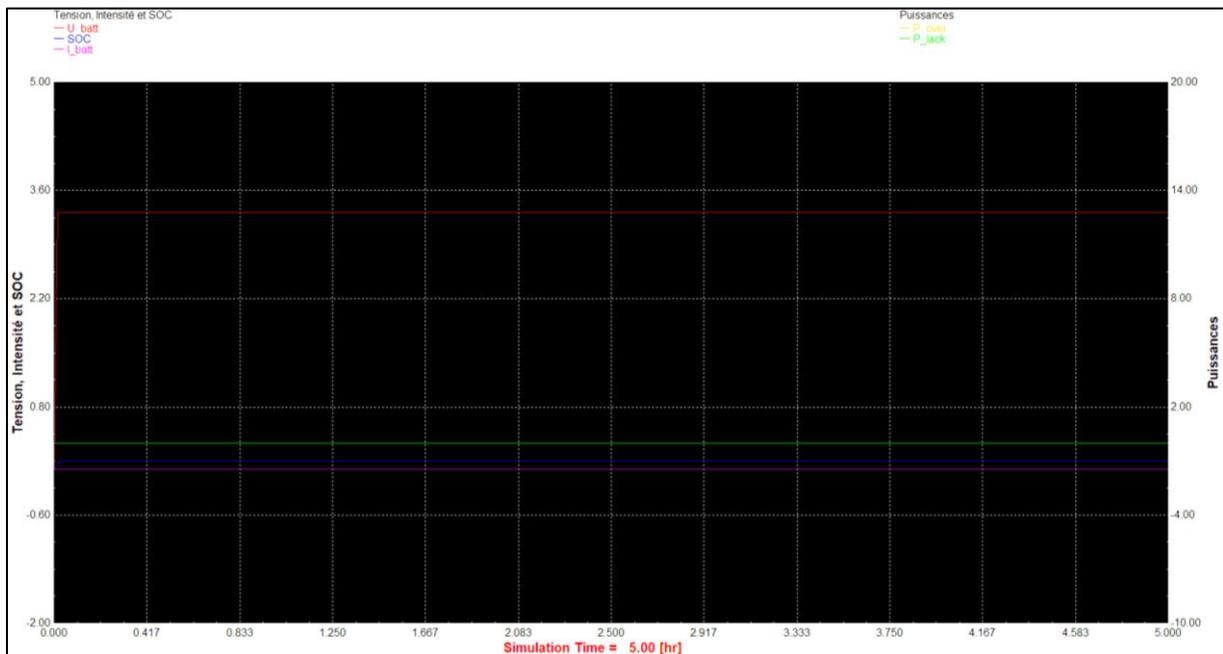


Figure 83 : Résultats de la simulation, en Mode « 1 », en intensité nulle

Comme attendu, aucune variation n'est constatée lorsque l'intensité reste nulle. Ce qui est tout à fait cohérent.

Des simulations ont également été réalisées afin de vérifier la bonne prise en compte de la tension de la batterie en fonction du C-rate.

Les résultats peuvent être observés dans la Figure 84 ci-dessous.

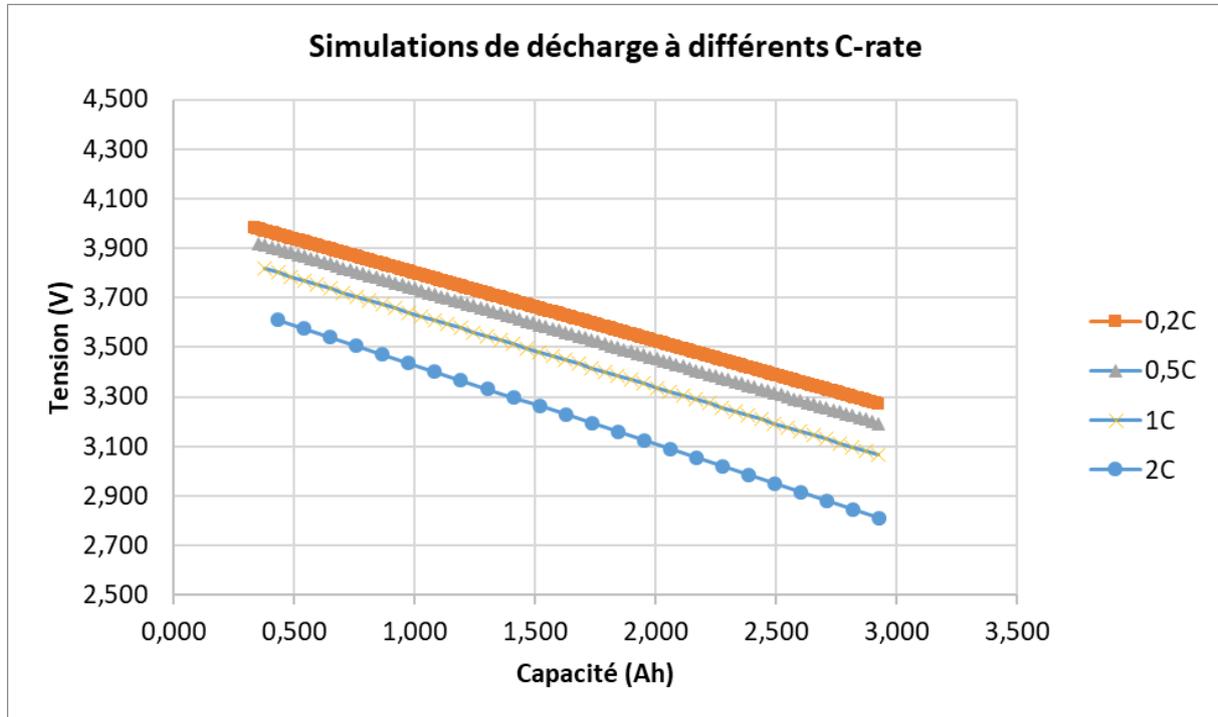


Figure 84 : Simulation de la tension à différents C-rates

Comme nous pouvons le voir dans cette figure, la simulation a bien pris en compte la diminution de la tension de la cellule liée à une augmentation du C-rate. Nous retrouvons donc ici des courbes de décharge correspondant bien aux données réelles disponibles dans la fiche technique et visibles dans la Figure 48.

Finalement, nous nous sommes intéressés à l'impact du **pas de temps** sur les résultats des simulations. Nous avons donc testé trois pas de temps différents : 1, 5 et 15 minutes. Les conditions utilisées étaient l'utilisation du Mode « 1 » en décharge.

La Figure 85 propose les résultats d'une simulation en utilisant un pas de temps de 1 minute.

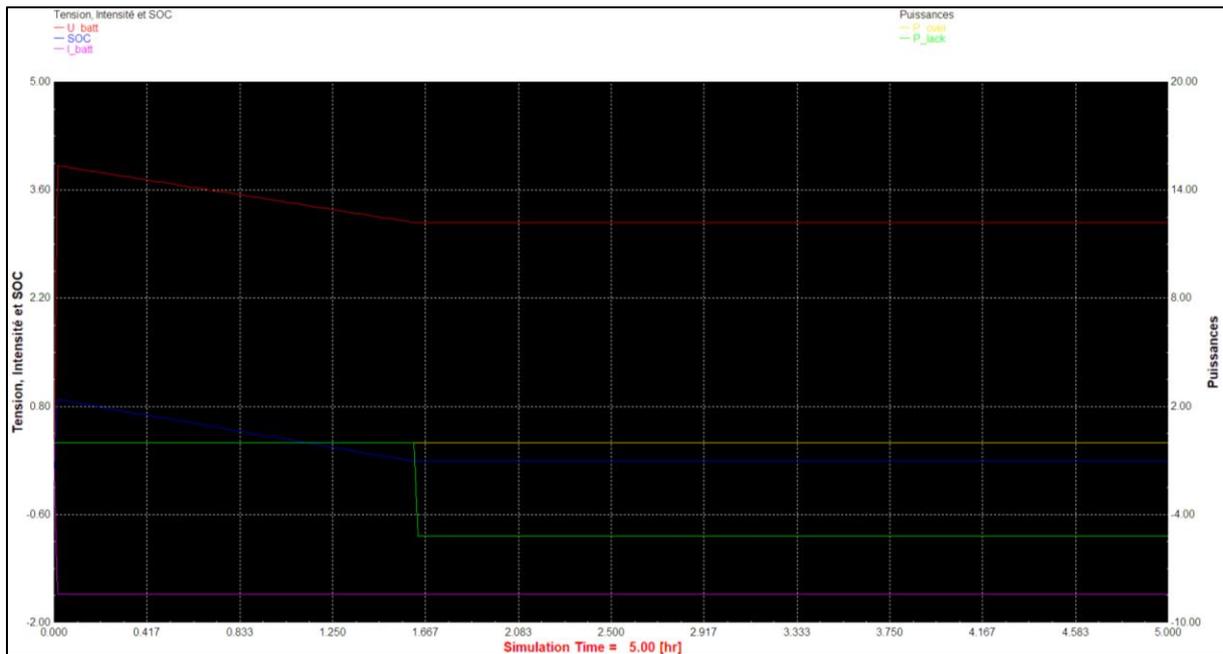


Figure 85 : Impact du pas de temps sur les résultats : pas de temps d'1 minute

Nous pouvons observer un saut très bref en début de simulation, correspondant à l'initialisation du code Matlab. En effet, la simulation ne dispose pas encore des informations concernant la tension au pas de temps « 0 ».

Lorsque nous augmentons le pas de temps à 5 minutes, comme illustré dans la Figure 86, nous observons quelques changements.

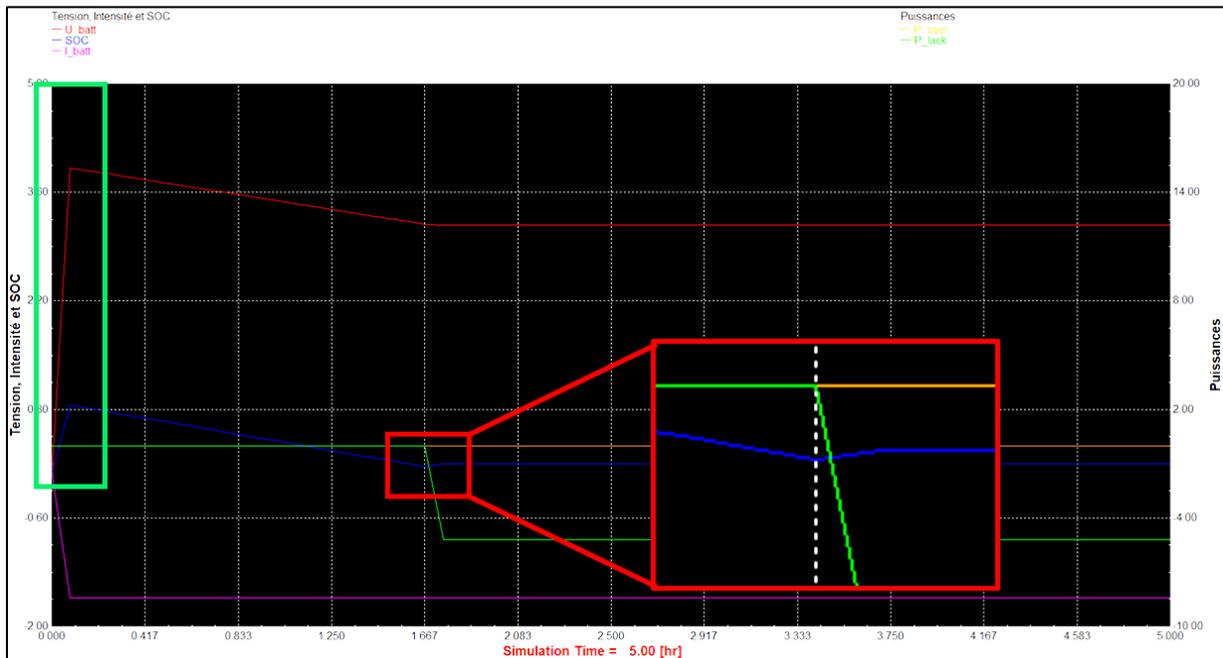


Figure 86 : Impact du pas de temps sur les résultats : pas de temps de 5 minutes

Tout d'abord, nous observons, dans l'encadré vert, que le saut de début de simulation est plus étendu. Cela s'explique simplement par le fait que le pas de temps est plus long, il a donc fallu plus de « temps » à la simulation pour s'initialiser.

Ce qui est plus intéressant est ce que nous observons dans l'encadré rouge : le SOC (courbe bleue) chute pendant un pas de temps sous la limite inférieure de SOC, représentée par la partie plane obtenue après la remontée de la courbe de SOC. Etant donné que le pas de temps est plus long, l'intensité est intégrée sur une plus longue période, le SOC étant directement lié à l'intégration de cette intensité, celui-ci obtient une valeur sortant des limites. La remontée qui suit est due à la partie du code faisant en sorte que le SOC soit ramené dans les limites s'il les franchit.

La Figure 87 présente les mêmes effets, ceux-ci sont cependant accentués par le pas de temps plus important.

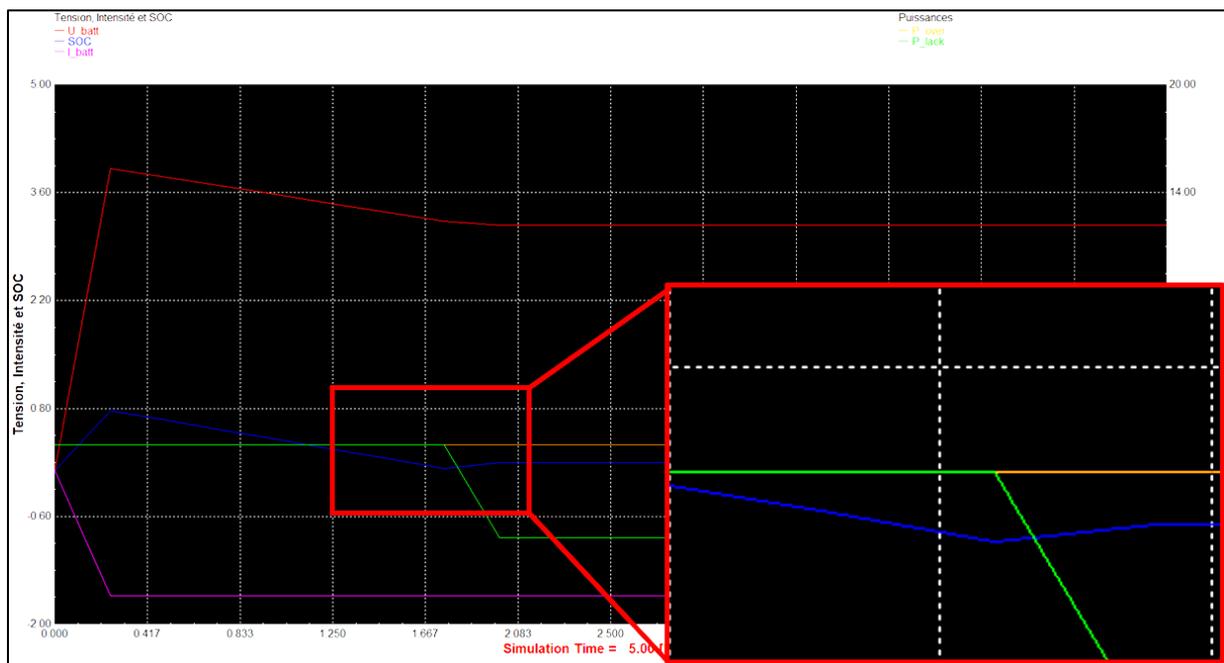


Figure 87 : Impact du pas de temps sur les résultats : pas de temps de 15 minutes

Nous pouvons donc voir ici qu'il est important de garder un pas de temps assez court, afin de rester dans les limites de fonctionnement de la batterie.

### 2.3. Discussion

Pendant la réalisation de ce travail, un premier modèle de simulation de batterie lithium-ion utilisable dans le logiciel de simulation dynamique TRNSYS a pu être réalisé. Ce modèle permet de simuler l'évolution de l'état de charge de la batterie. Il peut utiliser soit une puissance, soit une intensité comme variable d'entrée.

Ce modèle permet également de simuler la tension et l'intensité du courant générées par la batterie. Cela est réalisé à l'aide de paramètres disponibles dans la fiche technique de la cellule électrochimique utilisée, notamment les paramètres de décharge et la capacité nominale de la batterie.

Le modèle proposé permet également de calculer une « puissance excédentaire », c'est-à-dire la puissance produite par le générateur et qui ne peut être utilisée ni pour charger la batterie, ni pour alimenter une charge ; et une « puissance déficitaire », correspondant aux besoins de la charge qui ne peuvent être ni comblés par le générateur, ni par la batterie.

Il prend également en compte les cellules connectées en série ou en parallèle ainsi que différents rendements : le rendement énergétique, le rendement du régulateur (placé entre le générateur et la batterie) et le rendement de l'onduleur (placé entre la batterie et la charge).

Comme nous l'avons vu dans le point précédent, le modèle proposé fonctionne dans tous les cas de figure : charge, décharge, batterie complètement chargée, déchargée, ... Le code Matlab fonctionne donc correctement en prenant en compte ce qui a été prévu.

Le modèle proposé a cependant encore un certain nombre de limites ; il sera donc intéressant de l'améliorer.

Pour commencer, il sera nécessaire de reprendre contact avec Mr Winternheimer de l'université HTW Saar afin d'avoir de plus amples explications concernant le fonctionnement des deux équations de calcul de la tension en charge et en décharge. Leur utilisation n'étant pas claire, elles n'ont pas été utilisées dans le modèle proposé ; une autre solution a donc été proposée dans ce travail : l'utilisation des courbes de décharges présentes dans la fiche technique de la cellule devant être simulée.

Ensuite, le modèle ne peut actuellement fonctionner que si le générateur et la charge sont du même « Input », c'est-à-dire une puissance ou une intensité. Le code ne permet pas d'avoir des « Inputs » ayant des unités différentes, par exemple puissance pour le générateur et intensité pour la charge ou inversement. Il pourrait donc être intéressant de modifier le code Matlab afin de permettre un tel mélange. Cela n'est cependant pas une priorité étant donné que la grande majorité des applications, des Types TRNSYS, fonctionnent sur base d'une puissance. Le Mode « 0 » actuellement proposé pourrait donc être utilisé dans la grande majorité des cas. Par exemple, le tableau suivant reprend tous les Types TRNSYS permettant la simulation de panneaux solaires photovoltaïques.

Tableau 20 : « Outputs » des Types TRNSYS de simulation de panneaux photovoltaïques

	Type194	Type94	Type180	Type50g, e, h, f	Type50c, a, d, b	Type563	Type560	Type562	Type566	Type567	Type569	Type568
U	V	V	V	V	X	X	X	X	X	X	X	X
I	V	V	V	V	X	X	X	X	X	X	X	X
P	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V

Nous pouvons observer dans ce tableau que tous ces Types TRNSYS proposent la puissance en « Output » alors que seuls quelques-uns permettent de fournir une tension et une intensité.

Une autre limitation du code est qu'il ne permet que l'utilisation d'une capacité exprimée en « Ah », alors que nous utilisons généralement l'unité « Wh » afin d'exprimer une énergie. Cela n'est cependant pas très grave étant donné que la conversion entre Wh et Ah n'est pas compliquée : il suffit en effet de diviser la capacité en Ah par la tension nominale de la batterie (en V) afin d'obtenir la capacité en Wh. Il pourrait tout de même être intéressant d'ajouter la possibilité d'utiliser ces deux unités dans le code.

Il serait ensuite intéressant d'intégrer la prise en compte du vieillissement dans le modèle. Pour ce faire, nous pourrions par exemple utiliser une donnée proposée dans les fiches techniques des cellules lithium-ion. Un exemple est le graphique de la capacité en fonction du nombre de cycles comme présenté dans la Figure 88 ci-dessous.

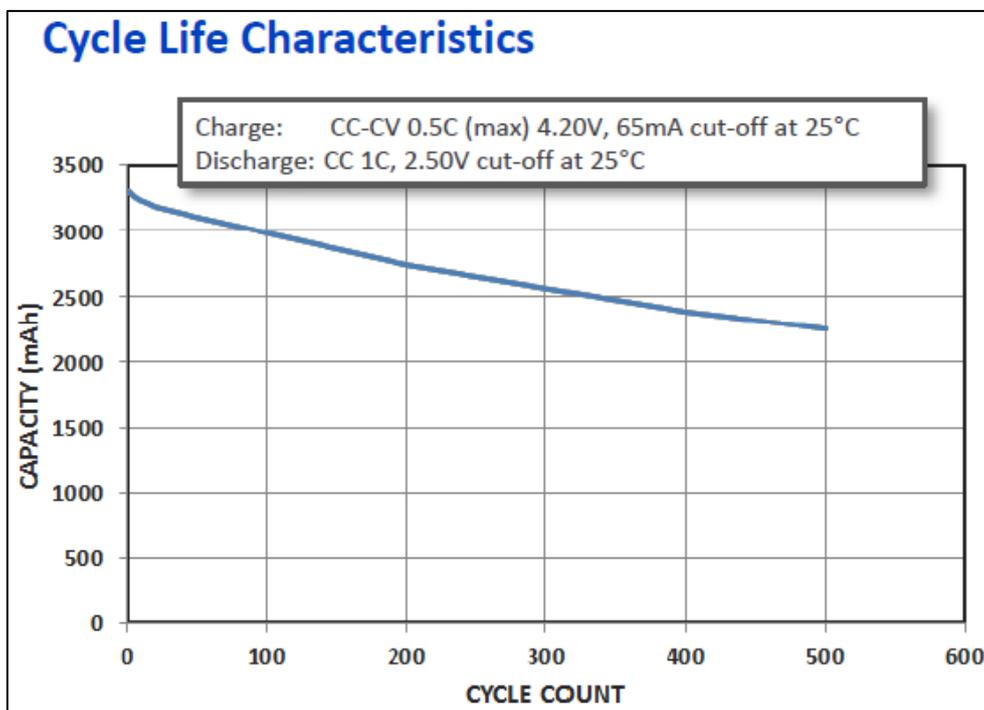


Figure 88 : Fiche technique : Perte de capacité en fonction du nombre de cycles [144]

Nous pourrions imaginer d'intégrer une fonction comptant le nombre de cycles réalisés par le modèle afin d'intégrer une perte de capacité au fil du temps. La difficulté serait de trouver une méthode permettant de compter correctement les cycles. En effet, un cycle est défini comme étant composé d'une charge complète suivie d'une décharge complète ; or une batterie n'est presque jamais utilisée sur sa gamme complète de capacité. Nous pourrions ainsi imaginer un compteur permettant d'additionner l'énergie extraite et intégrée à la batterie ; chaque fois que l'énergie extraite ainsi que l'énergie intégrée à la batterie arrivent toutes deux à la capacité nominale de la batterie, celles-ci seraient remises à zéro et un cycle serait compté.

L'auto-déchargement serait également un paramètre qui pourrait être pris en compte dans la simulation de la batterie. Il s'agirait dans ce cas d'une valeur fixe qui pourrait être déterminée en fonction de tests réels ou de références dans la littérature. Nous pourrions ainsi utiliser une valeur de 1% à 4% d'auto-déchargement par mois en fonction des sources [10][93].

Un autre phénomène qui pourrait également être intégré est l'impact de la température sur le fonctionnement de la batterie. Certaines fiches techniques proposent également un graphique tel que proposé dans la Figure 89, illustrant l'impact de la température sur le voltage de la batterie, en fonction du C-rate.

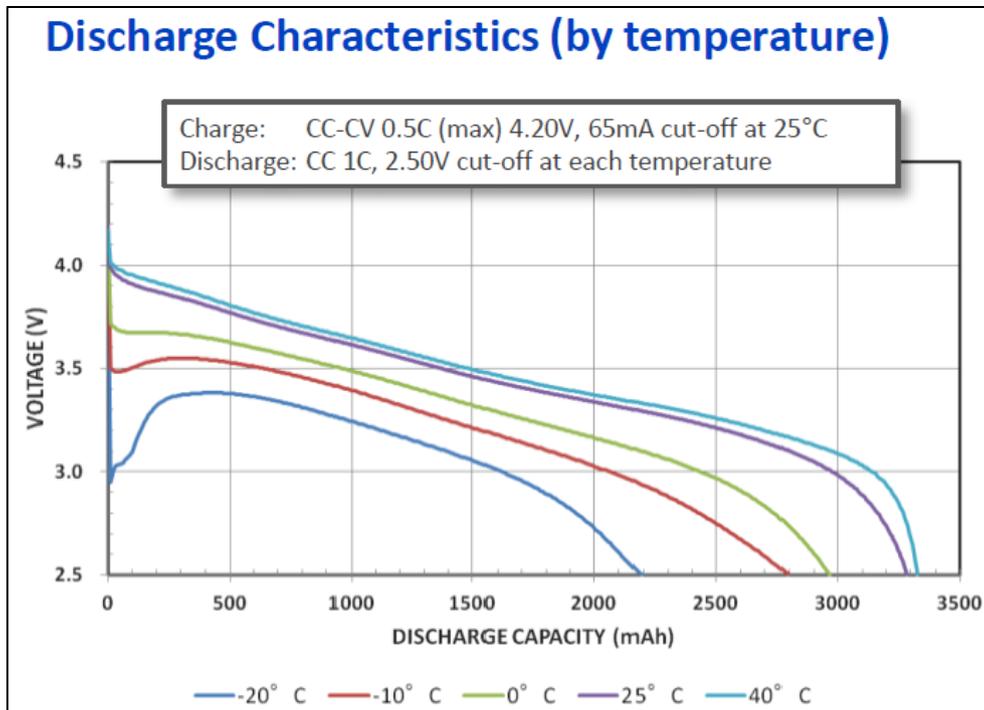


Figure 89 : Fiche technique : Influence de la température sur la tension de la cellule

Cependant, la température ne devrait que très peu impacter le comportement de la batterie. En effet, une batterie domestique est placée à l'intérieur d'une habitation, elle n'est donc pas soumise à de fortes variations de températures ; la température à l'intérieur d'un bâtiment restant assez constante pendant toute l'année.

Ensuite, afin d'alléger la simulation TRNSYS, nous pourrions ajouter un pas de temps interne au modèle Matlab, différent du pas de temps TRNSYS. Cela permettrait de définir un pas de temps très court dans le code Matlab, permettant une plus grande finesse de calcul, tout en ne générant pas un nombre trop important de résultats dans TRNSYS, ce qui complique leur traitement par la suite. Le pas de temps utilisé dans le modèle proposé a été fixé à 1 minute, il s'agit déjà d'un pas de temps relativement court dans le cadre de simulations TRNSYS. Ainsi, pendant un pas de temps TRNSYS, le modèle Matlab pourrait réaliser plusieurs itérations. Les informations que TRNSYS recevrait ne seraient alors que l'état du modèle Matlab à sa dernière itération, pour le pas de temps TRNSYS en cours.

Une dernière chose qu'il serait utile d'ajouter est une limite d'intensité électrique. En effet, le modèle actuel ne présente aucune limite, nous pourrions donc appliquer une intensité très grande à la batterie sans que cela ne pose problème. Or, dans la réalité, une batterie ne peut pas accepter une intensité excessive. Une limite devrait donc être fixée, par exemple sur base du C-rate. Nous pourrions fixer un C-rate maximum de 0,5C à 1C par exemple, et ainsi calculer l'intensité maximale en fonction de la capacité de la batterie et de ce C-rate prédéfini.

Finalement, un certain nombre de fabricants de batteries lithium-ion ne fournissent pas des fiches techniques très détaillées. Celles-ci ne proposent par exemple que quelques informations telles que la capacité en Wh, la tension nominale de la batterie ou encore un rendement énergétique. Elles ne proposent cependant pas nécessairement les graphiques de décharge par exemple, qui sont nécessaires au bon fonctionnement du modèle. Lorsque les informations sont limitées comme cela, l'utilisation du Type47a de TRNSYS pourrait être suffisante. Celui-ci ne prenant en compte que l'intégration de la puissance et le rendement énergétique. Nous pourrions cependant imaginer de comparer les données de plusieurs fiches techniques détaillées afin de déterminer si certains paramètres tels que les coefficients « a » et « b » par exemple, ne pourraient pas devenir des valeurs constantes valables pour toutes les batteries lithium-ion, ou pour un type de chimie. En effet, la plupart des fiches techniques de batteries informent de la chimie utilisée.

Par rapport au Type47a, le modèle proposé dans ce travail permet néanmoins de prendre en compte directement le régulateur et l'onduleur, alors que dans le cas du Type47a, l'utilisation d'un Type supplémentaire est nécessaire. De plus, le modèle Matlab permet de proposer le calcul de la tension et de l'intensité électrique, ce que le Type47a ne permet pas.

## Conclusions

Pour conclure, l'objectif de ce mémoire était tout d'abord d'obtenir les connaissances nécessaires à la bonne compréhension du fonctionnement, et de l'utilisation des batteries, plus spécifiquement des batteries lithium-ion. Le travail visait ensuite à évaluer la possibilité d'utilisation des modèles de batterie proposés par le logiciel de simulation TRNSYS et d'en créer un nouveau si nécessaire.

Ce mémoire commence par une partie théorique dans laquelle nous nous sommes tout d'abord intéressés à la définition de toute une série de paramètres indispensables à la bonne compréhension de ce travail, mais également du fonctionnement des batteries en général. Nous avons donc défini des notions telles que les différents voltages rencontrés, les capacités ainsi que des termes tels que l'énergie spécifique ou encore le rendement énergétique.

Le travail se poursuit par une description des constituants d'une cellule électrochimique ainsi que par leur fonctionnement. Cela nous permet de mieux comprendre les différents phénomènes qui sont expliqués par après.

Ensuite, nous entendons souvent parler des batteries lithium-ion, comme si elles fonctionnaient toutes de la même façon, or ce n'est pas le cas. En effet, il existe plusieurs chimies différentes qui sont toutes regroupées sous un seul et même terme : lithium-ion. Nous décrivons plusieurs de ces chimies afin de cerner les différences de fonctionnement ainsi que les avantages et inconvénients que chacune d'elles peut représenter.

Nous nous sommes ensuite intéressés au conditionnement de ces cellules lithium-ion. Celles-ci peuvent se présenter sous forme cylindrique, bouton, poche ou encore prismatique. Le choix de la forme de la cellule dépendra de son utilisation. De plus, une batterie est composée de plusieurs cellules uniques. Celles-ci ne peuvent pas être connectées n'importe comment et c'est pourquoi nous décrivons les connexions en série et parallèle ainsi que l'importance d'apparier les cellules. Cela afin d'obtenir une batterie stable et qui dure dans le temps.

La suite du travail décrit différents phénomènes responsables du vieillissement et de la détérioration des cellules. Ces différents phénomènes, tels que l'apparition de dendrites dans la cellule ou la croissance d'une interface électrolytique solide, vont réduire la durée de vie de la batterie et augmenteront les risques de dysfonctionnement.

Nous abordons ensuite différentes utilisations possibles des batteries. Celles-ci peuvent notamment être utilisées à des fins de régulation du réseau électrique, dans une optique « Smart Grids » par exemple. Elles jouent également un rôle en ce qui concerne la meilleure utilisation des énergies renouvelables, en permettant de stocker l'énergie lorsqu'elle est disponible et de la récupérer lorsque ce n'est plus le cas ; la nuit, dans le cas de panneaux photovoltaïques par exemple.

La partie théorique se termine par un rapide passage en revue de différentes méthodes de simulation de batteries existantes : il peut s'agir de modèles mathématiques, à circuit électrique équivalent ou encore électrochimique. Chacun de ces types de modèle présente un niveau de complexité accru. En effet, là où le modèle mathématique sera assez simplifié, le modèle électrochimique permet d'obtenir des informations sur le comportement interne de la cellule, telles que des concentrations en matériaux actifs ou encore l'état des électrodes à chaque moment de la simulation. Les modèles à circuit électrique équivalent représentent une complexité intermédiaire entre ces deux modèles.

La partie pratique de ce travail nous a tout d'abord permis de nous renseigner sur les modèles de batterie disponibles dans le logiciel de simulation dynamique TRNSYS. Nous avons ainsi pu extraire deux modèles : le Type47, divisé lui-même en cinq versions différentes ; et le Type185, divisé en deux versions. Nous avons ainsi pu étudier le code de programmation de certains de ces modèles afin de mieux comprendre leur fonctionnement et également afin de déterminer si ces modèles étaient utilisables dans le cadre de la simulation de batteries lithium-ion. Nous sommes arrivés à la conclusion que tous ces modèles, à l'exception du Type47a, ne sont pas utilisables. En effet, ceux-ci sont spécifiques aux batteries au plomb et comprennent un certain nombre de paramètres déterminés empiriquement et qui ne peuvent pas être obtenus simplement afin de modéliser des batteries lithium-ion. Le Type47a est cependant assez limité, la création d'un nouveau modèle a donc été imaginée.

Ce nouveau modèle a été programmé à l'aide du logiciel Matlab, qui est utilisable conjointement avec TRNSYS. Ce modèle a été développé afin de pouvoir être utilisé aussi bien à partir d'une puissance ou d'une intensité. Il permet également de prendre en compte le rendement du régulateur de tension, de l'onduleur, ainsi que le rendement énergétique. Le modèle proposé permet de générer une tension, une intensité, de calculer l'évolution de l'état de charge de la batterie. Il permet également de calculer une puissance excédentaire ainsi qu'une puissance déficitaire. Des tests ont été réalisés afin de s'assurer du bon fonctionnement de tous les cas de figures pris en compte, ce qui est le cas.

Finalement, il sera sans doute nécessaire d'apporter certaines améliorations au modèle. Des améliorations telles que la prise en compte du vieillissement et de l'impact de la température. Il serait également intéressant d'intégrer un contrôle de l'intensité, afin de garder la batterie dans de bonnes conditions de fonctionnement. Un dernier point d'ajout serait l'implémentation d'un pas de temps interne au code Matlab afin d'améliorer la précision du modèle Matlab, tout en soulageant la simulation TRNSYS.

## Bibliographie

- [1] European Commission, "Paquet sur le climat et l'énergie à l'horizon 2020," 2017. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020\\_fr](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_fr). [Accessed: 19-Aug-2017].
- [2] MathWorks, "Makers of MATLAB and Simulink," 2017. [Online]. Available: [https://nl.mathworks.com/?s\\_tid=gn\\_logo](https://nl.mathworks.com/?s_tid=gn_logo). [Accessed: 17-Aug-2017].
- [3] TRNSYS, "TRNSYS: Transient System Simulation Tool," 2017. [Online]. Available: <http://www.trnsys.com/>. [Accessed: 17-Aug-2017].
- [4] I. Noels, "Évolution des piles et des batteries," 2009. [Online]. Available: <http://www.geocities.ws/profmokeur/chimie/histoirepile.htm>. [Accessed: 02-Aug-2017].
- [5] Linternaute, "Alessandro Volta." [Online]. Available: <http://www.linternaute.com/biographie/alessandro-volta-1/>. [Accessed: 02-Aug-2017].
- [6] M. Cognet and M. Carboni, "Stockage de l'énergie: évolution des batteries," 2017. [Online]. Available: <http://culturesciences.chimie.ens.fr/stockage-de-lenergie-evolution-des-batteries-12>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [7] Lycée Renaudeau, "Historique des piles." [Online]. Available: [http://lyc-renaudeau-49.ac-nantes.fr/IMG/pdf/piles\\_historique.pdf](http://lyc-renaudeau-49.ac-nantes.fr/IMG/pdf/piles_historique.pdf). [Accessed: 02-Aug-2017].
- [8] D. Grazioli, M. Magri, and A. Salvadori, "Computational modeling of Li-ion batteries," *Comput. Mech.*, vol. 58, no. 6, pp. 889–909, 2016.
- [9] Battery University, "What's the Best Battery?," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/archive/whats\\_the\\_best\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/archive/whats_the_best_battery). [Accessed: 03-Aug-2017].
- [10] S. Winternheimer, "Visite du laboratoire en électronique de puissance de HTW Saar du 14/06/2017," 2017.
- [11] MIT Electric Vehicle Team, "A Guide to Understanding Battery Specifications." p. 3, 2008.
- [12] POWER Calculation, "Battery calculator," 2015. [Online]. Available: <http://www.power-calculation.com/battery-storage-calculator.php>. [Accessed: 22-May-2017].
- [13] Battery University, "What Is C-rate?," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/what\\_is\\_the\\_c\\_rate](http://batteryuniversity.com/learn/article/what_is_the_c_rate). [Accessed: 04-Jul-2017].
- [14] Battery University, "Battery Definitions," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/battery\\_definitions](http://batteryuniversity.com/learn/article/battery_definitions). [Accessed: 04-Jul-2017].
- [15] Zied Jelassi, "Résistance Interne," 2009. [Online]. Available: [http://www.memoireonline.com/09/10/3931/m\\_Etude-et-evaluation-des-performances-des-systemes-de-gestion-de-batteries-lithium-ion3.html](http://www.memoireonline.com/09/10/3931/m_Etude-et-evaluation-des-performances-des-systemes-de-gestion-de-batteries-lithium-ion3.html). [Accessed: 03-Aug-2017].
- [16] Battery University, "Confusion with Voltages," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/confusion\\_with\\_voltages](http://batteryuniversity.com/learn/article/confusion_with_voltages). [Accessed: 06-Jul-2017].
- [17] Battery University, "Making Lithium-ion Safe," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_304b\\_making\\_lithium\\_ion\\_safe](http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_304b_making_lithium_ion_safe). [Accessed: 07-Jul-2017].
- [18] Battery University, "Getting to Know the Battery," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/getting\\_to\\_know\\_the\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/article/getting_to_know_the_battery). [Accessed: 04-Jul-2017].

- [19] Battery University, "Basics about Discharging," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/discharge\\_methods](http://batteryuniversity.com/learn/article/discharge_methods). [Accessed: 11-Jul-2017].
- [20] Futura Tech, "L'autonomie des batteries lithium-ion pourrait être triplée." [Online]. Available: <http://www.futura-sciences.com/tech/actualites/technologie-autonomie-batteries-lithium-ion-pourrait-etre-triplee-54668/>. [Accessed: 10-Aug-2017].
- [21] Battery University, "How do Battery Chargers Work?," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/all\\_about\\_chargers](http://batteryuniversity.com/learn/article/all_about_chargers). [Accessed: 08-Jul-2017].
- [22] Battery University, "Charging Lithium-Ion," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/charging\\_lithium\\_ion\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries). [Accessed: 10-Jul-2017].
- [23] Battery University, "How to Calculate Battery Runtime," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_503\\_how\\_to\\_calculate\\_battery\\_runtime](http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_503_how_to_calculate_battery_runtime). [Accessed: 11-Jul-2017].
- [24] Battery University, "What Causes Li-ion to Die?," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_808b\\_what\\_causes\\_li\\_ion\\_to\\_die](http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_808b_what_causes_li_ion_to_die). [Accessed: 13-Jul-2017].
- [25] Tesla, "Data Sheet Tesla Powerwall 2 AC." p. 2, 2016.
- [26] C. Patsios *et al.*, "An integrated approach for the analysis and control of grid connected energy storage systems," *J. Energy Storage*, vol. 5, pp. 48–61, 2016.
- [27] Battery University, "The Octagon Battery – What makes a Battery a Battery," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/the\\_octagon\\_battery\\_what\\_makes\\_a\\_battery\\_a\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/article/the_octagon_battery_what_makes_a_battery_a_battery). [Accessed: 04-Jul-2017].
- [28] Battery University, "Cell Matching and Balancing," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_803a\\_cell\\_mismatch\\_balancing](http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_803a_cell_mismatch_balancing). [Accessed: 12-Jul-2017].
- [29] C. Edouard, "Vieillessement des batteries Li-ion de traction : des mécanismes vers le vieillissement accéléré," Université de Technologie Compiègne, 2015.
- [30] Battery University, "Battery Building Blocks," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_104b\\_building\\_blocks\\_of\\_a\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_104b_building_blocks_of_a_battery). [Accessed: 04-Jul-2017].
- [31] Battery University, "What is the Function of the Separator?," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_306\\_battery\\_separators](http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_306_battery_separators). [Accessed: 08-Jul-2017].
- [32] M.-F. Bottin, "Les Polyoléfinés," 2014, no. 1, p. 22.
- [33] M.-L. DOUBLET, "Batteries Li-ion : Conception théorique," *Tech. l'ingénieur. Sci. Fondam.*, vol. AFP4, no. AF6612, p. 15, 2009.
- [34] Battery University, "How does Electrolyte Work?," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_307\\_electrolyte](http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_307_electrolyte). [Accessed: 08-Jul-2017].
- [35] Battery University, "Li-polymer: Substance or Hype?," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/the\\_li\\_polymer\\_battery\\_substance\\_or\\_hype](http://batteryuniversity.com/learn/article/the_li_polymer_battery_substance_or_hype). [Accessed: 04-Jul-2017].

- [36] A. Teyssot, "Etude de l'interface lithium métal / électrolyte polymère fondu ou gélifié," 2010.
- [37] A. M. Stephan and K. S. Nahm, "Review on composite polymer electrolytes for lithium batteries," *Polymer (Guildf)*, vol. 47, p. 13, 2006.
- [38] J. Yi, B. Koo, C. Burm Shin, T. Han, and S. Park, "Modeling the effect of aging on the electrical and thermal behaviors of a lithium-ion battery during constant current charge and discharge cycling," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 99, pp. 31–39, 2017.
- [39] C. Campestrini, P. Keil, S. F. Schuster, and A. Jossen, "Ageing of lithium-ion battery modules with dissipative balancing compared with single-cell ageing," *J. Energy Storage*, vol. 6, pp. 142–152, 2016.
- [40] Battery University, "Types of Lithium-ion," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion). [Accessed: 12-Jun-2017].
- [41] M. Müller *et al.*, "Evaluation of grid-level adaptability for stationary battery energy storage system applications in Europe," *J. Energy Storage*, vol. 9, pp. 1–11, 2017.
- [42] S. F. Schuster *et al.*, "Nonlinear aging characteristics of lithium-ion cells under different operational conditions," *J. Energy Storage*, vol. 1, no. 1, pp. 44–53, 2015.
- [43] Battery University, "How does Cobalt Work in Li-ion?," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_310\\_cobalt](http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_310_cobalt). [Accessed: 08-Jul-2017].
- [44] Battery University, "How do Lithium Batteries Work?," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium\\_based\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries). [Accessed: 04-Jul-2017].
- [45] Atelier Jean Guglia et Fils Enr., "Les avantages des batteries au Lithium-ion," 2014. [Online]. Available: <http://jeanguglia.com/dernieres-nouvelles/les-avantages-des-batteries-au-lithium-ion/>. [Accessed: 05-Aug-2017].
- [46] G. Vallverdu, "Principe de fonctionnement des batteries au lithium." Pau, p. 43, 2011.
- [47] Battery University, "How does Graphite Work in Li-ion?," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_309\\_graphite](http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_309_graphite). [Accessed: 08-Jul-2017].
- [48] UPS Battery Center, "How Does Intercalation Work in Batteries?," 2014. [Online]. Available: <http://www.upsbatterycenter.com/blog/intercalation-work-batteries/>. [Accessed: 05-Aug-2017].
- [49] SOFAD, "Électricité – Tension et différence de potentiel," 2008. [Online]. Available: <http://edusofad.com/www/demo/wscp-4011/demo/q1s106.php>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [50] KeepSchool, "Le potentiel standard d'oxydo-réduction." [Online]. Available: <http://keepschool.com/fiches-de-cours/lycee/chimie/potentiel-standard-oxydo-reduction.html>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [51] KeepSchool, "Les couples d'oxydo-réduction." [Online]. Available: <http://keepschool.com/fiches-de-cours/lycee/chimie/couples-oxydo-reduction.html>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [52] S. Franger, "Les batteries Li-ion, vers un stockage efficace de l'énergie," 2013. [Online]. Available: <http://www.cvc.u-psud.fr/spip.php?article171>. [Accessed: 05-Aug-2017].
- [53] TPE: La Voiture Electrique, "Fonctionnement de la batterie au lithium." [Online]. Available: <http://tpevoitureelectrique.e-monsite.com/pages/introduction/fonctionnement-de-la-batterie-au-lithium.html>. [Accessed: 05-Aug-2017].

- [54] Vapo-DEPOT, "Les batteries Lithium-Ion." [Online]. Available: <http://www.vapo-depot.com/content/8-les-batteries-lithium-ion>. [Accessed: 08-Aug-2017].
- [55] Battery University, "Discharge Characteristics of Li-ion," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/discharge\\_characteristics\\_li](http://batteryuniversity.com/learn/article/discharge_characteristics_li). [Accessed: 11-Jul-2017].
- [56] Battery University, "How does Rising Internal Resistance affect Performance?," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/rising\\_internal\\_resistance](http://batteryuniversity.com/learn/article/rising_internal_resistance). [Accessed: 12-Jul-2017].
- [57] Battery University, "Discharging at High and Low Temperatures," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/discharging\\_at\\_high\\_and\\_low\\_temperatures](http://batteryuniversity.com/learn/article/discharging_at_high_and_low_temperatures). [Accessed: 11-Jul-2017].
- [58] Battery University, "Fast and Ultra-fast Chargers," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/ultra\\_fast\\_chargers](http://batteryuniversity.com/learn/article/ultra_fast_chargers). [Accessed: 09-Jul-2017].
- [59] Battery University, "Charging Batteries at High and Low Temperatures," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/charging\\_at\\_high\\_and\\_low\\_temperatures](http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_at_high_and_low_temperatures). [Accessed: 10-Jul-2017].
- [60] Wikipedia, "Dendrite," 2017. [Online]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Dendrite>. [Accessed: 07-Aug-2017].
- [61] C. Campestrini, S. Kosch, and A. Jossen, "Influence of change in open circuit voltage on the state of charge estimation with an extended Kalman filter," *J. Energy Storage*, vol. 12, pp. 149–156, 2017.
- [62] A. Fotouhi, D. J. Auger, K. Propp, S. Longo, and M. Wild, "A review on electric vehicle battery modelling: From Lithium-ion toward Lithium-Sulphur," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 1008–1021, 2016.
- [63] Futura Planète, "Structure spinelle." [Online]. Available: <http://www.futura-sciences.com/planete/definitions/geologie-structure-spinelle-5043/>. [Accessed: 06-Aug-2017].
- [64] Wikipedia, "Lithium ion manganese oxide battery," 2017. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium\\_ion\\_manganese\\_oxide\\_battery](https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_ion_manganese_oxide_battery). [Accessed: 06-Aug-2017].
- [65] F. Wankmüller, P. R. Thimmapuram, K. G. Gallagher, and A. Botterud, "Impact of battery degradation on energy arbitrage revenue of grid-level energy storage," *J. Energy Storage*, vol. 10, pp. 56–66, 2017.
- [66] Wikipedia, "Alimentation sans interruption," 2017. [Online]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Alimentation\\_sans\\_interruption](https://fr.wikipedia.org/wiki/Alimentation_sans_interruption). [Accessed: 06-Aug-2017].
- [67] Large Battery, "Advantages and Disadvantages of Lithium Ion Battery," 2011. [Online]. Available: <http://www.large-battery.com/advantages-and-disadvantages-of-lithium-ion-battery.html?gclid=Cj0KEQjw9r7JBRCj37PIItTskaMBEiQAKTzTfC733QxuaMoMH9Hz4ZYH3uqd9LNgcIvoaKkVd7hK2pcaAv-a8P8HAQ>. [Accessed: 01-Jun-2017].
- [68] Battery University, "Is Lithium-ion the Ideal Battery?," 2010. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/archive/is\\_lithium\\_ion\\_the\\_ideal\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/archive/is_lithium_ion_the_ideal_battery). [Accessed: 01-Jun-2017].
- [69] Battery Boost, "Le procédé de régénération des batteries." [Online]. Available:

- <http://www.battery-boost.fr/le-procede-de-regeneration/>. [Accessed: 07-Aug-2017].
- [70] Le monde des accus rechargeables, "L'effet mémoire des accus au Nickel." [Online]. Available: <http://www.ni-cd.net/accusphp/baba/nickel/effetmemoire.php>. [Accessed: 07-Aug-2017].
- [71] Battery University, "Future Batteries," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/experimental\\_rechargeable\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/experimental_rechargeable_batteries). [Accessed: 05-Jul-2017].
- [72] Société Chimique de France, "Carbure de silicium," 2016. [Online]. Available: <http://www.societechimiquedefrance.fr/carbure-de-silicium.html>. [Accessed: 07-Aug-2017].
- [73] Battery University, "Why does Sodium-sulfur need to be heated," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_210a\\_why\\_does\\_sodium\\_sulfur\\_need\\_to\\_be\\_heated](http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_210a_why_does_sodium_sulfur_need_to_be_heated). [Accessed: 05-Jul-2017].
- [74] Battery University, "Alternate Battery Systems," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/alternate\\_battery\\_systems](http://batteryuniversity.com/learn/article/alternate_battery_systems). [Accessed: 05-Jul-2017].
- [75] N. Imanishi and O. Yamamoto, "Rechargeable lithium–air batteries: characteristics and prospects," *Biochem. Pharmacol.*, vol. 17, no. 1, pp. 24–30, 2014.
- [76] APERE, "Systèmes de conversion." [Online]. Available: <http://www.apere.org/fr/systemes-de-conversion-0>. [Accessed: 07-Aug-2017].
- [77] Ecosources, "Stockage d'énergie par volant d'inertie." [Online]. Available: [http://www.ecosources.info/dossiers/Stockage\\_energie\\_volant\\_inertie](http://www.ecosources.info/dossiers/Stockage_energie_volant_inertie). [Accessed: 07-Aug-2017].
- [78] Fraunhofer IWES, "StEnSea," 2015. [Online]. Available: <https://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/en/projekte/search/laufende/stensea.html>. [Accessed: 07-Aug-2017].
- [79] Forschung Energiespeicher, "Storing energy at sea," 2017. [Online]. Available: [http://forschung-energiespeicher.info/en/projektschau/gesamtliste/projekt-einzelansicht/95/Kugelpumpspeicher\\_unter\\_Wasser/](http://forschung-energiespeicher.info/en/projektschau/gesamtliste/projekt-einzelansicht/95/Kugelpumpspeicher_unter_Wasser/). [Accessed: 07-Aug-2017].
- [80] Forma TIS, "Stockage W," 2014. [Online]. Available: <http://blog.formatis.pro/stockage-w>. [Accessed: 07-Aug-2017].
- [81] Ecosources, "Les STEP, stockage d'énergie par pompage turbinage." [Online]. Available: [http://www.ecosources.info/dossiers/Station\\_stockage\\_transfert\\_pompage\\_turbinage](http://www.ecosources.info/dossiers/Station_stockage_transfert_pompage_turbinage). [Accessed: 07-Aug-2017].
- [82] Battery University, "How to Store Renewable Energy in a Battery," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_413a\\_storing\\_renewable\\_energy\\_in\\_a\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_413a_storing_renewable_energy_in_a_battery). [Accessed: 10-Jul-2017].
- [83] Battery University, "Types of Battery Cells," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_battery\\_cells](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells). [Accessed: 06-Jul-2017].
- [84] International Electrotechnical Commission, "Welcome to the IEC," 2017. [Online]. Available: <http://www.iec.ch/>. [Accessed: 08-Aug-2017].
- [85] Battery University, "Serial and Parallel Battery Configurations," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/serial\\_and\\_parallel\\_battery\\_configurations](http://batteryuniversity.com/learn/article/serial_and_parallel_battery_configurations). [Accessed: 06-Jul-2017].

- [86] Hooked on rc airplanes, "Lipo Battery Sizes." [Online]. Available: <http://www.hooked-on-rc-airplanes.com/lipo-battery-sizes.html>. [Accessed: 08-Aug-2017].
- [87] Le Comptoir Eolien, "Infos sur les batteries - montage parallèle et série." [Online]. Available: <https://www.comptoireolien.fr/informations-batteries-les-limites-d-utilisation-d-une-batterie/index.html>. [Accessed: 08-Aug-2017].
- [88] Battery University, "Safety Concerns with Li-ion Batteries," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/safety\\_concerns\\_with\\_li\\_ion](http://batteryuniversity.com/learn/article/safety_concerns_with_li_ion). [Accessed: 07-Jul-2017].
- [89] Battery University, "Cycling Performance," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/battery\\_performance\\_as\\_a\\_function\\_of\\_cycling](http://batteryuniversity.com/learn/article/battery_performance_as_a_function_of_cycling). [Accessed: 05-Jul-2017].
- [90] Battery University, "Can Batteries Be Restored?," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/can\\_batteries\\_be\\_restored](http://batteryuniversity.com/learn/article/can_batteries_be_restored). [Accessed: 12-Jul-2017].
- [91] Battery University, "What Causes Capacity Loss?," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/capacity\\_loss](http://batteryuniversity.com/learn/article/capacity_loss). [Accessed: 12-Jul-2017].
- [92] Battery University, "How to Prolong Lithium-based Batteries," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/how\\_to\\_prolong\\_lithium\\_based\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries). [Accessed: 12-Jul-2017].
- [93] Battery University, "What does Elevated Self-discharge Do?," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/elevating\\_self\\_discharge](http://batteryuniversity.com/learn/article/elevating_self_discharge). [Accessed: 12-Jul-2017].
- [94] Battery University, "How Low can a Battery be Discharged?," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/premature\\_voltage\\_cut\\_off](http://batteryuniversity.com/learn/article/premature_voltage_cut_off). [Accessed: 12-Jul-2017].
- [95] Battery University, "How to Verify Sufficient Battery Capacity," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_504\\_how\\_to\\_verify\\_sufficient\\_battery\\_capacity](http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_504_how_to_verify_sufficient_battery_capacity). [Accessed: 11-Jul-2017].
- [96] Intertek, "Battery Safety Testing - IEC 62133 Standard." [Online]. Available: <http://www.intertek.com/energy-storage/battery-safety/iec-62133/>. [Accessed: 10-Aug-2017].
- [97] Battery University, "Why are Protection Circuits Needed?," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/safety\\_circuits\\_for\\_modern\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/safety_circuits_for_modern_batteries). [Accessed: 06-Jul-2017].
- [98] Battery University, "Building a Lithium-ion Pack," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/building\\_a\\_lithium\\_ion\\_pack](http://batteryuniversity.com/learn/article/building_a_lithium_ion_pack). [Accessed: 07-Jul-2017].
- [99] E. Darcy, F. Davies, J. Jeevarajan, and P. Cowles, "Lithium-Ion Cell PTC Limitations and Solutions for High Voltage Battery Applications." p. 1.
- [100] Battery University, "Loss of Electrolyte," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_803c\\_loss\\_of\\_electrolyte](http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_803c_loss_of_electrolyte). [Accessed: 12-Jul-2017].
- [101] Futura Sciences, "Coulomb." [Online]. Available: <http://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-coulomb-335/>. [Accessed: 12-Aug-2017].

- [102] S. Knoth, "Know a Battery's State-of-Charge By Counting Coulombs." pp. 1–5.
- [103] Battery University, "How does a Smart Battery Work?," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/inner\\_workings\\_of\\_a\\_smart\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/article/inner_workings_of_a_smart_battery). [Accessed: 11-Jul-2017].
- [104] Battery University, "Measuring State-of-charge," 2017. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/how\\_to\\_measure\\_state\\_of\\_charge](http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_state_of_charge). [Accessed: 12-Jun-2017].
- [105] M. A. Awadallah and B. Venkatesh, "Accuracy improvement of SOC estimation in lithium-ion batteries," *J. Energy Storage*, vol. 6, pp. 95–104, 2016.
- [106] Le Comptoir Eolien, "Schéma de montage d'un panneau solaire," 2017. [Online]. Available: <https://www.comptoireolien.fr/schema-de-montage-d-un-panneau-solaire/index.html#bv000004>. [Accessed: 18-Jul-2017].
- [107] Battery University, "Charging Batteries with Solar, Turbine," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/charging\\_with\\_solar\\_and\\_turbine](http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_with_solar_and_turbine). [Accessed: 10-Jul-2017].
- [108] SOLARIS-STORE, "Principe de fonctionnement d'un régulateur solaire." [Online]. Available: <https://www.solaris-store.com/content/44-principe-de-fonctionnement-d-un-regulateur-solaire>. [Accessed: 18-Jul-2017].
- [109] SOLARIS-STORE, "Principe de fonctionnement d'un convertisseur DC → DC." [Online]. Available: <https://www.solaris-store.com/content/48-principe-de-fonctionnement-d-un-convertisseur-dc-dc>. [Accessed: 18-Jul-2017].
- [110] energieplus, "Les onduleurs." [Online]. Available: <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16683>. [Accessed: 18-Jul-2017].
- [111] epectec, "Battery Cell Comparison." [Online]. Available: <http://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>. [Accessed: 13-Aug-2017].
- [112] G. Albright, J. Edie, and S. Al-Hallaj, "A Comparison of Lead Acid to Lithium-ion in Stationary Storage Applications." p. 14, 2012.
- [113] Tesla, "Powerwall," 2017. [Online]. Available: [https://www.tesla.com/fr\\_BE/powerwall?redirect=no](https://www.tesla.com/fr_BE/powerwall?redirect=no). [Accessed: 17-Jul-2017].
- [114] rte, "LE FONCTIONNEMENT DU RESEAU ELECTRIQUE." p. 6.
- [115] Battery University, "Battery as a Buffer," 2016. [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/battery\\_as\\_a\\_buffer](http://batteryuniversity.com/learn/article/battery_as_a_buffer). [Accessed: 10-Jul-2017].
- [116] I. Kim, "A case study on the effect of storage systems on a distribution network enhanced by high-capacity photovoltaic systems," *J. Energy Storage*, vol. 12, pp. 121–131, 2017.
- [117] Connaissance des Energies, "Réseau intelligent (Smart Grid)," 2015. [Online]. Available: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/reseau-intelligent-smart-grid>. [Accessed: 14-Aug-2017].
- [118] Smart Grids-CRE, "Définition des Smart grids." [Online]. Available: <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=definition-smart-grids>. [Accessed: 14-Aug-2017].
- [119] S. Barsali, R. Giglioli, G. Lutzemberger, D. Poli, and G. Valenti, "Optimised operation of storage systems integrated with MV photovoltaic plants, considering the impact on the battery lifetime," *J. Energy Storage*, vol. 12, pp. 178–185, 2017.

- [120] Energies & Environnement, "Vehicule-to-grid : la brique manquante au développement des smart grids ?," 2015. [Online]. Available: <http://www.energie.sia-partners.com/vehicule-grid-la-brique-manquante-au-developpement-des-smart-grids>. [Accessed: 14-Aug-2017].
- [121] Energystream, "'Vehicule to grid' : le véhicule électrique au service du réseau," 2013. [Online]. Available: <https://www.energystream-wavestone.com/2013/03/vehicule-to-grid-le-vehicule-electrique-au-servic-du-reseau/>. [Accessed: 14-Aug-2017].
- [122] J. Manwell and J. McGowan, "Lead acid battery storage model for hybrid energy systems," *Sol Energy*, vol. 50, no. 399, pp. 399–405, 1993.
- [123] M. Jongerden and B. Haverkort, "Battery modeling. Centre for telematics and information technology, University of Twente." 2008.
- [124] A. Abdollahi *et al.*, "Optimal charging for general equivalent electrical battery model, and battery life management," *J. Energy Storage*, vol. 9, pp. 47–58, 2017.
- [125] J. Nadeau, M. Dubois, A. Desrochers, and N. Denis, "Ageing estimation of lithium-ion batteries applied to a three-wheel PHEV roadster," in *Proceedings of the IEEE vehicle power and propulsion conference*, 2013.
- [126] A. Papazoglou, S. Longo, D. Auger, and F. Assadian, "Nonlinear filtering techniques comparison for battery state estimation," *J Sustain Dev Energy Water Env. Syst*, vol. 2(3), no. 259, p. 69, 2014.
- [127] K. Smith and C. Wang, "Solid-state diffusion limitations on pulse operation of a lithium ion cell for hybrid electric vehicles," *J Power Sources*, vol. 161, no. 628, p. 39, 2006.
- [128] batterX, "batterX home series." p. 4.
- [129] ALMA SOLAR, "Acheter batteries solaires pas chères chez Alma Solar." [Online]. Available: <https://www.alma-solarshop.fr/121-batteries-solaires#/>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [130] europe-solar Store, "Batteries." [Online]. Available: <http://www.europe-solarstore.com/catalogsearch/result/?q=fronius>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [131] Mercedes-Benz, "Mercedes-Benz Energy Storage Home." p. 6.
- [132] Fronius, "Fronius energy package." p. 6, 2016.
- [133] LG Chem, "Change your enery. Change your life." p. 7, 2016.
- [134] UL, "UL 1642." p. 31, 2012.
- [135] Hoppecke, "sun. Powerpack premium." p. 2, 2016.
- [136] MG Solar Shop, "MG Solar Shop." [Online]. Available: [http://www.mg-solar-shop.de/advanced\\_search\\_result.php?keywords=hoppecke](http://www.mg-solar-shop.de/advanced_search_result.php?keywords=hoppecke). [Accessed: 15-Aug-2017].
- [137] victron energy, "Batteries au lithium fer phosphate de 12,8 V." p. 2.
- [138] APB-BLUEPOWER, "Batterie Lithium Fer Phosphate 12,8V." [Online]. Available: <https://www.apb-bluepower.com/batterie-lithium-fer-phosphate-12-8v,fr,3,37.cfm>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [139] Enphase, "Enphase AC Battery." p. 2, 2017.
- [140] T. 18, "Volume 4 - Mathematical Reference." p. 698, 2017.
- [141] Trnsys 17, "Fortran Code Type47." 2017.

- [142] Trnsys 17, "Volume 7 - Programmer's Guide," vol. 7. p. 187, 2014.
- [143] C. M. Shepherd, "Design of Primary and Secondary Cells," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 112, no. 7, p. 657, 1965.
- [144] Panasonic, "Data Sheet - Panasonic NCR18650B," *Data sheet*. p. 1, 2012.
- [145] HTW Saar, "Elektrische Charakterisierung einer Lithium-Ionen Zelle." p. 27.
- [146] S. Hennaut, "TRNSYS Advanced group : New component creation." 2016.
- [147] materiel-informatique.be, "Impédance électrique," 2015. [Online]. Available: <http://www.materiel-informatique.be/impedance.php>. [Accessed: 18-Jul-2017].
- [148] Pierre Dessapt, "Pile de Volta," 2009. [Online]. Available: <http://leradiofil.com/PileVolta2V.htm>. [Accessed: 01-Aug-2017].

# Annexes

## Annexe I : Fiche technique cellule Panasonic NCR18650B [144]

# Lithium Ion Panasonic NCR18650B

### Features & Benefits

- High energy density
- Long stable power and long run time
- Ideal for notebook PCs, boosters, portable devices, etc.

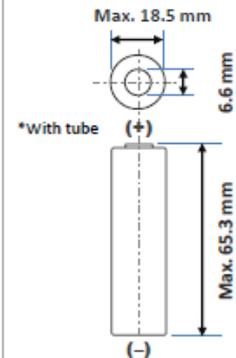
\* At temperatures below 10°C, charge at a 0.25C rate.

### Specifications

Rated capacity <sup>(1)</sup>	Min. 3200mAh
Capacity <sup>(2)</sup>	Min. 3250mAh Typ. 3350mAh
Nominal voltage	3.6V
Charging	CC-CV, Std. 1625mA, 4.20V, 4.0 hrs
Weight (max.)	48.5 g
Temperature	Charge*: 0 to +45°C Discharge: -20 to +60°C Storage: -20 to +50°C
Energy density <sup>(3)</sup>	Volumetric: 676 Wh/l Gravimetric: 243 Wh/kg

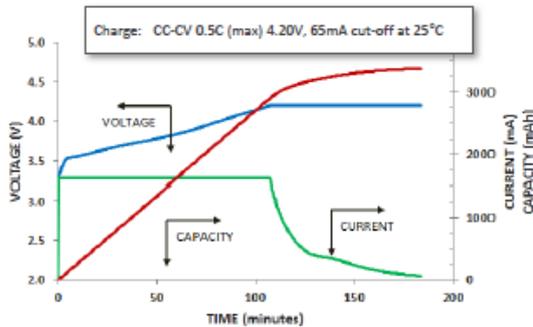
<sup>(1)</sup> At 20°C <sup>(2)</sup> At 25°C <sup>(3)</sup> Energy density based on bare cell dimensions

### Dimensions

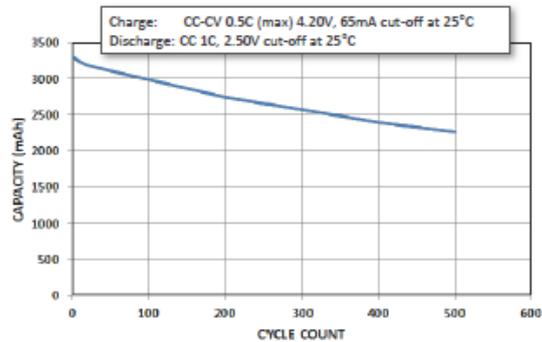


For Reference Only

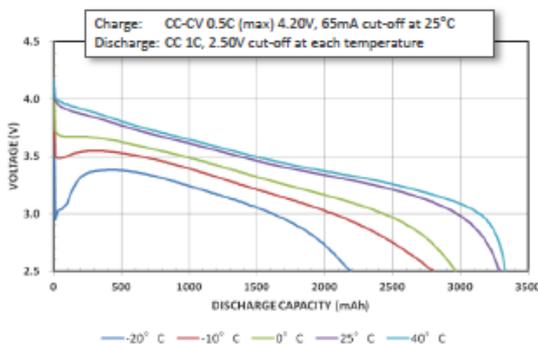
### Charge Characteristics



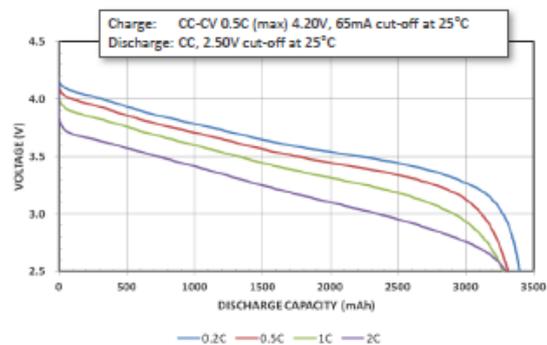
### Cycle Life Characteristics



### Discharge Characteristics (by temperature)



### Discharge Characteristics (by rate of discharge)



The data in this document is for descriptive purposes only and is not intended to make or imply any guarantee or warranty.

For more information on how Panasonic can assist you with your battery power solution needs, visit us at [www.panasonic.com/industrial/batteries-oem](http://www.panasonic.com/industrial/batteries-oem), e-mail [secsales@us.panasonic.com](mailto:secsales@us.panasonic.com), or call (469) 362-5600.

## Annexe II : Intégralité du code FORTRAN du Type47 TRNSYS [141]

```

1 Subroutine Type47
2 *****
3 ! This component simulates the performance of a lead-acid storage battery. It is designed to
4 ! operate in conjunction with a solar cell array and regulator.
5 !
6 ! Q = state of charge (mode 1 - watt hrs, modes 2,3,4 - amp hrs)
7 ! Qm = rated capacity of cell
8 ! Qc,qd = capacity parameters on charge, discharge
9 ! F = fractional state of charge = q/qm (1.0 is full charge)
10 ! Cp,cs = number of cells in parallel, series
11 ! P = power (the 3.6 factor converts kj/hr to watts on input and vice versa on output)
12 ! Iq = current
13 ! Iqmax,iqmin = maximum current (charge), minimum current (discharge)
14 ! V = voltage
15 ! Vc,ic = cutoff voltage on charge, current corresponding to vc
16 ! Ictol,vtol = parameters for iterative calculations, modes 3 and 5
17 ! Vd = cutoff voltage on discharge
18 ! Ed,rd = data used to calculate vd when vcontr .lt. 0.
19 ! Vcontr = specification of voltage control on discharge. Positive means vd=vcontr. Negative
20 ! means vd=ed-abs(iq)*rd.
21 ! Idf = current corresponding to vd
22 ! Vdi = diode voltage from z-p model, used in modes 3 and 5
23 ! Voc = open circuit voltage at full charge
24 ! Esc,esd = extrapolated open circuit voltages
25 ! Gc,gd = coefficients of (1-f)in v formulas
26 ! Rsc,rsd = internal resistances at full charge
27 ! Mc,md = cell type parameters which determine the shapes of the I-V-Q characteristics
28 !
29 ! The battery can operate in one of five modes.
30 ! Mode 1 - discharge rate is determined by a power efficiency factor
31 ! Mode 2 - the I-V-Q formula is based upon the Shepherd model, with IQ and v calculated from P.
32 ! Modes 2 and 3 are peak-power modes.
33 ! Mode 3 - same as mode 2, but using model recommended in the best report (the Hyman model). It
34 ! is the shepherd model modified by the addition of a Zimmerman-Petersen diode in both the charge
35 ! and discharge equivalent circuits.
36 ! Mode 4 - shepherd model, but with P and V calculated from IQ. This and mode 5 are
37 ! clamped-voltage modes.
38 ! Mode 5 - same as mode 4, but using Hyman model
39 !
40 ! Revision history
41 ! 03.26.2001 - MKu: Corrected call to TYPECK (ND=1)
42 ! 02.00.2004 - TPM: For TRNSYS 16
43 ! 04.27.2009 - DEB: Not all the parameters were being re-read if the UNIT number had changed.
44 ! 07.00.2009 - TPM: conversion to version 17 coding standards.
45 ! 11.23.2010 - DEB: Add a check and RETURN on if ErrorFound() on calling getNumericalSolution.
46 !
47 *****
48 ! Copyright © 2011 Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. All rights reserved.
49
50 !export this subroutine for its use in external DLLs.
51 !DEC$ATTRIBUTES DLLEXPORT :: TYPE47
52
53 -----
54 Use TrnsysConstants
55 Use TrnsysFunctions
56 -----
57
58 !Variable Declarations
59 Implicit None !force explicit declaration of local variables
60 Double Precision Time,Timestep
61 Double Precision il,ic,icl,ictol,idf,iq,iqmax,iqmin,kl,mc,md,esc,esd,gc,gd,ed,rd,vd,qm,vc,vcontr,qc,qd,rsc,rsd, &
62 p,cp,cs,eff,f,h,a,b,c,v,vmin,vmax,voc,vdimax,vdimin,vtol,vl,vdi,pmax,pmin,pc
63 Integer mode,CurrentUnit,CurrentType
64
65 Data esc/2.25/,esd/2.10/,gc/.08/,gd/.08/,mc/.864/,md/1./,ed/1.8/,rd/2.4d-3/,vd/1.75/,il/2.5/,kl/29.3/
66
67 -----
68 !Get the Global Trnsys Simulation Variables
69 Time = getSimulationTime()
70 Timestep = getSimulationTimeStep()
71 CurrentUnit = getCurrentUnit()
72 CurrentType = getCurrentType()
73 -----
74
75 -----
76 !Set the Version Number for This Type
77 If(getIsVersionSigningTime()) Then
78     Call SetTypeVersion(17)
79     Return
80 Endif
81 -----
82
83 -----
84 !Do All of the Last Call Manipulations Here
85 If(getIsLastCallofSimulation()) Then
86     Return
87 Endif
88 -----
89
90 -----
91 !Perform Any "End of Timestep" Manipulations That May Be Required
92 If(getIsEndOfTimestep()) Then
93     Return
94 Endif
95 -----

```

```

96
97
98 !Do All of the "Very First Call of the Simulation Manipulations" Here
99 If(getIsFirstCallOfSimulation()) Then
100
101 ! Tell the TRNSYS Engine How This Type Works
102 mode = getParameterValue(1)
103 If (mode == 1) Then
104     Call SetNumberOfParameters(5)
105     Call SetNumberOfOutputs(4)
106 Elseif (mode==2.or.mode==4) Then
107     Call SetNumberOfParameters(9)
108     Call SetNumberOfOutputs(12)
109 Else
110     Call SetNumberOfParameters(10)
111     Call SetNumberOfOutputs(12)
112 EndIf
113 Call SetNumberOfInputs(1)
114 Call SetNumberOfDerivatives(1)
115 Call SetIterationMode(1)
116 Call SetNumberStoredVariables(0,0)
117
118 Return
119 Endif
120
121 !-----
122 !Do All of the "Start Time" Manipulations Here - There Are No Iterations at the Initial Time
123 If (getIsStartTime()) Then
124
125 ! Read in the Values of the Parameters from the Input File
126 mode = getParameterValue(1)
127 If (mode<1.or.mode>5) Call FoundBadParameter(1,'Fatal','The mode must be between 1 and 5.')
128 If (ErrorFound()) Return
129 If (getNumberOfDerivatives() /= 1) Call Messages(-1,'There must be one derivative defined.','fatal',CurrentUnit,CurrentType)
130 If (ErrorFound()) Return
131
132 qm = getParameterValue(2)
133 cp = getParameterValue(3)
134 cs = getParameterValue(4)
135 eff = getParameterValue(5)
136 If (mode > 1) Then
137     iqmax = getParameterValue(6)
138     iqmin = getParameterValue(7)
139     If ((iqmax>qm*2.d0).or.(iqmax<0.d0)) Call FoundBadParameter(6,'Fatal','The maximum cell charging current cannot be negativ
140     If ((iqmin<qm*-2.d0).or.(iqmin>0.d0)) Call FoundBadParameter(7,'Fatal','The maximum cell discharging current cannot be pos
141     vc = getParameterValue(8)
142     If (vc>2.8d0 .or. vc<1.8d0) Call FoundBadParameter(8,'Fatal','The maximum cell charge voltage must be between 1.8 and 2.8.
143     vcontr = getParameterValue(9)
144     If (vcontr > 0.d0) Then
145         vd = vcontr
146         If (vd>2.5d0 .or. vd<1.5d0) Call FoundBadParameter(9,'Fatal','The discharge cutoff voltage must be between 1.5 and 2.5.'
147     EndIf
148     If (mode==3 .or. mode==5) ictol = getParameterValue(10)
149     qc = -0.035d0*qm
150     qd = qm/0.85d0
151     rsc = 3.d0/qm
152     rsd = 0.5d0/qm
153 EndIf
154 Return
155
156 Endif
157 !-----
158

```

Zoom sur les textes coupés des lignes 139 à 146 :

```

!Parameter(6,'Fatal','The maximum cell charging current cannot be negative or greater than twice the cell current capacity.')
adParameter(7,'Fatal','The maximum cell discharging current cannot be positive or less than the negative of twice the cell current capacity.')

r(8,'Fatal','The maximum cell charge voltage must be between 1.8 and 2.8.')

ter(9,'Fatal','The discharge cutoff voltage must be between 1.5 and 2.5.')

```

Suite du code :

```

159 !-----
160 !ReRead the Parameters if Another Unit of This Type Has Been Called Last
161 If(getIsReReadParameters()) Then
162     mode = getParameterValue(1)
163     qm = getParameterValue(2)
164     cp = getParameterValue(3)
165     cs = getParameterValue(4)
166     eff = getParameterValue(5)
167     If (mode > 1) Then
168         iqmax = getParameterValue(6)
169         iqmin = getParameterValue(7)
170         vc = getParameterValue(8)
171         vcontr = getParameterValue(9)
172         If (vcontr > 0.d0) vd = vcontr
173         If (mode==3 .or. mode==5) ictol = getParameterValue(10)
174         qc = -0.035d0*qm
175         qd = qm/0.85d0
176         rsc = 3.d0/qm
177         rsd = 0.5d0/qm
178     EndIf
179 Endif
180 !-----

```

```

181
182 !If (mode /= 1) Then
183 !   qc = -.035*qm
184 !   qd = qm/.85
185 !   rsc = 3./qm
186 !   rsd = .5/qm
187 !EndIf
188
189 If (mode < 4) Then
190   p = getInputValue(1)
191   p = p/3.6d0/(cp*cs)
192 Else
193   iq = getInputValue(1)
194   iq = iq/cp
195 EndIf
196
197 Select case (mode)
198 case (1) ! mode 1
199   If (p <= 0.d0) Call SetNumericalDerivative(1,p)
200   If (p > 0.d0) Call SetNumericalDerivative(1,p*eff)
201 case (2) ! mode 2
202   f = getNumericalSolution(1)/qm
203   If (ErrorFound()) Return
204   h = 1.d0-f
205   ic = (vc-esc+gc*h)/rsc/(1.d0+mc*h/(qc/qm-h))
206   idf = (vd-esd+gd*h)/rsd/(1.d0+md*h/(qd/qm-h))
207   If (p < 0.d0) Then
208     a = rsd*(1.d0+md*h/(qd/qm-h))
209     b = esd-gd*h
210   Else
211     a = rsc*(1.d0+mc*h/(qc/qm-h))
212     b = esc-gc*h
213   EndIf
214   c = -p
215   iq = (-b+DSQRT(b**2.d0-4.d0*a*c))/(2.d0*a)
216   If (iq > iqmax) iq = iqmax
217   If (iq < iqmin) iq = iqmin
218   v = b+iq*a
219   If (v > vc) Then
220     v = vc
221     iq = ic
222   EndIf
223   If (v < vd) Then
224     v = vd
225     iq = idf
226   EndIf
227   p = iq*v
228   If (iq <= 0.d0) Call SetNumericalDerivative(1,iq)
229   If (iq > 0.d0) Call SetNumericalDerivative(1,iq*eff)
230   vmin = esd-gd*h+iqmin*rsd*(1.d0+md*h/(qd/qm-h))
231   vmax = esc-gc*h+iqmax*rsc*(1.d0+mc*h/(qc/qm-h))
232 case (3) ! mode 3
233   f = getNumericalSolution(1)/qm
234   If (ErrorFound()) Return
235   h = 1.d0-f
236   voc = (esc+esd)/2.d0
237   vdimax = 1./kl*DLOG(iqmax/il+1.)
238   vmax = voc+vdimax-gc*h+iqmax*rsc*(1.d0+mc*h/(qc/qm-h))
239   vdimin = 1.d0/kl*DLOG(-iqmin/il+1.d0)
240   vmin = voc-vdimin-gd*h+iqmin*rsd*(1.d0+md*h/(qd/qm-h))
241   If (p >= 0.d0) Then
242     v = 2.2d0
243     vtol = ictol
244     v1 = v
245     iq = p/v1
246     vdi = 1.d0/kl*DLOG(iq/il+1.d0)
247     v = voc+vdi-gc*h+iq*rsc*(1.d0+mc*h/(qc/qm-h))
248     If (DABS(v1-v) > vtol) goto 16
249     If (iq >= iqmax) Then
250       iq = iqmax
251       v = vmax
252     EndIf
253     If (v > vc) Then
254       v = vc
255       ic = qm/5.d0
256       icl = ic
257       vdi = 1.d0/kl*DLOG(icl/il+1.d0)
258       ic = (vc-voc-vdi+gd*h)/rsc/(1.d0+mc*h/(qc/qm-h))
259       If (DABS(icl-ic) > ictol) goto 18
260       iq = ic
261     EndIf
262   Else
263     v = 2.1d0
264     vtol = ictol
265     v1 = v
266     iq = p/v1
267     vdi = 1.d0/kl*DLOG(-iq/il+1.d0)
268     v = voc-vdi-gd*h+iq*rsd*(1.d0+md*h/(qd/qm-h))
269     If (DABS(v1-v) > vtol) goto 20
270     If (iq <= iqmin) Then
271       iq = iqmin
272       v = vmin
273     EndIf

```

```

274     If (v < vd) Then
275         v = vd
276         idf = -qm/5.d0
277         icl = idf
278         vdi = 1.d0/kl*DLOG(-icl/il+1.d0)
279         idf = (vd-voc+vdi+gd*h)/rsd/(1.d0+md*h/(qd/qm-h))
280         If (DABS(icl-idf) > ictol) goto 22
281         iq = idf
282     EndIf
283     If (iq <= 0.d0) Call SetNumericalDerivative(1,iq)
284 EndIf
285 If (iq > 0.d0) Call SetNumericalDerivative(1,iq*eff)
286 p = iq*v
287 case (4) ! mode 4
288 f = getNumericalSolution(1)/qm
289 If (ErrorFound()) Return
290 h = 1.d0-f
291 ic = (vc-esc+gc*h)/rsc/(1.d0+mc*h/(qc/qm-h))
292 idf = (vd-esd+gd*h)/rsd/(1.d0+md*h/(qd/qm-h))
293 If (iq >= 0.d0) Then
294     If (iq > iqmax) iq = iqmax
295     v = esc-gc*h+iq*rsc*(1.d0+mc*h/(qc/qm-h))
296     If (v > vc) Then
297         v = vc
298         iq = ic
299     EndIf
300 Else
301     If (iq < iqmin) iq = iqmin
302     v = esd-gd*h+iq*rsd*(1.d0+md*h/(qd/qm-h))
303     If (v <= vd) Then
304         iq = idf
305         v = vd
306     EndIf
307     If (iq <= 0.) Call SetNumericalDerivative(1,iq)
308 EndIf
309 If (iq > 0.d0) Call SetNumericalDerivative(1,iq*eff)
310 vmax = esc-gc*h+iqmax*rsc*(1.d0+mc*h/(qc/qm-h))
311 vmin = esd-gd*h+iqmin*rsd*(1.d0+md*h/(qd/qm-h))
312 p = iq*v
313 case (5) ! mode 5
314 f = getNumericalSolution(1)/qm
315 If (ErrorFound()) Return
316 h = 1.d0-f
317 voc = (esc+esd)/2.d0
318 If (IQ >= 0.d0) Then
319     If (iq > iqmax) iq = iqmax
320     vdi = 1.d0/kl*DLOG(iq/il+1.d0)
321     v = voc+vdi-gc*h+iq*rsc*(1.d0+mc*h/(qc/qm-h))
322     If (v > vc) Then
323         v = vc
324         ic = 50.d0
325         icl = ic
326         vdi = 1.d0/kl*DLOG(icl/il+1.d0)
327         ic = (vc-voc-vdi+gc*h)/rsc/(1.d0+mc*h/(qc/qm-h))
328         If (DABS(icl-ic) > ictol) goto 30
329         iq = ic
330     EndIf
331 Else
332     If (iq < iqmin) iq = iqmin
333     vdi = 1.d0/kl*DLOG(-iq/il+1.)
334     v = voc-vdi-gd*h+iq*rsd*(1.d0+md*h/(qd/qm-h))
335     If (v <= vd) Then
336         v = vd
337         idf = -qm/5.d0
338         icl = idf
339         vdi = 1.d0/kl*DLOG(-icl/il+1.d0)
340         idf = (vd-voc+vdi+gd*h)/rsd/(1.d0+md*h/(qd/qm-h))
341         If (DABS(icl-idf) > ictol) goto 32
342         iq = idf
343     EndIf
344     If (iq <= 0.d0) Call SetNumericalDerivative(1,iq)
345 EndIf
346 If (iq > 0) Call SetNumericalDerivative(1,iq*eff)
347 p =iq*v
348 vdimax = 1.d0/kl*DLOG(iqmax/il+1.d0)
349 vmax = voc+vdimax-gc*h+iqmax*rsc*(1.d0+mc*h/(qc/qm-h))
350 vdimin = 1.d0/kl*DLOG(-iqmin/il+1.d0)
351 vmin = voc-vdimin-gd*h+iqmin*rsd*(1.d0+md*h/(qd/qm-h))
352 End Select
353 -----
354 !Set the Outputs from this Model
355 Call SetOutputValue(1,getNumericalSolution(1))
356 Call SetOutputValue(2,getNumericalSolution(1)/qm)
357 If (ErrorFound()) Return
358 Call SetOutputValue(3,p*cp*cs*3.6d0)
359 Call SetOutputValue(4,0.d0)
360 If (p > 0.) Call SetOutputValue(4,(1.d0-eff)*p*cp*cs*3.6d0)

```

```
363 If (mode > 1) Then
364   Call SetOutputValue(5,iq*cp)
365   Call SetOutputValue(6,v*cs)
366   pmax = vmax*iqmax
367   Call SetOutputValue(7,pmax*cp*cs*3.6d0)
368   pmin = vmin*iqmin
369   Call SetOutputValue(8,pmin*cp*cs*3.6d0)
370   If (vcontr < 0.d0) vd = ed-DABS(iq)*rd
371   Call SetOutputValue(9,vd*cs)
372   Call SetOutputValue(10,vd*idf*cs*cp*3.6d0)
373   Call SetOutputValue(11,vc*cs)
374   pc = ic*vc
375   Call SetOutputValue(12,pc*cp*cs*3.6d0)
376 EndIf
377
378 Return
379 End
```

## Annexe III : Intégralité du code Matlab du modèle de batterie lithium-ion

```

139 % --- Get TRNSYS Inputs ---
140
141 Mode = trnInputs(1); % Mode 0 : Le modèle fonctionne à l'aide d'une puissance en Input et recalcule alors l'intensité / Mode 1 : Le modèle fonctionne
142 Q_100_batt = trnInputs(2); % Capacité totale de la batterie (Ah)
143 SOC_max = trnInputs(4); % SOC maximum, à fixer de préférence à 0,9 (90%) afin d'éviter un stress excessif sur la cellule (compris entre 0 et 1)
144 SOC_min = trnInputs(5); % SOC minimum, à fixer de préférence à 0,1 (10%) afin d'éviter un stress excessif sur la cellule (compris entre 0 et 1)
145 a_max = trnInputs(6); % Coefficient de l'équation de détermination de la courbe de voltage y = ax + b, pour un SOC de 90%, calculé à partir du fichier
146 a_min = trnInputs(7); % Coefficient de l'équation de détermination de la courbe de voltage y = ax + b, pour un SOC de 10%, calculé à partir du fichier
147 b_max = trnInputs(8); % Coefficient de l'équation de détermination de la courbe de voltage y = ax + b, pour un SOC de 90%, calculé à partir du fichier
148 b_min = trnInputs(9); % Coefficient de l'équation de détermination de la courbe de voltage y = ax + b, pour un SOC de 10%, calculé à partir du fichier
149 P_gen = trnInputs(10); % Puissance fournie par le générateur connecté en entrée du modèle (panneaux photovoltaïques par exemple), dans le cas du Mode
150 I_gen = trnInputs(11); % Intensité fournie par le générateur connecté en entrée du modèle (panneaux photovoltaïques par exemple), dans le cas du Mode
151 P_load = trnInputs(12); % Puissance demandée par une charge connectée à la batterie (W)
152 I_load = trnInputs(13); % Intensité demandée par une charge connectée à la batterie (A)
153 Ns = trnInputs(14); % Nombre de cellules connectées en série
154 Np = trnInputs(15); % Nombre de cellules connectées en parallèle
155 eff_regul = trnInputs(16); % Rendement du régulateur, placé entre le générateur et la batterie (compris entre 0 et 1)
156 eff_ondul = trnInputs(17); % Rendement de l'onduleur, placé entre la batterie et une charge connectée en courant alternatif (compris entre 0 et 1)
157 eff_ch = trnInputs(18); % Rendement de rechargement (compris entre 0 et 1)
158
159 mFileErrorCode = 60; % After reading inputs
160
161 % Récupérer le SOC au temps t=0 lors du premier pas de temps ou récupérer le SOC enregistré en fin de pas de temps
162
163 if ((trnInfo(7) == 0) && (trnTime-trnStartTime < 1e-6))
164     SOC = trnInputs(3); % Prend la valeur du SOC au temps 0 pour le premier pas de temps
165 else
166     SOC = trnInputs(19); % Récupère le SOC en sortie pour tous les pas de temps sauf le premier
167 end
168
169 mFileErrorCode = 70;
170

```

### Zoom sur les textes coupés des lignes 141 à 150 :

Mode 0 : Le modèle fonctionne à l'aide d'une puissance en Input et recalcule alors l'intensité / Mode 1 : Le modèle fonctionne directement avec une intensité en Input  
 ) : % Capacité totale de la batterie (Ah)  
 ) : % SOC maximum, à fixer de préférence à 0,9 (90%) afin d'éviter un stress excessif sur la cellule (compris entre 0 et 1)  
 ) : % SOC minimum, à fixer de préférence à 0,1 (10%) afin d'éviter un stress excessif sur la cellule (compris entre 0 et 1)  
 Coefficient de l'équation de détermination de la courbe de voltage y = ax + b, pour un SOC de 90%, calculé à partir du fichier Excel "Calcul des paramètres du modèle" (nombre sans dimensions)  
 Coefficient de l'équation de détermination de la courbe de voltage y = ax + b, pour un SOC de 10%, calculé à partir du fichier Excel "Calcul des paramètres du modèle" (nombre sans dimensions)  
 Coefficient de l'équation de détermination de la courbe de voltage y = ax + b, pour un SOC de 90%, calculé à partir du fichier Excel "Calcul des paramètres du modèle" (nombre sans dimensions)  
 Coefficient de l'équation de détermination de la courbe de voltage y = ax + b, pour un SOC de 10%, calculé à partir du fichier Excel "Calcul des paramètres du modèle" (nombre sans dimensions)  
 Puissance fournie par le générateur connecté en entrée du modèle (panneaux photovoltaïques par exemple), dans le cas du Mode 0 (W)  
 Intensité fournie par le générateur connecté en entrée du modèle (panneaux photovoltaïques par exemple), dans le cas du Mode 1 (A) / En Mode 0 cette intensité est utilisée comme constante dans la formule P=UI

### Suite du code :

```

171 % --- Calculation ---
172
173 if SOC>SOC_max
174     SOC=SOC_max;
175 elseif SOC<SOC_min;
176     SOC=SOC_min;
177 else
178     SOC=SOC;
179 end
180
181 Q_100_cell = Q_100_batt/(Ns*Np);
182 Q_t0_cell = Q_100_cell*SOC;
183 mFileErrorCode = 80;
184
185 if Mode == 0 % Puissance en Input
186
187     P_batt = P_gen*eff_regul - abs(P_load)*eff_ondul; % La puissance circulant au travers de la batterie correspond à la puissance que l
188
189     P_cell = P_batt/(Ns*Np); % Calcul de la puissance d'une seule cellule
190     I_0 = I_gen; % L'intensité définie comme paramètre dans TRNSYS correspond directement à l'intensité d'une seule cellule
191     U_max = a_max*I_0+b_max; % Calcul de la tension à 90% de SOC en fonction des coefficients a et b calculés dans le fichier Excel
192     U_min = a_min*I_0+b_min; % Calcul de la tension à 10% de SOC en fonction des coefficients a et b calculés dans le fichier Excel
193     delta_U = U_max-U_min;
194
195     SOC_bis = (1/(SOC_max-SOC_min))*SOC-(SOC_min/(SOC_max-SOC_min));
196
197     U_0 = U_max-delta_U*(1-SOC_bis);
198
199     while abs(abs(P_cell)-(U_0*abs(I_0)))>0.01 % Valeur absolue de l'intensité dans le cas de la décharge, pour ne pas additionner l
200
201         I_cell = P_cell/U_0;
202         U_max = a_max*abs(I_cell)+b_max;
203         U_min = a_min*abs(I_cell)+b_min;
204         delta_U = U_max-U_min;
205         U_cell = U_max-delta_U*(1-SOC_bis);
206         U_0 = U_cell;
207         I_0 = I_cell;
208         mFileErrorCode = 90;
209
210     end
211
212     U_cell = U_0;
213     U_batt = U_cell*Ns;
214     I_cell = I_0;
215     I_batt = I_cell*Np;
216

```

## Zoom sur les textes coupés des lignes 187 à 199 :

```
regul - abs(P_load)*eff_ondul; % La puissance circulant au travers de la batterie correspond à la puissance que le générateur envoie vers la batterie moins la puissance qu'une charge demande à la batterie.  
:(Ns*Np); % Calcul de la puissance d'une seule cellule  
l'intensité définie comme paramètre dans TRNSYS correspond directement à l'intensité d'une seule cellule  
:_0a_max; % Calcul de la tension à 90% de SOC en fonction des coefficients a et b calculés dans le fichier Excel "Calcul des paramètres du modèle"  
:_0a_min; % Calcul de la tension à 10% de SOC en fonction des coefficients a et b calculés dans le fichier Excel "Calcul des paramètres du modèle"
```

## Suite du code :

```
217 if P_cell > 0 % En charge  
218  
219     if SOC < SOC_max && SOC >= SOC_min;  
220  
221         Q_cell = I_cell*trnTimeStep*eff_ch+Q_t0_cell; % Attention le pas de temps TRNSYS doit être défini en minutes !  
222         Q_batt = Q_cell*Np;  
223         SOC = (Q_cell*Np)/(Q_100_cell*Np);  
224         P_over = 0;  
225         P_lack = 0;  
226  
227         mFileErrorCode = 100;  
228  
229     elseif SOC == SOC_max;  
230  
231         Q_batt = Q_t0_cell*Np;  
232         P_over = U_cell*I_cell*Ns*Np;  
233         P_lack = 0;  
234  
235         mFileErrorCode = 110;  
236  
237     end  
238  
239 elseif P_cell < 0; % En décharge  
240  
241     if SOC <= SOC_max && SOC > SOC_min  
242  
243         Q_cell = Q_t0_cell-abs(I_cell)*trnTimeStep;  
244         Q_batt = Q_cell*Np;  
245         SOC = (Q_cell*Np)/(Q_100_cell*Np);  
246         P_over = 0;  
247         P_lack = 0;  
248  
249         mFileErrorCode = 120;  
250  
251     elseif SOC == SOC_min;  
252  
253         Q_batt = Q_t0_cell*Np;  
254         P_over = 0;  
255         P_lack = U_cell*I_cell*Ns*Np;  
256  
257         mFileErrorCode = 130;  
258  
259     end  
260  
261 elseif P_cell == 0; % Pas de charge ni de décharge  
262  
263         Q_batt = Q_t0_cell*Np;  
264         P_over = 0;  
265         P_lack = 0;  
266  
267         mFileErrorCode = 140;  
268  
269     end  
270  
271 elseif Mode == 1; % Intensité en Input  
272  
273     I_batt = I_gen*eff_regul-abs(I_load)*eff_ondul;  
274     I_cell = I_batt/Np;  
275     U_max = a_max*abs(I_cell)+b_max; % Calcul de la tension à 90% de SOC en fonction des coefficients a et b calculés  
276     U_min = a_min*abs(I_cell)+b_min; % Calcul de la tension à 10% de SOC en fonction des coefficients a et b calculés  
277     delta_U = U_max-U_min;  
278  
279     SOC_bis = (1/(SOC_max-SOC_min))*SOC-(SOC_min/(SOC_max-SOC_min));  
280  
281     U_cell = U_max-delta_U*(1-SOC_bis);  
282     U_batt = U_cell*Ns;  
283  
284 if I_cell > 0 % En charge  
285  
286     if SOC < SOC_max && SOC >= SOC_min;  
287  
288         Q_cell = I_cell*trnTimeStep*eff_ch+Q_t0_cell; % Attention le pas de temps TRNSYS doit être défini en minutes !  
289         Q_batt = Q_cell*Np;  
290         SOC = (Q_cell*Np)/(Q_100_cell*Np);  
291         P_over = 0;  
292         P_lack = 0;  
293  
294         mFileErrorCode = 150;  
295  
296     elseif SOC == SOC_max;  
297  
298         Q_batt = Q_t0_cell*Np;  
299         P_over = U_cell*I_cell*Ns*Np;  
300         P_lack = 0;  
301  
302         mFileErrorCode = 160;  
303  
304     end  
305
```

## Zoom sur les textes coupés des lignes 275 et 276 :

% Calcul de la tension à 90% de SOC en fonction des coefficients a et b calculés dans le fichier Excel "Calcul des paramètres du modèle"  
% Calcul de la tension à 10% de SOC en fonction des coefficients a et b calculés dans le fichier Excel "Calcul des paramètres du modèle"

## Suite et fin du code :

```
306 elseif I_cell < 0; % En décharge
307
308     if SOC <= SOC_max && SOC > SOC_min
309
310         Q_cell = Q_t0_cell-abs(I_cell)*trnTimeStep;
311         Q_batt = Q_cell*Np;
312         SOC = (Q_cell*Np)/(Q_100_cell*Np);
313         P_over = 0;
314         P_lack = 0;
315
316         mFileErrorCode = 170;
317
318     elseif SOC == SOC_min;
319
320         Q_batt = Q_t0_cell*Np;
321         P_over = 0;
322         P_lack = U_cell*I_cell*Ns*Np;
323
324         mFileErrorCode = 180;
325
326     end
327
328 elseif I_cell == 0; % Pas de charge ni de décharge
329
330     Q_batt = Q_t0_cell*Np;
331     P_over = 0;
332     P_lack = 0;
333
334     mFileErrorCode = 190;
335
336 end
337
338 end
339
340
341 % --- Set outputs ---
342
343 trnOutputs(1) = U_batt;
344 trnOutputs(2) = SOC;
345 trnOutputs(3) = P_over;
346 trnOutputs(4) = P_lack;
347 trnOutputs(5) = I_batt;
348
349 mFileErrorCode = 200;
350
351 % --- Code reset ---
352
353
354 mFileErrorCode = 0; % Tell TRNSYS that we reached the end of the m-file without errors
355 return
```

## Résumé

Notre production d'énergie repose actuellement principalement sur les ressources fossiles telles que le pétrole, le gaz et le charbon. Ces ressources sont polluantes et produisent énormément de gaz à effet de serre. Il est donc important de se tourner vers une transition énergétique mettant davantage l'accent sur l'utilisation d'énergies renouvelables et sur une meilleure efficacité énergétique. Les batteries peuvent avoir un impact très favorable, notamment grâce à leur couplage avec des panneaux photovoltaïques ou à de l'éolien. Cela permettrait, en effet, de mieux réguler l'énergie circulant sur le réseau et de mieux utiliser ces types d'énergies, qui sont intermittentes.

Ce travail a pour but de mieux comprendre ce qui concerne l'univers des batteries lithium-ion. Que ce soit au niveau de leur fonctionnement ou encore de l'impact de certains phénomènes sur leur comportement, tels que la température ou encore le vieillissement. Différentes méthodes d'utilisations de ces batteries ainsi que des techniques de modélisation de celles-ci sont décrites dans ce travail.

Afin de modéliser le comportement des batteries lithium-ion, les modèles inclus dans le logiciel TRNSYS ont été passés en revue et évalués. Ensuite, l'HTW Saar nous a proposé un modèle à circuit électrique équivalent qui pourrait correspondre à nos attentes. Enfin, un nouveau modèle de simulation de batteries lithium-ion a été développé dans Matlab, logiciel pouvant être couplé à TRNSYS. Le code proposé permet ainsi de modéliser l'évolution de l'état de charge de la batterie, la tension et l'intensité de celle-ci, ainsi qu'une puissance excédentaire et une puissance déficitaire. Le modèle prend également en compte le rendement du régulateur, celui de l'onduleur et pour terminer le rendement énergétique.

**Mots-clés :** Batterie, lithium-ion, chimies de batteries, vieillissement des batteries, régulation du réseau, simulation, modèle, TRNSYS, Matlab.

## Abstract

The energy production of today is mostly based on fossil sources such as oil, gas and coal. These sources produce a lot of greenhouse gases. So, it is very important to aim towards an energy transition that use the renewable energies more effectively and that promote a better energy efficiency. The batteries can present a positive impact, mostly thanks to their combined use with photovoltaic panels or wind turbines. This could allow us a better management of the energy grid and a better use of those sporadic green energies.

This work aims a better understanding of the lithium-ion batteries. It can be about their operation or the impact of some phenomena on their behaviour, such as temperature or ageing. Various use methods and modelling techniques are described in this work.

With the target of modelling lithium-ion batteries, TRNSYS models have been evaluated. Then, an equivalent circuit model was suggested to us by the HTW Saar battery lab. Finally, a new model has been created using Matlab, linked to TRNSYS. The proposed code allows us to model the progress of the state of charge, the voltage, the current, an extra power and a lacking power. The model also considers the efficiency of the regulator and of the inverter. It also uses the energetic efficiency of the battery.

**Keywords:** Battery, lithium-ion, battery chemistries, battery ageing, grid management, simulation, model, TRNSYS, Matlab.