



N° d'Ordre : 31 /2021

Formation Doctorale : Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC)

Discipline: Physique

Spécialité : Génie Electrique

Laboratoire d'Informatique, Signaux, Automatique et Cognitivisme (LISAC)

THÈSE DE DOCTORAT

Présentée par

Mustapha El Alaoui

Contributions à la conception intégrée des circuits d'interface de chargeur des batteries Li-Ion

Soutenue le 26 / 06 / 2021 devant le jury composé de :

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------|------------|---------------------------|
| Pr. Farid Abdi | FST - Fès | PES | Président |
| Pr. Jalal Sabor | ENSAM - Meknès | PES | Rapporteur |
| Pr. Mohammed Sabbane | FS - Meknès | PES | Rapporteur |
| Pr. Said Mazer | ENSA - Fès | PES | Rapporteur |
| Pr. Abdellah Aarab | FSDM - Fès | PES | Examineur |
| Pr. Rachid El Alami | FSDM - Fès | PH | Examineur |
| Pr. Karim El Khadiri | ENS - Fès | PA | Invité |
| Pr. Hassan Qjidaa | FSDM - Fès | PES | Directeur de thèse |

Dédicace

Je dédie cette thèse

À mes chers parents **Lalla Fatima Khaissidi** et **My Ali El Alaoui**

Pour leur soutien, leur patience, leur sacrifice et leur amour

Vous méritez tout éloge

Vous qui avez fait de moi ce que je suis maintenant

J'espère être à la hauteur de vos attentes

Que dieu vous procure bonne santé et longue vie

Je dédie aussi cette thèse

À mes chères sœurs **Asmae El Alaoui** et **Ikrame El Alaoui**

Pour leur affection et leur encouragement qui ont toujours été pour moi des plus précieux

Que cette thèse soit pour vous le gage de mon profond amour

À tous mes amis

À tous ceux qui m'aidaient

À tous ceux que j'aime

Je dédie cette thèse ...

Mustapha El Alaoui

Remerciements

Je tiens à exprimer mes gratitude et mes remerciements aux membres de jury : le Pr. **Farid Abdi (Président)**, le Pr. **Jalal Sabor (Rapporteur)**, le Pr. **Mohammed Sabbane (Rapporteur)**, le Pr. **Said Mazer (Rapporteur)**, le Pr. **Abdellah Aarab (Examineur)** et le Pr. **Rachid El Alami (Examineur)**. Veuillez accepter dans cette thèse mon sincère respect et ma profonde reconnaissance.

Je voudrais également remercier mes chers professeurs, le Pr. **Hassan Qjidaa** et le Pr. **Karim El Khadiri** pour m'avoir offert les conditions nécessaires et m'avoir guidé dans l'élaboration de cette thèse et contribuer largement à sa réalisation avec la patience et le dynamisme qui les caractérisent, ainsi que leur soutien tout au long de ma thèse.

Je profite aussi de cette thèse pour exprimer mes plus vifs remerciements envers tous les professeurs qui m'apportait du soutien durant mes études et envers tous mes amis qui ont été toujours près de moi avec leurs encouragements, critiques et conseils.

Que le corps professoral et administratif et surtout le Doyen de la faculté des sciences Dhar El Mahraz-Fès, trouvent ici mes sincères remerciements pour tout le travail que vous avez accompli pendant ma formation à la faculté.

Mustapha El Alaoui

Table des matières

| | |
|--|-------------|
| Liste des figures | IV |
| Liste des tableaux | VIII |
| Liste des abréviations, des sigles et des acronymes | X |
| Liste des publications | XIV |
| Résumé | XVII |
| Abstract | XIX |
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I : Principes fondamentaux | 7 |
| I.1 Qu'est-ce que la batterie ? | 8 |
| I.2 Historique de la batterie | 9 |
| I.3 Différents types des batteries | 12 |
| I.3.1 Batteries primaires | 12 |
| I.3.2 Batteries secondaires | 13 |
| I.4 Paramètres pratiques pour l'évaluation de la performance des batteries | 16 |
| I.4.1 Capacité, efficacité coulombienne et durée de vie du cycle | 16 |
| I.4.2 Tension | 17 |
| I.4.3 Densité énergétique | 20 |
| I.4.4 Puissance | 20 |
| I.5 Pourquoi la batterie Li-Ion ? | 20 |
| I.5.1 Principe de la batterie Li-Ion | 21 |
| I.5.2 Électrode positive (Cathode) | 23 |
| I.5.3 Électrode négative (Anode) | 24 |
| I.5.4 Électrolyte | 25 |
| I.5.5 Séparateur et Collecteur | 26 |
| I.6 Mécanismes de vieillissement de la batterie Li-Ion | 26 |
| I.6.1 Formation de l'interface des électrolytes solides | 27 |
| I.6.2 Placage de Lithium | 29 |
| I.6.3 Électrode positive (Cathode) | 30 |
| I.6.4 Électrode négative (Anode) | 30 |
| I.6.5 Électrolyte | 32 |
| I.6.6 Séparateur | 33 |
| I.6.7 Vieillissement calendrier et cyclique | 33 |
| I.7 Effet mémoire | 34 |
| I.8 Taux de charge C de batterie Li-Ion | 34 |
| I.9 Modélisation électrique d'une batterie Li-Ion | 34 |
| I.10 Conclusion | 35 |

| | |
|--|-----------|
| Chapitre II : Différentes méthodes existant pour charger une batterie Li-Ion | 36 |
| II.1 Introduction | 37 |
| II.2 Méthodes de charge simples | 37 |
| II.2.1 Méthode de charge à courant constant | 37 |
| II.2.2 Méthode de charge à tension constante | 38 |
| II.3 Méthodes de charge optimisées | 38 |
| II.3.1 Méthode de chargement à courant constant-tension constante | 38 |
| II.3.2 Méthode de chargement à courant constant multi-étapes | 42 |
| II.3.2.1 Contrôle flou (Fuzzy Control) | 45 |
| II.3.2.2 Méthode de Taguchi | 46 |
| II.3.2.3 Système de colonies de fourmis (Ant Colony System) | 46 |
| II.3.3 Méthode de chargement par impulsion | 49 |
| II.3.4 Méthode d'augmenter la charge | 50 |
| II.4 Méthodes de charge basée sur les modèles | 50 |
| II.4.1 Modèle de vieillissement électrothermique | 51 |
| II.4.2 Modèle électrochimique | 51 |
| II.4.3 Modèle Courant Alternatif AC | 51 |
| II.5 Conclusion | 52 |
| Chapitre III : Conception et analyse d'un nouveau décaleur de niveau associé avec un pilote de grille | 53 |
| III.1 Introduction | 54 |
| III.2 Décaleur de niveau | 57 |
| III.2.1 Décaleur de niveau conventionnel | 57 |
| III.2.2 Nouveau décaleur de niveau proposé | 58 |
| III.3 Résultats de la simulation | 60 |
| III.3.1 Résultat de la simulation du décaleur de niveau proposé et du décaleur de niveau conventionnel | 60 |
| III.3.2 Simulation Monte Carlo du décaleur de niveau proposé et du décaleur de niveau conventionnel | 65 |
| III.3.3 Résultat de la simulation du décaleur de niveau proposé associé avec le pilote de grille | 66 |
| III.3.4 Simulation Monte Carlo du décaleur de niveau proposé associé avec le pilote de grille | 68 |
| III.3.5 Layout | 69 |
| III.3.5.1 Effets indésirables | 69 |
| A. Variations de process | 69 |
| B. Effet de la température | 70 |
| C. Eléments parasites | 70 |
| III.3.5.2 Techniques de Layout | 70 |
| A. Même structure, même taille | 71 |
| B. Même température | 72 |
| C. Même orientation | 72 |
| D. Minimiser les distances | 74 |
| E. Structure centroïde commune | 74 |
| F. Même environnement | 75 |
| G. Augmentation des tailles | 75 |
| H. Connexion en étoile | 76 |
| III.3.5.3 Layout du décaleur de niveau proposé avec le pilote de grille | 77 |
| III.4 Conclusion | 78 |

Chapitre IV : Conception et analyse d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant une technique basée sur la commutation _____ 79

| | |
|--|-----|
| IV.1 Introduction _____ | 80 |
| IV.2 Conception d'un nouveau chargeur utilisant une technique de contrôle basée sur la commutation _____ | 82 |
| IV.2.1 Bloc de contrôle du mode _____ | 84 |
| IV.2.2 Bloc de référence des courants _____ | 90 |
| IV.2.3 Bloc de contrôle de charge _____ | 94 |
| IV.2.4 Bloc de décaleur de niveau et bloc de pilote de grille _____ | 96 |
| IV.2.5 Bloc de détecteur de courant _____ | 97 |
| IV.3 Résultats de la simulation et le Layout de chargeur proposé basé sur la commutation _____ | 99 |
| IV.3.1 Simulation de chargeur proposé basé sur la commutation _____ | 99 |
| IV.3.2 Layout de chargeur proposée basé sur la commutation _____ | 101 |
| IV.4 Conclusion _____ | 102 |

Chapitre V : Conception et analyse d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle par impulsions _____ 104

| | |
|---|-----|
| V.1 Introduction _____ | 105 |
| V.2 Conception d'un nouveau chargeur utilisant une technique de contrôle par impulsions _____ | 108 |
| V.2.1 Bloc de contrôle du mode courant constant CC _____ | 113 |
| V.2.2 Bloc de contrôle du mode tension constante CV _____ | 115 |
| V.2.3 Blocs " Décaleur de niveau" et " Pilote de grille" _____ | 117 |
| V.2.4 Bloc capteur de courant _____ | 118 |
| V.2.5 Bloc générateur de rampe et d'horloge _____ | 119 |
| V.2.6 Transistor de puissance PMOS (Power PMOS) _____ | 120 |
| V.2.6.1 Principe de fonctionnement _____ | 121 |
| A. État bloqué _____ | 121 |
| B. État passant _____ | 121 |
| V.2.6.2 MOSFET de puissance en commutation _____ | 122 |
| A. Fermeture du MOSFET _____ | 123 |
| B. Ouverture du MOSFET _____ | 123 |
| V.3 Résultats de la simulation et le Layout de chargeur proposé basé sur le contrôle par impulsions _____ | 123 |
| V.3.1 Simulation de chargeur proposé basé sur le contrôle par impulsions _____ | 123 |
| V.3.2 Layout de chargeur proposée basé sur le contrôle par impulsions _____ | 126 |
| V.4 Conclusion _____ | 128 |

Conclusion générale et perspectives _____ 129

Références _____ 131

Liste des figures

| | |
|---|-----------|
| Introduction générale | 1 |
| Figure 1 : Processus de charge typique d'une batterie Li-ion par l'algorithme CC-CV | 2 |
| Chapitre I : Principes fondamentaux | 7 |
| Figure 2: Batterie Parthian [28] | 10 |
| Figure 3 : Composants d'une batterie, le diagramme circulaire de gauche est basé sur le coût et celui de droite sur la masse en % [45] | 15 |
| Figure 4 : Importance de l'efficacité coulombienne dans les performances de cyclage, en supposant une quantité limitée de lithium | 17 |
| Figure 5 : Représentation schématique des différents types de courbes de décharge [46] | 18 |
| Figure 6: Mécanisme de chargement et de déchargement des batteries Li-Ion [48] | 22 |
| Figure 7 : Formation d'une interface d'électrolyte solide et dépôt de lithium [50] | 32 |
| Figure 8 : Modèle de circuit à double polarisation | 35 |
| Chapitre II : Différentes méthodes existant pour charger une batterie Li-Ion | 36 |
| Figure 9 : Technique de chargement CC-CV [66] | 39 |
| Figure 10 : Algorithme de charge CC-CV [66] | 41 |
| Figure 11 : Technique de charge à courant constant multi-étapes [66] | 42 |
| Figure 12 : Algorithme de charge à courant constant multi-étapes [66] | 43 |
| Figure 13 : Charge à courant constant multi-étapes avec une condition de décalage basée sur la tension de coupure supérieure [64] | 44 |
| Figure 14 : Charge à courant constant multi-étapes avec une condition de décalage basé sur une limite de l'intervalle d'état de charge [64] | 45 |
| Figure 15 : Algorithme de charge à base du système de colonies de fourmis [70] | 48 |
| Chapitre III : Conception et analyse d'un nouveau décaleur de niveau associé avec un pilote de grille | 53 |
| Figure 16: Positionnement du décaleur de niveau avec le pilote de grille dans l'architecture générale de l'interface du chargeur de batterie [77] | 55 |
| Figure 17 : Architecture du pilote de grille [90] | 56 |
| Figure 18 : Circuit du décaleur de niveau conventionnel | 58 |
| Figure 19 : Circuit de décaleur de niveau proposé | 59 |
| Figure 20 : Schéma du circuit de décaleur de niveau proposé | 60 |
| Figure 21 : Schéma du circuit de décaleur de niveau conventionnel | 60 |
| Figure 22 : Schéma du circuit de l'inverseur utilisé dans le décaleur de niveau proposé | 61 |

| | |
|---|-----------|
| Figure 23 : Schéma du circuit de la porte logique AND utilisé dans le décaleur de niveau proposé _____ | 62 |
| Figure 24 : Simulation transitoire : (a) Analyse transitoire du décaleur de niveau proposé et du décaleur de niveau conventionnel, (b) Retards de transfert du décaleur de niveau proposé et (c) Retards de transfert du décaleur de niveau conventionnel _____ | 63 |
| Figure 25 : Histogramme de la différence de délai du décaleur de niveau classique _____ | 65 |
| Figure 26 : Histogramme de la différence de délai du décaleur de niveau proposé _____ | 66 |
| Figure 27 : Schéma du circuit de pilote de grille _____ | 66 |
| Figure 28 : Schéma du circuit de décaleur de niveau proposé associé avec le pilote de grille ____ | 67 |
| Figure 29 : Simulation transitoire du décaleur de niveau proposé avec le pilote de grille _____ | 67 |
| Figure 30 : Histogramme de la différence de temps de retard du décaleur de niveau proposé avec le pilote de grille _____ | 68 |
| Figure 31 : Duplication d'une structure de même forme et de même taille _____ | 71 |
| Figure 32 : Placement des composants sur une isotherme _____ | 72 |
| Figure 33 : Implantation des zones de drain et de source _____ | 73 |
| Figure 34 : Conservation de l'orientation d'une structure _____ | 73 |
| Figure 35 : Conservation de la minimisation des distances _____ | 74 |
| Figure 36 : Structure à centre commune _____ | 74 |
| Figure 37 : Utilisation de « dummy structures » pour garantir le même environnement _____ | 75 |
| Figure 38 : Augmentation de la taille des composants _____ | 76 |
| Figure 39 : Connexion en étoile _____ | 76 |
| Figure 40 : Layout du décaleur de niveau proposé associé avec le pilote de grille _____ | 77 |
| Chapitre IV : Conception et analyse d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant une technique basée sur la commutation _____ | 79 |
| Figure 41 : Chargeur à base de LDO et le chargeur à base de commutation [6] _____ | 80 |
| Figure 42 : Modes de charge de la batterie Li-Ion à l'aide d'une technique basée sur la commutation _____ | 81 |
| Figure 43 : Circuit de charge proposé pour l'interface du chargeur de la batterie Li-Ion _____ | 83 |
| Figure 44 : Schéma du circuit de bloc de contrôle du mode _____ | 84 |
| Figure 45 : Formes des courbes des signaux de contrôle (V_{TC} , V_{CC} et V_{CV}), du courant de batterie (I_{BAT}) et de la tension de batterie (V_{BAT}) _____ | 85 |
| Figure 46 : Schéma du circuit de comparateur utilisé dans le bloc de contrôle de mode _____ | 86 |
| Figure 47 : Résultat de simulation transitoire de comparateur utilisé dans le bloc de contrôle de mode _____ | 87 |
| Figure 48 : Résultat de simulation DC de comparateur utilisé dans le bloc de contrôle de mode ____ | 87 |

| | |
|--|-----|
| Figure 49 : Schéma du circuit de l'inverseur utilisé dans le bloc de contrôle de mode | 88 |
| Figure 50 : Schéma du circuit de la porte logique NAND utilisé dans le bloc de contrôle de mode | 88 |
| Figure 51 : Résultats de la simulation transitoire du contrôle de mode | 89 |
| Figure 52 : Schéma du circuit de bloc de référence des courants | 90 |
| Figure 53 : Schéma du circuit de l'amplificateur opérationnel utilisé dans le bloc de référence des courants | 92 |
| Figure 54 : Résultat de la simulation transitoire de l'amplificateur opérationnel utilisé dans le bloc de référence des courants | 93 |
| Figure 55 : Résultat de la simulation DC de l'amplificateur opérationnel utilisé dans le bloc de référence des courants | 94 |
| Figure 56 : Schéma du circuit de bloc de contrôle de charge | 94 |
| Figure 57 : Schéma du circuit de bloc de décaleur de niveau utilisé dans l'interface proposé basée sur la commutation | 96 |
| Figure 58 : Schéma du circuit de bloc de pilote de grille utilisé dans l'interface proposé basée sur la commutation | 97 |
| Figure 59 : Schéma du circuit de bloc de détecteur de courant | 98 |
| Figure 60 : Résultats de la simulation transitoire du courant de batterie I_{BAT} et du courant capté I_{sense} | 98 |
| Figure 61 : Simulation transitoire, forme de courbe de la tension de batterie V_{BAT} obtenue | 99 |
| Figure 62 : Simulation transitoire, forme de courbe du courant de batterie I_{BAT} obtenue | 99 |
| Figure 63 : Courbe résultante de l'efficacité de puissance | 100 |
| Figure 64 : Layout de l'interface proposée utilisant une technique basée sur la commutation pour le chargeur de batterie Li-Ion | 101 |

Chapitre V : Conception et analyse d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle par impulsions 104

| | |
|--|-----|
| Figure 65 : Modes de chargement des batteries Li-Ion à l'aide de la technique de contrôle par impulsions | 107 |
| Figure 66 : Conception proposée de l'interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle par impulsions | 108 |
| Figure 67 : Formes des courbes de la tension de batterie V_{BAT} , du courant de la batterie I_{BAT} , du signal S_{CC} et du signal S_{CV} , en mode de charge de démarrage | 109 |
| Figure 68 : Formes des courbes de la tension de la batterie V_{BAT} , du courant de la batterie I_{BAT} , du signal S_{CC} et du signal S_{CV} , en mode de charge à courant constant | 110 |
| Figure 69 : Formes des courbes de la tension de la batterie V_{BAT} , du courant de la batterie I_{BAT} , du signal S_{CC} et du signal S_{CV} , en transition entre les modes de charge à courant constant CC et à tension constante CV | 111 |

| | |
|---|-----|
| Figure 70 : Formes des courbes de la tension de la batterie V_{BAT} , du courant de la batterie I_{BAT} , du signal S_{CC} et du signal S_{CV} , en mode de charge à tension constant _____ | 112 |
| Figure 71 : Schéma du circuit de bloc de contrôle du mode courant constant CC _____ | 113 |
| Figure 72 : Schéma du circuit de la porte logique Bascul-D utilisé dans le bloc de contrôle du mode CC _____ | 115 |
| Figure 73 : Schéma du circuit de bloc contrôle du mode tension constante CV _____ | 115 |
| Figure 74 : Schéma du circuit de la porte logique OR utilisé dans le bloc de contrôle du mode CV _____ | 116 |
| Figure 75 : Schéma du circuit de bloc décaleur de niveau utilisé dans l'interface proposé basée sur la technique de contrôle par impulsions _____ | 117 |
| Figure 76 : Schéma du circuit de bloc pilote de grille utilisé dans l'interface proposé basée sur la technique de contrôle par impulsions _____ | 117 |
| Figure 77 : Schéma du circuit de bloc capteur de courant utilisé dans l'interface proposé basée sur la technique de contrôle par impulsions _____ | 119 |
| Figure 78 : Schéma du circuit de bloc générateur de rampe et d'horloge _____ | 120 |
| Figure 79 : Enchainement des différentes phases du MOSFET _____ | 123 |
| Figure 80 : Simulation transitoire, formes de courbe de la tension de la batterie V_{BAT} obtenue et du courant de la batterie I_{BAT} obtenue _____ | 124 |
| Figure 81 : Simulation transitoire, forme de courbe de la tension de batterie V_{BAT} obtenue _____ | 125 |
| Figure 82 : Simulation transitoire, forme de courbe du courant de batterie I_{BAT} obtenue _____ | 125 |
| Figure 83 : Courbe résultante de l'efficacité de puissance d'interface proposée pour le chargeur de la batterie Li-Ion _____ | 126 |
| Figure 84 : Layout de l'interface proposée basé sur le contrôle par impulsions _____ | 127 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----------|
| Chapitre I : Principes fondamentaux | 7 |
| Tableau 1 : Historique de l'utilisation des batteries [38] [30] | 11 |
| Tableau 2 : Batteries primaires et leurs caractéristiques [39] [40] | 13 |
| Tableau 3 : Batteries secondaires et leurs caractéristiques [39] [40] | 14 |
| Tableau 4 : Comparaison des différents types des batteries [41] [42] | 14 |
| Tableau 5 : Matériaux d'électrode positive | 24 |
| Tableau 6 : Matériaux d'électrode négative | 25 |
| Chapitre II : Différentes méthodes existant pour charger une batterie Li-Ion | 36 |
| Chapitre III : Conception et analyse d'un nouveau décaleur de niveau associé avec un pilote de grille | 53 |
| Tableau 7 : Rapport de chaque transistor du circuit de décaleur de niveau proposé | 61 |
| Tableau 8 : Rapport de chaque transistor du circuit de décaleur de niveau conventionnel | 61 |
| Tableau 9 : Rapport de chaque transistor du circuit de l'inverseur utilisé dans le décaleur de niveau proposé | 62 |
| Tableau 10 : Rapport de chaque transistor du circuit de la porte logique AND utilisé dans le décaleur de niveau proposé | 62 |
| Tableau 11 : Analyse comparative entre le décaleur de niveau proposé et d'autres travaux/références | 64 |
| Tableau 12 : Rapport de chaque transistor du circuit de pilote de grille | 67 |
| Chapitre IV : Conception et analyse d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant une technique basée sur la commutation | 79 |
| Tableau 13 : Rapport de chaque transistor du circuit de comparateur utilisé dans le bloc de contrôle de mode | 86 |
| Tableau 14 : Rapport de chaque transistor du circuit de l'inverseur utilisé dans le bloc de contrôle de mode | 89 |
| Tableau 15 : Rapport de chaque transistor du circuit de la porte logique NAND utilisé dans le bloc de contrôle de mode | 89 |
| Tableau 16 : Rapport de chaque transistor du circuit de bloc de référence des courants | 90 |
| Tableau 17 : Rapport de chaque transistor du circuit d'amplificateur opérationnel utilisé dans le bloc de référence des courants | 92 |
| Tableau 18 : Rapport de chaque transistor du circuit de bloc de contrôle de charge | 95 |
| Tableau 19 : Rapport de chaque transistor du circuit de bloc de détecteur de courant | 98 |

Tableau 20 : Analyse comparative entre notre chargeur proposé basé sur la commutation et des autres références _____ 102

Chapitre V : Conception et analyse d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle par impulsions _____ 104

Tableau 21 : Chargeur à base de faible perte de charge (LDO) par rapport au chargeur à base de la commutation d'alimentation (Switching Power Supply) _____ 105

Tableau 22 : Rapport de chaque transistor du bloc de contrôle de mode courant constant CC ____ 114

Tableau 23 : Rapport de chaque transistor du circuit de la porte logique OR utilisé dans le bloc de contrôle du mode CV _____ 116

Tableau 24 : Rapport de chaque transistor du circuit de bloc capteur de courant _____ 118

Tableau 25 : Rapport de chaque transistor du circuit de bloc générateur de rampe et d'horloge __ 120

Tableau 26 : Analyse comparative entre notre chargeur proposé basé sur le contrôle par impulsions et des autres références _____ 127

Liste des abréviations, des sigles et des acronymes

BCI: Interface du chargeur de la batterie

Li-Ion: Lithium-Ion

Ni-Cd: Nickel-Cadmium

Ni-MH: Nickel-Métal Hybride

CV: Tension constante

CC: Courant constant

TC: Trickle Charge, charge de maintien

V_{BAT}: Tension de la batterie

I_{BAT}: Courant de la batterie

I_{LIM}: Courant de limite

V_{LIM}: Tension de limite

I_{Bas}: Courant minimum

CMOS: Complementary Metal Oxyde Semiconductor

TSMC: Taiwan Semiconductor Manufacturing Company

LDO: Low Drop Out, les régulateurs à faible perte

V_{IN}: Tension d'entrée ou tension d'alimentation

SOC: State-Of-Charge ou l'état de charge de la batterie

SOH: State-Of-Health, état de santé

LiNiMnCoO₂: Nickel-Cobalt-Manganèse, également connu sous le nom NMC

LTO: Titanate de lithium

LiC₆: Graphite

LiCoO₂: Lithium cobalt oxide

C_g: Capacité spécifique d'une électrode

F: Constante faradique

Z: Quantité de transfert de charge

M: Masse molaire

C_{cell}: Capacité spécifique d'une cellule complète

ΔG_r^0 : Energie libre de Gibbs de la réaction

ΔG_f^0 : Energie libre de Gibbs de la formation

E_{cell}: Tension de la cellule

BMS: Battery Management System, système de gestion de batterie

LiMO₂: Oxyde de lithium métallique

C: Taux de charge

Z_{model(S)}: Fonctions de transfert d'une batterie Li-Ion

AC: Courant Alternatif

DC : Courant continu

EOC: End Of Charge, fin de charge

V_{max}: Tension maximale prééglée

CCCF-PC: Charge par impulsions à courant constant et fréquence constante

CCVF-PC: Charge par impulsions à courant constant et fréquence variable

VCCF-PC: Charge par impulsions à courant variable et fréquence constante

EEPROM: Electrically Erasable Programmable Read Only Memory

V_{DDH}: Haute tension d'alimentation

V_{DDL}: Basse tension d'alimentation

MOS: Metal Oxide Semiconductor

MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

t_p: temps de propagation

SoC: System on Chip, système sur puce

V_L: Tension basse

V_H: Tension haute

V_{Tc}: Tension de charge de maintien

V_{CC}: Tension de la charge à courant constant

V_{CV}: Tension de la charge à tension constante

V_{Control}: Tension de contrôle

I_{Réf}: Référence de courant

I_{Tc}: Courant de la charge de maintien

I_{CC}: Courant de la charge à courant constant

I_{CV}: Courant de la charge à tension constante

I_{Cutt-off}: Courant de coupure

SW: interrupteur

V_G: Tension de grille

I_{Sense}: Courant capté

P_{Out}: Puissance de sortie en Watts

P_{In}: Puissance d'entrée en watts

S_{CC}: Signal de mode de charge à courant constant

S_{CV}: Signal de mode de charge à tension constante

V_{Complete}: Tension complète prédéfinie

V_{Sense}: Tension détecté

S_{Control}: Signal de contrôle

V_{Ramp}: Tension de forme d'onde de rampe

V_{Ccc}: Tension du condensateur

SCLK: Signal d'horloge

S_{Ramp}: Signal de rampe

V_{DS}: Tension Source-Drain

V_{GS}: Tension Source-Grille

I_D: Courant de drain

Liste des publications

1. Mustapha El Alaoui, Fouad Farah, Karim El Khadiri, Ahmed Tahiri, Rachid El Alami, Hassan Qjidaa, “**A high efficiency and high speed charge of Li-Ion battery charger interface using switching-based technique in 180 nm CMOS technology**”, Institute of Advanced Engineering and Science: International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS), Volume 12, Issue 1, March 2021, Pages 374-384, DOI: 10.11591/ijpeds.v12.i1.pp374-384.
2. Mustapha El Alaoui, Karim El Khadiri, Rachid El Alami, Ahmed Tahiri, Ahmed Lakhssassi, Hassan Qjidaa, “**A New High Speed Charge and High Efficiency Li-Ion Battery Charger Interface Using Pulse Control Technique in TSMC 180 nm CMOS Technology**”, manuscript accepted in Institute of Advanced Engineering and Science: International Journal of Electrical and Computer Engineering.
3. Fouad Farah, Mustapha El Alaoui, Abdellali Elboutahiri, Mounir Ouremchi, Karim El Khadiri, Ahmed Tahiri, Hassan Qjidaa, “**A new Li-ion battery charger with charge mode selection based on 0.18 um CMOS for phone applications**”, Institute of Advanced Engineering and Science: International Journal of Electrical and Computer Engineering, Volume 11, Issue 3, June 2021, Pages 1994-2002, DOI: 10.11591/ijece.v11i3.pp1994-2002.
4. Fouad Farah, Mustapha El Alaoui, Abdelali El Boutahiri, Mounir Ouremchi, Karim El Khadiri, Ahmed Tahiri, Hassan Qjidaa, “**High efficiency buck-boost converter with three modes selection for hv applications using 0.18 μm technology**”, ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications, Volume 18, Issue 2, August 2020, Pages 137-144, DOI: 10.37936/ecti-eec.2020182.222580.
5. Mustapha El Alaoui, Fouad Farah, Karim El Khadiri, Hassan Qjidaa, Abdellah Aarab, Ahmed Lakhssassi, Ahmed Tahiri, “**Design and analysis of new level shifter with gate driver for li-ion battery charger in 180nm cmos technology**”, Iran University of Science and Technology: Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, Volume 15, Issue 4, December 2019, Pages 477-484, DOI: 10.22068/IJEEE.15.4.477.

6. Abdelali El Boutahiri, Mounir Ouremchi, Ahmed Rahali, Mustapha El Alaoui, Fouad Farah, Karim El Khadiri, Ahmed Tahiri, Hassan Qjidaa, “**Design of new power generating circuit for passive UHF RFID tag**”, Institute of Advanced Engineering and Science: International Journal of Power Electronics and Drive Systems, Volume 10, Issue 3, September 2019, Pages 1389-1397, DOI: 10.11591/ijpeds.v10.i3.1389-1397.
7. Abdelali El Boutahiri, Mounir Ouremchi, Ahmed Rahali, Mustapha El Alaoui, Fouad Farah, Karim El Khadiri, Ahmed Tahiri, Hassan Qjidaa, “**Design of 2MHz OOK transmitter/receiver for inductive power and data transmission for biomedical implant**”, Institute of Advanced Engineering and Science: International Journal of Electrical and Computer Engineering, Volume 9, Issue 4, August 2019, Pages 2779-2787, DOI: 10.11591/ijece.v9i4.pp2779-2787.
8. Fouad Farah, Mustapha El Alaoui, Karim El Khadiri, Hassan Qjidaa, “**New Analog Li-Ion Battery Charger Using Pulsed Charging Method**”, IEEE Computer Society: 6th International Conference on Multimedia Computing and Systems, ICMCS 2018, Rabat, Morocco, Volume 2018-May, 6 November 2018, Article number 8525948, DOI: 10.1109/ICMCS.2018.8525948.
9. Mounir Ouremchi, Mustapha El Alaoui, Fouad Farah, Karim El Khadiri, Hassan Qjidaa, Ahmed Lakhssassi, Ahmed Tahiri, “**Li-ion battery charger based on LDO regulator for portable device power management**”, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: Proceedings of 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2018, Rabat, Morocco, 2 July 2018, Article number 8702961, DOI: 10.1109/IRSEC.2018.8702961.
10. Mustapha El Alaoui, Fouad Farah, Mounir Ouremchi, Karim El Khadiri, Hassan Qjidaa, Ahmed Lakhssassi, Ahmed Tahiri, “**Modelling of photovoltaic module with Powersim**”, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: Proceedings of 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2018, Rabat, Morocco, 2 July 2018, Article number 8702961, DOI: 10.1109/IRSEC.2018.8702998.
11. Fouad Farah, Mustapha El Alaoui, Karim El Khadiri, Hassan Qjidaa, Ahmed Lakhssassi, “**A design of a new resistor string DAC for phones applications in 130nm technology**”, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: 2018 International

Conference on Intelligent Systems and Computer Vision, ISCV 2018, Volume 2018-May, 3 May 2018, Pages 1-4, DOI: 10.1109/ISACV.2018.8354063.

12. Mustapha El Alaoui, Fouad Farah, Karim El Khadiri, Hassan Qjidaa, Abdellah Aarab, Rachid El Alami, Ahmed Lakhassassi, “**Analysis and design of dickson charge pump for EEPROM in 180nm CMOS technology**”, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: 2018 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision, ISCV 2018, Volume 2018-May, 3 May 2018, Pages 1-5, DOI: 10.1109/ISACV.2018.8354067.

Résumé

La conception de l'interface de chargeur de batterie Li-Ion utilisée dans les applications mobiles et automobiles requiert des exigences strictes de performance; notamment, celles relatives à la charge rapide de la batterie, à l'efficacité élevée et à la surface réduite. Cette thèse concerne la conception et l'optimisation de deux nouvelles interfaces de chargeur de batterie Li-Ion, l'une utilisant une technique basée sur la commutation et l'autre utilisant la technique de contrôle par impulsions.

La première partie de cette thèse traite l'intégration d'un nouveau décaleur de niveau associé à un pilote de grille dans l'architecture de l'interface de chargeur de batterie Li-Ion. Ils sont conçus pour passer de la basse tension du signal de commande à une tension plus élevée. D'autre part, le délai de propagation est considérablement réduit à 0,25ns. Ce circuit proposé est fixé à la grille du transistor PMOS de puissance pour alimenter la charge de la batterie par une action de commutation et pour réguler la valeur pratique du courant dans la batterie.

La deuxième partie de cette thèse traite la conception d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant une technique basée sur la commutation. Ce nouveau chargeur de batterie permet d'avoir un chargement complet par des passages à chaque mode de charge (TC, CC et CV) en trente-trois minutes. Avec une tension d'entrée $V_{IN} = 4,5V$, la tension de sortie de la batterie V_{BAT} peut varier de 2,7V à 4,2V et le courant de charge maximal de la batterie I_{BAT} est égale à 1,7A. Le rendement maximal de la nouvelle interface du chargeur atteint 97% et sa surface totale est seulement de 0.3mm².

La troisième partie de cette thèse traite la conception d'une autre nouvelle interface du chargeur de batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle par impulsions. Ce nouveau chargeur de batterie permet d'avoir un chargement complet en quarante et une minutes en passant par le mode de charge à courant constant CC qui inclut également le mode de

démarrage (Start-Up), et par le mode de charge à tension constante CV. Avec une tension d'entrée maximale V_{IN} égale à 5V, la tension de sortie de la batterie V_{BAT} peut varier de 2,9V à 4,35V et le courant de charge maximal de la batterie I_{BAT} est égale à 2,1A. Le rendement maximal de la nouvelle interface de chargeur atteint 98 % et sa surface totale est seulement de 0,1mm².

Les deux interfaces proposées du chargeur de la batterie Li-Ion, en utilisant la technique basée sur la commutation ou la technique de contrôle par impulsions, atteignent les normes les plus importantes qui sont : le haut rendement, la surface minimisée et la rapidité de charge. Elles sont conçues, simulées sous le logiciel Cadence Virtuoso en utilisant la technologie TSCM 180 nm CMOS.

Mots clés : Chargeur de la batterie Li-Ion, Décaleur de niveau, Pilote de grille, Retard de propagation, Chargeur à faible perte LDO, Chargeur basé sur une alimentation à commutation, Technique de commande par impulsions, Commande en mode courant constant CC, Commande en mode tension constante CV, Détection de courant.

Abstract

The design of Li-Ion battery charger interface used in mobile and automotive applications requires strict performance requirements; namely, those related to fast battery charging, high efficiency and small area. This thesis is concerned with the design and optimization of two new Li-Ion battery charger interfaces, one using a switching-based technique and the other using the pulse control technique.

The first part of this thesis deals with the integration of a new level shifter associated with a gate driver in the Li-Ion battery charger interface. They are designed to switch from the low voltage of the control signal to a higher voltage. On the other hand, the propagation delay is significantly reduced to 0.25ns. This proposed circuit is attached to the gate of the power PMOS transistor to supply the battery charge by switching action and to regulate the practical value of current in the battery.

The second part of this thesis deals with the design of a new Li-Ion battery charger interface using a switching-based technique. This new battery charger allows having a complete charge by switching to each charging mode (TC, CC, and CV) in thirty-three minutes. With an input voltage of $V_{IN} = 4.5V$, the output voltage of the V_{BAT} battery can vary from 2.7V to 4.2V and the maximum charging current of the I_{BAT} battery is equal to 1.7A. The maximum efficiency of the new charger interface is 97% and its total surface is only 0.3mm².

The third part of this thesis deals with the design of another new Li-Ion battery charger interface using the pulse control technique. This new battery charger allows having a full charge in forty-one minutes by going through the DC constant current charging mode that also includes the start-up mode (Start-Up), and through the CV constant voltage-charging mode. With a maximum input voltage V_{IN} equal to 5V, the output voltage of the V_{BAT} battery

can vary from 2.9V to 4.35V and the maximum charge current of the I_{BAT} is equal to 2.1A. The maximum efficiency of the new charger interface reaches 98% and its total surface is only 0.1mm².

The two proposed interfaces of the Li-Ion battery charger, using the switching-based technology or the pulse control technology, achieve the most important standards of high efficiency, minimized surface area and fast charging. They are designed, simulated under Cadence Virtuoso software using TSCM 180 nm CMOS technology.

Keywords: Li-Ion battery charger, Level shifter, Gate driver, Propagation delay, Low Drop Out based Charger, Switching power supply based charger, Pulse control technique, CC constant current mode control, CV constant voltage mode control, Current Sensing.

Introduction générale

Le lithium est le métal le plus léger qui possède un potentiel électrochimique élevé. Ce qui fait, les batteries lithium-ion (Li-ion) ont la plus grande densité énergétique parmi toutes les batteries rechargeables actuelles. En outre, les batteries Li-ion présentent aussi les avantages d'un courant de décharge élevé, d'une faible résistance interne, d'un long cycle de vie, d'une tension de cellule élevée et d'une facilité d'entretien [1]. Par conséquent, les batteries Li-ion remplacent largement les autres batteries rechargeables, telles que les batteries Nickel Cadmium (NiCd) et Nickel-Métal Hybride (NiMH), et deviennent les batteries rechargeables les plus populaires. Cependant, en raison de la forte réactivité du lithium, la température de fonctionnement, la pression des cellules, la tension et le courant de charge aux bornes des batteries Li-Ion doivent être strictement contrôlés pour des raisons de sécurité. En fait, des mécanismes de protection à plusieurs niveaux sont utilisés dans les blocs de la batterie Li-ion pour assurer la sécurité en toutes circonstances, y compris des événements de sécurité, des circuits de protection et des circuits de chargeurs soigneusement conçus. Les événements de sécurité peuvent libérer du gaz en cas de surpression. Tandis que les circuits de protection sont utilisés pour couper le courant en cas de surtension, de sous-tension, de surchauffe et de surintensité de courant.

Les chargeurs des batteries Li-Ion peuvent être divisés en deux catégories : les chargeurs autonomes et les chargeurs embarqués. Les chargeurs embarqués sont intégrés dans les appareils électroniques, tels que les Smartphones, et doivent donc non seulement charger la batterie mais aussi alimenter le système. Ces exigences complexes ont conduit au développement de la gestion dynamique de l'énergie, qui permet de réduire le courant de charge lorsque les systèmes fonctionnent [2], [3]. Par conséquent, la technique de gestion dynamique de la puissance peut empêcher la puissance d'entrée du chargeur de dépasser la

limite de l'adaptateur. D'autre part, les chargeurs autonomes ne sont utilisés que pour charger les blocs de la batterie.

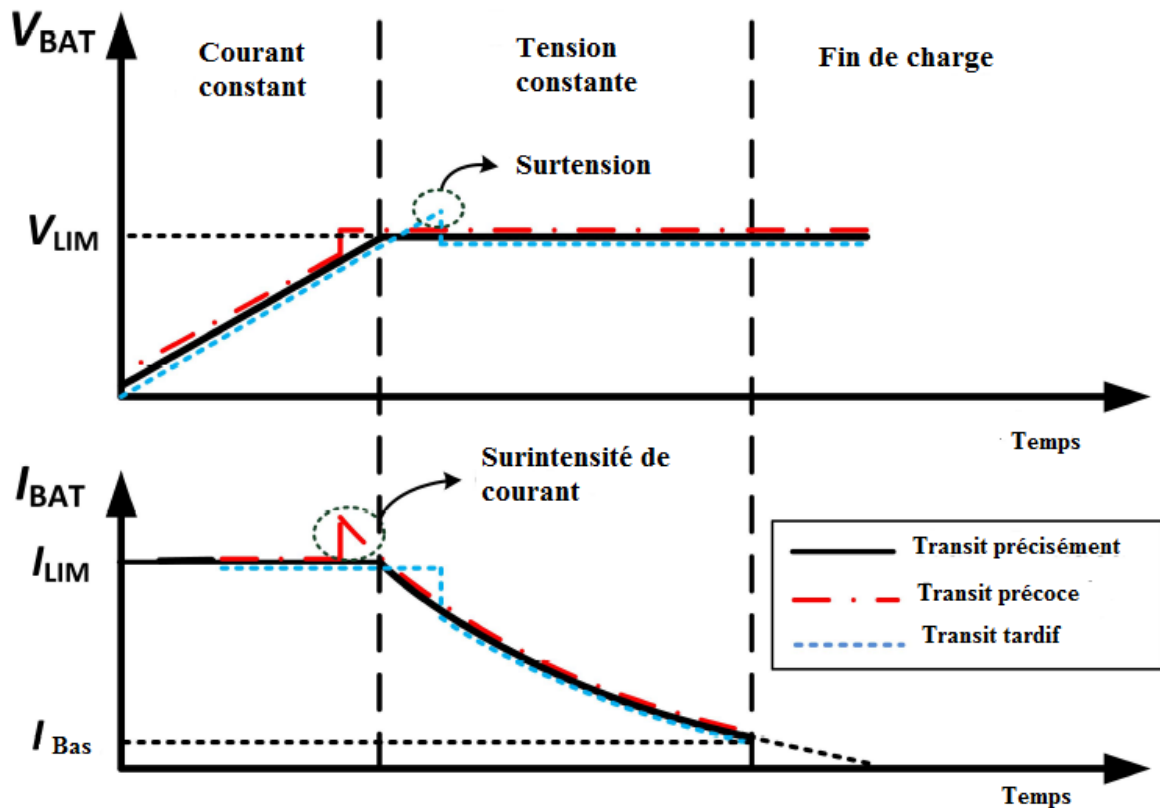


Figure 1 : Processus de charge typique d'une batterie Li-ion par l'algorithme CC-CV

Pour charger en toute sécurité les batteries Li-ion, les modes de fonctionnement à tension constante (CV) et à courant constant (CC) sont nécessaires pour contrôler strictement la tension et le courant de la batterie et aussi pour obtenir une charge rapide. Cette méthode de contrôle de charge est communément appelée algorithme CC-CV. L'algorithme de charge CC-CV est représenté par la Figure 1. Au début du cycle de charge, le courant de charge I_{BAT} est fixé à I_{LIM} , ce qui est appelé l'étape CC. Le courant I_{BAT} est maintenu constant jusqu'à ce que la tension de la batterie V_{BAT} atteigne la tension limite V_{LIM} . À cette étape, en raison de la résistance interne des batteries, la tension V_{BAT} n'atteint pas vraiment la tension V_{LIM} et la capacité de la batterie n'est pas complètement remplie. Il faut donc passer à l'étape CV pour charger complètement la batterie. Dans l'étape CV, le courant I_{BAT} diminue progressivement

avec l'augmentation de la tension V_{BAT} . Enfin, la tension V_{BAT} atteint la tension V_{LIM} . Néanmoins, afin de raccourcir le temps de charge totale, le cycle de charge se termine généralement lorsque le courant I_{BAT} devient inférieur à un courant minimum I_{Bas} . La clé de la conception d'un chargeur CC-CV est de savoir comment passer de l'étape CC à l'étape CV.

En outre, la tension d'une seule cellule de la batterie Li-Ion est comprise entre 2,5V et 4,2V. Elle est suffisante pour alimenter des appareils de faible puissance, comme les téléphones mobiles, les tablettes et les PC portables. Dans ces applications, les processus 5V CMOS standard sont suffisants pour mettre en œuvre ces chargeurs [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]. Cependant, des batteries à grande capacité sont nécessaires pour fournir une énergie plus élevée afin d'alimenter des appareils de moyenne ou de haute puissance, tels que les PC portables et les systèmes automobiles. Dans les packs des batteries de grande capacité, la connexion en série et en parallèle est nécessaire pour obtenir une tension élevée et un courant important.

Les systèmes des chargeurs des batteries Li-Ion peuvent être classés en deux catégories: les chargeurs à faible perte (LDO) [11], [4], [5], [12], [7], [8], [10] et les chargeurs à commutation (Switching) [13], [6], [14], [15], [16], [17], [18]. Le chargeur à base de LDO présente l'avantage d'une simple intégration, car il ne nécessite ni transistors de puissance externes ni inductance. Cependant, l'efficacité des chargeurs à base de LDO diminue avec l'augmentation du rapport de tension entrée/sortie. Par conséquent, l'utilisation de cette topologie est limitée aux chargeurs à cellule unique. En revanche, les chargeurs à commutation peuvent maintenir un rendement élevé dans des larges plages de tension d'entrée et de sortie. Ils sont plus adaptés aux applications de charge en série.

Par rapport à un convertisseur DC-DC à commutation traditionnel, un chargeur à commutation contrôle non seulement la tension de sortie mais aussi le courant de sortie. Une méthode courante de la détection du courant consiste à utiliser un petit transistor qui s'adapte

au transistor de puissance pour détecter son courant [19]. En d'autres termes, au moins un transistor de puissance doit être intégré dans la puce de contrôle pour détecter le courant de l'inducteur.

L'objectif principal de cette thèse est de concevoir, d'analyser et de développer des nouvelles interfaces du chargeur de la batterie Li-Ion. Ces contributions permettront de charger la batterie Li-Ion plus rapidement que les techniques de charge industrielles existantes. De plus, elles maintiendront un haut rendement, une surface minimisée et une charge rapide.

Cette thèse a donné lieu aux contributions scientifiques et techniques originales suivantes :

- La conception et l'analyse d'un nouveau décaleur de niveau associé avec un pilote de grille pour un chargeur de la batterie Li-Ion. Le décaleur de niveau proposé est utilisé pour élever le niveau de tension et réduit de manière significative le délai de transfert de 1,3ns (délai de transfert du décaleur de niveau conventionnel) à 0,15ns avec le même signal d'entrée. De plus, le décaleur de niveau associé avec le pilote de grille atteint un retard de propagation de moins de 0,25ns et une surface totale de 0,05 mm². Le circuit proposé a été conçu et simulé sous le logiciel Cadence Virtuoso en utilisant la technologie TSMC 180nm CMOS.

- La conception et l'analyse d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant une technique basée sur la commutation. Elle est proposée pour une haute efficacité, une charge rapide et une surface minimisée; qui sont les normes les plus importantes de l'interface de chargeur de la batterie Li-Ion. La charge de la batterie est complétée en trente-trois minutes par des passages à chaque mode de charge : le premier mode est le mode de charge lente (TC), le deuxième mode est le mode de courant constant (CC) et le dernier mode est le mode de tension constante (CV). L'interface de chargeur proposée est conçue, simulée

sous le logiciel Cadence Virtuoso en utilisant la technologie TSCM 180nm CMOS. Avec une tension d'entrée $V_{IN} = 4,5V$, la tension de la batterie V_{BAT} peut varier de 2,7V à 4,2V et le courant de charge maximal de la batterie I_{BAT} est de 1,7A. Le rendement maximal atteint 97% et la surface totale est seulement de 0.3 mm².

- La conception et l'analyse d'une autre nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle par impulsions. Les principaux standards de chargeur de la batterie Li-Ion sont atteints grâce à l'utilisation de la technique de contrôle par impulsions. Le chargeur proposé atteint une charge complète en quarante et une minutes en passant par : le mode de charge à courant constant CC qui inclut également le mode de démarrage, et par le mode de charge à tension constante CV. Il a été conçu, simulé pour occuper une petite surface de 0,1 mm² en utilisant la technologie TSMC 180nm CMOS sous le logiciel Cadence Virtuoso. Avec une tension d'entrée maximale $V_{IN} = 5V$, La tension de la batterie V_{BAT} peut varier de 2,9V à 4,35V et le courant maximal de la batterie I_{BAT} est de 2,1A en mode de charge CC, selon une tension d'entrée maximale V_{IN} égale à 5V. L'efficacité maximale de la charge atteint 98%.

Les principaux chapitres de ce rapport sont brefs et servent à introduire le contexte et les concepts fondamentaux nécessaires à la compréhension des contributions présentées dans cette thèse. Les contributions scientifiques exposées et détaillées dans cette thèse sont présentées dans les publications annexées. Les chapitres sont organisés comme suit :

- **Le chapitre I** est consacré à présenter les principes fondamentaux de la charge des batteries Li-Ion. Un bref aperçu du vieillissement des batteries Li-Ion est inclus dans cette section.
- **Le chapitre II** concerne la présentation des différentes méthodes de charge disponible.

- **Dans le chapitre III**, nous avons présenté la 1^{ère} contribution qui a pour objectif d'analyser, concevoir et développer un nouveau décaleur de niveau associé avec un pilote de grille pour un chargeur de batterie Li-Ion en technologie TSMC 180nm CMOS.

- **Dans le chapitre IV**, nous avons présenté la 2^{ème} contribution qui a pour objectif d'analyser, concevoir et développer une nouvelle interface du chargeur de la batterie Li-ion à haut rendement et à haute vitesse, utilisant une technique basée sur la commutation en technologie TSMC 180nm CMOS.

- **Dans le chapitre V**, nous avons présenté la 3^{ème} contribution qui a pour objectif d'analyser, de concevoir et de développer une autre nouvelle interface du chargeur de la batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle par impulsions en technologie TSMC 180nm CMOS.

- **Conclusion générale et perspectives** : Comprends les conclusions de la thèse et les orientations des recherches futures. Il est donné sur la base de la discussion générale. Les objectifs futurs et les possibilités de recherche sont inclus ici.

Chapitre I : Principes fondamentaux

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| I.1 Qu'est-ce que la batterie ? | 8 |
| I.2 Historique de la batterie | 9 |
| I.3 Différents types des batteries | 12 |
| I.3.1 Batteries primaires | 12 |
| I.3.2 Batteries secondaires | 13 |
| I.4 Paramètres pratiques pour l'évaluation de la performance des batteries | 16 |
| I.4.1 Capacité, efficacité coulombienne et durée de vie du cycle | 16 |
| I.4.2 Tension | 17 |
| I.4.3 Densité énergétique | 20 |
| I.4.4 Puissance | 20 |
| I.5 Pourquoi la batterie Li-Ion ? | 20 |
| I.5.1 Principe de la batterie Li-Ion | 21 |
| I.5.2 Électrode positive (Cathode) | 23 |
| I.5.3 Électrode négative (Anode) | 24 |
| I.5.4 Électrolyte | 25 |
| I.5.5 Séparateur et Collecteur | 26 |
| I.6 Mécanismes de vieillissement de la batterie Li-Ion | 26 |
| I.6.1 Formation de l'interface des électrolytes solides | 27 |
| I.6.2 Placage de Lithium | 29 |
| I.6.3 Électrode positive (Cathode) | 30 |
| I.6.4 Électrode négative (Anode) | 30 |
| I.6.5 Électrolyte | 32 |
| I.6.6 Séparateur | 33 |
| I.6.7 Vieillessement calendrier et cyclique | 33 |
| I.7 Effet mémoire | 34 |
| I.8 Taux de charge C de batterie Li-Ion | 34 |
| I.9 Modélisation électrique d'une batterie Li-Ion | 34 |
| I.10 Conclusion | 35 |

I.1 Qu'est-ce que la batterie ?

Une batterie est un dispositif composé d'une ou de plusieurs cellules électrochimiques avec des connexions externes fournies aux dispositifs d'alimentation électrique [20]. Les cellules électrochimiques sont un système qui peut générer l'énergie électrique à partir des réactions chimiques. Lorsqu'une batterie est utilisée comme source d'alimentation, la borne positive est appelée cathode et la borne négative est appelée anode [21].

Les batteries peuvent être disposées en série ou en parallèle sur un collecteur terminal où une source ou un puits peut être connecté. Les batteries étant généralement composées de plusieurs cellules, un système de gestion des batteries (Battery Management System "BMS") est utilisé pour contrôler et surveiller la tension, la capacité, la puissance et la température des cellules [22]. Dans les systèmes de gestion de batterie plus sophistiqués, des estimations de l'état de charge de la batterie (State-Of-Charge "SOC") ainsi que de son état de santé (State-Of-Health "SOH") peuvent être calculées à des fins de surveillance et de protection [23].

Fondamentalement, une batterie est un dispositif qui convertit l'énergie chimique en énergie électrique. Cette conversion est réalisée par une réaction d'oxydoréduction électrochimique [24]. Il existe de nombreux types des batteries rechargeables, et elles sont mieux connues par les matériaux qui les composent. Par exemple, le plomb-acide, le nickel-cadmium, le nickel-métal hydraté (NiMH), le soufre de sodium et les batteries lithium-ion (Li-Ion) sont des exemples courants. En outre, dans la chimie de chaque batterie, des caractéristiques spécifiques telles que l'énergie ou la puissance, la densité, la longévité et la sécurité peuvent être améliorées. Pour atteindre de tels objectifs, différents matériaux peuvent composer l'électrode positive (cathode) et l'électrode négative (anode), cela conduit à une sous-catégorisation des batteries. Par exemple, pour améliorer la longévité, le Nickel-Cobalt-Manganèse (LiNiMnCoO_2) peut être utilisé dans l'électrode positive d'une batterie Li-Ion et,

de ce fait, ce type de batterie est généralement connu sous l'acronyme NMC. En revanche, même si différents matériaux tels que le titanate de lithium (LTO) et le graphite (LiC_6 , le matériau le plus utilisé dans les électrodes négatives des batteries Li-Ion) peuvent composer l'électrode négative, ils n'ont traditionnellement aucune réflexion sur les batteries Li-Ion. Par rapport à d'autres types des batteries, les batteries Li-Ion offrent des performances supérieures en termes de niveaux de tension de sortie, de densités d'énergie et de puissance, ainsi que des taux d'autodécharge très faibles. En raison de ces qualités, elles sont couramment utilisées dans des applications telles que les véhicules électriques et hybrides [25]. Malgré cela, il convient de souligner que, par rapport aux batteries NiMH, par exemple, les batteries Li-Ion sont moins tolérantes aux températures basses et élevées (inférieures à zéro et supérieures à 40 °C) et moins tolérantes aux utilisations abusives, comme la surcharge et la décharge excessive. Soumettre la cellule à ces conditions peut réduire la durée de vie de la batterie Li-Ion, provoquer une surchauffe de la batterie et, dans le pire des cas, provoquer des incendies ou des explosions [26]. Ce fait laisse la place à d'autres types des batteries pour maintenir certaines positions sur le marché, par exemple dans les applications de réseau [27].

I.2 Historique de la batterie

La batterie Parthian, se compose d'un boîtier en argile et d'une solution de vinaigre. Une tige de fer est insérée dans cette solution entourée d'un cylindre de cuivre, et on pense qu'il s'agit de la première batterie inventée de l'histoire. L'idée a été conçue il y a 2000 ans, sous **l'empire Parthian** [28]. La figure 2 montre la batterie Parthian [28].

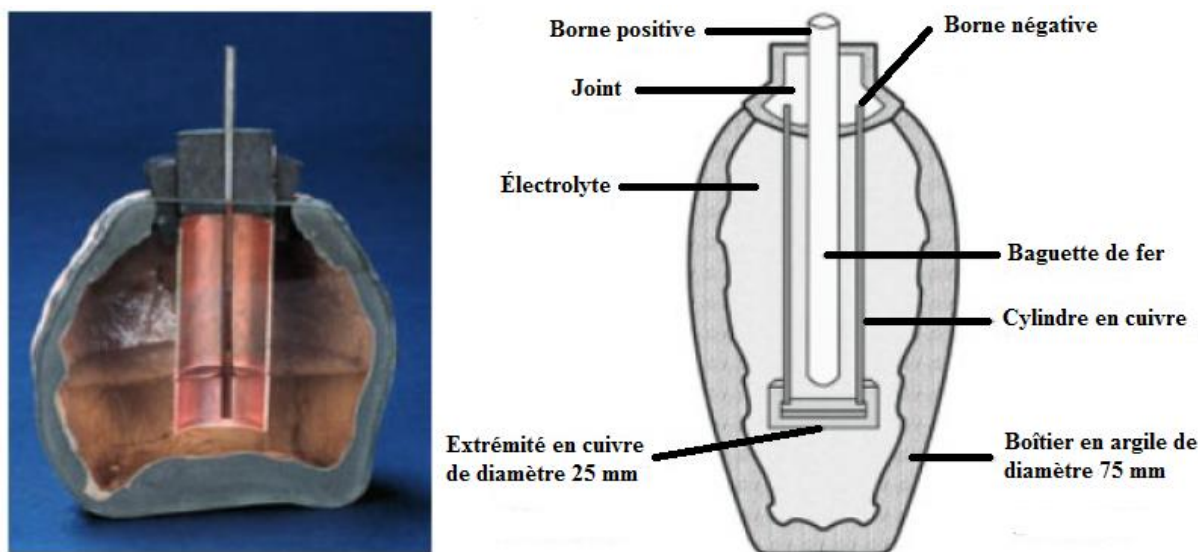


Figure 2: Batterie Parthian [28]

Certains scientifiques ne croient toujours pas que la batterie Parthian soit une source d'énergie. En 1660, **Otto Von Guerike** a pu prouver l'existence de l'électricité dans la nature [28]. En 1744, Leyden Jar inventée par **Ewald Georg Von Kleist**, a pu fournir un choc électrique [28]. En 1780, **Luigi Galvani** a introduit une nouvelle idée et l'a appelée électricité animale [28]. **Alessandro Volta** a inventé la première batterie pure et elle a été connue sous le nom de batterie voltaïque [29], la batterie voltaïque était meilleure que Leyden Jar. En 1836, le professeur de chimie **John Fredric Daniell** a introduit un moyen de résoudre le problème des bulles d'hydrogène de la batterie voltaïque et l'a appelée la cellule de Daniell, elle était capable de fournir 1,1 volt [28]. En 1837, **Golding Bird** a inventé une version améliorée de la batterie de Daniell, et l'année suivante, en 1838, **John Dancer** a introduit la version en pot poreux d'une cellule de Daniell. La cellule **Gravity** a été développée en 1860 par le Français **Callaud**, et elle était plus forte que toutes les autres cellules en raison de son excellente qualité, elle est devenue à la mode parmi les sociétés télégraphiques américaine et britannique. En 1859, le physicien français **Gaston Plante** a mis au point la première batterie au plomb. Après quelques années, en 1868 et 1888, la batterie humide et la batterie sèche ont été inventées. La première batterie rechargeable au nickel-cadmium a été inventée par

l'inventeur suédois **Waldmar Jugner** en 1899. Au début des années 1900, **Thomas Alva Edison** a inventé la première batterie alcaline [30]. En raison de sa petite taille, de son faible poids atomique et de son excellent potentiel électrochimique, le lithium a retenu l'attention du chercheur en batteries et il est devenu un composant idéal pour la technologie des batteries [31]. En 1912, **G. N. Lewis** a commencé à expérimenter la batterie Li-ion, mais les batteries Li-Ion commerciales ne sont pas devenues disponibles avant 1970 [32], [33].

Les années quatre-vingt ont été caractérisées par trois gradations importantes. En 1980, un chimiste américain, **John B. Goodenough**, a inventé la cathode LiCoO_2 (électrode positif), et un chercheur marocain, **Rachid Yazami**, a révélé l'anode en graphite (électrode négatif) avec l'électrolyte solide. En 1981, les chimistes japonais **Tokio Yamabe** et **Shizukuni Yata** ont inventé un nouveau nano-carboné-PAS (polyacène) [34], donnant naissance à un matériau qui était bénéfique pour l'anode dans l'électrolyte liquide conventionnel [35], [36]. Cette invention a permis de créer le premier prototype de batterie li-Ion qui a été commercialisé par **Sony** en 1991 [36] [37].

Tableau 1 : Historique de l'utilisation des batteries [38] [30]

| Année | Événement |
|---------------------------------|---|
| Il y a plus de 2,000 ans | La batterie Parthian d'abord introduite parmi la population. |
| 1798 | Le physicien italien, Count Alessandro Volta, a inventé la batterie voltaïque. |
| 1836 | Le chimiste anglais John F. Daniell améliore l'efficacité des batteries voltaïques. |
| 1859 | La batterie au plomb inventée par le physicien français Gaston Plante. |
| 1868 | Cellule humide développée par le chimiste français Georges Leclanche. |
| 1888 | Le Dr. Carl Gassner, scientifique allemand, a découvert une cellule sèche. |

| | |
|--|---|
| 1899 | La première batterie rechargeable à la nickel-cadmium découverte par l'inventeur suédois Waldmar Jugner. |
| Début des années Quatre-vingt-dix | L'inventeur américain Thomas Alva Edison a été le premier à développer une cellule alcaline. |
| 1955 | Introduction des batteries miniatures pour les appareils auditifs. |
| 1956 | Introduction de la batterie de 9 volts. |
| 1957 | Démarrage de la première batterie de montre commerciale. |
| 1959 | Démarrage de la première batterie alcaline cylindrique commercialement viable. |
| 1989 | Introduction de la première batterie alcaline "AAAA". |
| 1992 | La batterie Li-ion commercialisée pour la première fois. |
| De 2000 à aujourd'hui | La mise à niveau de la technologie des batteries rechargeables permet d'introduire des produits tels que les batteries rechargeables à hydrure métallique de nickel, les batteries à haute performance en titane et d'autres batteries. |

I.3 Différents types des batteries

Il existe actuellement différents types des batteries sur le marché. De nombreuses nouvelles améliorations sont introduites dans le domaine de la batterie. Toutes ces batteries peuvent être classées sous deux formes, elles sont les batteries primaires et les batteries secondaires.

I.3.1 Batteries primaires

La batterie primaire est connue sous le nom de batterie non rechargeable. Pour la chimie des cellules non réversibles, le fabricant suggère de ne pas charger la batterie primaire. Les batteries primaires sont utilisées lorsque l'appareil portable a une faible capacité de consommation de courant. Elle a une densité d'énergie élevée, mais aussi un système à forte

consommation de courant et ne peut pas durer longtemps. Les batteries primaires disponibles et leurs caractéristiques sont indiquées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Batteries primaires et leurs caractéristiques [39] [40]

| La chimie | Tension normale | Énergie spécifique (MJ/kg) | Explication |
|---|------------------------|-----------------------------------|--|
| Batterie de Zamboni | 0.8 | | Très longue durée de vie, courant peu profond. |
| Oxyde d'argent (argent-zinc) | 1.5 | 0.47 | Très cher. |
| Zinc-air | 1.1 | 1.59 | Utilisé principalement dans les appareils auditifs. |
| Alcaline (zinc-dioxyde de manganèse) | 1.15 | 0.4–0.59 | Bon pour les utilisations à haute et basse consommation. |
| Zinc-carbone | 1.2 | 0.13 | Peu coûteux. |
| Lithium (dioxyde de manganèse lithium) LiMnO₂ | | 0.83–1.01 | Utilisé uniquement dans les appareils à haut débit. |
| Le lithium (lithium-disulfure de fer) LiFeS₂ | 1.5 | 1.07 | Coûteux. |

I.3.2 Batteries secondaires

La batterie secondaire est connue sous le nom de batterie rechargeable. Sa matière active lui donne la capacité de se recharger. Les batteries rechargeables permettent une utilisation maximale des applications portables. Les batteries secondaires disponibles et leurs caractéristiques sont indiquées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Batteries secondaires et leurs caractéristiques [39] [40]

| La chimie | Tension normale | Énergie spécifique (MJ/kg) | Explication |
|---------------------------|------------------------|-----------------------------------|--|
| LiFePO₄ | 3.3 | 360 | La chimie du Li-ion-phosphate. |
| Plomb-acide | 2.1 | 140 | Des taux de décharge plus élevés entraînent une perte de capacité considérable. Danger pour l'environnement dû au plomb. |
| NiZn | 1.6 | 360 | Modérément peu coûteux, dispositif de vidange élevé adapté Faible taux d'autodécharge. |
| NiCd | 1.2 | 140 | Peu coûteux, taux d'autodécharge modéré et densité énergétique modérée. |
| NiMH | 1.2 | 360 | Peu coûteux. |
| AgZn | 1.5 | 460 | Extrêmement coûteux en raison de l'argent, très haute densité énergétique et très grande capacité de drainage. |
| Li-Ion | 3.6 | 460 | Différents produits chimiques à base de lithium, très coûteux et à très haute densité énergétique. |

La quantité d'énergie électrique d'une batterie peut être exprimée soit par unité de poids (Wh kg⁻¹), soit par unité de volume (Wh l⁻¹), soit en fonction du potentiel (V) et de la capacité (Ah kg⁻¹) de la batterie. Le tableau 4 résume les avantages de la batterie Li-Ion par rapport aux autres types des batteries connus.

Tableau 4 : Comparaison des différents types des batteries [41] [42]

| Type de batterie | Tension de fonctionnement (V) | Densité énergétique (Whkg-1) | Commentaires |
|-------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--|
| Plomb-acide | 1.9 | 30 | Communément appelée batterie de voiture, faible densité énergétique |
| Alcaline | 1.5 | 50-80 | Non rechargeable, grande capacité pour les appareils de faible puissance |

| | | | |
|-------------------------|-----|-----|---|
| Ni-Cadmium | 1.2 | 50 | Effet de mémoire, pollution de l'environnement, faible densité énergétique |
| Ni-métal hydrure | 1.2 | 60 | Effet mémoire, faible densité énergétique |
| Li-Ion | 4.0 | 150 | Léger, haute tension, pas d'effet de mémoire, grande capacité, bonne rétention de la charge, cher |

L'énergie maximale qui peut être tirée d'une batterie est principalement basée sur les types et la quantité des matières actives qui sont utilisés. Cependant, dans la pratique, seule une fraction de l'énergie théorique de la batterie est obtenue. Il s'agit du besoin d'électrolyte, des séparateurs, des collecteurs de courant et d'autres composants, tels que les conteneurs et les boîtiers. Cette relation est illustrée dans la figure 3. Pour que les batteries Li-Ion puissent compléter le passage aux véhicules électriques et des systèmes de stockage stationnaires plus importants, la technologie de la batterie Li-ion soit améliorée. Pour une commercialisation, les coûts doivent être réduits et la sécurité est une question de plus en plus importante. D'autres facteurs importants sont la cyclabilité, l'augmentation d'énergie et la densité de puissance, ainsi que l'amélioration de la plage de température des cellules [43] [44].

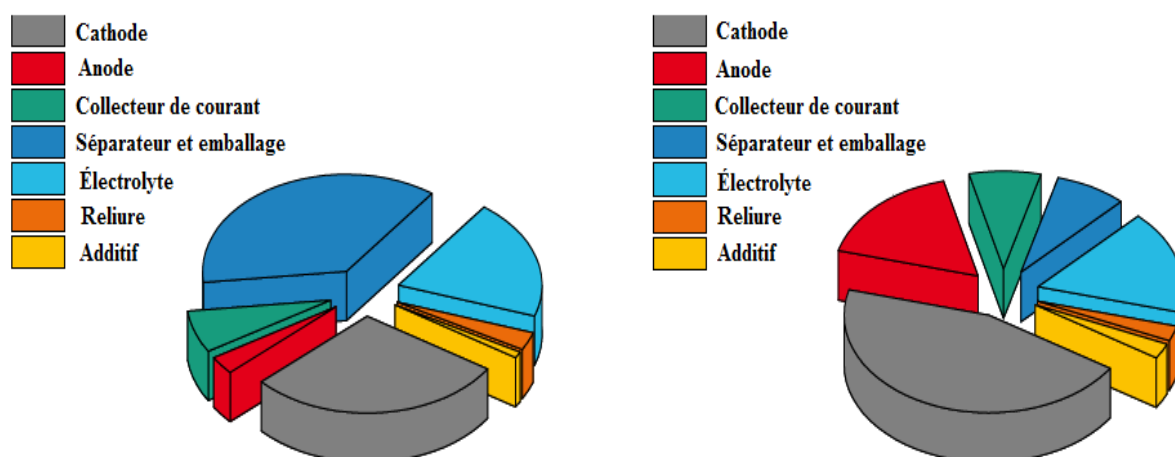


Figure 3 : Composants d'une batterie, le diagramme circulaire de gauche est basé sur le coût et celui de droite sur la masse en % [45]

I.4 Paramètres pratiques pour l'évaluation de la performance des batteries

Avant d'entrer dans les détails des batteries Li-Ion, il est utile d'expliquer d'abord certains des termes fréquemment utilisés. En particulier, l'évaluation de la capacité spécifique, l'efficacité de Coulomb, la durée de vie et la tension de la batterie sont des considérations importantes dans la conception d'une interface de chargeur de la batterie Li-Ion.

I.4.1 Capacité, efficacité coulombienne et durée de vie du cycle

La capacité spécifique est généralement définie par la quantité de charge qui peut être stockée par unité de masse des matériaux de l'électrode. La capacité spécifique d'une électrode peut être définie comme suit :

$$C_g = \frac{F \times z}{M \times 3.6} \text{mAh/g} \quad (1)$$

Où F est la constante faradique, z est la quantité de transfert de charge par mole de matériaux d'électrode de formule et M est la masse molaire des matériaux d'électrode de formule.

La capacité spécifique d'une cellule de batterie complète est déterminée par la cathode et l'anode. Par conséquent, la capacité spécifique d'une cellule complète peut être définie comme suit :

$$C_{\text{Cell}} = \frac{C_g(\text{anode}) \times C_g(\text{cathode})}{C_g(\text{anode}) + C_g(\text{cathode})} \quad (2)$$

Un autre paramètre important est l'efficacité coulombienne qui, dans le cas des batteries Li-Ion, est définie comme le rapport entre la capacité de délithiation et la capacité de lithiation. L'efficacité coulombienne est une indication de la réversibilité de la réaction de l'électrode et peut-être liée aux réactions secondaires entre l'électrode et l'électrolyte. L'efficacité coulombienne peut affecter de manière significative la capacité de la batterie au

cours du cycle, en particulier lorsque la quantité de lithium et d'électrolyte est limitée. La figure 4 montre la diminution de la capacité au fil des cycles avec différentes efficacités coulombiennes et un approvisionnement limité en lithium. Une perte de 0,1 % de l'efficacité coulombienne (99,9 %) entraîne une perte de capacité de 10 % sur 100 cycles, tandis qu'une perte de 1 % (efficacité coulombienne de 99 %) peut entraîner une perte de près de 64 % sur le même nombre des cycles.

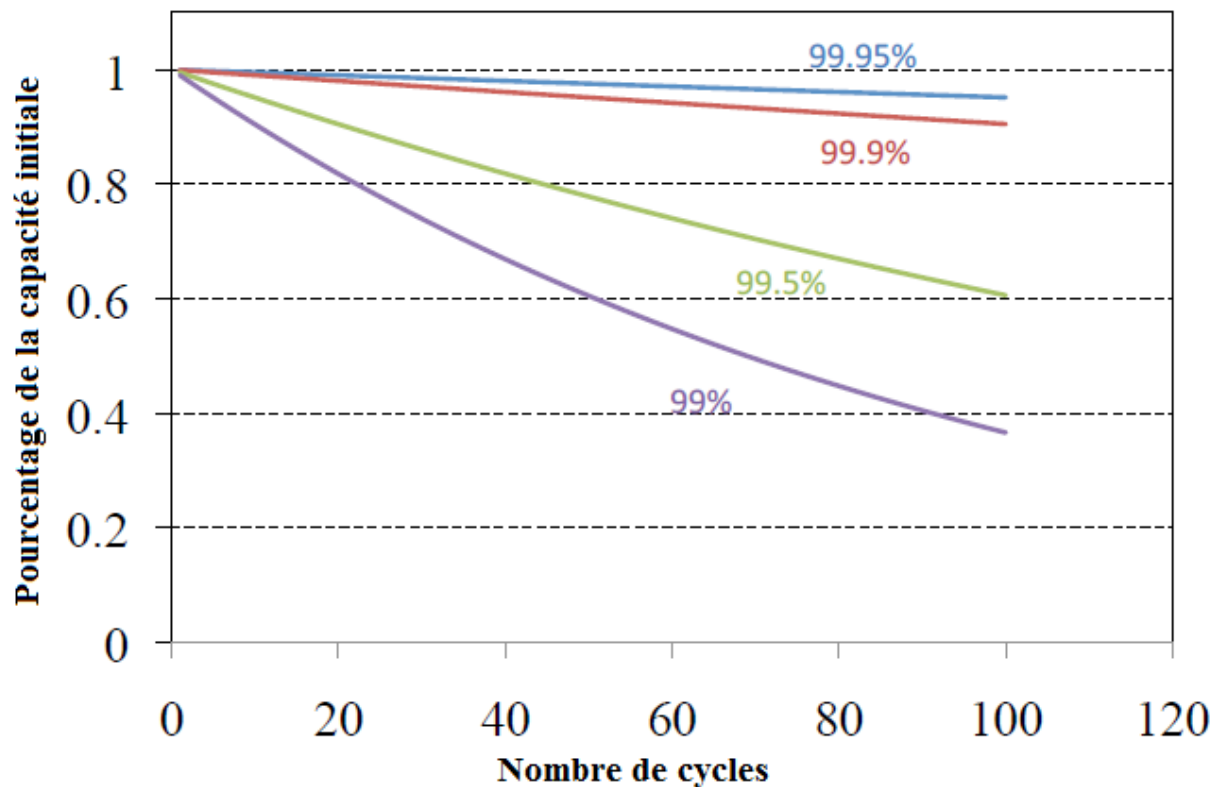


Figure 4 : Importance de l'efficacité coulombienne dans les performances de cyclage, en supposant une quantité limitée de lithium

I.4.2 Tension

La tension des batteries est déterminée par la thermodynamique de la réaction des électrodes, la représentation schématique des différents types de courbes de décharge [46] a été illustrée dans la figure 5. La cathode et l'anode ont généralement des potentiels électrochimiques différents, qui décrivent la tendance relative des matériaux de l'électrode à

perdre des électrons. Lorsque deux électrodes à l'état chargé sont connectées, les électrons circulent de l'anode à la cathode à travers le circuit externe, tandis que les ions positifs dissociés se déplacent de l'anode à travers l'électrolyte pour réagir avec la cathode. La force motrice de la réaction est l'énergie libre de Gibbs de la réaction (ΔG_r^0), qui peut être exprimée comme suit :

$$\Delta G_r^0 = \sum \Delta G_f^0(\text{produit}) - \sum \Delta G_f^0(\text{réactif}) \quad (3)$$

Où ΔG_f^0 est l'énergie libre de Gibbs de la formation.

La tension de la réaction électrochimique peut être exprimée comme suit :

$$E_{\text{cell}} = \frac{\Delta G_r^0}{-zF} \quad (4)$$

Où E_{cell} est la tension de la cellule, F est la constante faradique et z est le nombre de charges.

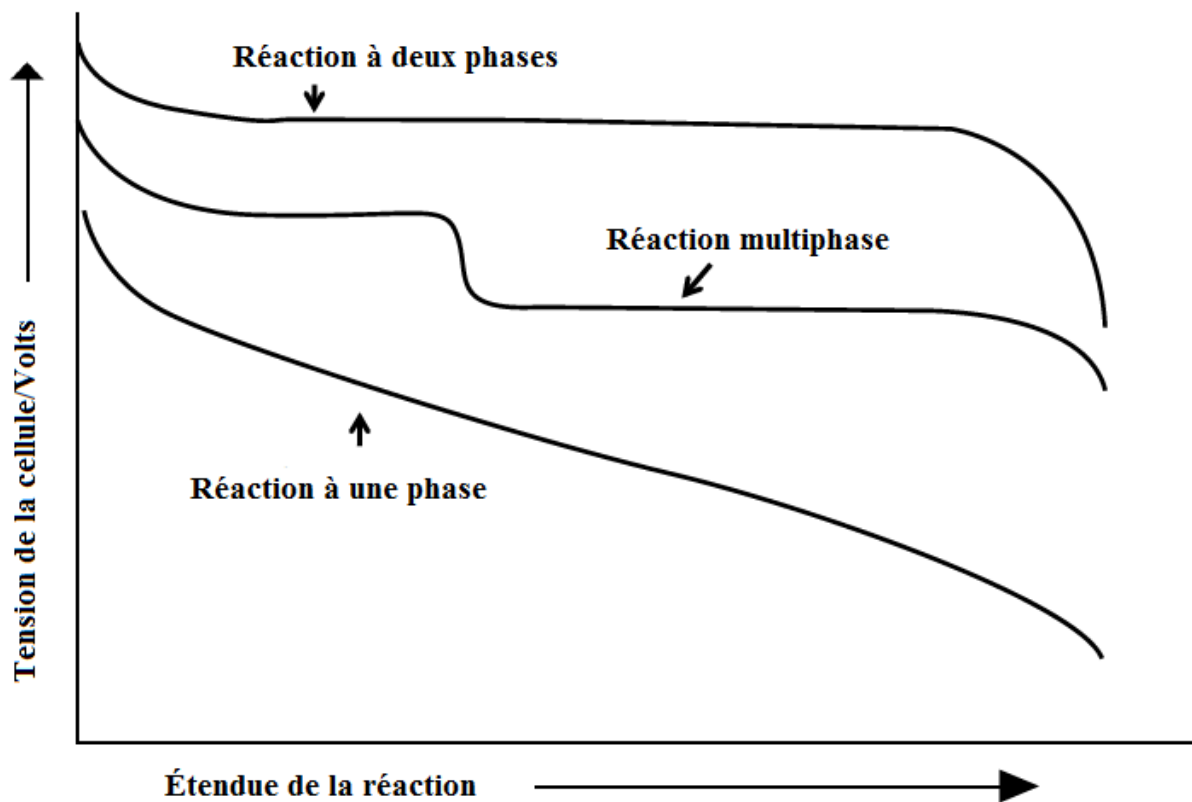
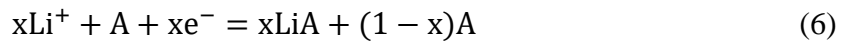


Figure 5 : Représentation schématique des différents types de courbes de décharge [46]

Le profil de tension de la réaction à l'électrode est lié au nombre des phases impliquées. Prenons, par exemple, une réaction simple entre le lithium et l'espèce A. Pour une réaction monophasée :



Si le lithium forme une solution solide avec A, la composition de Li_xA change constamment au fur et à mesure de la réaction, donc l'énergie libre de Gibbs de la réaction entre Li et Li_xA change également. Par conséquent, la tension varie avec l'ampleur de la réaction. Si la réaction du Li avec A conduit à la formation d'une nouvelle phase LiA, alors la réaction devient :



L'énergie libre de Gibbs de la réaction ΔG_f^0 est toujours égale à l'énergie libre de Gibbs de la formation de LiA, $\Delta G_f^0(\text{LiA})$ donc le potentiel d'électrode est constant. Pour une réaction multi phase, il s'agit simplement de la combinaison des mécanismes réactionnels en fonction de l'étape de la réaction.

Une autre considération importante de la tension de l'électrode est liée à son rôle dans la cathode et l'anode. Pour un matériau cathodique, la tension doit être aussi élevée que possible et l'inverse pour un matériau anodique. Le lithium métal présente le potentiel le plus faible à -3,04 V (par rapport à l'électrode d'hydrogène standard) pour l'anode des batteries Li-Ion et il est donc très intéressant pour les batteries à haute densité d'énergie. Les matériaux cathodiques à tension faible de lithiation et les matériaux anodiques à tension élevée de lithiation sont moins utiles pour les applications des batteries, car la tension de cellule résultante pourrait être très faible. En règle générale, les charges stockées entre 0 et 1,5 V sont considérées comme de l'énergie de faible qualité, tandis qu'une tension de cellule comprise entre 3,5 et 5,5 V permet de stocker de l'énergie de haute qualité [46].

I.4.3 Densité énergétique

L'énergie spécifique (densité d'énergie gravimétrique Wh/kg) d'une cellule électrochimique est l'intégration de la plage de tension et de la capacité spécifique.

$$\text{Énergie} = \int E dC \quad (7)$$

L'énergie spécifique est un paramètre important pour les applications pratiques car elle détermine le travail utile d'une cellule électrochimique.

I.4.4 Puissance

La densité de puissance d'une cellule électrochimique est généralement calculée en multipliant le courant par la tension. Un paramètre important est le taux C, c'est-à-dire le courant utilisé pour charger/décharger les batteries. Un C correspond au courant nécessaire pour charger complètement sa capacité nominale en une heure lors d'un cycle galvanostatique. Pour d'autres densités de courant, le taux de courant est exprimé par C/R, où R est le nombre d'heures nécessaires pour charger/décharger complètement la batterie. Les essais sur des batteries à différents taux de courant C permet d'évaluer leur cinétique.

I.5 Pourquoi la batterie Li-Ion ?

La batterie Li-Ion est actuellement l'une des batteries rechargeables les plus populaires parmi la population. Au cours des dernières années, elle a pu atteindre une grande popularité parmi les appareils électroniques portables et les secteurs des transports. Sa chimie présente une excellente caractéristique de charge et un niveau de tension élevé. Pour cela, elle est devenue le premier choix pour différents secteurs des batteries. La batterie Li-Ion nécessite moins d'entretien, par rapport aux autres batteries secondaires, elle a moins d'effets de mémoire et un faible taux de décharge. La batterie Li-Ion n'a pas besoin de se charger longtemps pour prolonger sa durée de vie. En raison de sa grande longévité, l'acheteur n'a pas non plus besoin de dépenser de l'argent pour changer fréquemment la batterie, cette qualité est

importante pour les applications de transport. Les secteurs du transport sont très dépendants des batteries Li-Ion, pourtant, pour gagner la compétition contre les voitures à essence, tous les véhicules électriques ont besoin d'un système de gestion de batterie (BMS) adapté pour la sécurité et des techniques de recharge rapide pour gagner du temps.

Pour réduire de manière significative les émissions de CO₂, le principe de zéro émission, les véhicules doivent remplacer les moteurs à combustion interne dans l'industrie automobile. Les batteries Li-Ion sont devenues un élément important dans la réalisation des ainsi que dans les véhicules électriques hybrides et les véhicules électriques rechargeables. En tant qu'énergie renouvelable les sources d'énergie se multiplient dans le monde entier, les systèmes de stockage d'énergie à haut rendement comme la centrale électrique autonome joueront un rôle plus important à l'avenir [32].

I.5.1 Principe de la batterie Li-Ion

Une batterie Li-Ion rechargeable est composée de deux électrodes (anode et cathode), d'un électrolyte, d'un séparateur et de deux collecteurs de courant (positif et négatif). Les batteries Li-Ion ne peuvent pas être utilisées directement après l'assemblage. Une batterie Li-Ion reste déchargée au tout début. Pour cet état de décharge, le Li-Ion reste lié à la cathode dans cet état et il ne peut pas produire d'électricité. Il doit être chargé avant sa première utilisation. Lorsqu'il se branche pour une charge, un électron chargé négativement commence à se séparer de la cathode, c'est ce qu'on appelle l'oxydation. Pendant le temps de charge, le même nombre d'ions lithium chargés positivement se dissout dans la solution d'électrolyte et essaie de maintenir l'équilibre des charges dans la cathode [47]. Ce processus se poursuit jusqu'à ce qu'ils atteignent l'anode, après les ions lithium restent dans lui.

Pendant la décharge, les ions lithium quittent l'anode et se dirigent vers la cathode via l'électrolyte. En même temps, les électrons qui sont restés dans l'anode, se déplacent à travers

le fil électrique externe. En suivant cette procédure, la charge et la décharge se poursuivent. En fonction de la chimie de la cellule et des différentes techniques de charge, cette charge et cette décharge peuvent prendre beaucoup de temps et, dans les mêmes cas, la capacité de la cellule n'est pas durable pendant longtemps. La figure 6 montre le mécanisme de charge et de décharge de la batterie Li-Ion [48].

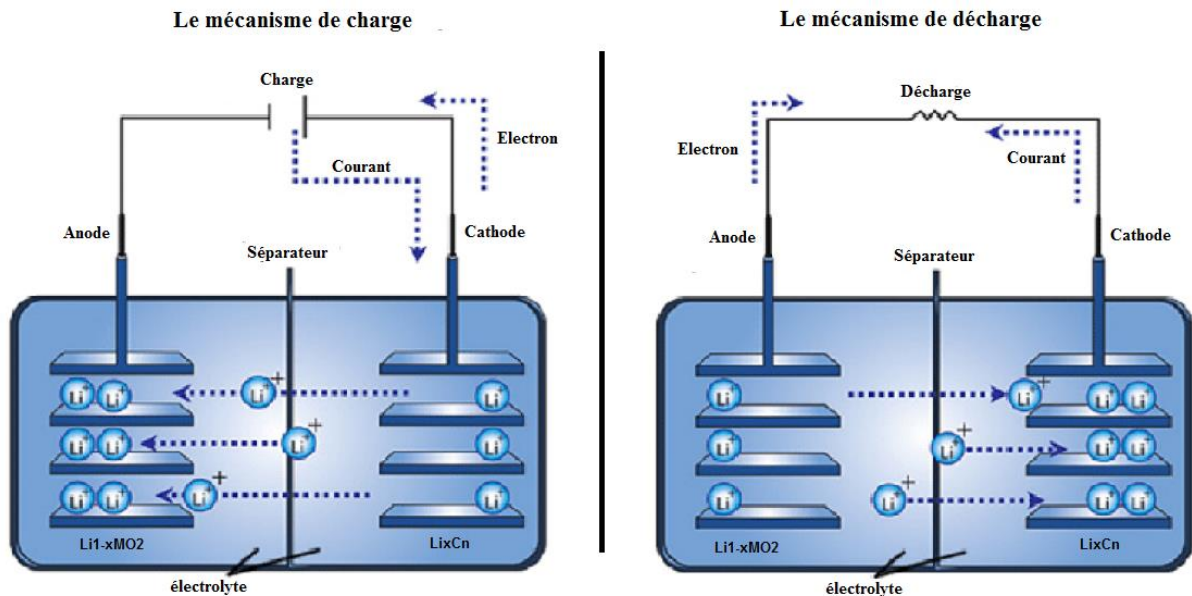
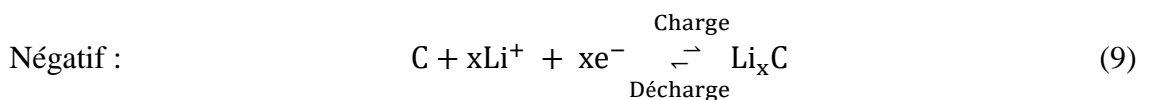
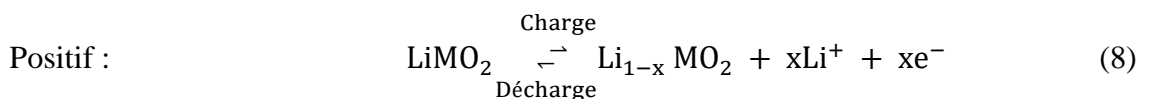
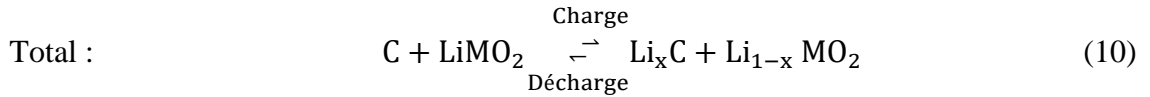


Figure 6: Mécanisme de chargement et de déchargement des batteries Li-Ion [48]

La figure 6 présente les schémas d'une batterie Li-Ion typique, composée de graphite comme anode et d'un oxyde de lithium métallique comme cathode. En chargeant les ions de lithium intercalés dans l'électrode négative, le matériau positif est oxydé, tandis que le matériau négatif est réduit. Lors de la décharge, l'inverse se produit [44], les réactions de l'électrode et la réaction globale peuvent être observées en haut.





I.5.2 Électrode positive (Cathode)

Il existe différents types d'électrodes positives. L'oxyde de lithium-cobalt est un matériau d'électrode positive réputé, et c'est également le premier matériau utilisé comme électrode positive. La source d'oxyde de lithium-cobalt est minime. Pour la limitation de ce matériau, il est très coûteux. Ce coût augmente également le prix des batteries. De plus, il a une stabilité inférieure à haute température, et ce matériau est très toxique [49]. Pour résoudre ce problème, le chercheur [49] a essayé de développer d'autres matériaux qui peuvent être utilisés comme électrode positive. L'oxyde de lithium-nickel-manganèse-cobalt a contribué à un moment donné à résoudre ce problème. Ces cellules sont fabriquées avec une cathode contenant un tiers de nickel, un tiers de manganèse et un tiers de cobalt, mais le rapport peut varier en fonction des formules "secrètes" du fabricant [47]. Elle présente une excellente tolérance thermique, est moins coûteuse et a une capacité spécifique élevée [49]. Une autre électrode positive disponible est le phosphate de fer et de lithium. Les batteries Li-phosphate de fer sont les mêmes que les batteries Li-oxyde de cobalt. Les matériaux de l'anode et de l'électrolyte sont similaires. La principale différence est que la cathode en dioxyde de cobalt lithium est remplacée par le phosphate de fer lithium, plus constant. En général, dans la batterie complètement chargée, les ions de lithium quittent la cathode. Le phosphate de lithium-ion a une excellente stabilité thermique, ce qui est très important pour la sécurité. Ses caractéristiques en font le bon choix pour les véhicules électriques et les outils électriques portables. Il peut se décharger et se charger plusieurs fois. Néanmoins, le phosphate de lithium-ion a une densité énergétique inférieure à celle d'une batterie à oxyde de cobalt et de

lithium et un taux d'autodécharge plus élevé [49]. Le tableau 5 présente des matériaux précieux pour les électrodes positives et leurs caractéristiques.

Tableau 5 : Matériaux d'électrode positive

| Matériaux | NCA | NMC | LFP | LMO | LCO |
|---|-------------------------------------|---------------------------------|--|--|---|
| Capacité de masse (mAh/g) | 279 | 280 | 170 | 148 | 274 |
| Capacité volumique (mAh/cm ³) | 1284 | 1333 | 589 | 596 | 1362 |
| Plage de tension (V) | 3.0 – 4.25 | 2.6 – 4.3 | 2.0 - 4.0 | 3.5 – 4.3 | 3.6 – 4.85 |
| Coût | Moyen | Moyen | Faible | Faible | Haut |
| Avantages | Haute capacité et haute tension | Haute tension, sécurité modérée | Excellente sécurité, abondance de Fe, faible toxicité | L'abondance de Mn, la haute tension, la sécurité modérée | Performance |
| Inconvénient | Sécurité, limitation du Ni et du Co | Limitation du Ni et du Co | Faible tension et capacité, faible densité énergétique | Durée de vie limitée, faible capacité | Sécurité, Limitation du Co, Faible capacité |

I.5.3 Électrode négative (Anode)

Différents types de matériaux peuvent être utilisés pour l'électrode négative. Parmi eux, si l'on compare le coût et la disponibilité, le graphite est l'électrode négative la plus populaire. L'électrode négative est fortement confrontée au problème de la dendrite. Le graphite présente moins des problèmes de dendrite que les autres. Il possède également une tension de travail adaptée, ce qui le rend plus approprié pour les batteries Li-Ion. Le dioxyde de lithium-titane comme électrode négative a suscité un grand intérêt de la part des fabricants et des universités

ces dernières années. Il présente une grande stabilité thermique. Dans l'industrie des véhicules électriques, la stabilité thermique est essentielle. En même temps, il a une capacité de charge rapide, ce qui le rend plus populaire dans l'industrie des transports. Le tableau 6 présente des matériaux précieux pour les électrodes négatives et leurs caractéristiques.

Tableau 6 : Matériaux d'électrode négative

| Matériaux | Graphite (LiC ₆) | LTO (Li ₄ Ti ₅ O ₁₂) | Si (LiSi ₂) |
|---|---|---|-------------------------|
| Capacité de masse (mAh/g) | 372 | 175 | 4200 |
| Capacité volumique (mAh/cm ³) | 837 | 613 | 9786 |
| Plage de tension (V) | 1.5 – 0.01 | 2.0 – 1.0 | 1.2 – 0.01 |
| Variation en volume (%) | 10% | 0.20% | 270% |
| Coût | Moyen | Haut | Faible |
| Avantages | Longue durée de vie | Bon cyclisme et efficacité | Haute capacité |
| Inconvénient | Une densité énergétique relativement faible | Haute tension, faible capacité (faible densité énergétique) | Augmentation du volume |

I.5.4 Électrolyte

Il existe différents types d'électrolytes, tels que l'électrolyte liquide, l'électrolyte solide et l'électrolyte en gel. Généralement, les batteries secondaires utilisent des électrolytes liquides pour leurs milieux de déplacement des ions. Les ions lithium ne peuvent pas se déplacer directement d'une électrode à l'autre. Dans ce cas, les électrolytes jouent un rôle essentiel. L'électrolyte liquide présente cependant deux problèmes importants, à savoir une conductivité moindre et une inflammabilité robuste. Pour les électrolytes solides, les sels de lithium sont réunis en un matériau polymère et, après plusieurs étapes d'ingénierie, on obtient une barrière. Cette dernière peut également être utilisée directement comme séparateur. Les

électrolytes solides ont une conductivité moindre à température ambiante. Il faut parfois une chaleur élevée pour que la batterie soit active. Les tout premiers électrolytes solides ont été introduits pour les batteries à électrode négative. Aujourd'hui, ils sont utilisés pour les batteries Li-Ion. Les électrolytes gélifiés sont obtenus en dissolvant une membrane solide dans un solvant [49]. Par rapport aux électrolytes solides, les électrolytes gélifiés offrent un meilleur contact avec les électrodes et une conductivité suffisante à température ambiante. Cependant, la résistance de contact des cellules reste plus élevée [49].

I.5.5 Séparateur et Collecteur

Le séparateur fait partie intégrante de la cellule. Il s'agit d'une feuille de polyéthylène et de polypropylène mono ou multicouche qui permet d'isoler les deux électrodes. Certaines qualités sont essentielles pour un séparateur adapté. Tout d'abord, il doit avoir une bonne résistance pour séparer le contact entre deux électrodes. Ensuite, il faut avoir une bonne conductivité ionique et une conductivité électronique moindre. Là encore, la neutralité chimique est vitale pour lui. Il doit être neutre pendant toute réaction. Le collecteur de courant est responsable du transfert des électrons du matériau actif de l'électrode vers le circuit externe. L'aluminium est un bon candidat pour cela, très léger et un bon conducteur électrique. Le cuivre est également un excellent conducteur électrique. C'est pourquoi le choix se présente souvent comme suit : un collecteur en aluminium pour l'électrode positive et du cuivre pour l'électrode négative [49].

I.6 Mécanismes de vieillissement de la batterie Li-Ion

La demande des batteries Li-Ion est en augmentation constante. Avec l'augmentation de la production des appareils mobiles et des véhicules électriques, l'intérêt pour le développement des batteries Li-Ion a également augmenté. Le principal obstacle à ce développement est le mécanisme de vieillissement et la dégradation de la capacité de la

batterie Li-Ion. L'identification des mécanismes de vieillissement et de dégradation de la capacité est très compliquée. Différents types des paramètres environnementaux et d'utilisation des batteries ont un impact important sur le vieillissement et la dégradation de la capacité des batteries. Comme la batterie Li-Ion est fabriquée à partir des différents types de composants, nous donnons un bref aperçu de la façon dont chaque élément joue un rôle dans la dégradation de la capacité de la batterie.

Le vieillissement d'une batterie Li-Ion est principalement mesuré par sa perte de capacité (la capacité à stocker de l'énergie) et par l'augmentation de son impédance (qui entraîne une réduction de la capacité de la batterie Li-Ion à accepter/fournir de l'énergie) [24]. Ces évolutions se produisent indépendamment du fait que la batterie Li-Ion soit utilisée ou non et dans ce dernier cas, le vieillissement peut être qualifié de vieillissement de calendrier. De plus, le vieillissement peut être accéléré par des facteurs tels que le niveau moyen de SOC tout au long de la vie de la batterie [50], les taux de courant utilisés et la température ressentie pendant l'utilisation [51]. Cependant, la dégradation d'une batterie Li-Ion peut se produire dans n'importe quelle partie de la batterie, lors de l'utilisation, les parties soumises à la dégradation et les plus importantes sont les électrodes. À partir des deux électrodes, le vieillissement est généralement plus sévère dans l'électrode négative, et c'est pourquoi les mécanismes de vieillissement de cette électrode sont les plus étudiés. Les deux principaux mécanismes de vieillissement sont la formation de l'interface des électrolytes solides (SEI) et le placage de lithium qui sont brièvement décrits ci-dessous.

I.6.1 Formation de l'interface des électrolytes solides

La formation de l'interface des électrolytes solides se produit principalement dans l'électrode négative, surtout si elle est en graphite [52]. Elle se produit parce que le graphite a un faible potentiel par rapport au lithium, un facteur qui augmente l'énergie spécifique globale

de la batterie, mais qui rend l'électrolyte sujet à des réactions de décomposition [53]. Ces réactions consomment le lithium en le transformant en une couche d'électrolyte solide à la surface du graphite. Ce processus est chronique puisque les réactions de décomposition ne sont pas réversibles. Par conséquent, le lithium est perdu de façon permanente, ce qui entraîne une réduction de la capacité de la batterie Li-Ion. Cependant, certains effets secondaires se produisent. Au fur et à mesure que la couche d'interface des électrolytes solides grandit, il devient plus difficile pour une couche d'interface des électrolytes solides supplémentaires de se former. En effet, la surface de l'électrode devient imperméable à l'électrolyte, ce qui réduit les réactions de décomposition entre l'électrolyte et le graphite. Par conséquent, les courts circuits entre les électrodes positives et négatives sont moins probables dans ces parties de la batterie Li-Ion. La couche d'interface des électrolytes solides est perméable aux ions lithium, ce qui permet d'utiliser le lithium cyclable restant pour son objectif initial [54] [55]. Toutefois, lors de la charge et de la décharge de la batterie Li-Ion, le lithium s'interpose et se désinterpose dans les électrodes respectives. Cela augmente et réduit le volume des couches de graphite et peut provoquer la couche d'interface des électrolytes solides à se fissurer. À travers les fissures d'interface des électrolytes solides, l'électrolyte peut atteindre la graphite qui, comme expliqué précédemment, peut consommer du graphite plus fonctionnel lithium et créer d'autres couches d'interface des électrolytes solides [54] [55]. C'est l'une des raisons pour lesquelles les batteries Li-Ion ne sont pas très tolérantes à l'égard des abus. Le processus de formation de la couche d'interface des électrolytes solides est renforcé par l'augmentation de la température [56].

I.6.2 Placage de Lithium

Comme la formation d'interface des électrolytes solides, le placage de lithium affecte principalement l'électrode négative. Le placage de lithium se produit pendant le processus de charge lorsque les ions de lithium tentent de s'intercaler dans les couches de graphite. Il y a deux raisons principales pour cela. L'un d'eux est lié à l'intensité de la charge, à savoir lorsqu'une batterie Li-Ion et les ions de lithium sont chargés avec un courant élevé et ils sont obligés de se déplacer à une vitesse taux de réaction (réaction redox lors de l'intercalation) puis le taux de réaction qui ils peuvent être physiquement intercalés. Ces intercalations non réussies résultent dans les atomes de lithium métalliques accumulés (ions de lithium unifiés avec les électrons mais non intercalés) à la surface du graphite [54]. Cette situation représente une principale difficulté résidée dans les applications où les batteries Li-Ion sont soumises à des charges rapides. L'autre situation dans laquelle le placage de lithium se produit est lorsque les batteries Li-Ion sont chargées à des températures basses (par exemple des températures inférieures à zéro) [57]. À basse température, le potentiel du graphite par rapport au lithium est inférieur au potentiel nécessaire pour que les réactions d'oxydoréduction soient réussies. Là encore, en diminuant le taux de réussite dès les réactions d'oxydoréduction (ions lithium unis aux électrons et intercalés), les atomes de lithium métalliques s'accumulent à la surface du graphite. Une fois convertis en lithium métallique, le lithium ne peut pas être séparé en ions lithium et des électrons, ce qui entraîne une réduction de la capacité de la batterie Li-Ion. De plus, les en s'accumulant à la surface de l'électrode négative, le lithium peut se développer dans une dendrite qui peut percer le séparateur, provoquer un court-circuit électrique et entraînant un emballement thermique potentiellement dangereux [58]. Ce problème est l'un des principaux défis que doivent relever les applications nécessitant l'utilisation des batteries Li-Ion à des températures inférieures à zéro sont confrontées.

I.6.3 Électrode positive (Cathode)

Sur la base d'observations des différentes ou plusieurs utilisations des batteries, il a été constaté que les électrodes positives présentent des changements moins importants que les électrodes négatives [26]. Avec le temps, la matière active de l'électrode cathodique subit une certaine altération. Une couche d'interface des électrolytes solides se forme sur l'électrode, mais pour la haute tension de la cathode, elle est devenue difficile à détecter. Dans l'ensemble, certains changements critiques peuvent se produire dans l'électrode positive, et ils sont : la décroissance de la masse active, la dégradation de l'électrolyte et la formation d'une interface d'électrolyte solide. Tous ces changements jouent un rôle essentiel dans la dégradation des capacités [50].

I.6.4 Électrode négative (Anode)

Le graphite, le carbone, le titanate et le silicium sont des matériaux actifs pertinents pour l'électrode négative. Parmi ceux-ci, le graphite est un matériau plus courant [50]. Lors de la réaction de l'électrolyte avec le graphite, une couche passive solide se forme sur l'anode. Lors de la première charge, cette couche solide se forme naturellement sur l'anode. Cette couche solide est connue sous le nom d'interface d'électrolyte solide [59]. La formation de l'interface des électrolytes solides dépend fortement des matériaux actifs, de l'électrolyte, du solvant, du sel conducteur, des additifs dans l'électrolyte et de la procédure de formation de la couche. Elle se forme au tout début de tout cycle et crée une barrière entre l'électrolyte et les électrodes. Il joue un rôle essentiel dans l'anode, Il essaie de sauver l'anode de toute détérioration possible et aide à réduire la réduction de l'électrolyte [22]. L'interface des électrolytes solides est une couche solide, mais il devient instable lorsqu'une batterie fonctionne au-dessus de la plage de fonctionnement électrochimique. Il est perméable au lithium-ion mais pas aux autres composants de l'électrolyte [23]. Lorsqu'un solvant

quelconque interagit avec le graphite, il entraîne la décomposition de l'électrode en graphite. Pendant ce temps, un gaz est formé à partir de la réaction. Ce gaz brise la couche d'interface des électrolytes solides et étend la surface de cette couche. Cette expansion de la couche d'interface des électrolytes solides augmente l'impédance et diminue la surface active de l'anode pour la réaction. Ce comportement de l'anode réduit la capacité de la batterie Li-Ion.

En outre, la formation d'interface des électrolytes solides, le placage de lithium a également lieu sur l'anode. D'après la procédure de charge que nous connaissons, les ions de lithium voyagent de cathode en anode et se stockent rapidement dans le matériau de l'anode. Lors d'une surcharge ou pour un taux de charge élevée, la basse température et d'autres conditions induisent une polarisation élevée de l'anode. En conséquence, le potentiel anodique atteint le niveau-seuil du placage de lithium, et le placage d'ions lithium commence sur l'anode pour ce placage électrolytique [25]. Le lithium métallique est déposé dans l'électrolyte. Il peut facilement consommer du lithium actif et peut constituer une barrière pour que le lithium actif entre en contact avec l'anode. Le passage de ce placage devient la raison de l'évanouissement de la capacité, et parfois la zone devient si grande qu'elle crée des courts circuits internes. La figure 7 montre la formation d'interface des électrolytes solides et le placage de lithium [50].

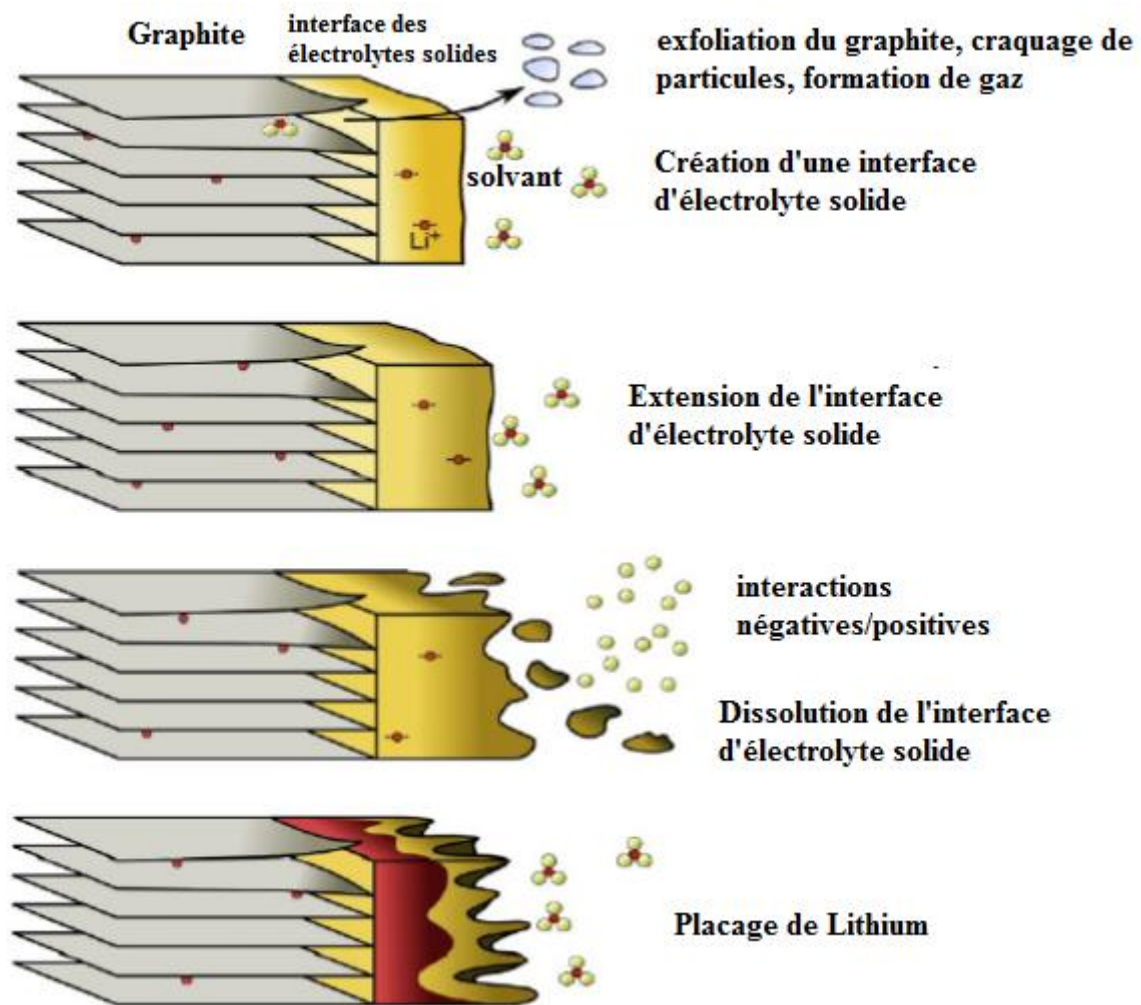


Figure 7 : Formation d'une interface d'électrolyte solide et dépôt de lithium [50]

I.6.5 Électrolyte

L'électrolyte intervient dans la réaction de l'électrode positive et négative. La formation d'interface des électrolytes solides pour les deux électrodes se produit en présence d'un électrolyte. Pendant le cycle de charge et de décharge, une grande quantité de sel conducteur est décomposé. Les changements de résistance dépendent fortement de la concentration de sel conducteur [49]. L'oxydation de l'électrolyte à l'électrode positive et la réduction à l'électrode négative a toutes deux un comportement opposé avec une consommation cyclique d'ions lithium. Lorsque la réaction a lieu dans l'électrolyte, le produit gazeux se libère dans

l'électrolyte. Lorsque cela se produit, les électrolytes ne peuvent pas jouer un rôle approprié dans le maintien de la capacité, et la capacité commence à diminuer.

I.6.6 Séparateur

Le séparateur est un autre composant essentiel des batteries Li-Ion. Electrochimiquement, le séparateur reste inactif pendant le cycle. Comme il reste à l'intérieur de la batterie, pendant la décomposition de l'électrolyte, avec le temps, les pores du séparateur commencent à se boucher. Pour cela, la surface active de l'électrode commence à diminuer, et en même temps, la résistance de la batterie commence à augmenter. Le taux élevé de cyclage du courant crée un impact important sur les feuilles du collecteur de courant. Lors du cycle, les matières actives commencent à se décomposer [49]. Il en résulte une mauvaise distribution du courant et un placage de lithium-ion. En outre, une contrainte excessive déforme la batterie, et la connexion entre l'électrolyte et le séparateur devient faible. Dans l'ensemble, la capacité de la batterie se dégrade.

I.6.7 Vieillessement calendrier et cyclique

Deux termes importants dans le domaine du vieillissement de la batterie sont le vieillissement calendaire et le vieillissement cyclique. Le vieillissement de la batterie Li-Ion dans des conditions non opérationnelles est connu sous le nom de vieillissement calendaire et dans des conditions opérationnelles, le vieillissement est connu sous le nom de vieillissement cyclique [60]. Dans les conditions de fonctionnement et de non-fonctionnement, la réduction et l'oxydation entre les électrolytes et les électrodes se poursuivent. Le vieillissement calendaire est lent mais dépend fortement de la température, de l'état de charge (SOC) et du temps. Le vieillissement du cycle dépend du courant de charge et de décharge, de la profondeur du cycle, de la tension de coupure, du courant de sortie. Dans les deux cas, la dégradation de la capacité se poursuit [49].

I.7 Effet mémoire

L'effet mémoire touche particulièrement les batteries Nickel-Cadmium utilisées principalement dans les téléphones portables. Le principe est que lorsque l'on recharge une batterie sans jamais la laisser se décharger totalement, on finit par perdre la capacité non utilisée. Exemple, j'utilise généralement 75% de ma batterie. Au bout d'un certain temps, la batterie aura perdu 25% de sa capacité. Une décharge complète avec un appareil approprié peut rendre réversible ce phénomène.

I.8 Taux de charge C de batterie Li-Ion

La charge et le décharge d'une batterie est mesurée en taux de C. La plupart des batteries portables, à l'exception de l'acide de plomb, sont évalués à 1C. Une décharge de 1C tire un courant égal à la capacité nominale. Par exemple, une batterie 1000mA/h offre une puissance de 1000mA pendant une heure en cas de déversement au taux de 1C. La même batterie déchargée à 0.5C fournit 500mA pendant deux heures. À 2C, la batterie fournit 2000mA même pour 30 minutes. 1C est souvent désigné comme une décharge d'une heure, un 0.5C serait une heure à deux, et un 0.1C une décharge de 10 heures.

I.9 Modélisation électrique d'une batterie Li-Ion

En général, le comportement électrique des batteries Li-Ion est représenté en utilisant des circuits électriques équivalents [61]. La sélection exacte des composants appartenant au circuit électrique équivalent dépend de la région de fréquence étudiée pour les batteries Li-Ion [62], [63]. Parmi les nombreux circuits possibles, la double polarisation le modèle de circuit, tel qu'il est illustré à la figure 8, il est l'un des plus utilisés. Le modèle de circuit à double polarisation peut représenter une large gamme de fréquence puisqu'il est composé des éléments de circuit RLC, à savoir : une résistance (R_0) en série avec un inducteur (L_1) et en série avec deux branches d'une résistance en parallèle avec un condensateur, (R_2, C_2) et ($R_3,$

C_3), respectivement. Afin de considérer le SOC d'une batterie Li-Ion, une source de tension ($E_{\text{Batterie Li-Ion}}$) est ajoutée au modèle de circuit. Le terme $E_{\text{Batterie Li-Ion}}$ n'est pas pris en compte dans un circuit de courant alternatif l'analyse.

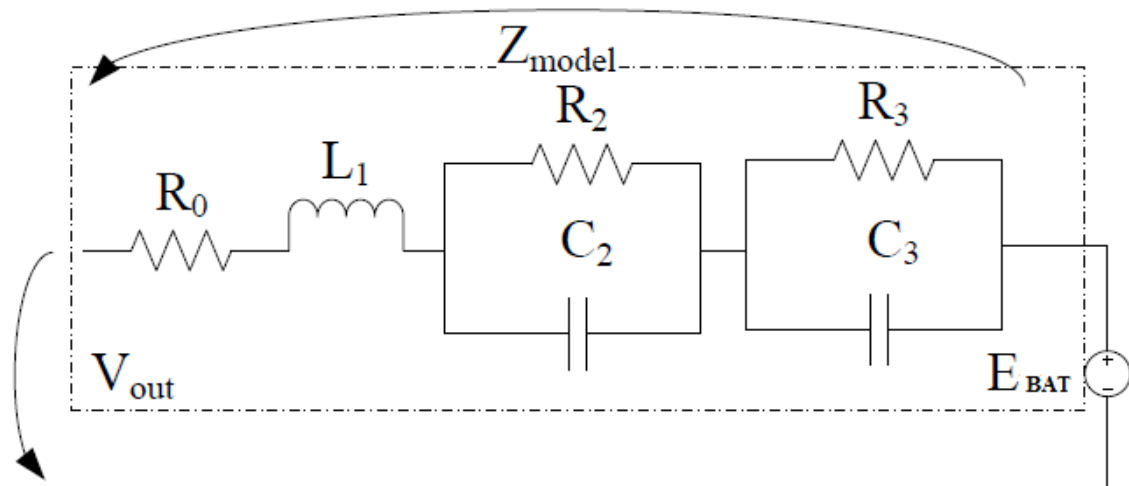


Figure 8 : Modèle de circuit à double polarisation

Les fonctions de transfert sont une autre représentation possible pour les batteries Li-Ion. Il est illustré dans l'équation suivante:

$$Z_{\text{model}}(s) \approx \frac{s^2 + n_1 s + n_0}{d_2 s^2 + d_1 s + d_0} \quad (11)$$

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, on a examiné les principes fondamentaux des batteries et surtout les batteries Li-Ion pour bien étudier leurs caractéristiques et spécifications. Au début un cadre historique de la batterie a été abordé brièvement. Ensuite, nous avons traité les différents types des batteries sur le marché et aussi on a expliqué certains termes fréquemment utilisés comme l'évaluation de la capacité spécifique, l'efficacité de Coulomb, la durée de vie et la tension de la batterie.

Le prochain chapitre présente en détail les différentes techniques de charge des batteries Li-Ion disponibles.

Chapitre II : Différentes méthodes existant pour charger une batterie Li-Ion

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| II.1 Introduction | 37 |
| II.2 Méthodes de charge simples | 37 |
| II.2.1 Méthode de charge à courant constant | 37 |
| II.2.2 Méthode de charge à tension constante | 38 |
| II.3 Méthodes de charge optimisées | 38 |
| II.3.1 Méthode de chargement à courant constant-tension constante | 38 |
| II.3.2 Méthode de chargement à courant constant multi-étapes | 42 |
| II.3.2.1 Contrôle flou (Fuzzy Control) | 45 |
| II.3.2.2 Méthode de Taguchi | 46 |
| II.3.2.3 Système de colonies de fourmis (Ant Colony System) | 46 |
| II.3.3 Méthode de chargement par impulsion | 49 |
| II.3.4 Méthode d'augmenter la charge | 50 |
| II.4 Méthodes de charge basée sur les modèles | 50 |
| II.4.1 Modèle de vieillissement électrothermique | 51 |
| II.4.2 Modèle électrochimique | 51 |
| II.4.3 Modèle Courant Alternatif AC | 51 |
| II.5 Conclusion | 52 |

II.1 Introduction

Différentes techniques de charge ont été développées pour améliorer les batteries Li-Ion rechargeables. Les techniques de chargement des batteries Li-Ion ont un rapport direct avec leur durée de vie. Toutes ces techniques de charge peuvent être divisées en deux groupes essentiels. Il s'agit des techniques de charge simples et des techniques de charge optimisées. La charge simple à courant constant et la charge simple à tension constante sont les deux systèmes de charge de la procédure de charge simple. Ces techniques de charge sont anciennes et ont un impact significatif sur la santé des batteries. Pour améliorer la technique de charge, différentes techniques de charge optimisée ont été développées. Les techniques de charge optimisée peuvent être différenciées en trois catégories importantes : les méthodes de charge basées sur la forme d'onde, les méthodes de charge basées sur le modèle et les méthodes de charge en courant alternatif. Dans ce chapitre, les techniques de charge disponibles sont brièvement examinées.

II.2 Méthodes de charge simples

II.2.1 Méthode de charge à courant constant

La méthode de charge à courant constant est un processus dans lequel vous devez maintenir le courant constant pendant toute la séquence de charge. Elle dépend fortement de la bonne estimation de l'état de charge (State Of Charge, SOC) [64]. Ce processus de charge est simple. Au cours de ce processus de charge, il est très facile de comprendre le courant de charge à partir du temps et de la capacité de chargement [64]. Cette technique dépend fortement de l'état de charge et, par conséquent, il arrive que la batterie soit surchargée, et parfois qu'elle reste sous-chargée. Ce comportement peut avoir un impact significatif sur la durée de vie de la batterie. Il peut dégrader plus rapidement la capacité de la batterie Li-Ion. Pendant ce processus de charge à courant constant, le courant constant reste entre 0,2C et 1C

[65]. Avec l'augmentation de l'état de charge, la limite de courant diminue inversement. Si le courant ne change pas avec l'augmentation de l'état de charge, alors les matériaux actifs de l'électrode commencent à réagir et à dégrader la capacité. Parfois, cette technique de charge utilise une charge de maintien (Trickle Charging, TC) qui aide la batterie à maintenir sa pleine charge.

II.2.2 Méthode de charge à tension constante

La méthode de charge à tension constante est une autre méthode de charge simple où, pendant toute la séquence de charge, une tension constante est appliquée. Pendant la charge à tension constante, la tension aux bornes de la batterie commence à augmenter, mais en même temps, le courant de charge commence à diminuer. Il existe des valeurs prédéfinies pour le courant de charge lorsqu'il s'arrête de charger. L'avantage de ce processus de charge est qu'il évite la surcharge. Cette technique de charge peut prolonger la durée de vie de la batterie. Au stade initial de la charge, l'état de charge reste faible, mais le niveau de courant reste élevé, ce qui a un impact significatif sur l'état des batteries Li-Ion [64].

II.3 Méthodes de charge optimisées

II.3.1 Méthode de chargement à courant constant-tension constante

Après avoir compris les avantages et les inconvénients des méthodes simples de charge à courant constant et à tension constante, les chercheurs ont exploré d'autres techniques de charges avancées combinant les deux à ces méthodes. En combinant les avantages potentiels des techniques à courant constant et à tension constante, ils ont introduit une nouvelle technique de charge appelée méthode à courant constant et tension constante (CC-CV). Pendant la charge CC-CV, un courant constant est appliqué pour charger la batterie jusqu'à ce que la tension de la batterie atteigne une valeur préétablie.

La tension de charge maximale est alors maintenue constante à la tension pré-réglée et le processus de charge s'arrête lorsque le courant de charge atteint le niveau de courant inférieur [66]. Dans la figure 9, nous pouvons voir les changements dans le graphique CC-CV [66]. Cette méthode de charge est indépendante du modèle de batterie, et elle est donc devenue la méthode de charge la plus répandue. Cette méthode présente une autre amélioration lorsque la technique de charge CC-CV ajoute la charge de maintien (TC) et la fin de charge (End Of Charge, EOC). C'est ce qu'on appelle la méthode de charge TC-CC-CV [67]. Les deux nouvelles étapes ne fonctionnent que dans des cas exceptionnels.

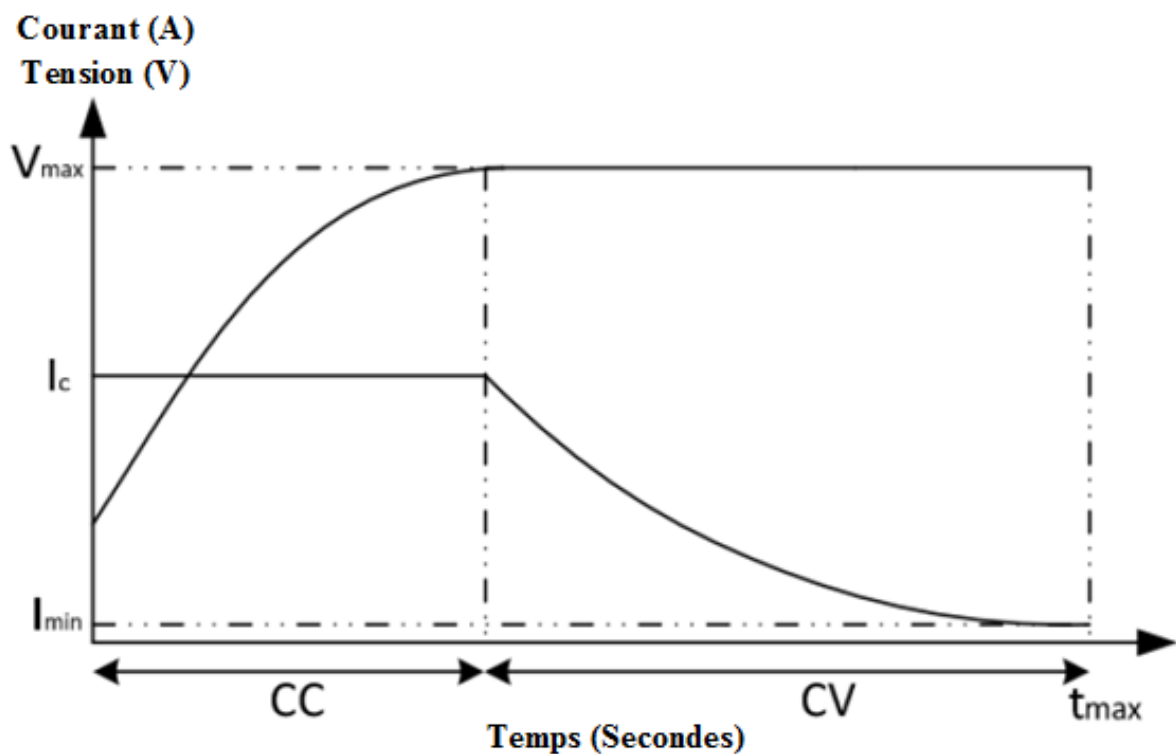


Figure 9 : Technique de chargement CC-CV [66]

Lorsque la batterie se décharge en profondeur, le mode de charge d'entretien est activé, et lorsque le courant de charge franchit une limite inférieure, le mode fin de charge est activé. En général, ce processus augmente le temps de cycle.

La figure 10 montre cet algorithme de charge [66]. Cet algorithme de charge comporte trois étapes critiques. Au tout début, il vérifie l'état de sécurité et mesure la température et la tension de circuit ouvert. Si la tension de circuit ouvert reste inférieure à la tension de coupure pré-réglée, le mode de maintien (TC) d'entretien est alors activé. Si la tension dépasse le mode de tension de coupure, pendant ce temps, le mode de courant constant CC est lancé. Il reste en fonction jusqu'à ce qu'il atteigne la tension maximale pré-réglée (V_{max}). Lorsqu'il touche le V_{max} , il passe en mode de la tension constante CV.

Parfois, ce mode se poursuit jusqu'à ce qu'il atteigne un temps de charge maximum prédéfini ou un niveau de courant de coupure minimum. Cette méthode est avancée mais n'est pas exempte d'effets secondaires. Parfois, des changements de tension perceptibles peuvent être constatés pendant la charge. En outre, la charge est longue. En raison de ces inconvénients, d'autres améliorations notables ont été introduites dans cette méthode.

La méthode de charge pré-accélérée, la méthode CC-CV à double boucle, la méthode CC-CV à logique floue, le processus de charge prévisible en gris et les techniques de charge à boucle verrouillage de phase sont quelques procédures améliorées dans le domaine de la procédure de charge CC-CV.

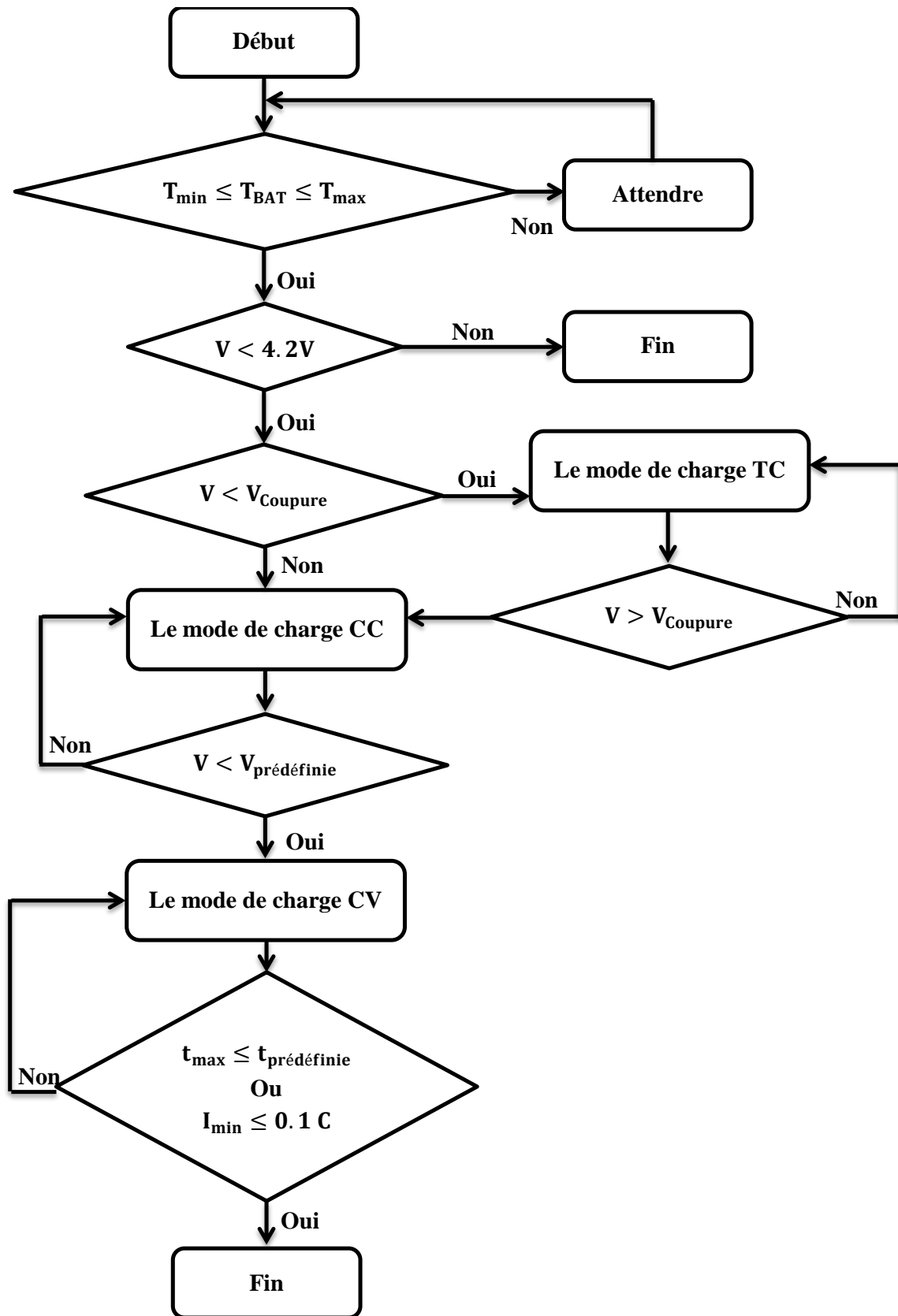


Figure 10 : Algorithme de charge CC-CV [66]

II.3.2 Méthode de chargement à courant constant multi-étapes

Pendant la charge CC-CV, la phase CV prend beaucoup de temps pour atteindre la valeur prédéfinie souhaitée. Pour résoudre cette difficulté et maintenir la qualité sanitaire de la batterie, différentes techniques de charge sont introduites. La charge à courant constant multi-étapes est une de ces techniques. Pour une charge rapide, il est essentiel d'augmenter le niveau de courant, mais un courant élevé peut augmenter la tension aux bornes de la batterie. Dans la charge à courant constant multi-étapes, cette difficulté peut être résolue, un courant de charge élevé peut être appliqué pendant la charge. La charge à courant constant multi-étapes comporte plusieurs étapes de courant de charge. Au tout début, le courant préréglé est utilisé pour la charge, ce courant de charge se poursuit jusqu'à ce qu'un niveau de tension prédéfini soit atteint. Ensuite, le niveau du courant de charge change et ce changement entre le courant et la tension reste pendant quatre à cinq étapes [66]. La méthode de charge commence par un courant très élevé et ce niveau de courant diminue à chaque étape, les figures 11 et 12 montrent le graphique et l'algorithme de la charge à courant constant multi-étapes [66].

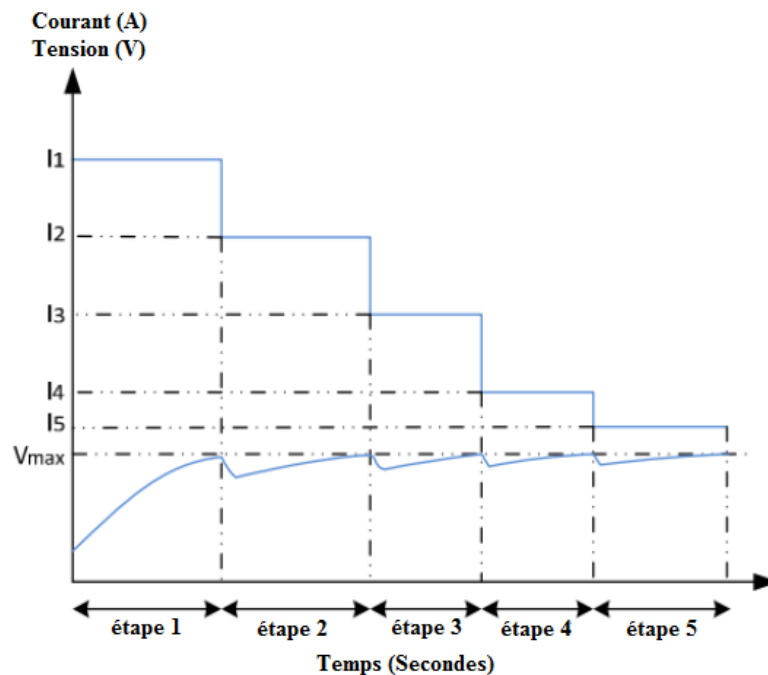


Figure 11 : Technique de charge à courant constant multi-étapes [66]

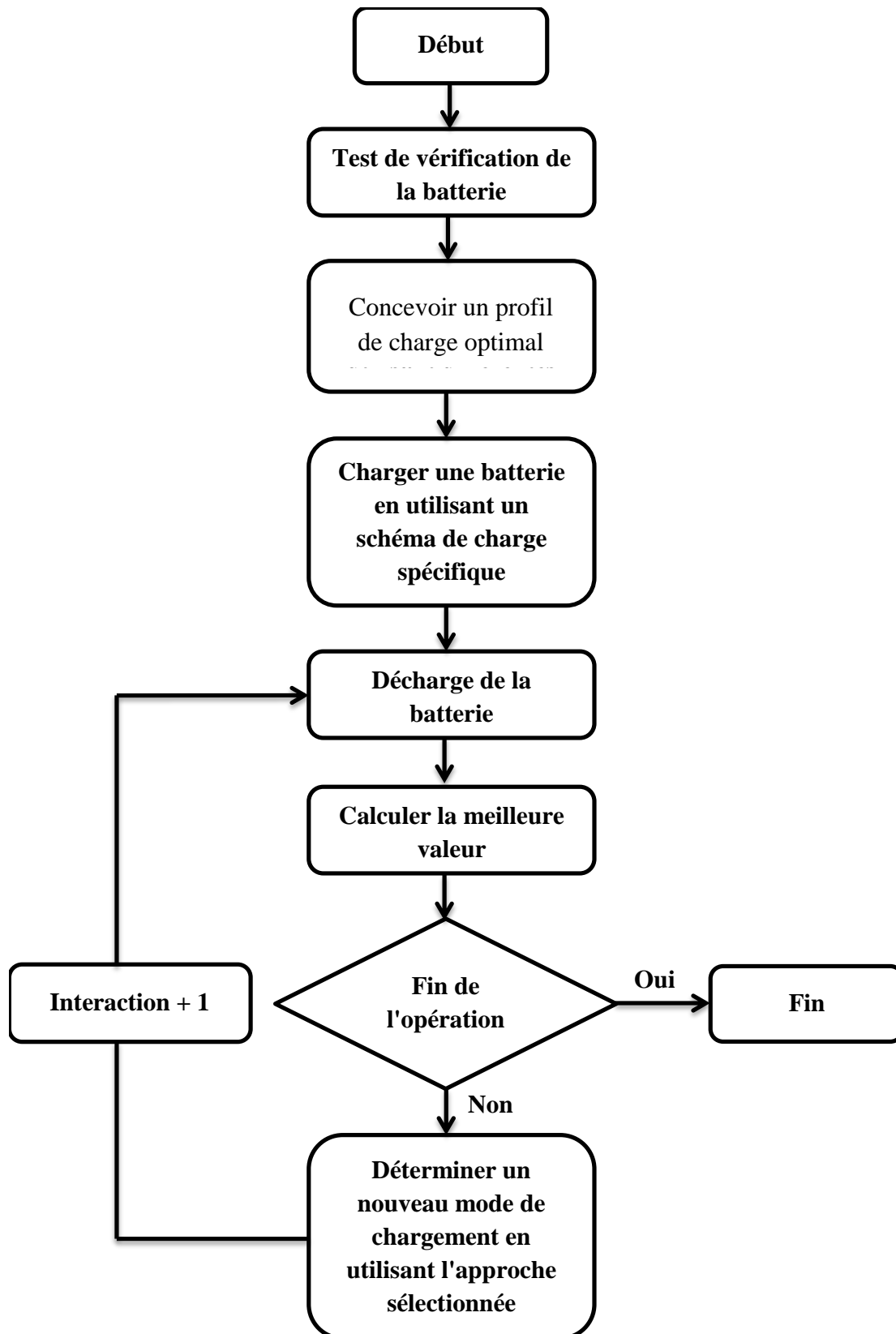


Figure 12 : Algorithme de charge à courant constant multi-étapes [66]

Si ces changements ont lieu lorsque la tension atteint la limite supérieure de la tension de coupure, cette condition est connue sous le nom de condition de décalage basée sur la tension de coupure supérieure. Et, si ces changements ont lieu en fonction de l'état de charge, on parle alors de condition de décalage basée sur l'état de charge [64]. Les figures 13 et 14 présentent le graphique de charge à base de la condition de décalage [64]. Pendant la charge à courant constant multi-étapes, il est essentiel de trouver le schéma de courant de charge optimal. Différentes techniques sont utilisées pour trouver le schéma optimal. La charge à base de la commande floue (Fuzzy Control), la méthode Taguchi et le système de colonies de fourmis (Ant Colony System) sont les procédés les plus utilisés pour trouver le schéma de charge optimal [64].

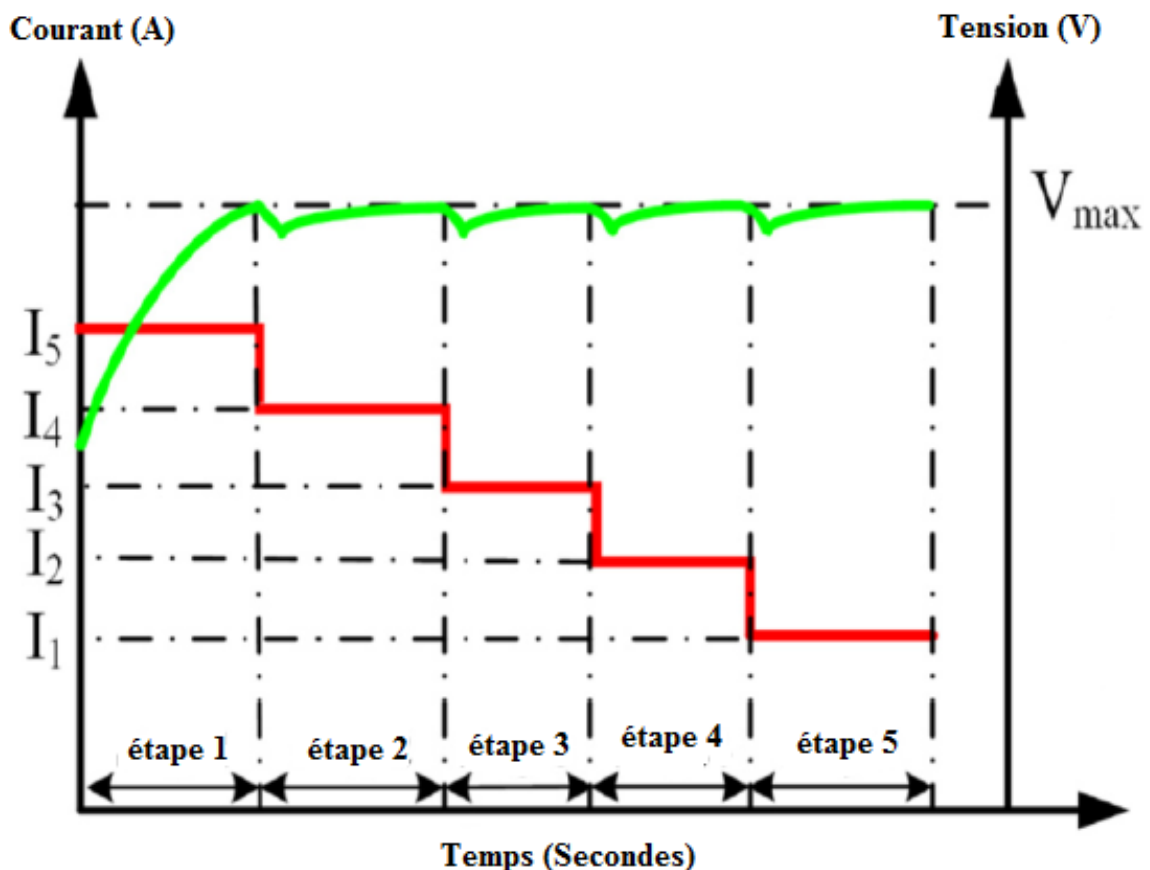


Figure 13 : Charge à courant constant multi-étapes avec une condition de décalage basée sur la tension de coupure supérieure [64]

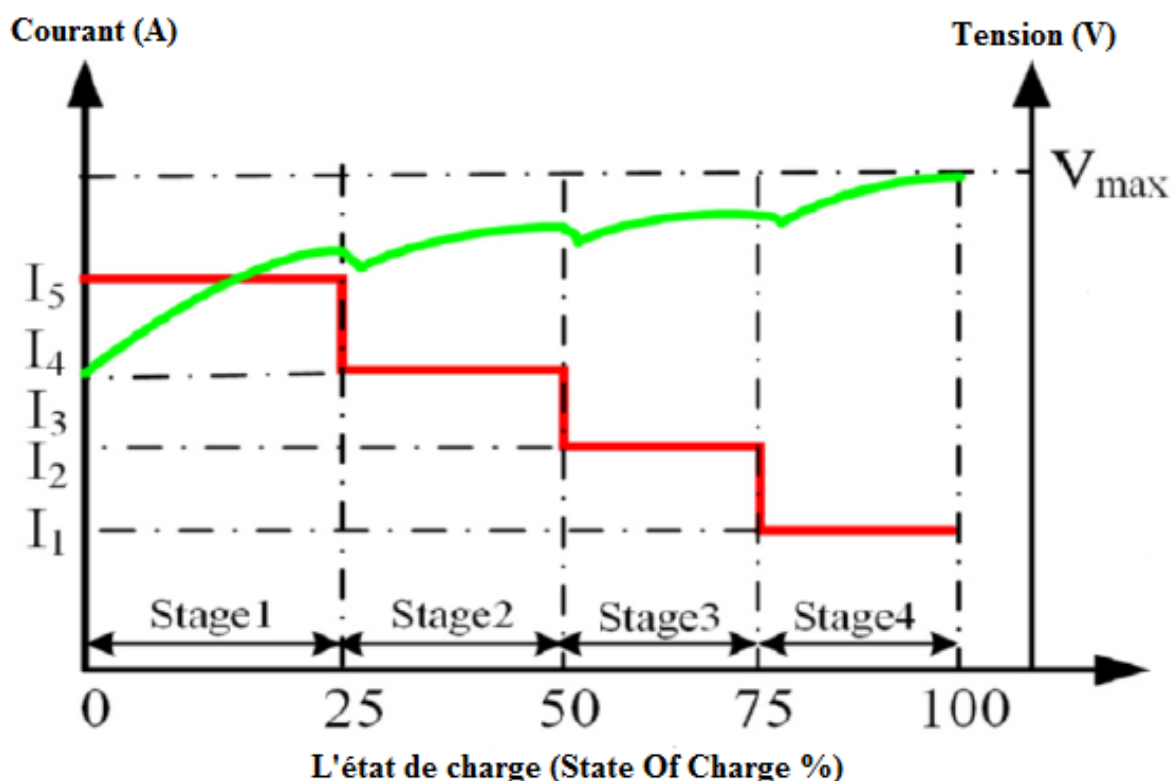


Figure 14 : Charge à courant constant multi-étapes avec une condition de décalage basé sur une limite de l'intervalle d'état de charge [64]

II.3.2.1 Contrôle flou (Fuzzy Control)

La technique de charge à base de contrôle flou permet une charge plus rapide de bonne qualité, avec une excellente efficacité et une faible augmentation de la température. Le contrôleur à logique floue comporte quatre parties essentielles : le fuzzificateur, la base des règles floues, le moteur d'inférence flou et le défuzzificateur [68]. Le fuzzificateur fournit la fonction d'appartenance pour convertir la valeur réelle du système en ensembles linguistiques flous. La base de règles floues fonctionne selon l'expérience professionnelle et la méthode de fonctionnement du contrôle du système. La transformation à base de règles floues en sortie linguistique floue est effectuée par le moteur d'inférence flou. Le défuzzificateur aide à convertir les ensembles linguistiques flous en valeurs réelles. Le chargement à base des règles floues est exempt d'arrêt soudain, Elle a moins des incréments de température et la durée de vie du cycle reste plus élevée pour cette technique [68].

II.3.2.2 Méthode de Taguchi

La technique de Taguchi peut fournir une approche systématique et efficace pour le chargement [69]. Le processus de Taguchi comporte quatre étapes importantes sont la formation du problème, l'expérimentation/la collecte des données, l'analyse des paramètres, la prédiction/confirmation [69]. Dans la première étape, il tente de classer les variables qui sont liées au dispositif en facteurs de bruit, de contrôle, de signal d'entrée et de réponse de sortie. Le rapport signal/bruit joue un rôle essentiel. La méthode de Taguchi permet de déterminer la combinaison optimale dans une série d'expériences. Dans la deuxième étape, l'expérience est réalisée dans le matériel ou la méthode de simulation. Le réseau orthogonal développé dans l'étape précédente est utilisé pour l'expérimentation. L'étape d'analyse des paramètres permet de déterminer le réglage optimal des facteurs de contrôle. Dans l'étape finale de prédiction/confirmation, la performance du système sous la ligne de base et le réglage optimal du paramètre sont prédites. Parfois, le système entier doit être répété pour obtenir la valeur correcte [69].

II.3.2.3 Système de colonies de fourmis (Ant Colony System)

Inspiré des caractéristiques réelles des fourmilières, le système de fourmilière a été développé pour trouver le schéma de charge approprié. Le retour d'information positif (feedback), la compulsion distribuée et l'utilisation d'une heuristique avide constructive sont trois caractéristiques importantes du système de fourmilière [70]. Le retour d'information positif confirme la recherche rapide des solutions globales. Le calcul distribué permet d'éviter le prématuré et la convergence, et l'utilisation d'une heuristique avide pratique permettent de trouver le bon chemin plus rapidement. L'algorithme du système de colonies de fourmis comporte cinq étapes cruciales sont la phase d'initialisation, la phase de répartition des fourmis, la phase d'évaluation de la condition physique, la phase de mise à jour de l'intensité

de la piste et la phase de détermination de la convergence [70]. Au cours de l'étape d'initialisation, toutes les fourmis se localisent sur des nœuds d'ouverture générés arbitrairement, et les valeurs initiales de l'intensité des traces sont fixées sur des limites. Dans la phase suivante, en se basant sur l'estimation, les fourmis aiment choisir le point le plus proche où la phéromone maximale sera présente. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que toutes les fourmis aient terminé leur tour. Dans la troisième phase, après avoir terminé la tournée, la capacité de chaque fourmi sera mesurée. Toutes les restrictions associées au problème d'optimisation peuvent s'unir dans la fonction d'objectif en tant que fonctions de désavantage. Ces valeurs de capacité sont ensuite utilisées pour compléter la force des phéromones des bords entre chaque étape. Dans la phase de mise à jour de l'intensité de la traînée, deux facteurs importants jouent un rôle vital dans l'intensité de la traînée de chaque bord individuel. L'intensité des phéromones des bords diminue avec le temps si aucune autre fourmi n'y laisse sa phéromone. Pour cette mise à jour globale des phéromones, une caractéristique importante de ce mouvement est la mise à jour des phéromones. Ce système total prendra fin si le mouvement atteint le nombre maximum ou si la même tournée est choisie par le nombre maximum de fourmis. Ce processus global est connu sous le nom de système de colonies de fourmis. L'algorithme du système de colonies de fourmis est présenté à la figure 15.

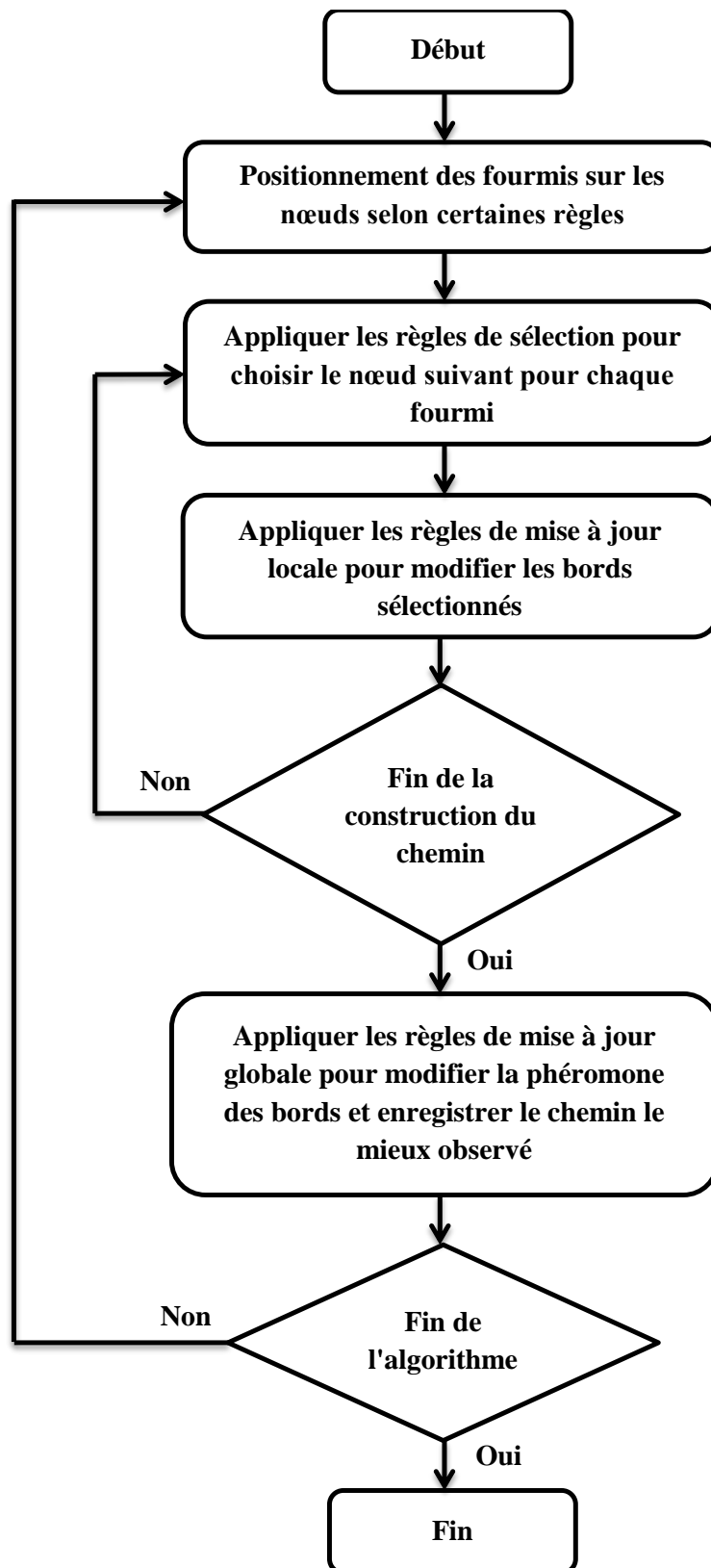


Figure 15 : Algorithme de charge à base du système de colonies de fourmis [70]

L'optimisation des essais de particules (Particle Swarm Optimization, PSO) et la programmation linéaire en nombres entiers sont deux techniques importantes qui permettent de trouver le processus de chargement optimal approprié [69]. Elles apportent également une contribution significative au domaine de la charge à courant constant multi-étape.

II.3.3 Méthode de chargement par impulsion

Tant pour la charge simple que pour la charge à courant constant à multi-étages, il était habituel que les deux utilisent un courant constant ou une tension constante pour leur phase de charge. Mais pour la charge par impulsions, les chercheurs suivent une voie différente. La charge par impulsions utilise un courant constant discontinu et une tension constante. La charge par impulsions a la qualité d'accepter un courant de charge élevé pendant la charge [64]. Comme la charge par impulsions a un effet de tension de polarisation moindre, elle peut accepter un courant élevé plusieurs fois. Pendant la charge par impulsions, une courte période de repos est appliquée, ce qui permet d'obtenir un effet de tension de polarisation moindre et, en même temps, de maintenir la concentration d'ions dans la batterie. Ce processus est utile pour augmenter l'efficacité de la charge de la batterie. Il existe deux techniques importantes de charge par impulsions. Il s'agit de la charge par impulsions de courant et de la charge par impulsions de tension. La charge par impulsions de courant comporte trois séquences importantes. Il s'agit de la charge par impulsions à courant constant et fréquence constante (Constant Current-Constant Frequency Pulse Charging, CCCF-PC), de la charge par impulsions à courant constant et fréquence variable (Constant Current-Variable Frequency Pulse Charging, CCVF-PC) et de la charge par impulsions à courant variable et fréquence constante (Variable Current-Constant Frequency Pulse Charging, VCCF-PC) [64]. Au cours de ces techniques de charge, un temps de repos est prévu entre deux courants de charge maximum. Comme elle est capable de prendre un courant de charge élevé, la charge prend

moins de temps que les autres. La charge par impulsions de tension peut être divisée en deux parties : l'impulsion de tension à service variable et l'impulsion de tension à fréquence variable. La charge par impulsions de tension à fréquence variable a trois modes importants, à savoir le mode de détection de charge complète, le mode de détection et le mode de charge. La technique de charge par impulsions de tension à fréquence variable permet de trouver la fréquence de charge optimale [64], [66]. Dans l'ensemble, la technique de charge par impulsions permet de gagner le temps. Cependant, elle présente des fortes restrictions quant au maintien du processus de charge, car le courant de charge élevé peut créer une interface d'électrolyte solide épaisse. Si cette épaisseur devient importante, elle peut alors augmenter la tension interne et peut créer des dommages irréversibles à l'intérieur de la batterie.

II.3.4 Méthode d'augmenter la charge

Pour répondre à la forte demande de réduction du temps de chargement, on a introduit le chargement accéléré. Cette technique de charge permet de charger un tiers d'une batterie à décharge complète en 5 minutes [71]. Elle a fourni une nouvelle façon de penser aux méthodes de charge. Elle présente également certaines limites. Elle permet de réduire le temps de charge, mais aussi la capacité de la batterie. Si une méthode simple est de 300 cycles, la méthode d'augmenter la charge est de 100-150 cycles. Pour cela, devient une préoccupation majeure pour les utilisateurs.

II.4 Méthodes de charge basée sur les modèles

Modèle de température de circuit équivalent : La température joue un rôle essentiel dans la performance des batteries. Pendant la charge, la température de la batterie augmente très rapidement. Si la température dépasse la limite maximale, cela peut affecter les matériaux de la cathode et dégrader la capacité de la batterie. Il est donc essentiel de maintenir la température pendant la charge. Le modèle de température de circuit équivalent est un modèle

où le schéma de charge de courant optimal est sélectionné de telle sorte qu'il suit la limite de température [72].

Modèle de perte de puissance du circuit équivalent : En gardant à l'esprit la perte de puissance minimale, la conception du modèle de circuit équivalent peut parfois être utilisée pour trouver le schéma de charge optimal. Le temps de charge, la température, le courant de charge et la limite de tension sont contrôlés de manière à minimiser la perte de puissance de la batterie [73].

II.4.1 Modèle de vieillissement électrothermique

Ce système de circuit est capable d'identifier le vieillissement thermique de la batterie. Ce modèle peut maintenir une charge sûre et rapide. La séquence de charge prend en charge tous les paramètres suivant l'effet du vieillissement électrique et thermique. Il est complexe à concevoir [74].

II.4.2 Modèle électrochimique

Pendant la charge, des réactions internes ont lieu à l'intérieur de la batterie. Les changements de température, les pertes de puissance, le vieillissement thermique, etc. se produisent pour cette réaction électrochimique interne. Lorsque l'on recherche un schéma de charge spécifique pour les batteries Li-Ion, on garde toujours ces paramètres à l'esprit. Cependant, il est rare de voir les réactions chimiques qui se produisent, comment le potentiel interne change et comment la concentration de Li-Ion évolue. Le modèle de charge électrochimique tente de charger la batterie plus rapidement et de maintenir la réaction chimique interne à la limite, ce qui a moins d'effet sur l'électrode [75].

II.4.3 Modèle Courant Alternatif AC

La technique de charge en courant alternatif est une nouvelle technique de charge sur le marché des batteries Li-Ion. Cette technique de charge est essentiellement une technique de

courant d'ondulation sinusoïdale. Elle n'est pas comparable à une procédure de charge par impulsions. Pendant la charge en courant alternatif, un courant d'ondulation sinusoïdal est superposé à un courant de charge continu [76].

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a examiné les différentes techniques de charge des batteries Li-Ion disponibles. Donc ces techniques de charge divisées en deux groupes essentiels : les techniques de charge simples et les techniques de charge optimisée. Puisque les deux méthodes de charge simples, à courant constant et à tension constante, sont anciennes et ont un impact significatif sur la santé des batteries, ils sont améliorés par le développement des différentes techniques de charge optimisée qui sont différenciés en trois catégories importantes, les méthodes de charge basées sur la forme d'onde, les méthodes de charge basées sur le modèle et les méthodes de charge en courant alternatif.

Le prochain chapitre présente en détail la conception et l'optimisation d'un nouveau décaleur de niveau associé avec un pilote de grille fixé à la grille du transistor PMOS de puissance dans l'architecture de l'interface de chargeur de batterie Li-Ion pour passer de la basse tension du signal de commande à une tension plus élevée.

Chapitre III : Conception et analyse d'un nouveau décaleur de niveau associé avec un pilote de grille

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| III.1 Introduction | 54 |
| III.2 Décaleur de niveau | 57 |
| III.2.1 Décaleur de niveau conventionnel | 57 |
| III.2.2 Nouveau décaleur de niveau proposé | 58 |
| III.3 Résultats de la simulation | 60 |
| III.3.1 Résultat de la simulation du décaleur de niveau proposé et du décaleur de niveau conventionnel | 60 |
| III.3.2 Simulation Monte Carlo du décaleur de niveau proposé et du décaleur de niveau conventionnel | 65 |
| III.3.3 Résultat de la simulation du décaleur de niveau proposé associé avec le pilote de grille | 66 |
| III.3.4 Simulation Monte Carlo du décaleur de niveau proposé associé avec le pilote de grille | 68 |
| III.3.5 Layout | 69 |
| III.3.5.1 Effets indésirables | 69 |
| A. Variations de process | 69 |
| B. Effet de la température | 70 |
| C. Eléments parasites | 70 |
| III.3.5.2 Techniques de Layout | 70 |
| A. Même structure, même taille | 71 |
| B. Même température | 72 |
| C. Même orientation | 72 |
| D. Minimiser les distances | 74 |
| E. Structure centroïde commune | 74 |
| F. Même environnement | 75 |
| G. Augmentation des tailles | 75 |
| H. Connexion en étoile | 76 |
| III.3.5.3 Layout du décaleur de niveau proposé avec le pilote de grille | 77 |
| III.4 Conclusion | 78 |

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le nouveau décaleur de niveau (Level Shifter) associé avec un pilote de grille (Gate Driver) pour l'utiliser dans l'interface du chargeur de la batterie Li-Ion, comme illustré dans la Figure 16.

Les batteries Li-Ion offrent des avantages significatifs, notamment une faible maintenance, une grande tension de batterie, un courant de décharge élevé, une faible résistance interne et une longue durée de vie. Bien que les batteries Ni-MH et les batteries Ni-Cd fassent partie des batteries rechargeables, les batteries Li-Ion sont les batteries rechargeables les plus utilisées et les plus populaires [77]. Dans le circuit intégré de gestion des batteries, l'élément le plus important est le chargeur de batterie Li-Ion qui assure le contrôle de la charge en toute sécurité sans réduire sa durée de vie [78], [79]. Les chargeurs de batterie Li-Ion peuvent être divisés en deux catégories : les chargeurs autonomes qui ne sont utilisés que pour charger les batteries et les chargeurs embarqués qui sont utilisés à l'intérieur des appareils électroniques, comme les Smartphones. Les chargeurs embarqués doivent non seulement charger la batterie mais aussi alimenter le système [77]. Par exemple, l'intégration de la pompe de charge Dickson dans un chargeur embarqués pour programmer l'EEPROM afin d'écrire une clé secrète [80]. Elle génère une tension de sortie pour alimenter l'EEPROM en fonction d'une tension de batterie variable V_{Battery} des chargeurs embarqués.

Nous avons comparé notre nouveau décaleur de niveau avec le décaleur de niveau conventionnel et d'autres travaux [81], [82], [83], [84], [85] et [86]. Ces travaux concernent l'utilisation de décaleur de niveau dans différents domaines et avec différents délais de propagation. Notre décaleur de niveau proposé est plus développée pour augmenter le niveau de tension rapidement, et pour obtenir un délai de propagation plus court qui est égal à 0,15ns.

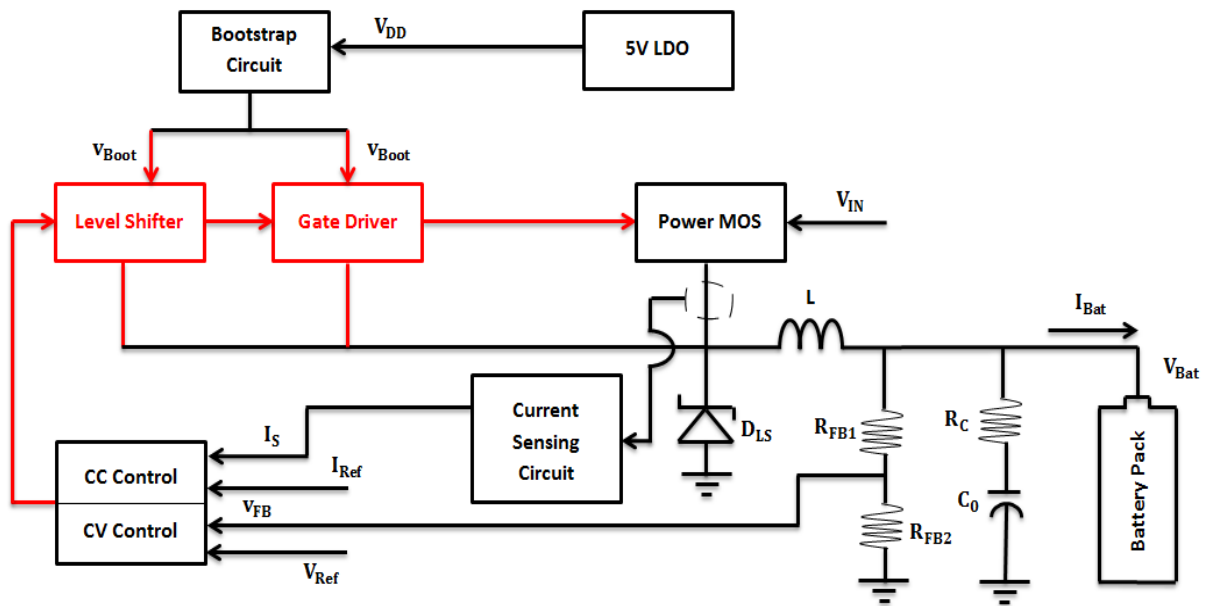


Figure 16: Positionnement du décaleur de niveau avec le pilote de grille dans l'architecture générale de l'interface du chargeur de batterie [77]

La figure 16 montre le positionnement du décaleur de niveau avec le pilote de grille dans l'architecture générale de l'interface du chargeur de batterie, elle est constituée de plusieurs blocs : Contrôle de courant constant (CC Control), Contrôle de tension constante (CV Control), décaleur de niveau (Level Shifter), pilote de grille (Gate Driver), MOS de puissance (Power MOS), circuit de détection de courant (Current Sensing Circuit), circuit d'amorçage (Bootstrap circuit) et 5V LDO.

Le décaleur de niveau est un circuit essentiel dans les systèmes Multi-tension. Il est utilisé entre les circuits d'entrée/sortie et les circuits centraux. Dans la littérature, de nombreuses conceptions de décaleur de niveau ont été indiquées comme double et simple alimentation [87]. Le circuit décaleur de niveau conventionnel avec une alimentation haute et basse tension (V_{DDH} et V_{DDL}) utilisant 10 transistors a été montré dans la référence [88]. Elle présente l'inconvénient d'une variation du retard grâce aux capacités de commande du courant des différents transistors, d'une défaite à basse tension d'alimentation de base V_{DDL} et d'une forte absorption de puissance [89].

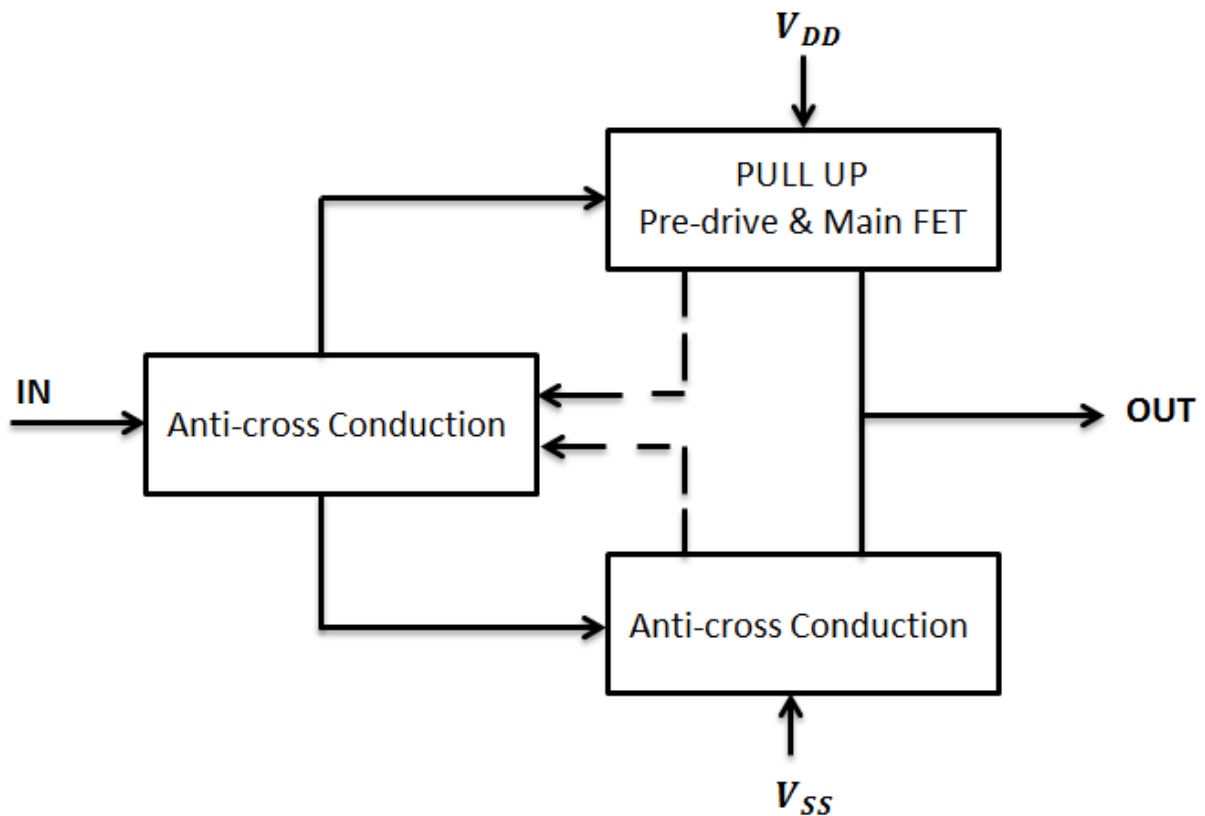


Figure 17 : Architecture du pilote de grille [90]

La figure 17 montre l'architecture du pilote de grille qui consiste en un circuit pull-down et pull-up. Le pilote de grille est fixé à la grille d'un MOS de puissance, qui alimente la charge par des actions de commutation. Les capacités de la grille peuvent atteindre quelques nF pour des MOSFET de grande puissance. Le circuit anti-conduction est nécessaire dans le pilote de grille pour empêcher la décharge du circuit de traction vers le haut au circuit de traction vers le bas à travers l'alimentation électrique.

Il y a deux sources de retard de signal dans le pilote de grille, l'une due au circuit anti-conduction et l'autre au circuit de pré-pilotage. Le circuit anti-conduction est trop petit parce que les dispositifs de taille minimale sont également utilisés dans le circuit de protection contre le passage, et le pré-pilote est constitué d'une chaîne des inverseurs [90]. Nous avons utilisé dans cette contribution un pré-pilote qui constitué par le bon nombre des portes logiques inverseurs pour avoir un retard minimum du signal.

III.2 Décaleur de niveau

Le décaleur de niveau est utilisé pour convertir le niveau de basse tension en niveau de haute tension ou l'inverse. Le circuit de décaleur de niveau bidirectionnel est utilisé pour faire une interface entre les niveaux de tension d'entrée et de sortie dans les applications avec une tension d'alimentation différente. Les décaleurs de niveau sont les platines qui convertissent la basse tension centrale en haute tension. Il existe de nombreux types de décaleur de niveau, comme les décaleurs de niveau à double alimentation et les décaleurs de niveau à alimentation unique. Le décaleur de niveau à alimentation unique permet la communication entre les modules sans ajouter toutes les broches d'alimentation supplémentaires. Il présente un avantage par rapport au décaleur de niveau à double alimentation en termes de nombre de broches, d'obstruction du coût global du système et de routage [91].

III.2.1 Décaleur de niveau conventionnel

La figure 18 montre le décaleur de niveau conventionnel. Il s'agit d'un type de demi-blocage (Half-lock) qui est constitué de deux PMOS (M3, M4) et de deux NMOS (M1, M2). Ce dispositif est commandé par la tension V_{IN} à basse tension et ses compléments. Lorsque la tension V_{IN} passe de la basse à la haute tension, le transistor M1 est activé et le transistor M2 est désactivé, de sorte que la tension du nœud OUTA est abaissée et la tension du nœud OUTB est élevée, ce qui conduit au M4 : ON et M3 : OFF. Lorsque M4 est ON, la tension à la sortie OUTB est égale au V_{DDP} et M3 est OFF, et la tension à la sortie OUTA reste déchargée. Il peut y avoir un problème d'impédance entre les dispositifs. C'est pourquoi les forces de réseau de tirage vers le haut (pull-up) et vers le bas (pull-down) doivent être équilibrées et réduites avec précision pour maintenir les niveaux logiques requis [92]. Il est

difficile de se rendre compte lorsque les signaux de décalage de niveau sont à un niveau de tension inférieur au seuil [93].

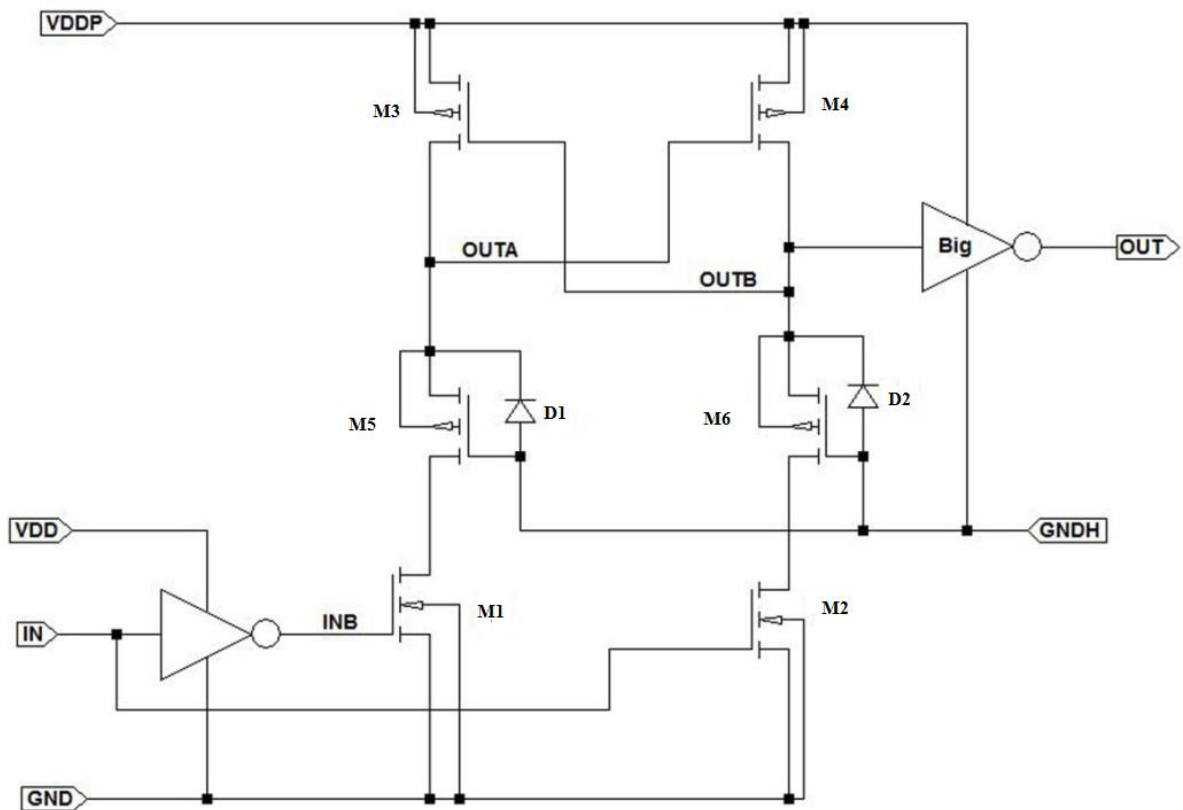


Figure 18 : Circuit du décaleur de niveau conventionnel

III.2.2 Nouveau décaleur de niveau proposé

Le circuit de décaleur de niveau proposé est illustré à la figure 19. Il comprend quatre dispositifs au total avec une capacité $C1$ et une résistance $R1$, dans lesquels deux transistors sont du type NMOS, à savoir (transistor $M1$, transistor $M4$) et les deux autres sont du type PMOS, à savoir (transistor $M2$, transistor $M3$). Les couples de signaux d'entrée en baisse à travers la capacité $C1$ pour décharger la tension $Vg2$ dans une transition haut-bas. Lorsque le transistor $M3$ est momentanément activé, la résistance $R1$ tire la tension $Vg5$ vers le haut. Le transistor du type NMOS, à savoir (transistor $M1$), tire la tension $Vg5$ vers le bas.

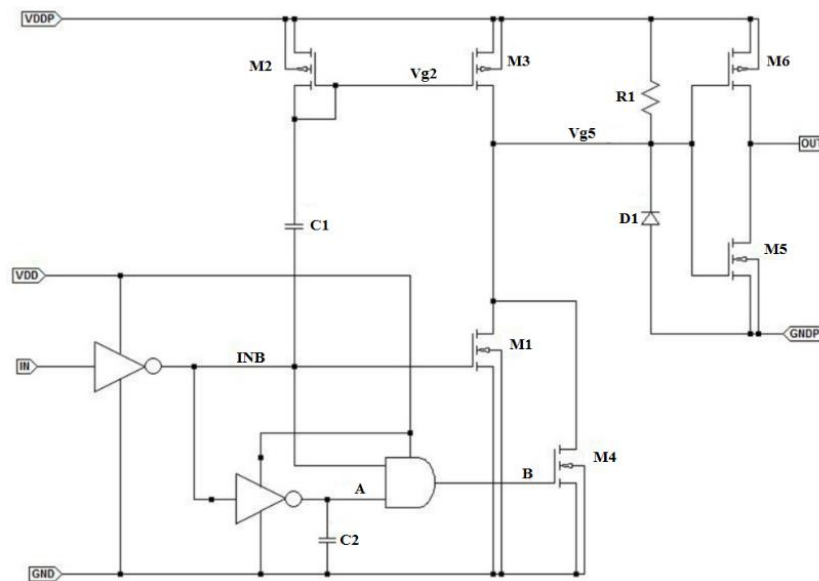


Figure 19 : Circuit de décaleur de niveau proposé

La diode, connectée entre GNDP et la tension Vg5, est utilisé pour protéger la tension Vsg du transistor du type NMOS, à savoir (transistor M5), lorsque la tension Vg5 est tirée vers le bas et que le nœud GNDP monte vers le haut en suivant la tension VIN.

Si nous réduisons la taille du transistor du type NMOS, à savoir (transistor M1), cela réduira le courant et la charge, mais la petite taille de transistor M1 ne peut pas permettre la tension Vg5 d'être tiré vers le bas.

La charge de stockage élevée de la sortie construite à travers la diode lorsque la tension Vg5 est basse. La charge doit être enlevée pour tirer la tension Vg5 jusqu'à l'amorçage lorsque la sortie est dans la transition haute à basse. Ce qui peut être un risque d'un énorme retard de propagation.

Le délai de propagation minimum est fonction de 3 choses : la technologie des procédés, la tension de fonctionnement et bien sûr la conception des circuits. L'expression du temps de propagation est donnée par l'équation (12) :

$$t_p \approx \frac{2 \cdot C_{OX} \cdot W \cdot L^2 \cdot V_{DD}}{\mu_n \cdot C_{OX} \cdot V_{DD}^2} \approx \frac{2 \cdot L^2}{\mu_n \cdot V_{DD}} \quad (12)$$

Une tension V_{DD} plus élevée avec un temps de transition plus rapide permet un découplage plus rapide et donne également une vitesse plus élevée.

III.3 Résultats de la simulation

III.3.1 Résultat de la simulation du décaleur de niveau proposé et du décaleur de niveau conventionnel

La figure 20 montre le schéma du décaleur de niveau proposé et la figure 21 montre le schéma du décaleur de niveau conventionnel, sous le logiciel CADENCE Virtuoso.

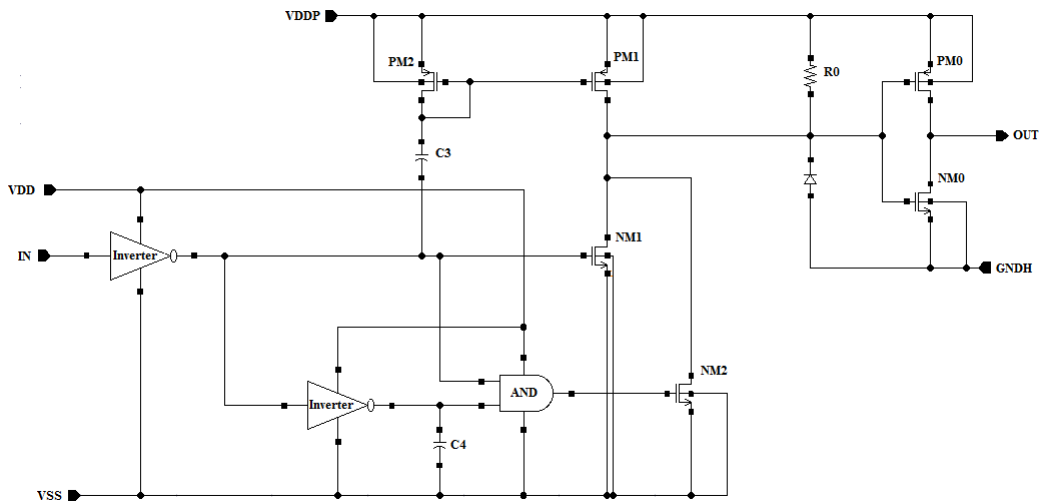


Figure 20 : Schéma du circuit de décaleur de niveau proposé

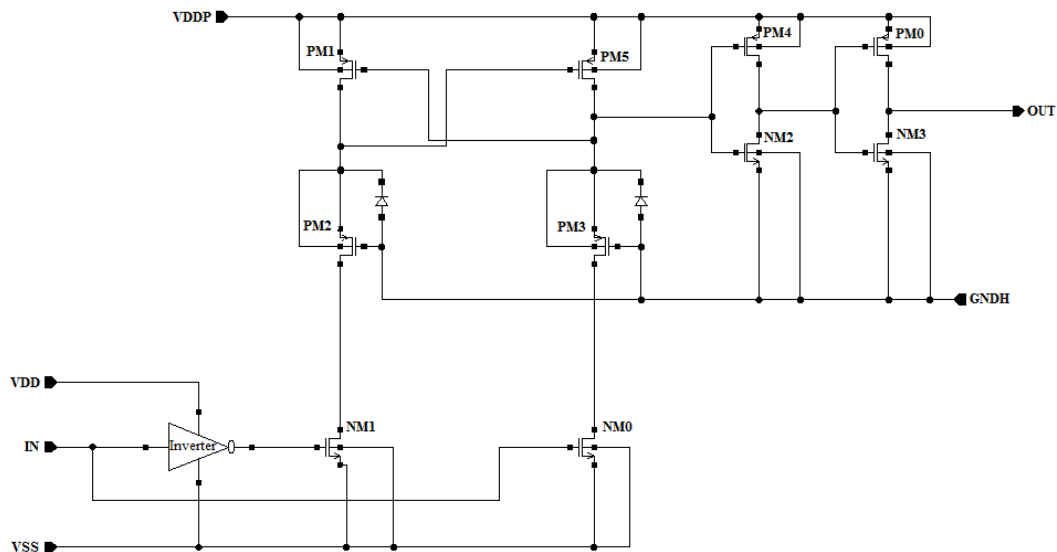


Figure 21 : Schéma du circuit de décaleur de niveau conventionnel

Chapitre III

Conception et analyse d'un nouveau décaleur de niveau associé avec un pilote de grille

Le rapport de chaque transistor du circuit de décaleur de niveau proposé est donné par le tableau 7 et celui du circuit de décaleur de niveau conventionnel est donné par le tableau 8.

Tableau 7 : Rapport de chaque transistor du circuit de décaleur de niveau proposé

| Transistors | le rapport (W/L) ($\mu\text{m}/\text{nm}$) | Le taux de multiplication (m) |
|---------------|--|-------------------------------|
| PM0, PM1, PM2 | 2/180 | 1 |
| NM0, NM2 | 2/180 | 1 |
| NM1 | 2/180 | 20 |

Tableau 8 : Rapport de chaque transistor du circuit de décaleur de niveau conventionnel

| Transistors | le rapport (W/L) ($\mu\text{m}/\text{nm}$) | Le taux de multiplication (m) |
|-------------------------|--|-------------------------------|
| PM0, PM1, PM2, PM3, PM5 | 4/180 | 1 |
| NM0, NM1 | 2/180 | 20 |
| NM2, NM3 | 2/180 | 1 |

La figure 22 montre le schéma de l'inverseur et la figure 23 montre le schéma de la porte logique AND, qui sont utilisés dans le décaleur de niveau proposé.

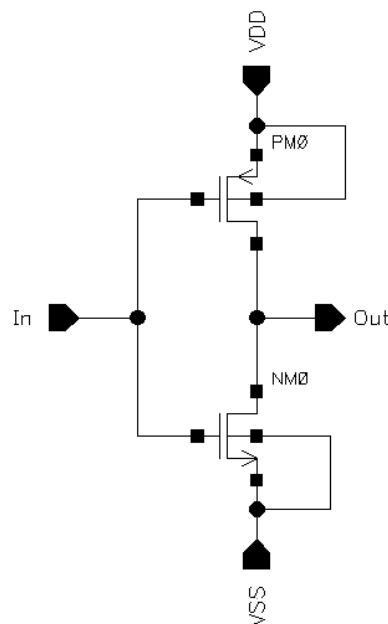


Figure 22 : Schéma du circuit de l'inverseur utilisé dans le décaleur de niveau proposé

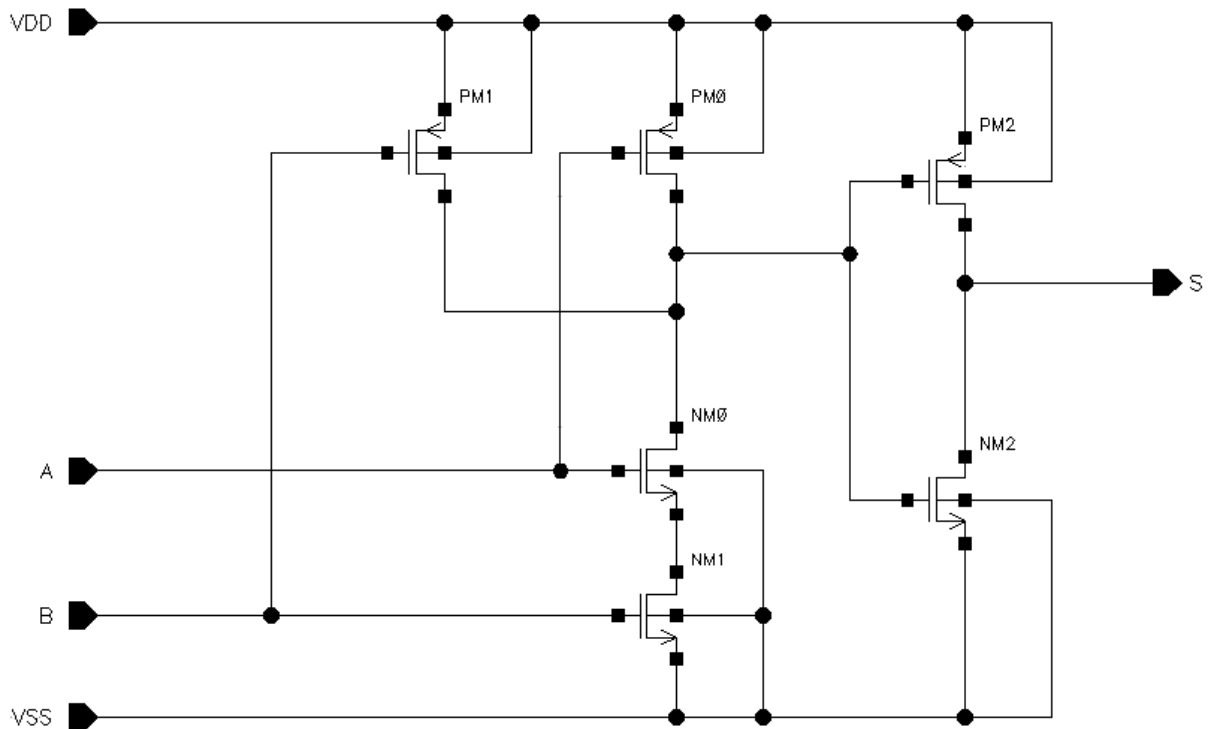


Figure 23 : Schéma du circuit de la porte logique AND utilisé dans le décaleur de niveau proposé

Le rapport de chaque transistor des circuits de l'inverseur et de la porte logique AND utilisé dans le décaleur de niveau proposé, sont donné par les tableaux 9 et 10, respectivement.

Tableau 9 : Rapport de chaque transistor du circuit de l'inverseur utilisé dans le décaleur de niveau proposé

| Transistors | le rapport (W/L) ($\mu\text{m}/\text{nm}$) | Le taux de multiplication (m) |
|-------------|--|-------------------------------|
| PM0 | 4/180 | 1 |
| NM0 | 2/180 | 1 |

Tableau 10 : Rapport de chaque transistor du circuit de la porte logique AND utilisé dans le décaleur de niveau proposé

| Transistors | le rapport (W/L) ($\mu\text{m}/\text{nm}$) | Le taux de multiplication (m) |
|---------------|--|-------------------------------|
| PM0, PM1, PM2 | 2/180 | 1 |
| NM0, NM1, NM2 | 2/180 | 1 |

La figure 24 montre la forme d'onde par rapport à l'analyse transitoire du décaleur de niveau proposé et du décaleur de niveau conventionnel.

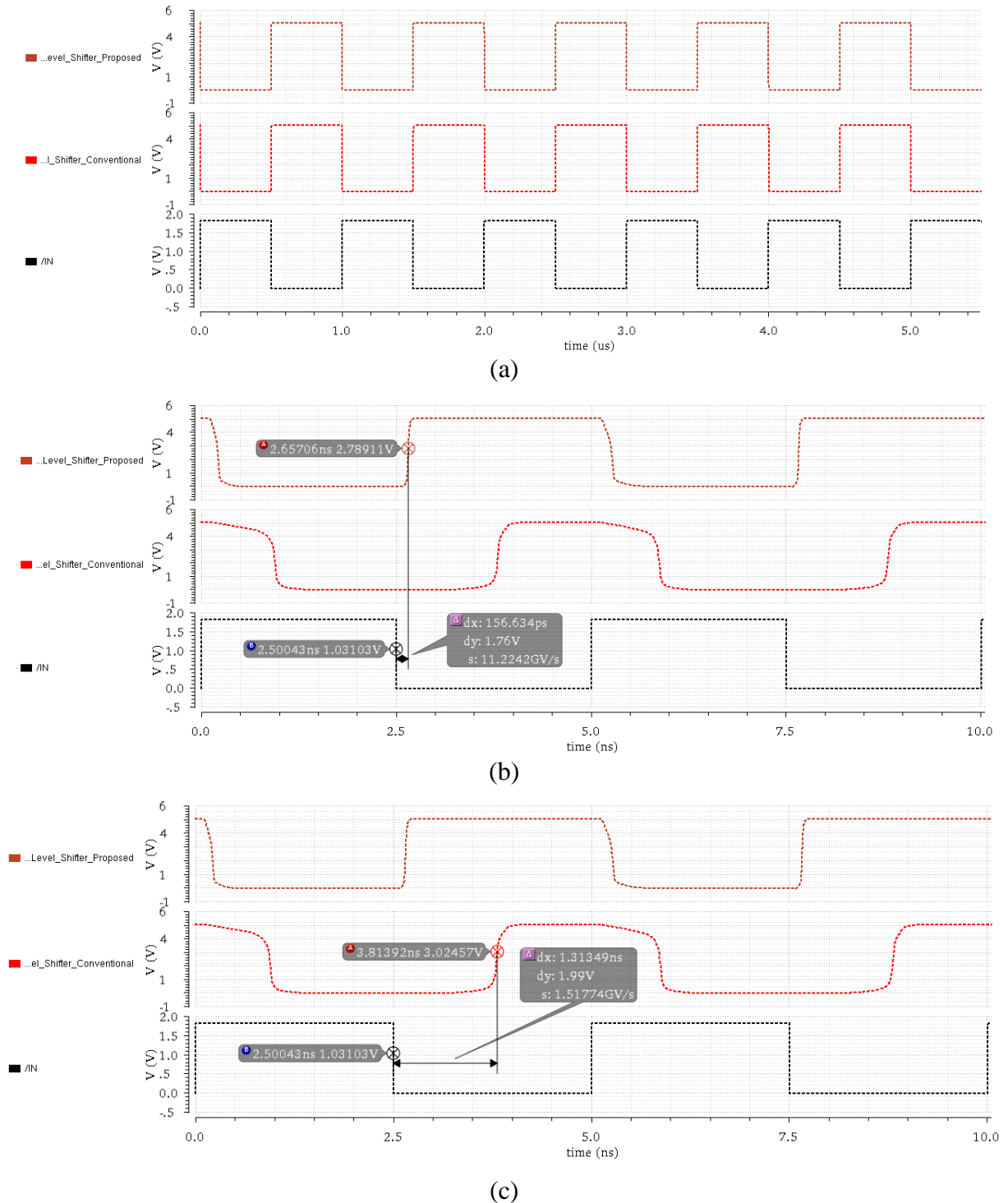


Figure 24 : Simulation transitoire : (a) Analyse transitoire du décaleur de niveau proposé et du décaleur de niveau conventionnel, (b) Retards de transfert du décaleur de niveau proposé et (c) Retards de transfert du décaleur de niveau conventionnel

Chapitre III

Conception et analyse d'un nouveau décaleur de niveau associé avec un pilote de grille

Les tensions V_{DD} et V_{DDP} sont les tensions d'alimentation utilisée dans ce circuit. La tension V_{DD} est de 1,8 V et la tension V_{DDP} est de 5 V. Le circuit de décaleur de niveau proposé et le circuit de décaleur de niveau classique permettent d'augmenter la tension de 1,8 V à 5 V. La sortie de 5 V a été obtenue en fonction d'une impulsion d'entrée de 1,8 V. Ils sont conçus en utilisant la technologie 180nm CMOS sous le logiciel CADENCE Virtuoso. La sortie stable du décaleur de niveau proposé peut être visualisée sur la figure 24(a).

On peut observer sur les figures 24(b) et 24(c), les délais de transfert du décaleur de niveau proposé et du décaleur de niveau conventionnel.

Les résultats montrent que le décaleur proposé réduit considérablement le délai de transfert de 1,3ns (délai de transfert du décaleur de niveau conventionnel) à 0,15ns avec le même signal d'entrée.

Le tableau 11 présente une analyse comparative entre le décaleur de niveau proposé et d'autres travaux.

Tableau 11 : Analyse comparative entre le décaleur de niveau proposé et d'autres travaux/références

| Références | Technologie | VDDL [V] | VDDH [V] | Retard [ns] |
|---|-------------|----------|----------|-------------|
| M. EL Alaoui et <i>al.</i> , 2019, [94] | 180nm CMOS | 1.8 | 5 | 0.15 |
| G. Maderbacher et <i>al.</i> , 2011, [81] | 65nm CMOS | 1.2 | 5 | 0.61 |
| N. B. Romli et <i>al.</i> , 2012, [82] | 180nm CMOS | 0.4 | 3 | 15.65 |
| Y. Moghe et <i>al.</i> , 2011, [83] | 350nm HV | 3.3 | 6.7-10 | 3 |
| P. Gosatwar et <i>al.</i> , 2016, [84] | 90nm CMOS | 0.2 | 1 | 10.99 |
| M. Vaidya, et <i>al.</i> , 2018, [85] | 45nm CMOS | 0.7 | 1.2 | 12.18 |
| S. Chatterjee, et <i>al.</i> , 2018, [86] | 28nm FDSOI | 0.25 | 1 | 3.11 |

III.3.2 Simulation Monte Carlo du décaleur de niveau proposé et du décaleur de niveau conventionnel

La simulation de Monte Carlo est utilisée pour étudier comment les différents dispositifs mal assortis d'un circuit peuvent s'assembler et avoir un impact sur le circuit.

La figure 25 montre l'histogramme de la différence de temps de propagation du décaleur de niveau conventionnel et la figure 26 montre l'histogramme de la différence de temps de propagation du décaleur de niveau proposé. Nous pouvons observer à partir de la simulation Monte Carlo que l'écart-type du décaleur de niveau conventionnel pour 200 simulations est de 105.679ps, et que l'écart-type du décaleur de niveau proposé pour 200 simulations est de 19.3924ps.

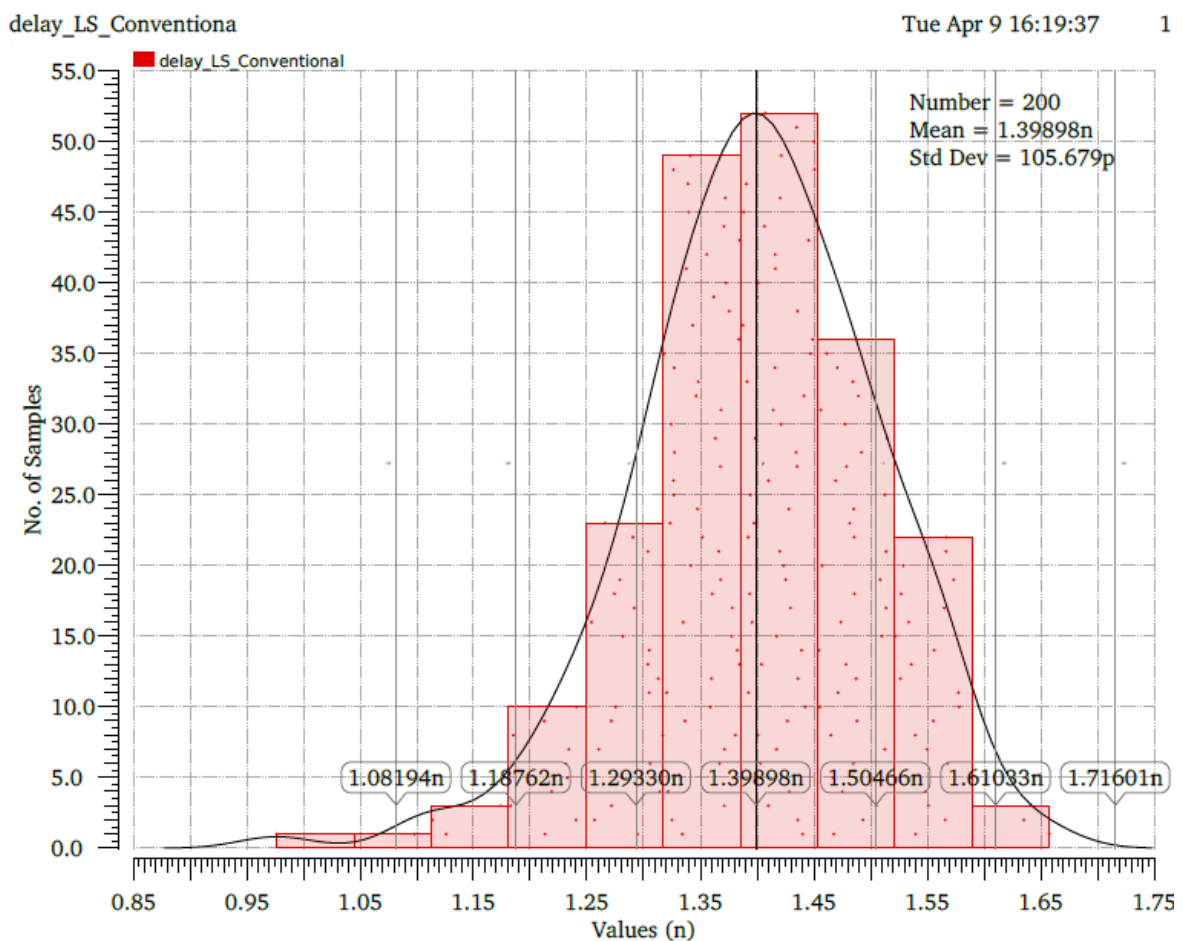


Figure 25 : Histogramme de la différence de délai du décaleur de niveau classique

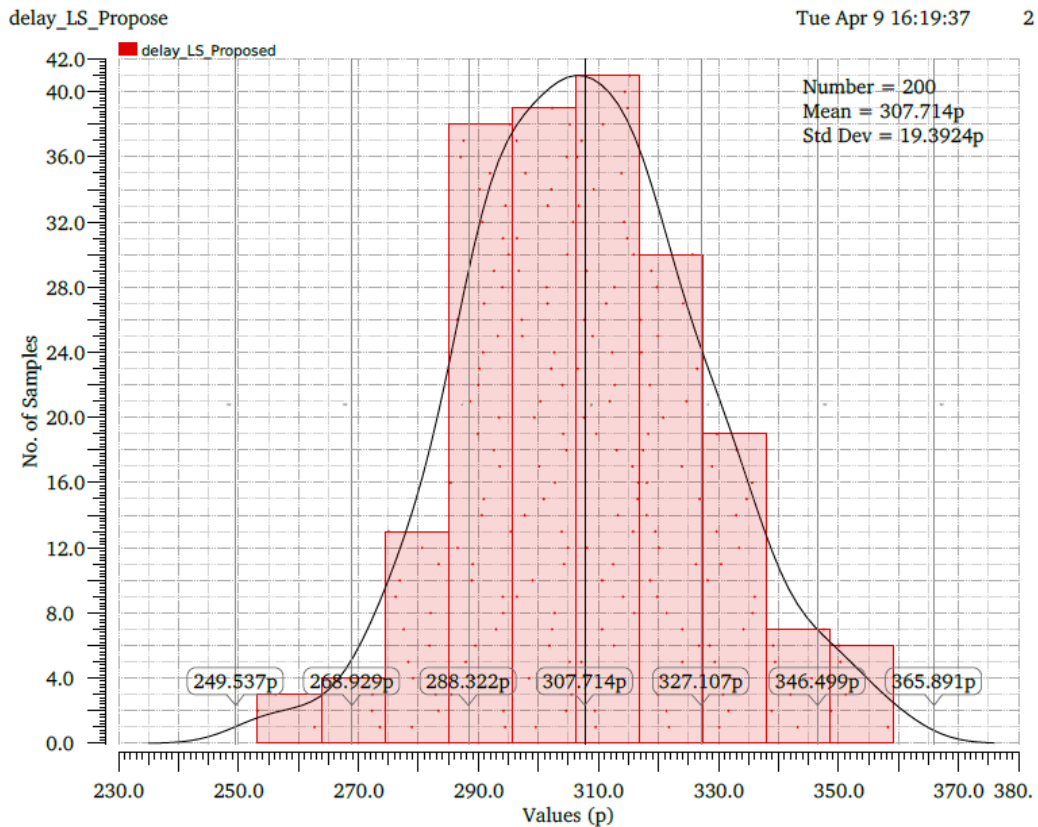


Figure 26 : Histogramme de la différence de délai du décaleur de niveau proposé

III.3.3 Résultat de la simulation du décaleur de niveau proposé associé avec le pilote de grille

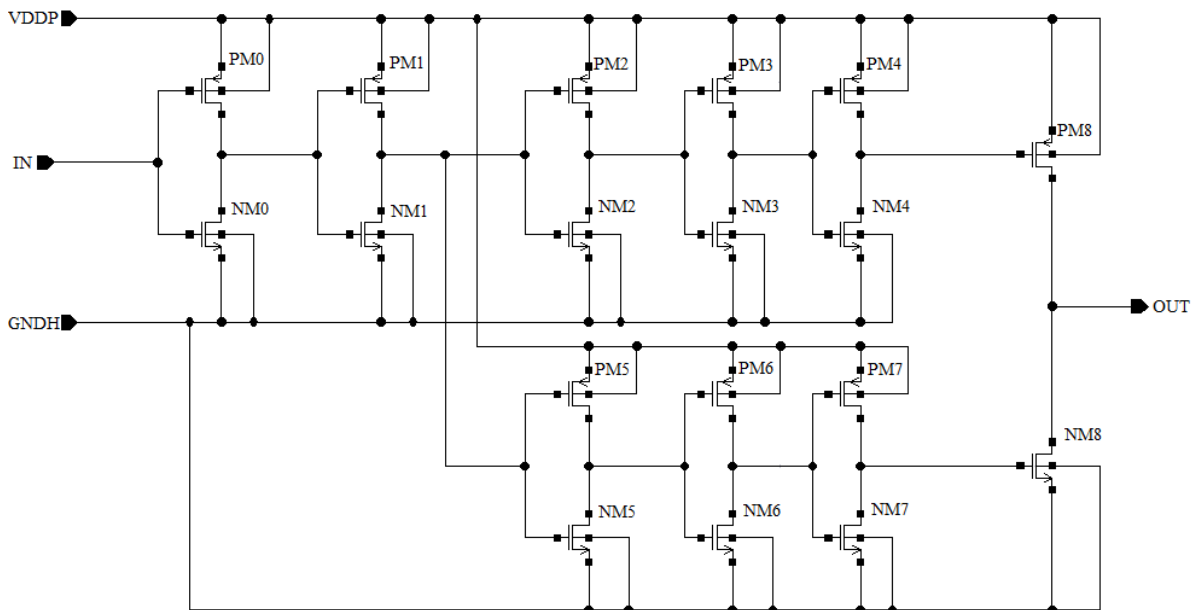


Figure 27 : Schéma du circuit de pilote de grille

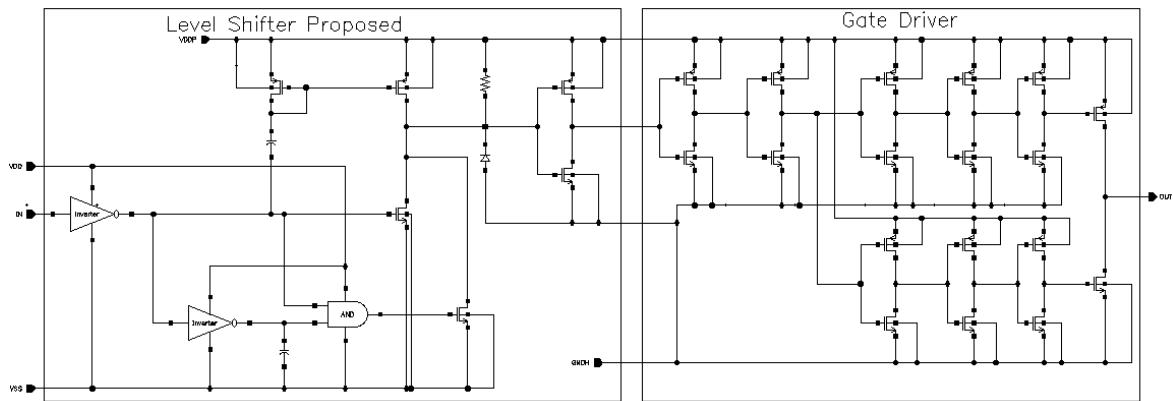


Figure 28 : Schéma du circuit de décaleur de niveau proposé associé avec le pilote de grille

La figure 27 montre un schéma du circuit de pilote de grille et la figure 28 montre un schéma du circuit de nouveau décaleur de niveau associé avec le pilote de grille sous le logiciel CADENCE Virtuoso.

Le rapport de chaque transistor du circuit de pilote de grille est donné par le tableau 12.

Tableau 12 : Rapport de chaque transistor du circuit de pilote de grille

| Transistors | le rapport (W/L) ($\mu\text{m}/\text{nm}$) | Le taux de multiplication (m) |
|---|--|-------------------------------|
| PM0, PM1, PM2, PM3, PM4, PM5, PM6, PM7, PM8 | 4/180 | 1 |
| NM0, NM1, NM2, NM3, NM4, NM5, NM6, NM7, NM8 | 2/180 | 1 |

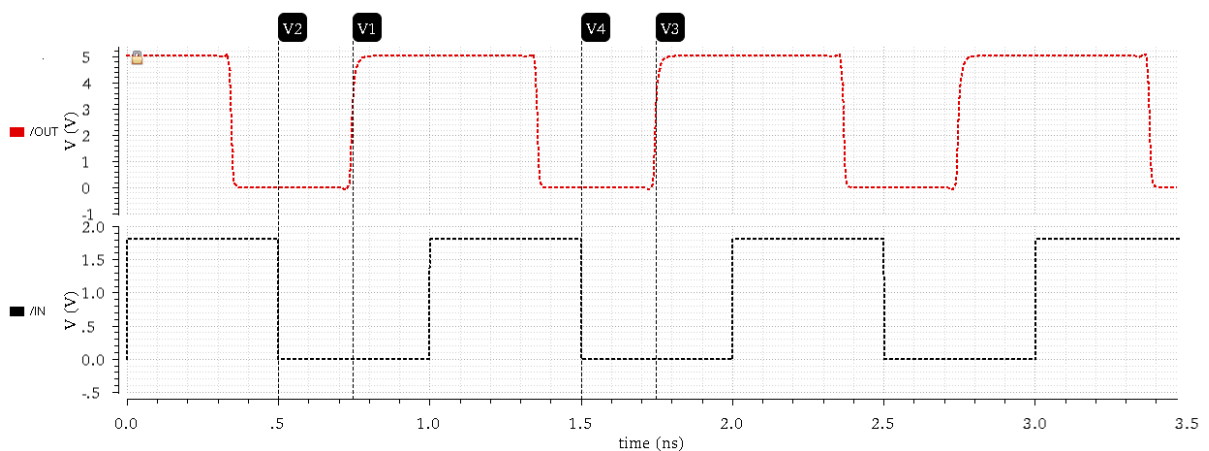


Figure 29 : Simulation transitoire du décaleur de niveau proposé avec le pilote de grille

La figure 29 montre l'analyse transitoire de nouveau décaleur de niveau avec le pilote de grille que nous avons utilisé dans notre puce de chargement de batterie sous le logiciel CADENCE Virtuoso.

Le nouveau décaleur de niveau associé avec le pilote de grille permet d'augmenter la tension de 1,8 V à 5 V. La sortie de 5 V a été obtenue en fonction d'une impulsion d'entrée de 1,8 V. Il est conçu à l'aide d'une technologie 180nm CMOS sous le logiciel CADENCE Virtuoso. La sortie stable du nouveau décaleur de niveau avec le pilote de grille peut être visualisée sur la figure 29. En conséquence, le temps de montée est d'environ 36 ps, le temps de descente est de presque 36 ps et le temps de retard est d'environ 0,25 ns.

III.3.4 Simulation Monte Carlo du décaleur de niveau proposé associé avec le pilote de grille

La figure 30 montre l'histogramme de la différence de délai du décaleur de niveau proposé associé avec le pilote de grille, nous pouvons observer à partir de la simulation Monte Carlo que l'écart-type pour 200 simulations était de 25,9365 ps.

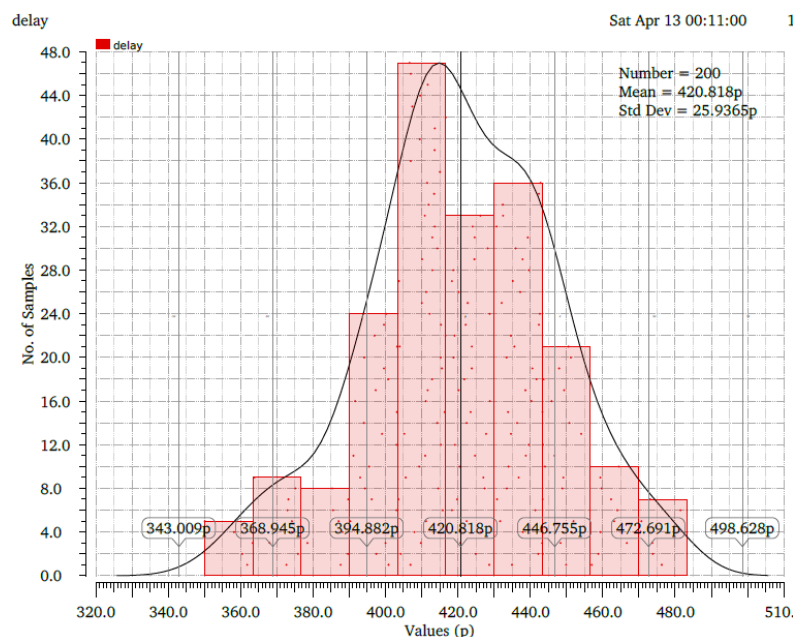


Figure 30 : Histogramme de la différence de temps de retard du décaleur de niveau proposé avec le pilote de grille

III.3.5 Layout

Cette partie s'intéresse aux dessins des masques en vue de la fabrication des circuits intégrés. Cette phase de « Layout » est critique car c'est elle qui définit l'implantation réelle des composants sur le silicium. Cette étape de conception d'un circuit doit prendre en compte un grand nombre d'effets indésirables qui sont susceptibles de provoquer un mauvais fonctionnement du circuit intégré. Il est donc nécessaire de concevoir le circuit en gardant à l'esprit que la robustesse du circuit dépend d'une part des choix que nous avons fait au moment du dimensionnement du circuit, mais aussi de la façon dont on va réaliser le dessin des masques. Il est donc indispensable de respecter des règles de dessin afin de s'affranchir ou de minimiser les effets indésirables dont l'origine peut être liée à des causes très diverses : chaleur, dispersion de caractéristiques des composants et des procédés de fabrication.

III.3.5.1 Effets indésirables

Il est possible de lister les effets indésirables selon les critères suivants : variations de process, matching, température, bruit, élément parasites.

Il est nécessaire d'ajouter les effets propres au design lui-même comme l'association sur un même substrat d'une partie numérique et d'une partie analogique ou la nature imparfaite des composants (due au matériau) lorsque le circuit fonctionne à des fréquences très élevées (par exemple, l'effet de substrat).

A. Variations de process

Les variations de procédés de fabrication ou variation de processus sont des effets qui se traduisent sur la variation de la qualité des matières. Nous observons ces variations aussi bien entre les « wafers » (les galettes de silicium) qu'entre les puces d'un même « wafer ».

Enfin lorsqu'il s'agit des variations des caractéristiques d'un même composant, par exemple les deux transistors d'une paire différentielle, on parle d'appariement ou de «

matching » des composants. Plus les caractéristiques des transistors d'une paire différentielle seront proches, plus les caractéristiques de la paire différentielle s'approcheront du cas idéal.

B. Effet de la température

Lors de la conception d'un Layout, le designer ne doit pas perdre de vue les effets de la température sur les différents paramètres électriques des composants. Par exemple, le courant de saturation d'une diode varie de façon très sensible avec la température. Afin de limiter les effets de la température, il est souvent souhaitable d'isoler spatialement les points chauds, dus à un courant élevé dans un transistor par exemple. Ainsi, il est possible de limiter l'effet d'un gradient de température dans un circuit où les composants doivent être appariés finement.

C. Eléments parasites

Lors de la phase de conception, le designer simule le comportement de son circuit par des simulations « électriques ». A ce stade de la conception, il ignore encore à quoi ressemblera son Layout. Il ne peut donc pas tenir compte des effets parasites liés à l'architecture de son Layout, c'est-à-dire généralement les capacités et les résistances parasites liés aux interconnexions (via, poly-silicium, métal). C'est pour cela qu'il est indispensable de procéder à une extraction de ces éléments parasites une fois le Layout dessiné en vue de la simulation post-Layout.

III.3.5.2 Techniques de Layout

Ce paragraphe présente les règles usuelles de dessin des masques. Le designer devra les garder en mémoire lorsqu'il sera dans cette phase de conception qui est très souvent s'avère délicate. Il devra également se souvenir des causes physiques qui ont menés à l'établissement de ces règles. Il est possible de lister ces règles : même structure, même taille, même température, même orientation, même environnement, minimisation des distances, structure

centroïde, augmentation des tailles, dessin des contacts, connexion en étoiles, latch-up, isolation avec la masse et placement des circuits mixtes.

A. Même structure, même taille

Lors du dessin d'une structure comportant des composants de même nature, il est préférable d'utiliser plusieurs fois la même structure plutôt que de définir des structures similaires de tailles différentes. Par exemple, si l'on réalise un miroir de courant avec un gain de 2, il faut dupliquer le transistor miroir 2 fois plutôt que de dessiner un transistor 2 fois plus large comme illustré dans la figure 31. En effet, seules les structures identiques sont susceptibles d'être appariées ou de « matcher ».

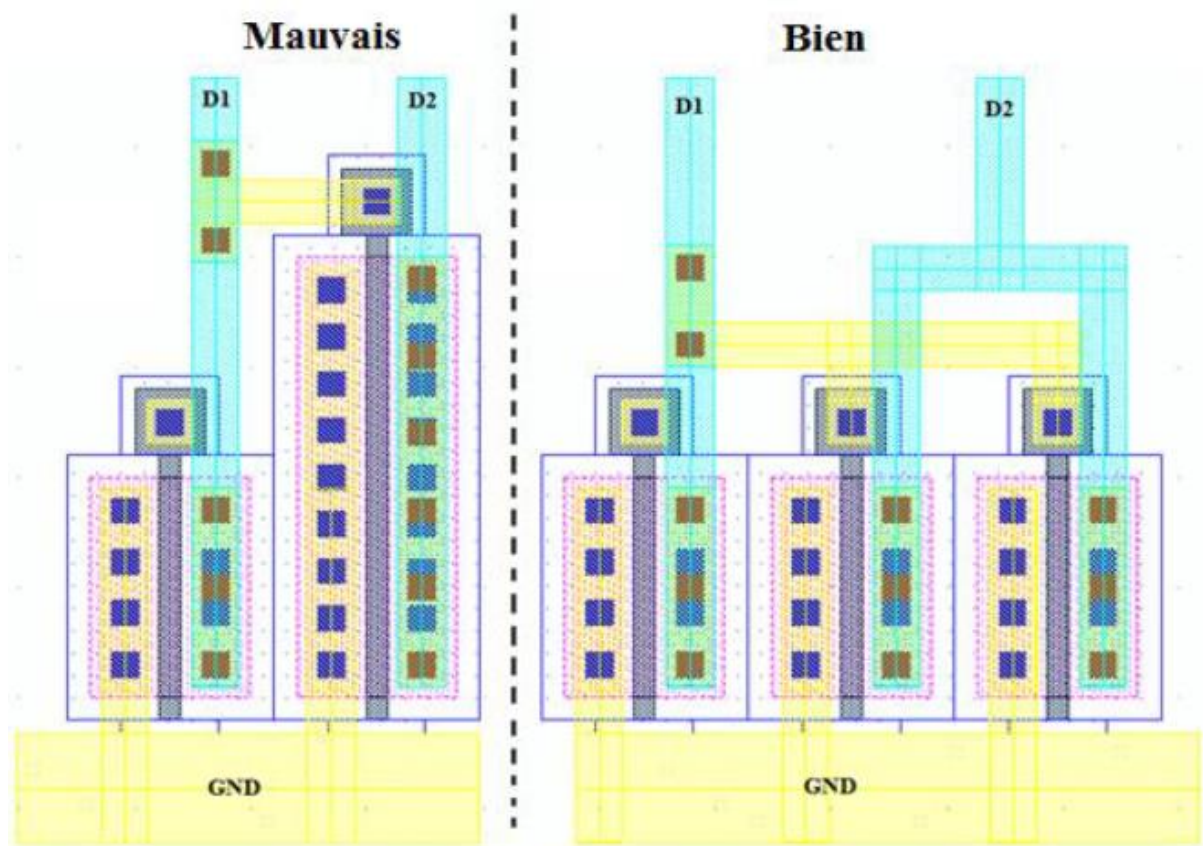


Figure 31 : Duplication d'une structure de même forme et de même taille

B. Même température

Lors du placement de composants appariés, il est important qu'il se trouve sur une même isotherme comme illustré dans la figure 32. Ainsi, les dérives en température des caractéristiques des composants ont moins de chance d'influer sur le comportement du montage. Par exemple, un gradient en température important peut modifier le comportement d'une structure différentielle en introduisant un offset.

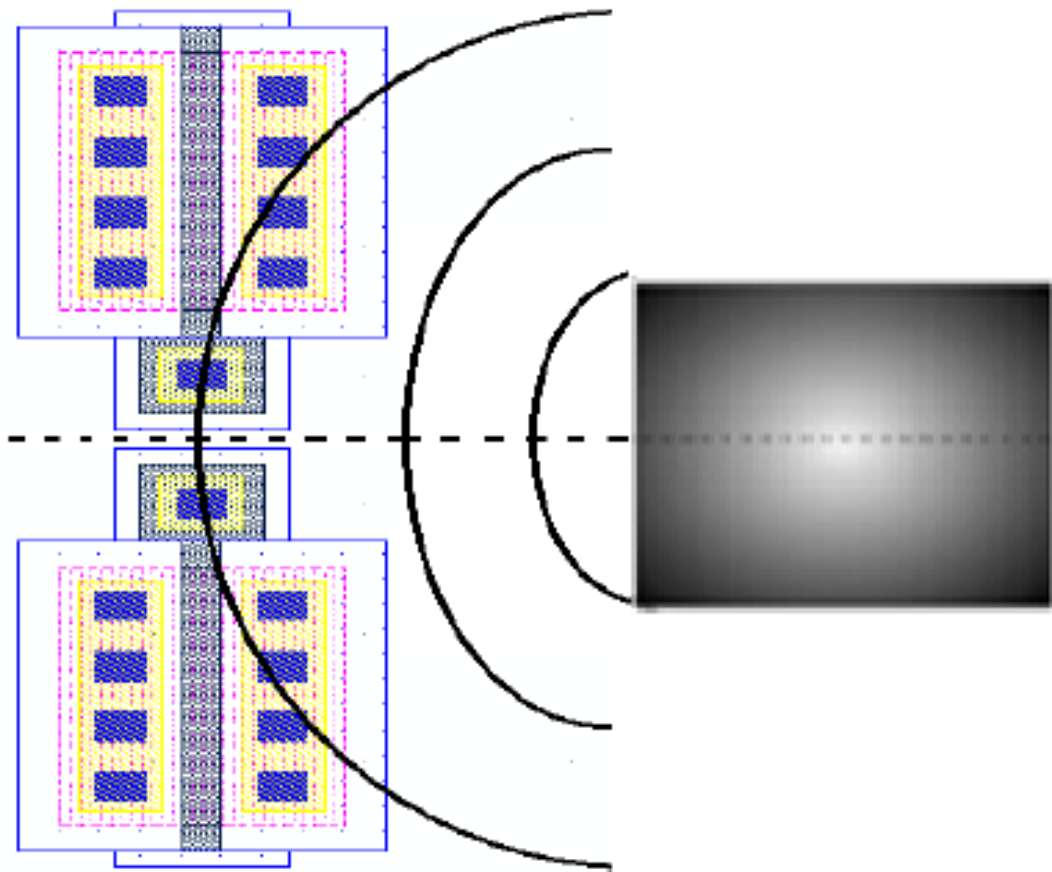


Figure 32 : Placement des composants sur une isotherme

C. Même orientation

L'implantation des zones de drain et de source se fait avec un angle pour éviter la canalisation des dopants dans le réseau cristallin comme illustré dans la figure 33. Il en résulte que le drain et la source ne sont plus symétriques : il y a un effet d'ombre causé par la grille.

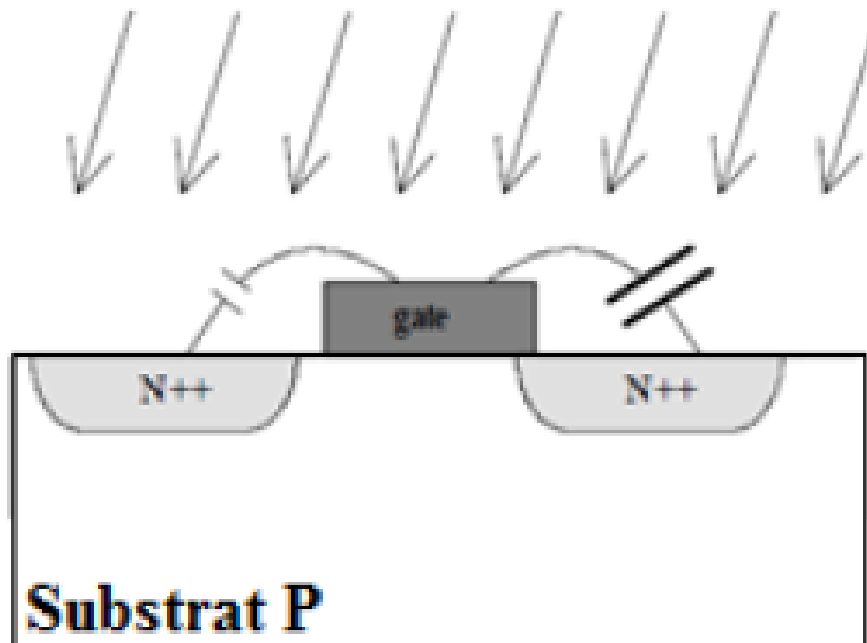


Figure 33 : Implantation des zones de drain et de source

Les conséquences pour le concepteur est qu'il devra conserver la même orientation pour ces composants afin que ces derniers puissent « matcher ». Le dessin au centre de la figure 34, n'est pas correct car les sources et les drains des transistors ne sont pas du même côté (le courant circule en sens opposé dans les transistors). Il faut donc veiller à ce que le courant circule dans le même sens pour les deux composants.

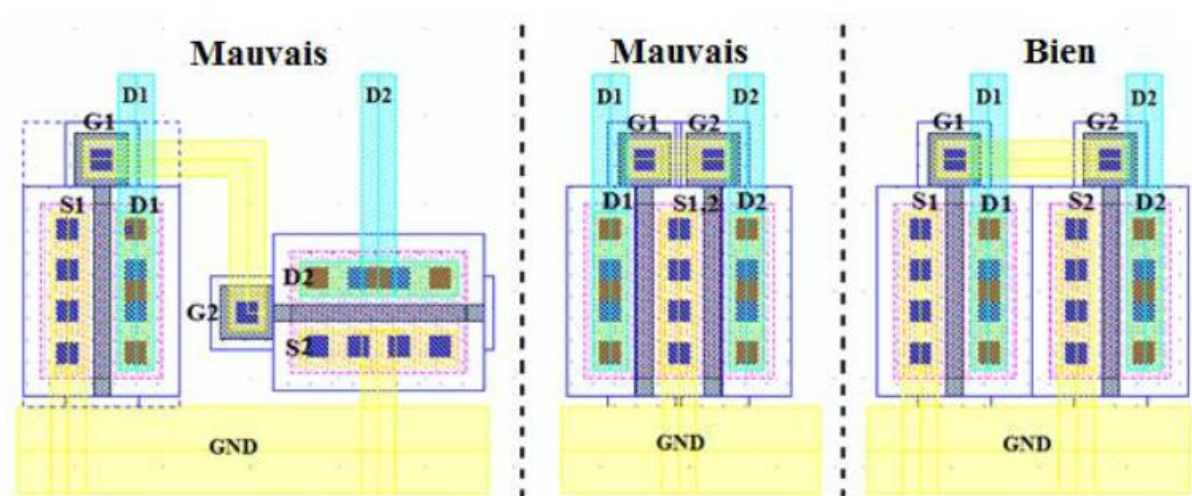


Figure 34 : Conservation de l'orientation d'une structure

D. Minimiser les distances

Le concepteur doit essayer de minimiser les distances afin de limiter les pertes en ligne dues à la résistivité des lignes et l'apparition de capacités parasites préjudiciables au bon fonctionnement du circuit comme illustré dans la figure 35.

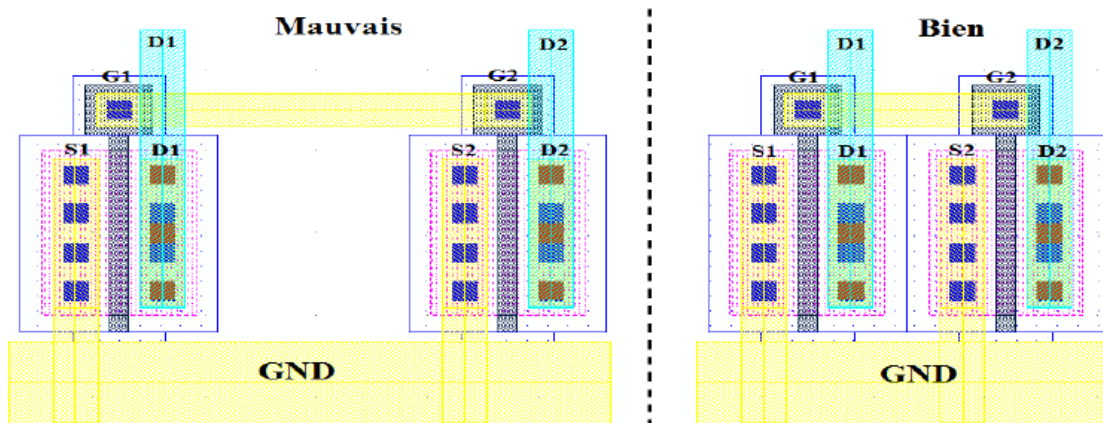


Figure 35 : Conservation de la minimisation des distances

E. Structure centroïde commune

Pour diminuer les effets dus aux variations locales, on imbrique les composants de telles sortes qu'ils aient un même barycentre comme illustré dans la figure 36.

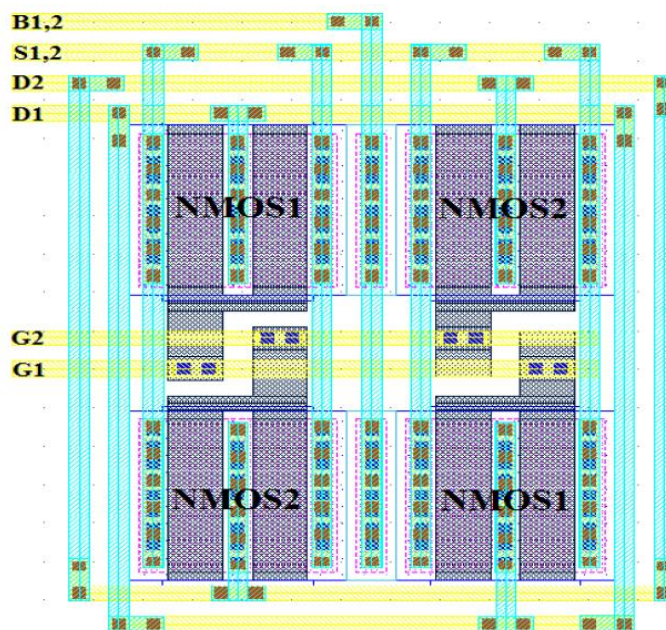


Figure 36 : Structure à centre commune

F. Même environnement

Afin de supprimer les effets de sur-gravure lors de la fabrication, il est souhaitable que deux composants identiques partagent le même environnement comme illustré dans la figure 37. Pour ce faire, il est usuel de dessiner des structures qui ne sont là que dans le but de limiter les effets de la sur-gravure lors de la fabrication. On parle alors de structures inutiles ou de « dummy structures ».

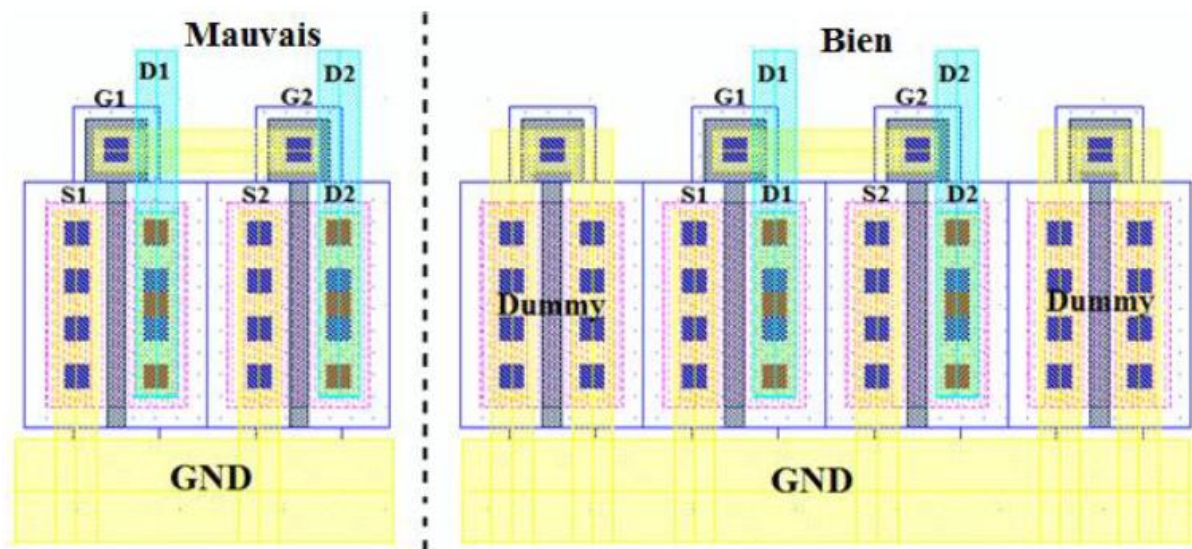


Figure 37 : Utilisation de « dummy structures » pour garantir le même environnement

G. Augmentation des tailles

Comme les petits composants sont plus sensibles aux variations aléatoires (loi de Pelgrom) des procédés de fabrication, il est souhaitable d'augmenter leur taille de sorte à limiter les effets de ces variations comme illustré dans la figure 38. Cette règle conduit aux concepteurs de circuits analogiques à ne jamais dessiner les composants par leurs dimensions minimales. Les transistors ont en général des valeurs supérieures pour W et L que les valeurs minimales de la technologie. Toutefois, en numérique, les transistors fonctionnent en commutation.

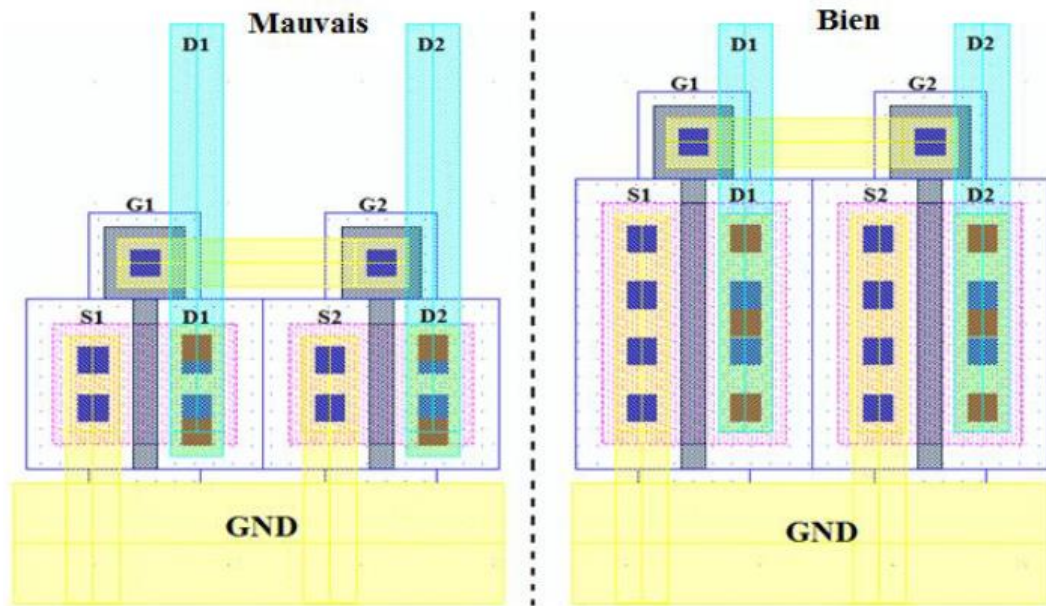


Figure 38 : Augmentation de la taille des composants

H. Connexion en étoile

Pour éviter qu'un retour de courant par la masse crée une différence de potentiel (ou offset CEM), il est nécessaire de connecter en étoile deux composants qui doivent matcher comme illustré dans la figure 39.

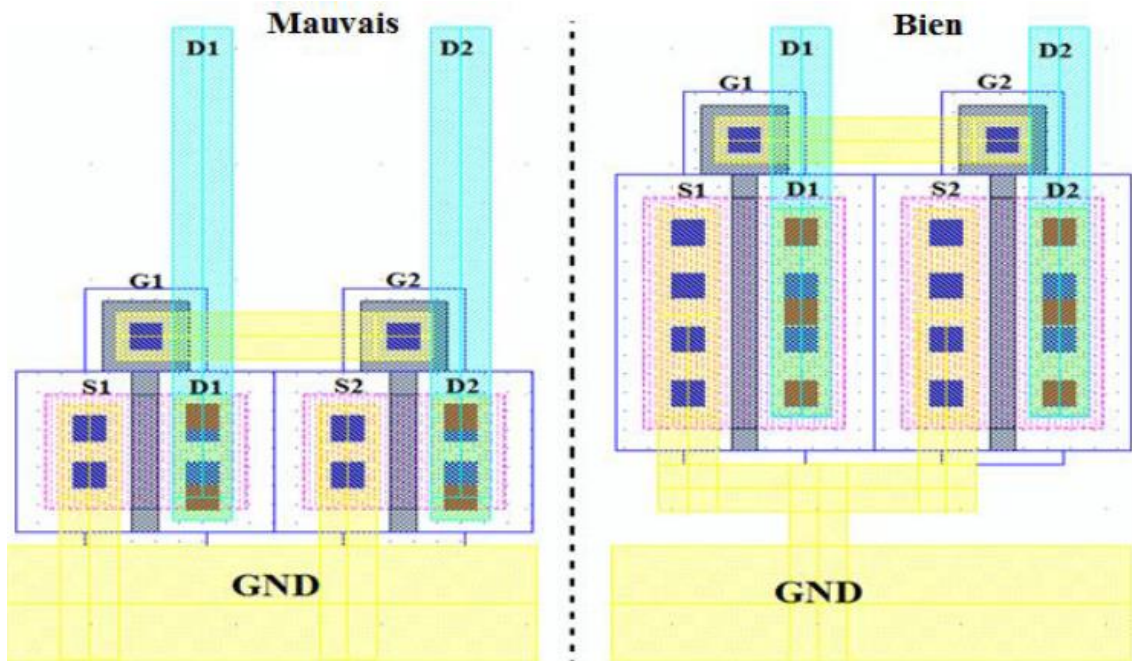


Figure 39 : Connexion en étoile

III.3.5.3 Layout du décaleur de niveau proposé avec le pilote de grille

La figure 40 montre le layout du décaleur de niveau proposé associé avec le pilote de grille pour le chargeur de batterie Li-Ion. Tous les dispositifs ou circuits susceptibles de produire des interférences électromagnétiques ou sensibles aux interférences sont entourés d'anneaux de protection à double couche. La disposition est réalisée en respectant les éléments suivants : les règles de conception (DRM, MRC et Densité) et les informations sur les contraintes du concepteur (gestionnaire de contraintes, match Cat, texte, etc.). Le Layout occupe une surface totale de 0,05 mm².

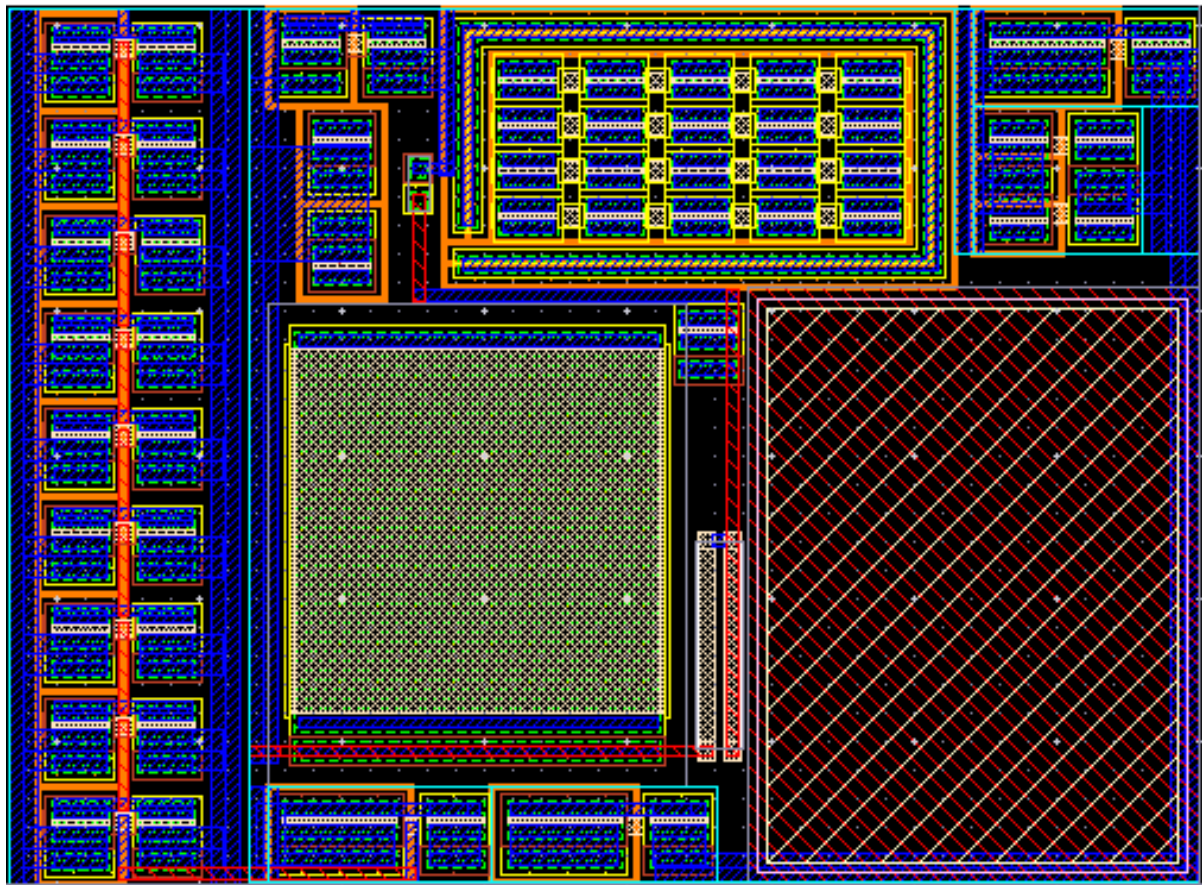


Figure 40 : Layout du décaleur de niveau proposé associé avec le pilote de grille

III.4 Conclusion

Un décaleur de niveau associé avec le pilote de grille à faible coût, de petite taille et à grande vitesse pour l'interface de chargeur de batterie Li-Ion a été conçu et mis en œuvre avec succès sous le logiciel Cadence Virtuoso avec la technologie TSMC 180 nm CMOS. La conception du circuit, la simulation, l'analyse et la conception de la disposition sont toutes incluses dans ce chapitre. Le décaleur de niveau proposé réduit considérablement le délai de transfert de 1,3 ns (délai de transfert de décaleur de niveau classique) à 0,15 ns avec le même signal d'entrée. Le décaleur de niveau proposé associé avec le pilote de grille atteint un délai de propagation de 0,25 ns et la surface totale n'est que de 0,05 mm².

Le prochain chapitre présente en détail la conception et l'optimisation d'une nouvelle interface du chargeur de la batterie Li-Ion utilisant une technique basée sur la commutation. Ce chargeur proposé permet de charger la batterie complètement par des passages à chaque mode de charge (TC, CC, CV) en trente-trois minutes.

Chapitre IV : Conception et analyse d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant une technique basée sur la commutation

Sommaire

| | |
|---|------------|
| IV.1 Introduction | 80 |
| IV.2 Conception d'un nouveau chargeur utilisant une technique de contrôle basée sur la commutation | 82 |
| IV.2.1 Bloc de contrôle du mode | 84 |
| IV.2.2 Bloc de référence des courants | 90 |
| IV.2.3 Bloc de contrôle de charge | 94 |
| IV.2.4 Bloc de décaleur de niveau et bloc de pilote de grille | 96 |
| IV.2.5 Bloc de détecteur de courant | 97 |
| IV.3 Résultats de la simulation et le Layout de chargeur proposé basé sur la commutation | 99 |
| IV.3.1 Simulation de chargeur proposé basé sur la commutation | 99 |
| IV.3.2 Layout de chargeur proposée basé sur la commutation | 101 |
| IV.4 Conclusion | 102 |

IV.1 Introduction

La batterie Li-Ion est reconnue comme le meilleur outil de stockage d'énergie qui résout le besoin d'un faible coût, d'un poids léger et d'une longue durée de fonctionnement [22]. C'est pourquoi la solution de recharge de la batterie Li-Ion a suscité des efforts de recherche si intenses, que ce soit dans l'industrie ou dans les universités [77] [4] [12] [95]. Les solutions de charge de la batterie bien connues sont essentiellement classées en deux types, la figure 41 montre le chargeur à base de LDO (Low-Drop-Out) et le chargeur à base de commutation (Switching-Based) [6].

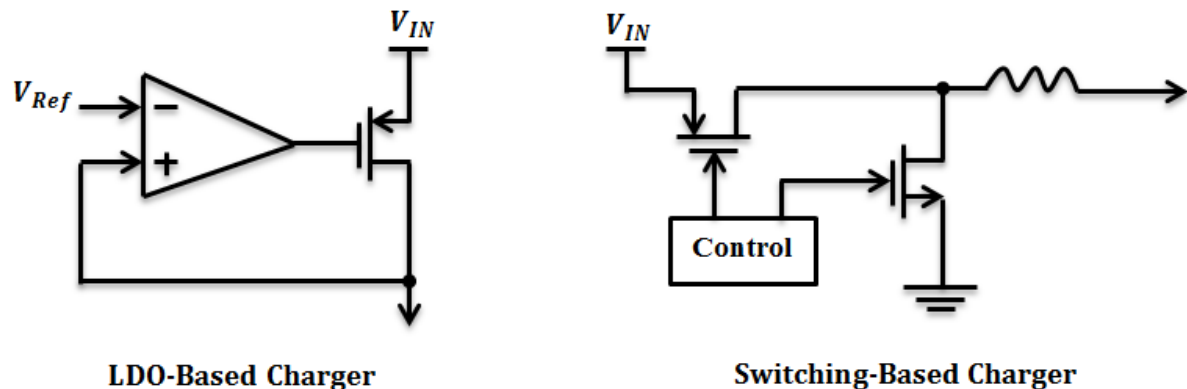


Figure 41 : Chargeur à base de LDO et le chargeur à base de commutation [6]

Le chargeur à base de LDO réalise l'avantage de la simplicité au détriment d'une efficacité médiocre. Le chargeur LDO répond à telles demandes en raison de son faible courant ondulé et il peut être inséré dans la puce sans composant descriptif [7]. Le faible rendement est un grand problème pour lui, de sorte que l'utilisation du Power MOS comme source de courant variable est une solution à son faible rendement et aussi pour minimiser sa perte [96]. Le chargeur à base de la commutation est basé sur la conception d'un circuit avancé. Il est nécessaire pour obtenir un rendement élevé, et il donne une large gamme de tension d'entrée/sortie [79]. En outre, la commutation présente de nombreux inconvénients,

comme une pire répudiation du bruit (dès l'ondulation à un taux de commutation) et une augmentation de la consommation d'énergie [97].

En plus, ces systèmes de charge sont généralement intégrés dans une seule puce pour minimiser la complexité de la conception des circuits grâce à l'amélioration de la technologie CMOS. Ensuite, le chargeur de batterie est intégré dans un système sur puce (SoC) pour réduire l'effet d'ondulation et le bruit [97]. La figure 42 montre les modes de charge de la batterie Li-Ion qui se compose de quatre étapes : la première est la charge de maintien (TC), la deuxième est la charge à courant constant (CC), la troisième est la charge à tension constante (CV) et la dernière est la fin de la charge [98] [9].

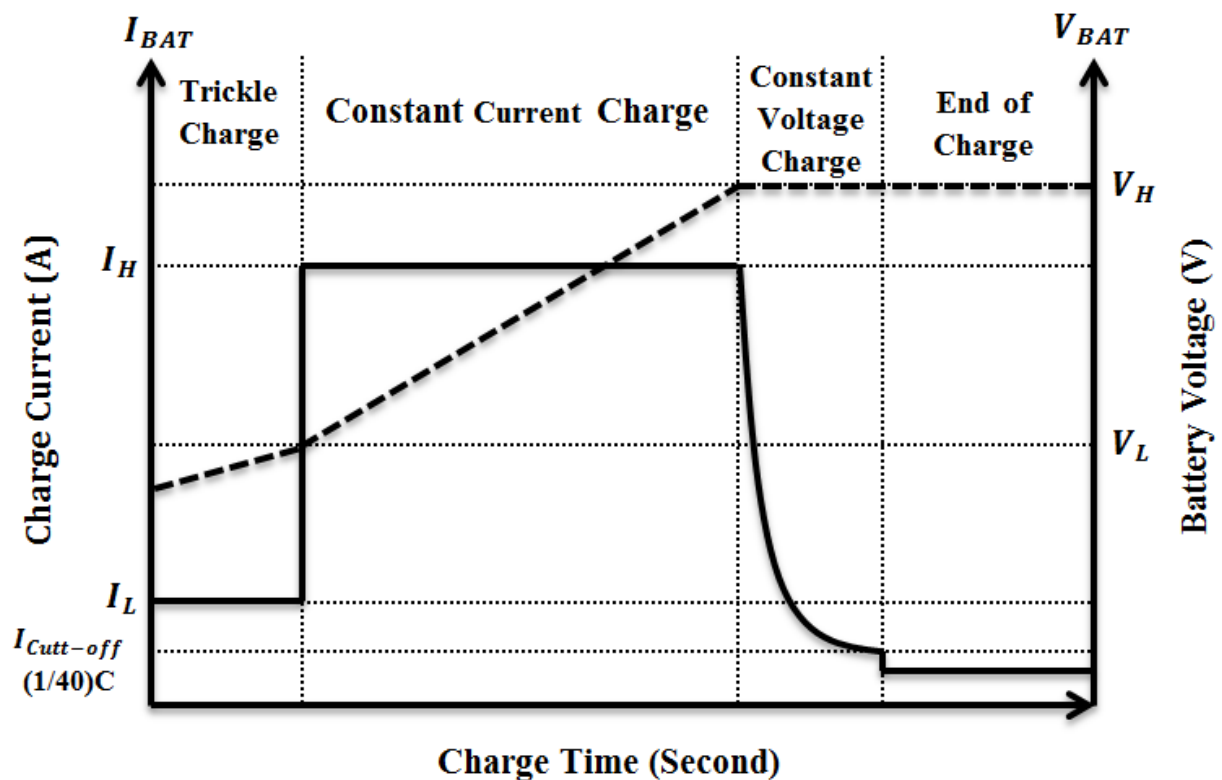


Figure 42 : Modes de charge de la batterie Li-Ion à l'aide d'une technique basée sur la commutation

Le mode de charge de maintien TC (Trickle Charge) est activé lorsque la tension de la batterie V_{BAT} est réduite par rapport à la basse tension V_L , le courant de la batterie I_{BAT} est

maintenu à une valeur basse constante ($0,1C$, C représente la capacité de la batterie et son unité est (Ah) ampères-heures) pour protéger la batterie contre les dommages causés par une surchauffe. Le mode de charge à courant constant CC (Constant Current Charge) est sélectionné lorsque la tension V_{BAT} se situe entre la tension V_L et la haute tension V_H , il minimise le temps de charge car la batterie est chargée avec un courant constant et élevé ($0,1C-1C$).

Le mode de charge à tension constante CV (Constant Voltage Charge) est activé lorsque la tension V_{BAT} monte jusqu'à la valeur de spécification de la tension V_H , ce qui fait que le courant I_{BAT} tombe à la coupure ($0,02C-0,07C$) et que le processus de charge se termine.

IV.2 Conception d'un nouveau chargeur utilisant une technique de contrôle basée sur la commutation

Jusqu'à présent, de nombreux travaux de recherche ont proposé différentes architectures afin de générer une tension d'alimentation de sortie constante pour l'interface du chargeur de batterie Li-Ion en utilisant la technologie CMOS. Cependant, leur efficacité énergétique est comparativement faible en raison d'une perte de puissance accrue du MOSFET de puissance (Power-MOSFET) [9], [99], [100], [13] et [10]. Pour résoudre ce problème, nous allons contrôler chaque mode via son signal de commande identique afin d'améliorer l'efficacité énergétique qui contribuera à l'adaptation entre la tension d'alimentation de la charge et la tension de la batterie V_{BAT} . Un nouveau circuit de charge proposé pour l'interface de chargeur des batteries Li Ion est illustré à la figure 43 qui comprend six sous-circuits : le bloc de contrôle de mode (Mode Control), le bloc de référence des courants (Currents Reference), le bloc de contrôle de charge (Charge Control), le bloc de pilote de grille (Gate Driver), le bloc de décaleur de niveau (Level Shifter) et le bloc de détecteur de courant (Current Sensing).

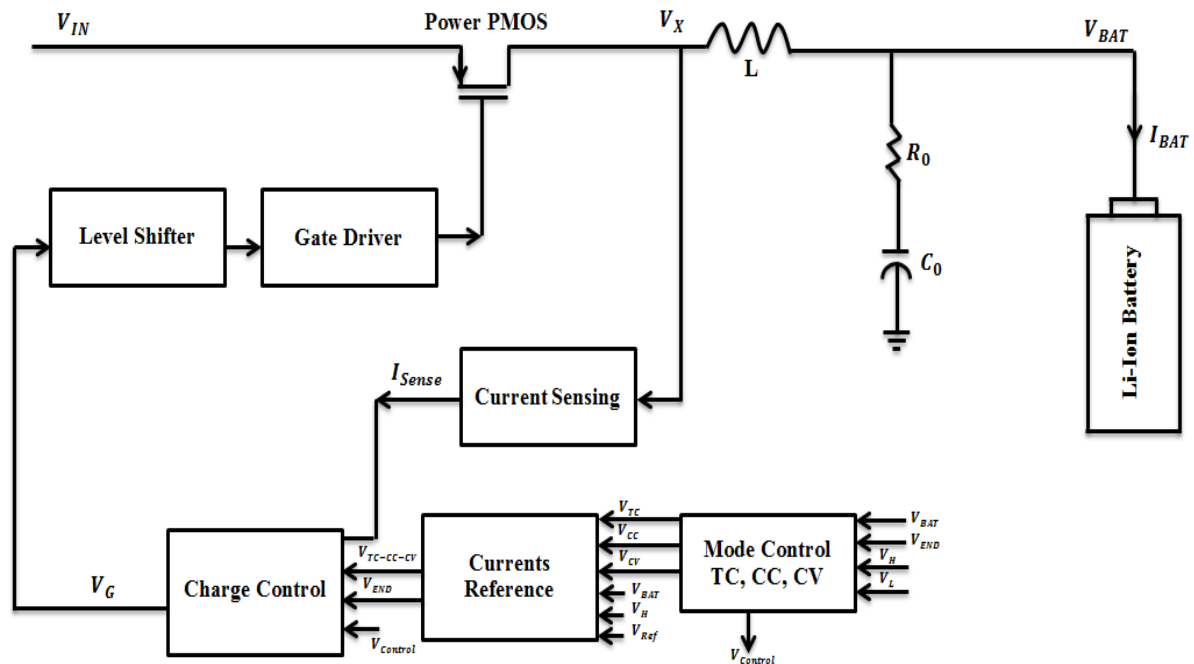


Figure 43 : Circuit de charge proposé pour l'interface du chargeur de la batterie Li-Ion

Le bloc de contrôle de mode (Mode Control Block) est conçu pour définir les modes de charge (le mode de charge de ruissellement ou de maintien TC, le mode de charge à courant constant CC et le mode de charge à tension constante CV) en comparant la tension de la batterie V_{BAT} avec la tension V_H et la tension V_L , qui sont générées à partir d'un bloc de bande interdite (Band-Gap block).

D'autre part, le bloc de référence des courants produit un courant souhaité correspondant à la tension de sortie du bloc de contrôle de mode. Ce dernier bloc est suivi d'un bloc de contrôle de charge utilisé pour la comparaison entre le courant capté ou détecté I_{sense} généré par le détecteur de courant et les courants de référence afin de générer la tension de grille V_G qui aide à contrôler le transistor PMOS de puissance (Power PMOS) grâce au décaleur de niveau associé avec un circuit de pilote de grille. Cela permet de maintenir une différence de tension constante entre la tension d'alimentation V_{IN} et la tension V_{BAT} . Le principe de fonctionnement de chaque bloc a été décrit dans les sous-sections suivantes.

IV.2.1 Bloc de contrôle du mode

Le circuit de bloc de contrôle de mode est un système de contrôle logique composé de deux niveaux de tension de sortie : une tension élevée qui signifie un niveau logique égal à "1" et une tension basse qui signifie un niveau logique égal à "0".

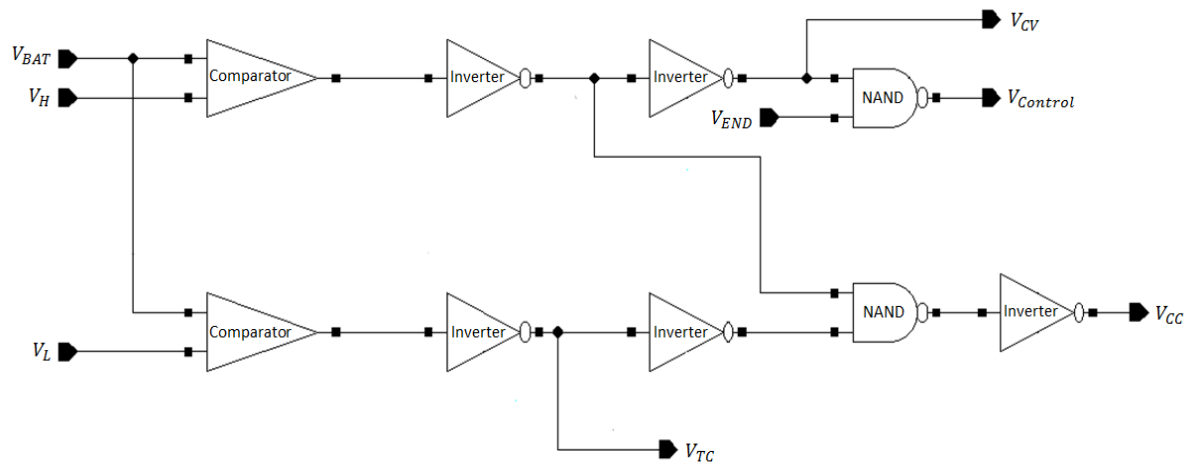


Figure 44 : Schéma du circuit de bloc de contrôle du mode

Le circuit de bloc de contrôle du mode est illustré à la figure 44. Il contribue à définir la tension de la batterie V_{BAT} et à produire les signaux de contrôle qui sont : la tension de charge de maintien V_{TC} , la tension de charge à courant constant V_{CC} et la tension de charge à tension constante V_{CV} . La tension V_{TC} , la tension V_{CC} , et la tension V_{CV} sont obtenues à partir d'une comparaison entre la tension V_{BAT} et les tensions de référence qui sont la tension V_H et la tension V_L . Cette comparaison est produite par l'utilisation de deux comparateurs à grande vitesse. Par conséquent, lorsque la tension de la batterie V_{BAT} est inférieure à la tension V_L , seulement la tension V_{TC} qui sera activée. Lorsque la tension de la batterie V_{BAT} est supérieure ou égale à la tension V_L et inférieure à la tension V_H , seulement la tension V_{CC} qui sera activée. Par contre lorsque la tension de la batterie V_{BAT} est supérieure ou égale à la tension V_H , seulement la tension V_{CV} qui sera activée.

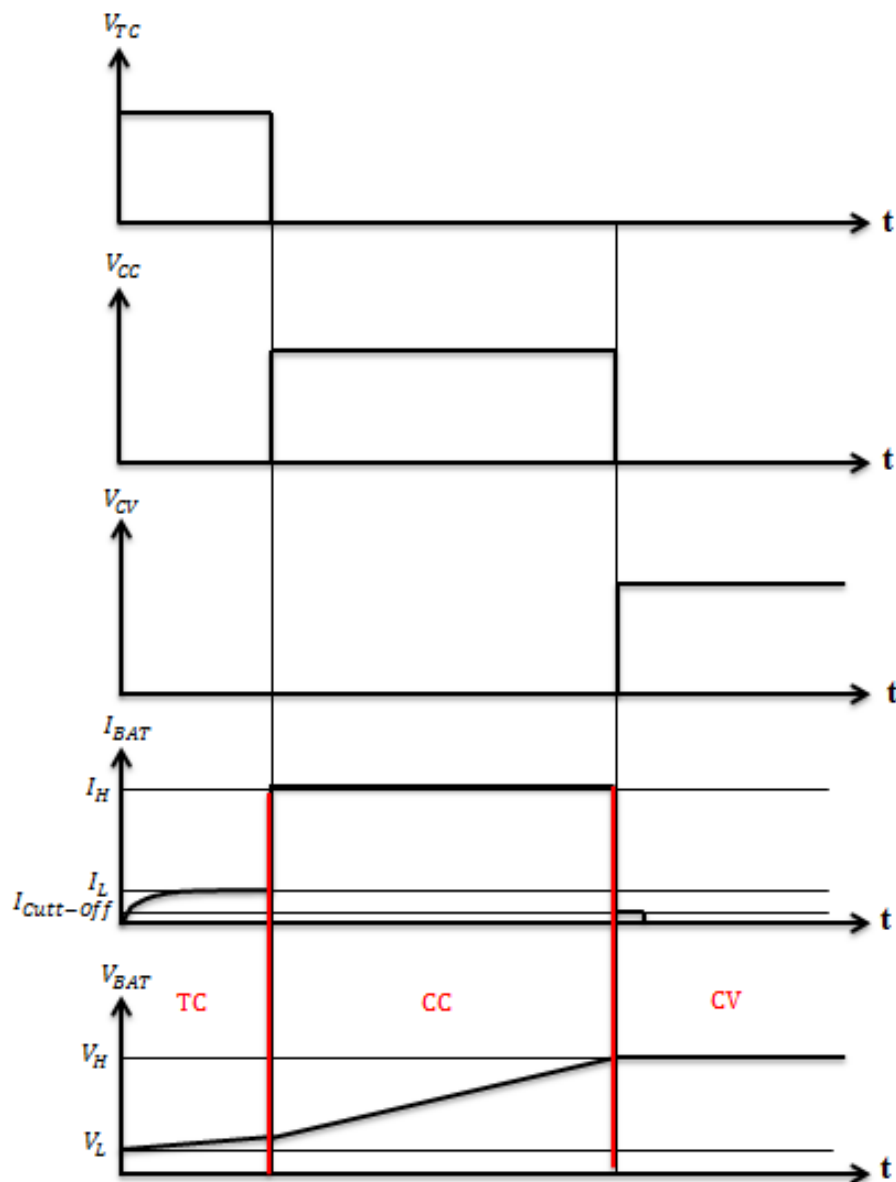


Figure 45 : Formes des courbes des signaux de contrôle (V_{TC} , V_{CC} et V_{CV}), du courant de batterie (I_{BAT}) et de la tension de batterie (V_{BAT})

De plus, le signal de tension de contrôle $V_{Control}$ est envoyé au bloc de contrôle de charge pour générer un courant de charge dans le mode de charge correspondant. La figure 45 montre les formes d'ondes des signaux de contrôle (V_{TC} , V_{CC} et V_{CV}), du courant I_{BAT} et de la tension V_{BAT} . Donc dans le mode de charge TC, seulement la tension V_{TC} est réglé sur "ON". En mode de charge CC, seulement la tension V_{CC} est réglée sur "ON". Aussi, en mode de charge CV, seulement la tension V_{CV} est réglée sur "ON".

La figure 46 montre le schéma de comparateur utilisé dans le bloc de contrôle de mode.

Aussi le rapport de chaque transistor de circuit du comparateur est donné dans le tableau 13.

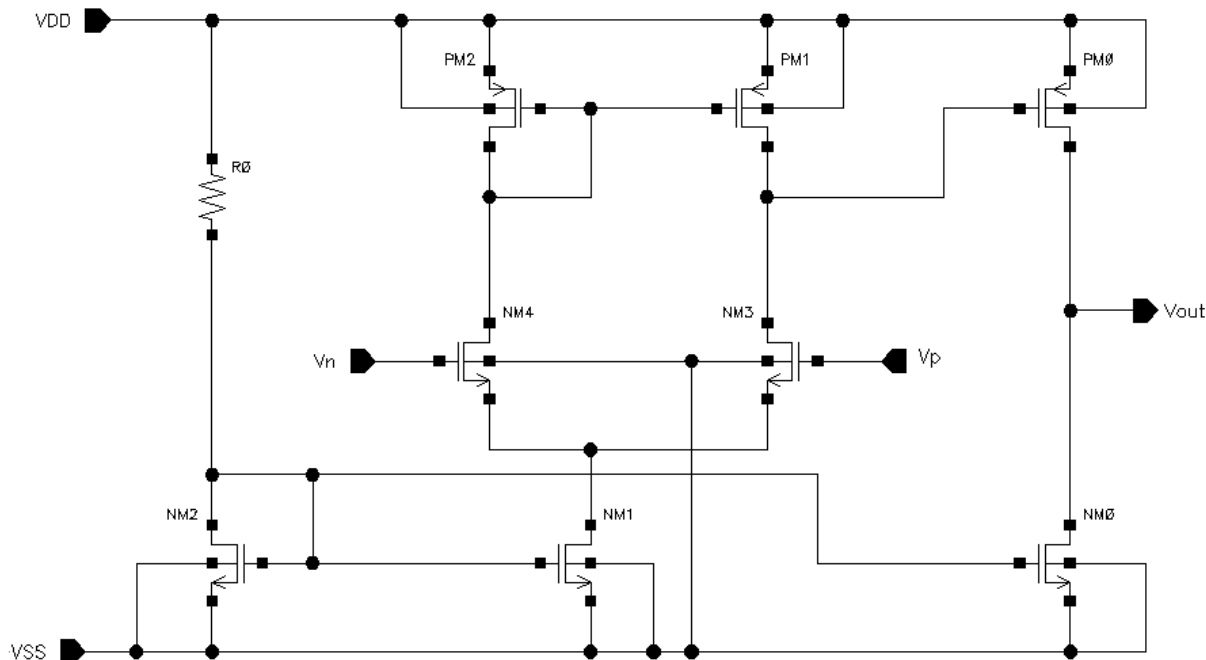


Figure 46 : Schéma du circuit de comparateur utilisé dans le bloc de contrôle de mode

L'analyse transitoire est utilisée pour montrer la variation de la sortie en fonction du temps. La simulation transitoire de comparateur utilisé dans le bloc de contrôle de mode est illustrée dans la figure 47. Le résultat de simulation confirme le fonctionnement du comparateur, si $V_P > V_N$ la sortie du comparateur est au niveau haut et si $V_P < V_N$ la sortie du comparateur est au niveau bas.

Tableau 13 : Rapport de chaque transistor du circuit de comparateur utilisé dans le bloc de contrôle de mode

| Transistors | le rapport (W/L) ($\mu\text{m}/\text{nm}$) | Le taux de multiplication (m) |
|--------------------|--|-------------------------------|
| PM0 | 4/180 | 2 |
| PM1, PM2 | 4/180 | 1 |
| NM0, NM1, NM3, NM4 | 2/180 | 2 |
| NM2 | 2/180 | 1 |

Chapitre IV

Conception et analyse d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant une technique basée sur la commutation

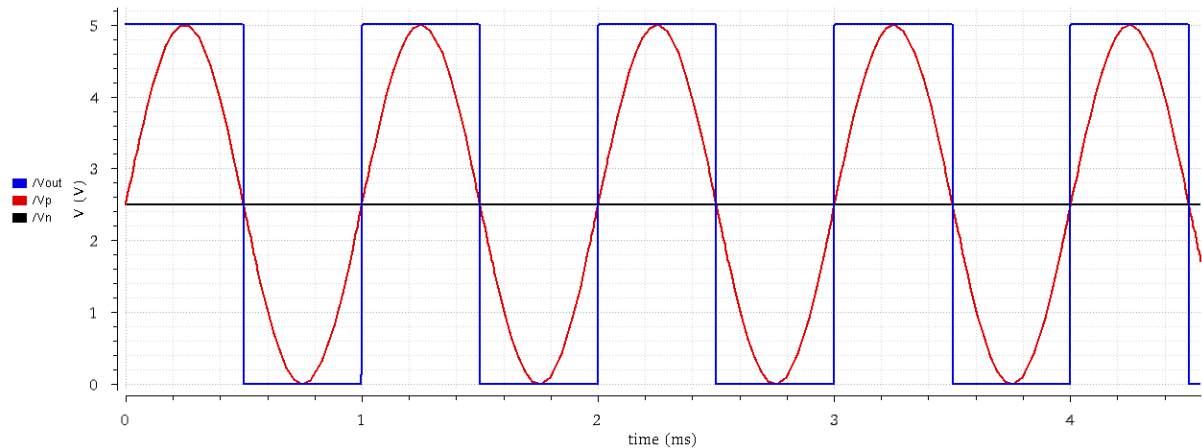


Figure 47 : Résultat de simulation transitoire de comparateur utilisé dans le bloc de contrôle de mode

L'analyse DC est utilisée pour analyser le comportement de la sortie en fonction de la variation de l'entrée. La simulation DC de comparateur utilisé dans le bloc de contrôle de mode est illustrée dans la figure 48. Le résultat de simulation montre bien le fonctionnement du comparateur, lorsque $V_P < V_N$ la sortie du comparateur est égale à V_{SS} , et lorsque $V_P > V_N$ la sortie prend la valeur de V_{DD} . Nous avons vérifié que tous les transistors CMOS de circuit du comparateur fonctionnent en régime de saturation.

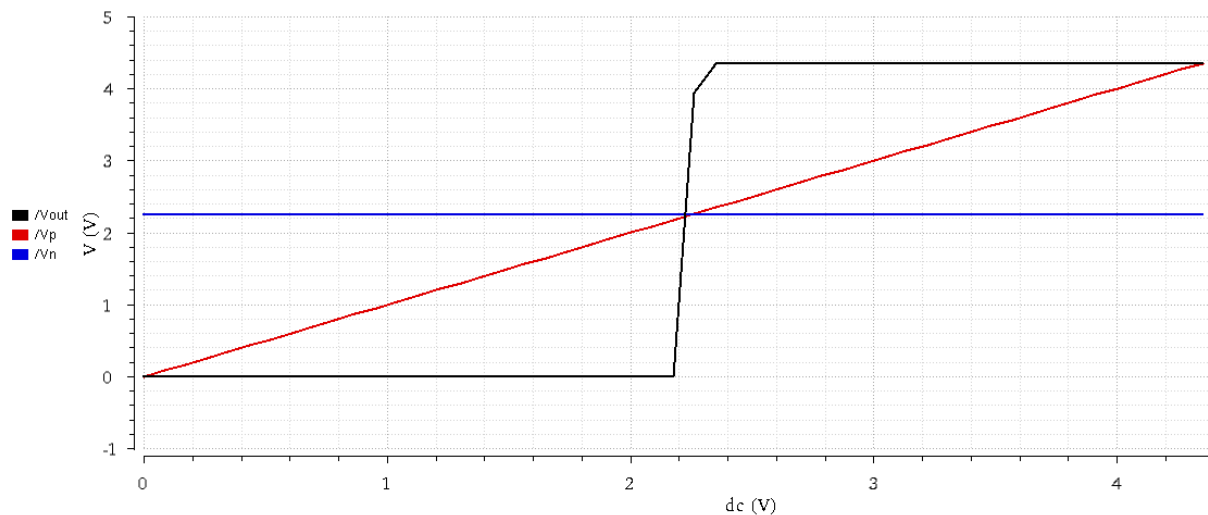


Figure 48 : Résultat de simulation DC de comparateur utilisé dans le bloc de contrôle de mode

La figure 49 montre le schéma de l'inverseur et la figure 50 montre le schéma de la porte logique NAND, qui sont utilisées dans le bloc de contrôle de mode.

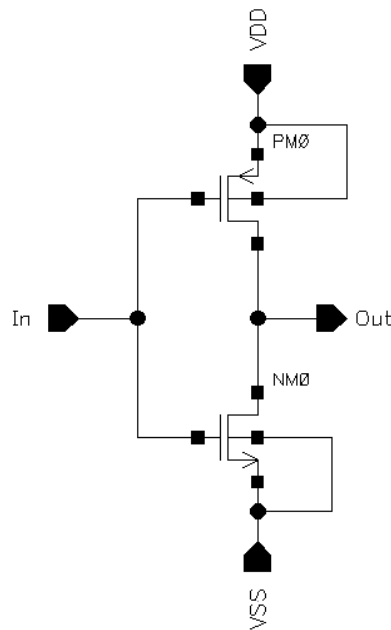


Figure 49 : Schéma du circuit de l'inverseur utilisé dans le bloc de contrôle de mode

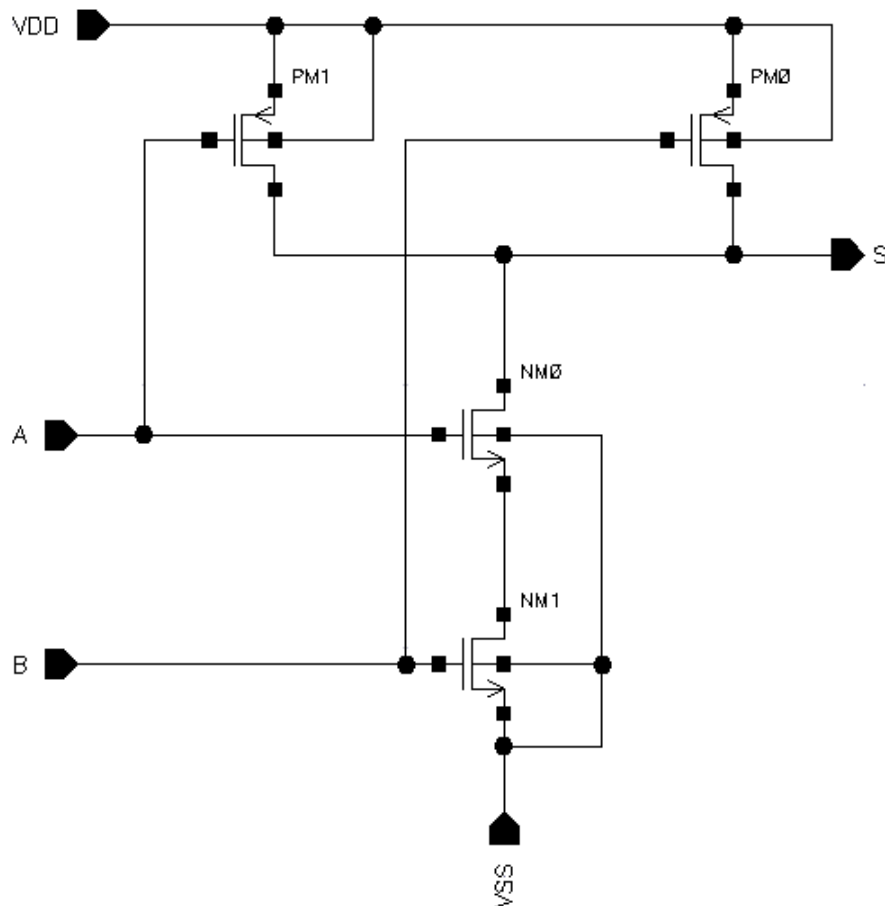


Figure 50 : Schéma du circuit de la porte logique NAND utilisé dans le bloc de contrôle de mode

Chapitre IV

Conception et analyse d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant une technique basée sur la commutation

Le rapport de chaque transistor des circuits de l'inverseur et de la porte logique NAND utilisés dans le bloc de contrôle de mode, sont donnés par les tableaux 14 et 15, respectivement.

Tableau 14 : Rapport de chaque transistor du circuit de l'inverseur utilisé dans le bloc de contrôle de mode

| Transistors | le rapport (W/L) ($\mu\text{m}/\text{nm}$) | Le taux de multiplication (m) |
|---------------|--|-------------------------------|
| PM0, PM1, PM2 | 2/180 | 1 |
| NM0, NM1, NM2 | 2/180 | 1 |

Tableau 15 : Rapport de chaque transistor du circuit de la porte logique NAND utilisé dans le bloc de contrôle de mode

| Transistors | le rapport (W/L) ($\mu\text{m}/\text{nm}$) | Le taux de multiplication (m) |
|-------------|--|-------------------------------|
| PM0, PM1 | 4/180 | 1 |
| NM0, NM1 | 2/180 | 1 |

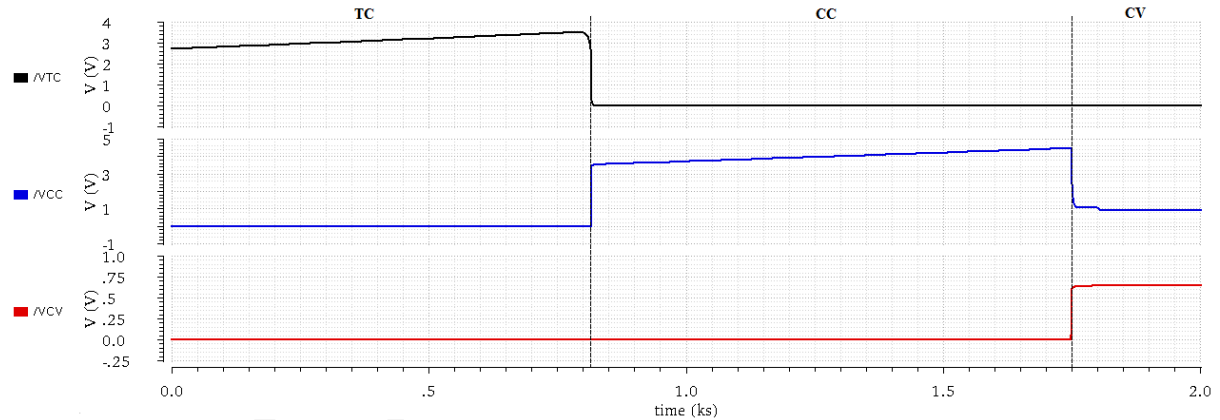


Figure 51 : Résultats de la simulation transitoire du contrôle de mode

Le résultat de simulation transitoire de bloc de contrôle du mode dans chaque mode de charge est présenté dans la figure 51. Cette dernière montre que la tension V_{TC} est active dans le mode de charge TC, la tension V_{CC} est active dans le mode de charge CC et la tension V_{CV} est active dans le mode de charge CV.

IV.2.2 Bloc de référence des courants

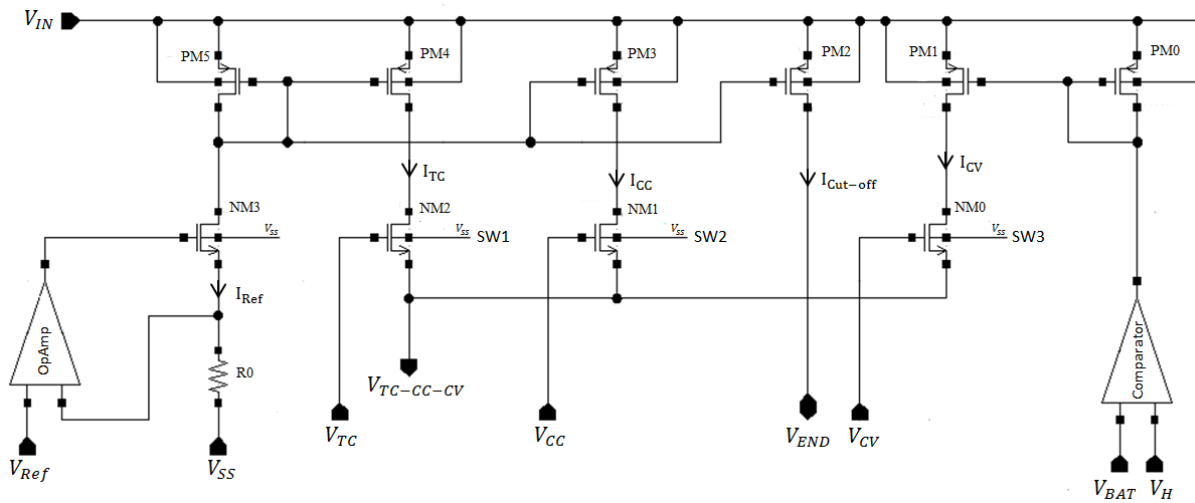


Figure 52 : Schéma du circuit de bloc de référence des courants

Le circuit de bloc de référence des courants sous le logiciel CADENCE Virtuoso est illustré à la figure 52. Il se compose d'un amplificateur opérationnel qui est illustré dans la Figure 53 et d'un comparateur qui est illustré dans la Figure 46. Il est conçu pour produire une référence de courant I_{Ref} qui est déterminé par l'équation :

$$I_{Ref} = \frac{V_{Ref}}{R_{Ref}} \quad (13)$$

Le rapport de chaque transistor du circuit de bloc de référence des courants est donné par le tableau 16.

Tableau 16 : Rapport de chaque transistor du circuit de bloc de référence des courants

| Transistors | le rapport (W/L) ($\mu\text{m}/\text{nm}$) | Le taux de multiplication (m) |
|--------------------|--|-------------------------------|
| PM0, PM1, PM4, PM5 | 2/180 | 1 |
| PM2 | 0.4/180 | 1 |
| PM3 | 2/180 | 5 |
| NM0, NM1 | 2/ (1 μm) | 1 |
| NM2 | 2/500 | 1 |
| NM3 | 2/180 | 1 |

Le premier système de miroir de courant est composé des transistors PMOS : transistor PM2, transistor PM3, transistor PM4, transistor PM5. Ce système aide à produire le courant I_{TC} , le courant I_{CC} et le courant de coupure $I_{Cut-off}$, qui sont proportionnels au courant de référence I_{Ref} et ils sont également utilisés comme références proportionnelles dans le mode de charge TC, le mode de charge CC et la fin du mode de charge, respectivement.

Lorsque la tension de la batterie V_{BAT} atteint 4,25 V, le comparateur à grande vitesse associé avec le second système de miroir de courant commence à produire un courant de la tension constante I_{CV} , qui diminue du courant I_{CC} au courant $I_{Cut-off}$. Le second système de miroir de courant est composé des transistors PMOS (transistor PM0, transistor PM1).

Le courant I_{CV} est utilisé comme une référence proportionnelle dans le mode de charge CV. La tension V_{TC} , la tension V_{CC} et la tension V_{CV} , qui sont générées à partir du bloc de contrôle du mode, sont utilisées dans le bloc de référence des courants pour contrôler les trois interrupteurs SW1, SW2 et SW3, respectivement. Le bloc de référence des courants assure la production et l'envoi de courant de charge de ruissellement ou de maintien I_{TC} , de courant du courant constant I_{CC} et de courant de la tension constant I_{CV} au bloc de contrôle de charge dans chaque mode de charge (TC, CC et CV).

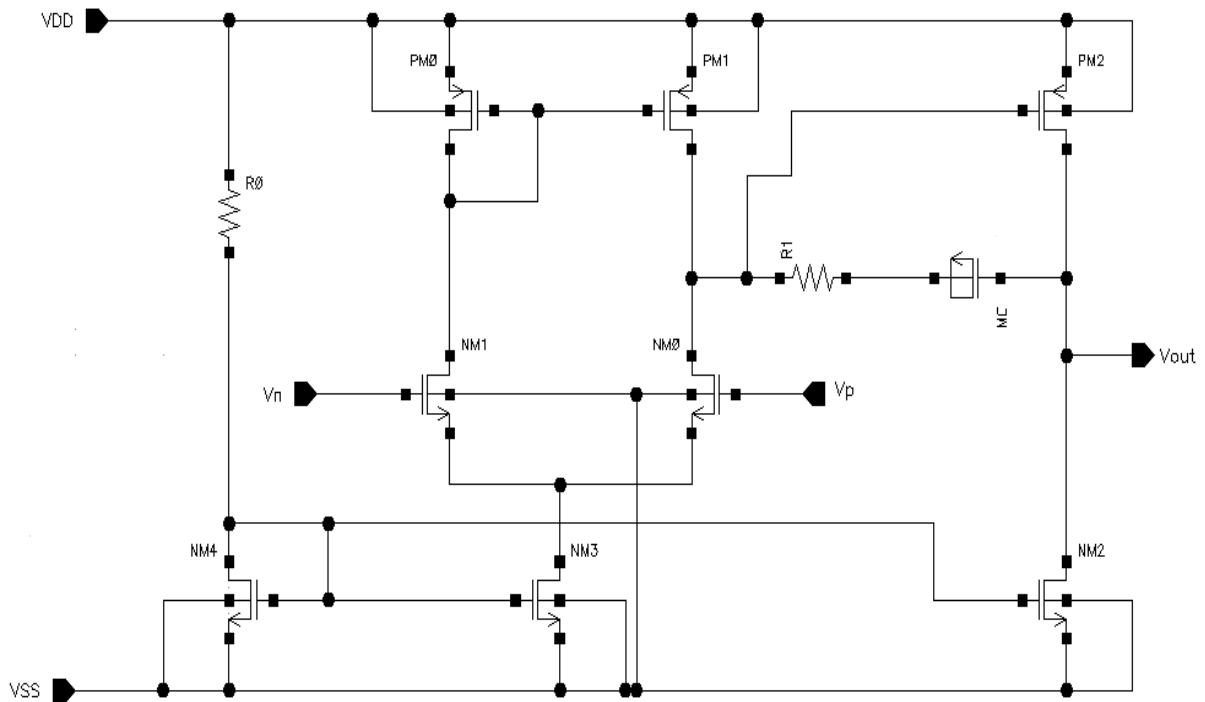


Figure 53 : Schéma du circuit de l'amplificateur opérationnel utilisé dans le bloc de référence des courants

La figure 53 montre le schéma de l'amplificateur opérationnel utilisé dans le bloc de référence des courants. Aussi, le rapport de chaque transistor du circuit d'amplificateur opérationnel utilisé est donné par le tableau 17.

Tableau 17 : Rapport de chaque transistor du circuit d'amplificateur opérationnel utilisé dans le bloc de référence des courants

| Transistors | le rapport (W/L) ($\mu\text{m}/\text{nm}$) | Le taux de multiplication (m) |
|--------------------|--|-------------------------------|
| PM2 | 4/180 | 2 |
| PM0, PM1 | 4/180 | 1 |
| NM0, NM1, NM2, NM3 | 2/180 | 2 |
| NM4 | 2/180 | 1 |

L'analyse transitoire de l'amplificateur opérationnel utilisé dans le bloc de référence des courants est illustrée dans la figure 54. Nous avons appliqué un signal carré à l'entrée positif de l'amplificateur opérationnel et on a relié la sortie à l'entrée négative de l'amplificateur

(suiveur). Le résultat de simulation confirme le fonctionnement de l'amplificateur opérationnel comme un suiveur puisque la sortie suit l'entrée.

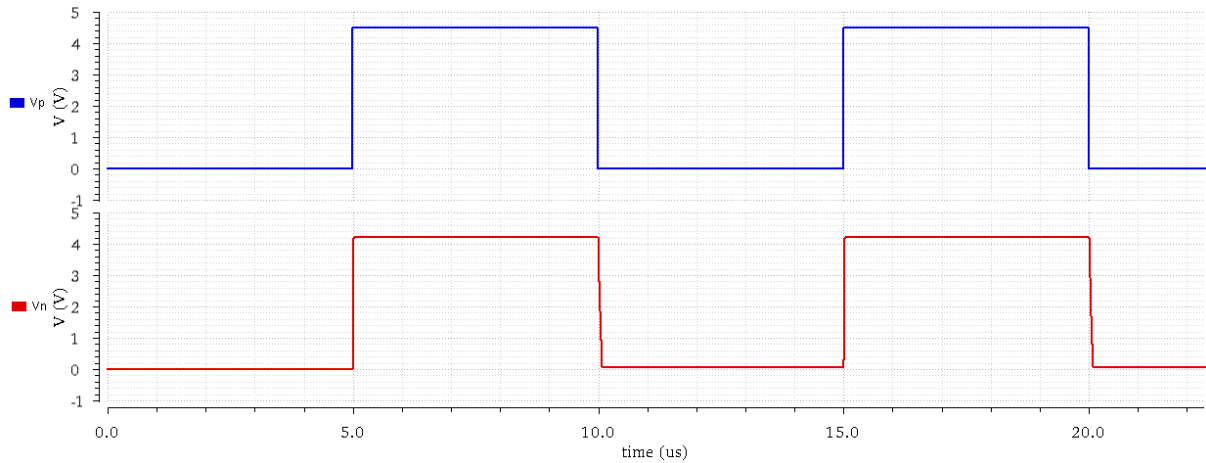


Figure 54 : Résultat de la simulation transitoire de l'amplificateur opérationnel utilisé dans le bloc de référence des courants

La vitesse de balayage (Slew Rate) de l'amplificateur opérationnel utilisé est égale à $66.9\text{V}/\mu\text{s}$. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$\text{Slew Rate} = \frac{\Delta V_{\text{out}}}{\Delta t} \quad (14)$$

L'analyse DC de l'amplificateur opérationnel utilisé dans le bloc de référence des courants est illustrée dans la figure 55. Le résultat de simulation montre bien le fonctionnement du comparateur, lorsque $V_P < V_N$ la sortie du comparateur est égale à V_{SS} , et lorsque $V_P > V_N$ la sortie prend la valeur de V_{DD} . Nous avons vérifié que tous les transistors CMOS de circuit fonctionnent en régime de saturation.

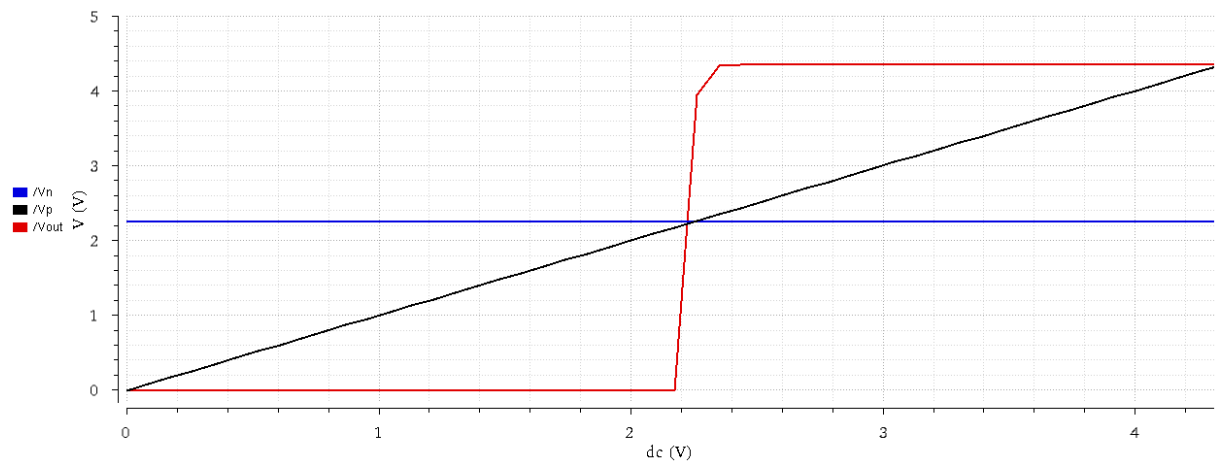


Figure 55 : Résultat de la simulation DC de l'amplificateur opérationnel utilisé dans le bloc de référence des courants

IV.2.3 Bloc de contrôle de charge

Le bloc de contrôle de charge est utilisé pour générer une tension de grille V_G vers le décaleur de niveau (Level Shifter) associé avec le pilote de grille (Gate Driver) pour piloter le transistor PMOS de puissance (Power PMOS) dans chaque mode de charge.

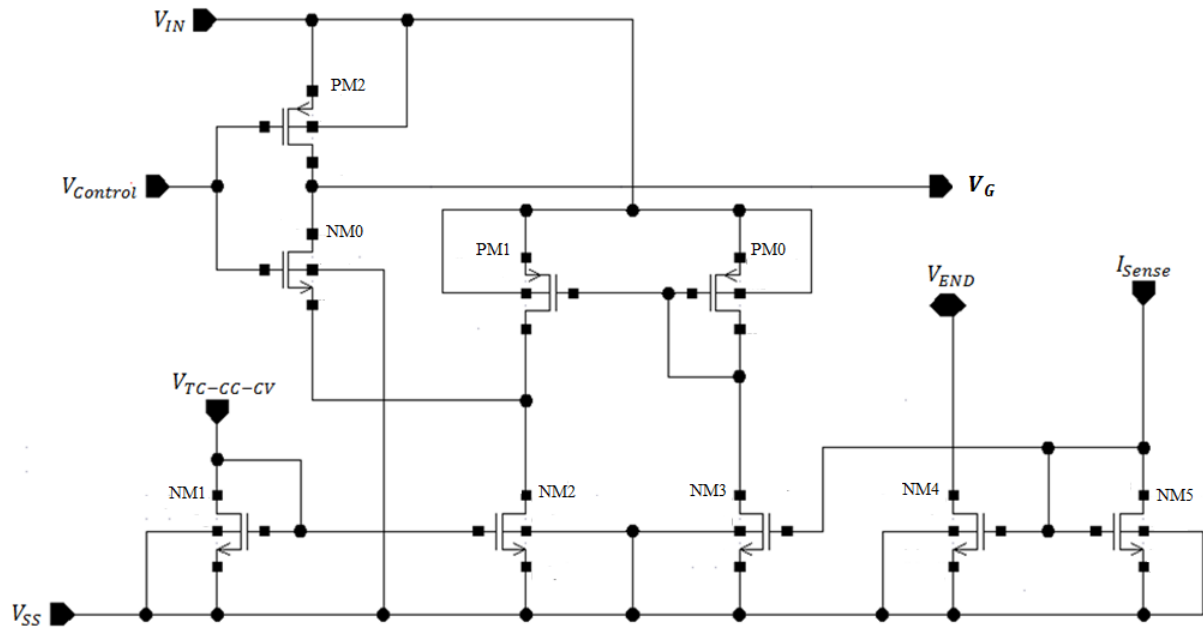


Figure 56 : Schéma du circuit de bloc de contrôle de charge

Le circuit de contrôle de charge sous le logiciel CADENCE Virtuoso est illustré à la figure 56. La valeur de la tension V_G est modifiée en fonction du courant $I_{TC-CC-CV}$ par

Chapitre IV

Conception et analyse d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant une technique basée sur la commutation

l'utilisation de comparateur de courant utilisé pour comparer le courant I_{sense} généré à partir du bloc de détecteur de courant et le courant $I_{\text{TC-CC-CV}}$ généré à partir du bloc de référence des courants selon chaque mode. La tension V_G est évaluée comme la basse tension du circuit de sélection du signal. La tension de contrôle V_{Control} générée à partir du bloc de contrôle de mode est utilisée pour piloter le circuit sélecteur qui se compose de deux transistors, à savoir le transistor PMOS (PM2) et le transistor NMOS (NM0).

Le rapport de chaque transistor du circuit de bloc de contrôle de charge est donné par le tableau 18.

Tableau 18 : Rapport de chaque transistor du circuit de bloc de contrôle de charge

| Transistors | le rapport (W/L) ($\mu\text{m}/\text{nm}$) | Le taux de multiplication (m) |
|---------------------------------|--|-------------------------------|
| PM0, PM1, PM2 | 2/180 | 1 |
| NM0, NM1, NM2, NM3, NM4, NM5 | 2/180 | 1 |

Le dernier mode est le mode de fin de charge. Ce mode est effectué indépendamment lors d'une comparaison entre le courant $I_{\text{cut-off}}$ et le courant I_{sense} . Par conséquent, si le courant $I_{\text{cut-off}}$ est inférieur au courant I_{sense} , la tension de fin V_{END} est au niveau le plus bas. Ce qui fait que le niveau requis de la tension de contrôle V_{Control} correspond à trois modes de charge (TC, CC et CV). Sinon, si le courant $I_{\text{cut-off}}$ est plus élevé que le courant I_{sense} , la tension de fin V_{END} est à un niveau élevé. Ce qui fait que la tension de contrôle V_{Control} est à un niveau bas pour couper le circuit de sélection. Cela signifie que la tension de grille V_G est au niveau le plus élevé pour faire cesser le processus de charge.

IV.2.4 Bloc de décaleur de niveau et bloc de pilote de grille

Le circuit de décaleur de niveau illustré à la figure 57 est utilisé pour faire passer la basse tension de grille V_G générée par le bloc de contrôle de charge à une haute tension pour piloter le transistor PMOS de puissance (Power PMOS).

De plus, le circuit de pilote de grille illustré à la figure 58 est connecté à la grille du transistor PMOS de puissance (Power PMOS) qui alimente la charge de la batterie par l'action de commutation, puis la somme appropriée de courant est régulée dans la batterie.

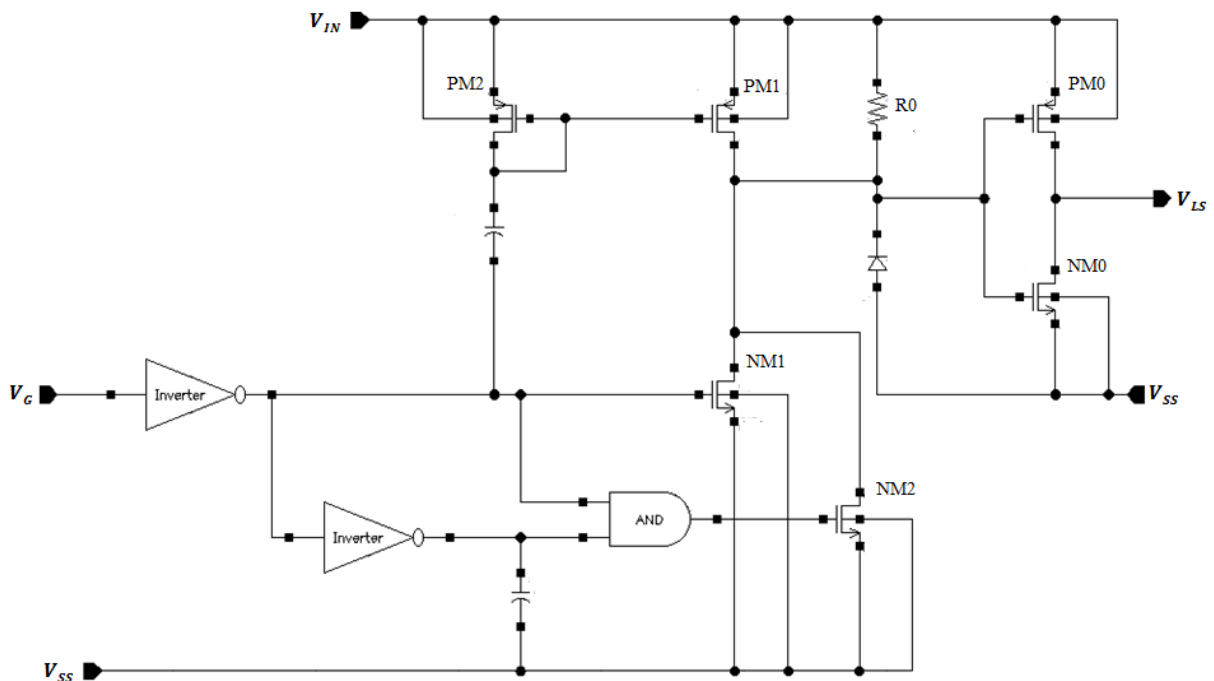


Figure 57 : Schéma du circuit de bloc de décaleur de niveau utilisé dans l'interface proposé basée sur la commutation

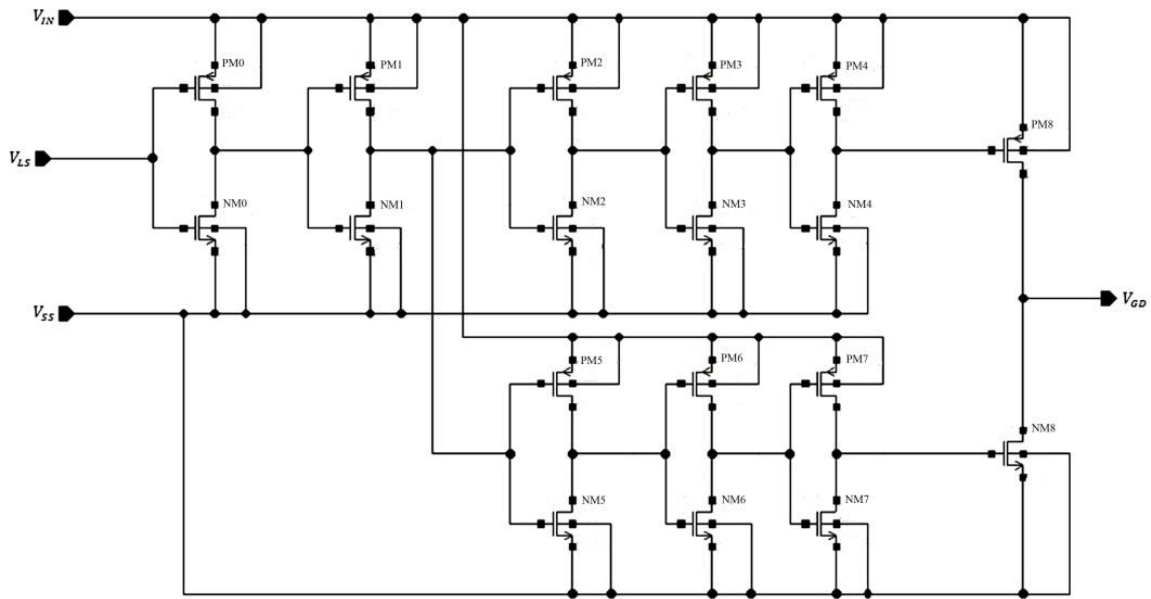


Figure 58 : Schéma du circuit de bloc de pilote de grille utilisé dans l'interface proposé basée sur la commutation

Le circuit de décaleur de niveau associé au circuit de pilote de grille atteint un temps de montée d'environ 36ps, un temps de descente d'environ 36ps et un temps de propagation d'environ 0,25ns [94]. Ils sont bien détaillés dans le chapitre III.

IV.2.5 Bloc de détecteur de courant

La figure 59 montre le circuit de détecteur de courant. Le transistor PMOS (PM0) est utilisé dans la conception comme un capteur de courant de charge. L'amplificateur opérationnel (illustré dans la figure 53) est utilisé pour maintenir la tension de drain du transistor PMOS (PM0) constante et égale à la tension de la batterie V_{BAT} . Par conséquent, le courant capté I_{sense} est toujours proportionnel au courant du transistor PMOS de puissance (Power PMOS).

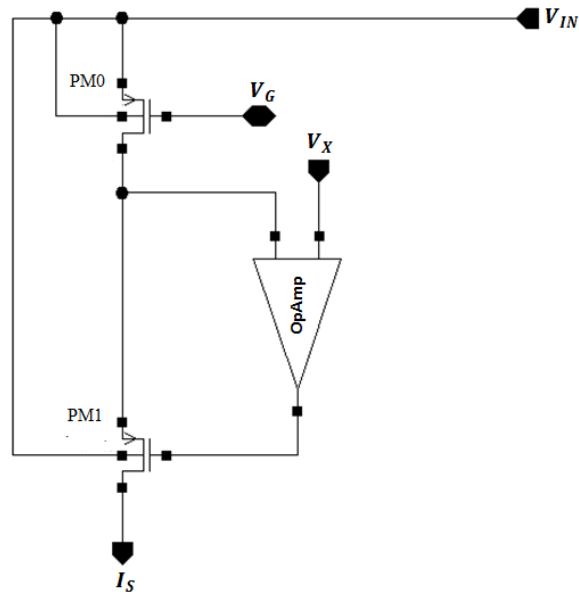


Figure 59 : Schéma du circuit de bloc de détecteur de courant

Le rapport de chaque transistor du circuit de bloc de détecteur de courant est donné par le tableau 19.

Tableau 19 : Rapport de chaque transistor du circuit de bloc de détecteur de courant

| Transistors | le rapport (W/L) ($\mu\text{m}/\text{nm}$) | Le taux de multiplication (m) |
|-------------|--|-------------------------------|
| PM0, PM1 | 4/180 | 1 |

Le résultat de la simulation transitoire du bloc de détecteur de courant est illustré dans la figure 60. Elle montre le courant de batterie I_{BAT} et le courant capté I_{sense} .

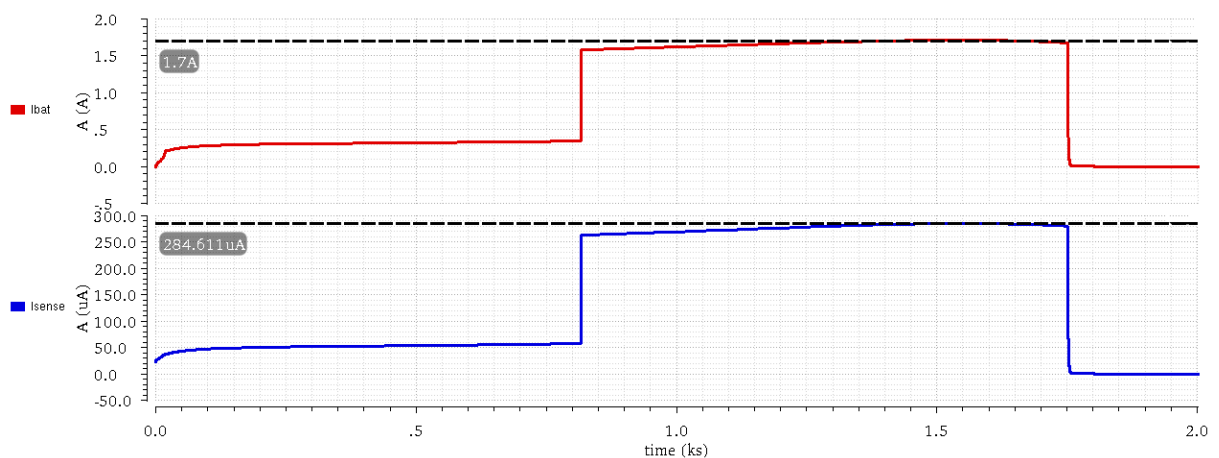


Figure 60 : Résultats de la simulation transitoire du courant de batterie I_{BAT} et du courant capté I_{sense}

IV.3 Résultats de la simulation et le Layout de chargeur proposé basé sur la commutation

IV.3.1 Simulation de chargeur proposé basé sur la commutation

La conception de l'interface proposée pour le chargeur de la batterie Li-Ion est réalisée par la technologie TSMC 180nm CMOS sous le logiciel Cadence Virtuoso. Dans cette simulation, la capacité de la batterie sélectionnée à 5000mAh, la valeur de la basse tension V_L choisie est égale à 2,9V et la valeur de la haute tension V_H choisie est égale à 4,2V.

Les résultats de la simulation de la tension de batterie V_{BAT} et du courant de batterie I_{BAT} dans chaque mode de charge (TC, CC et CV) de l'interface de charge de batterie Li-Ion proposée sont présentés respectivement à la figure 61 et à la figure 62.

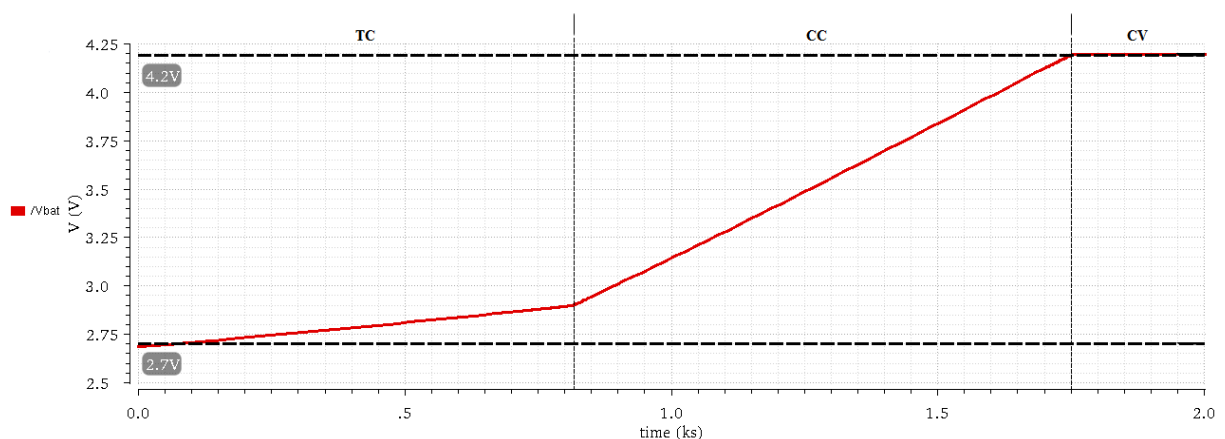


Figure 61 : Simulation transitoire, forme de courbe de la tension de batterie V_{BAT} obtenue

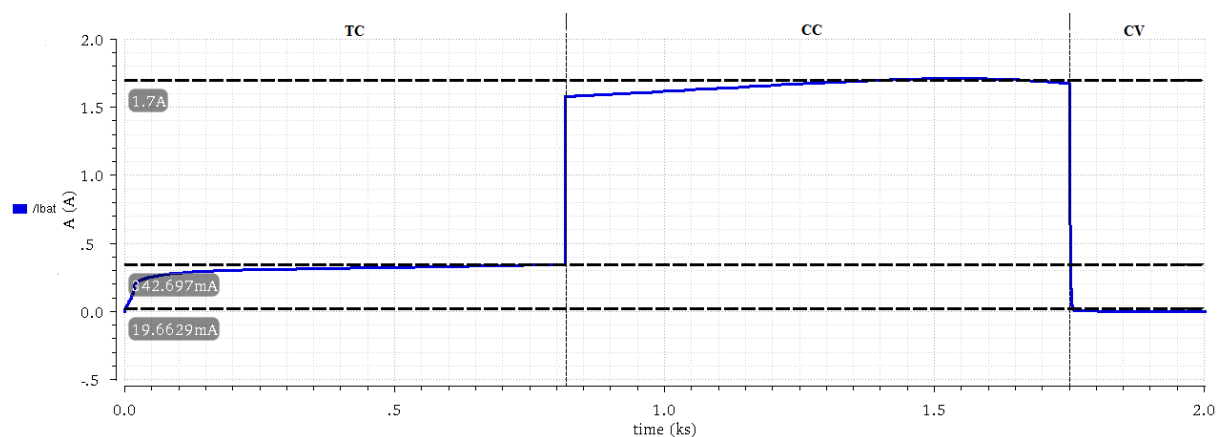


Figure 62 : Simulation transitoire, forme de courbe du courant de batterie I_{BAT} obtenue

La forme de courbe de la tension de batterie V_{BAT} obtenue est présentée dans la figure 61. Elle montre que la valeur variable de la tension de batterie V_{BAT} est d'environ 2,7 V à 4,2 V. La forme de courbe du courant de batterie I_{BAT} obtenue est présentée dans la figure 62. Elle montre que le courant de la batterie I_{BAT} est égal à 342,7 mA en mode de charge TC et égal à 1,7 A en mode de charge CC. De même, la procédure de charge est terminée lorsque le courant de la batterie I_{BAT} atteint la valeur de courant de coupure $I_{cut-off}$ qui est égale à environ 20 mA. Nous pouvons également observer à partir de la simulation que la batterie se charge rapidement en trente-trois minutes (2 kilo seconde).

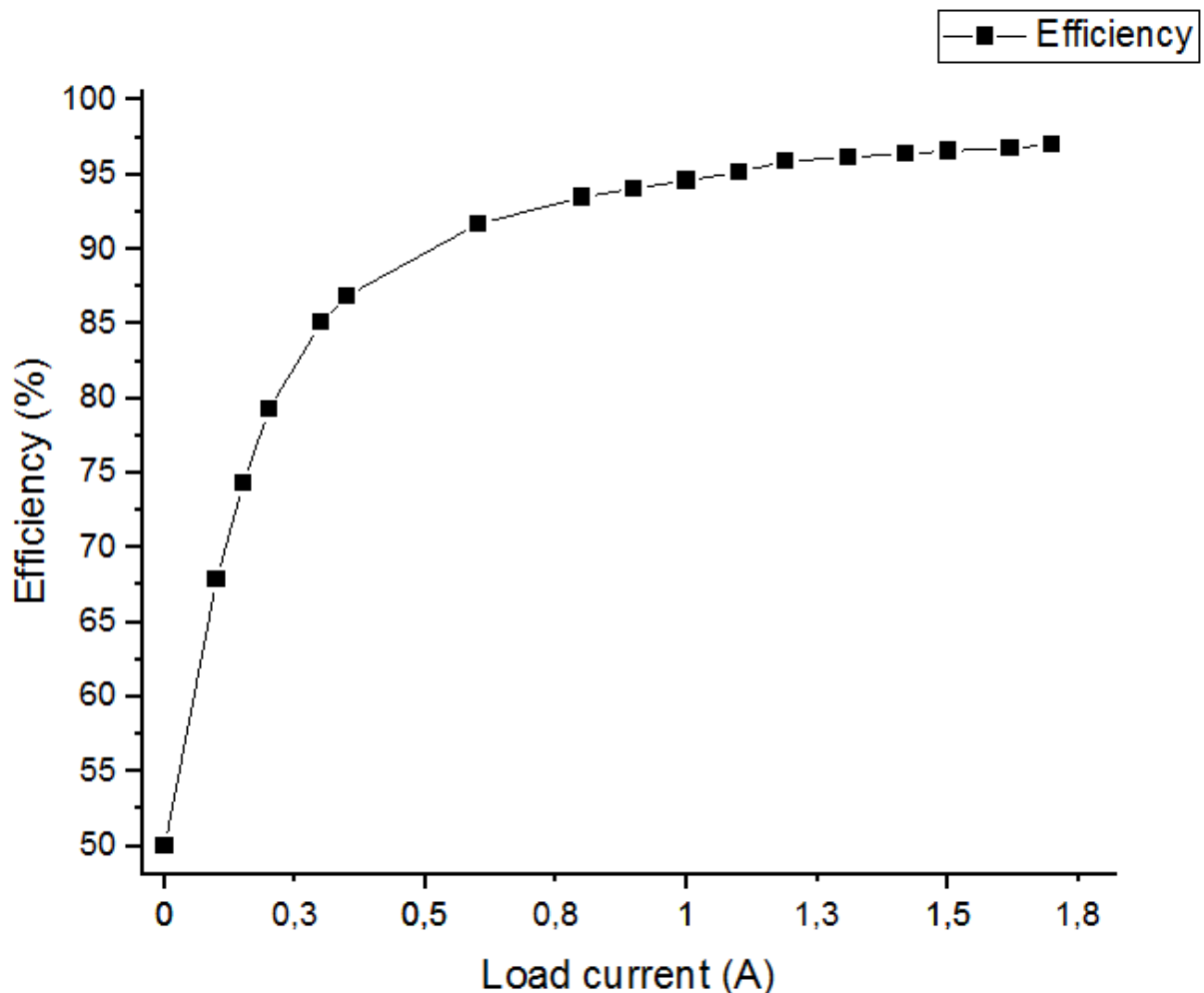


Figure 63 : Courbe résultante de l'efficacité de puissance

La figure 63 illustre la courbe résultante de l'efficacité de puissance de l'interface de chargeur de la batterie Li-Ion proposé, qui atteint une efficacité de 97% lorsque le courant de charge maximal est égal 1,7 A. Elle est calculée par l'équation :

$$\% \text{Efficacité} = \frac{P_{\text{Out}} (\text{la puissance de sortie en Watts})}{P_{\text{In}} (\text{la consommation de puissance d'entrée en watts})} \times 100 \quad (15)$$

IV.3.2 Layout de chargeur proposée basé sur la commutation

La figure 64 illustre le Layout de l'interface de chargeur de la batterie Li-Ion proposée. Tous les dispositifs ou circuits susceptibles de produire des interférences électromagnétiques ou sensibles aux interférences sont entourés par des anneaux de protection à double couche. Elle est réalisée en respectant les règles de conception (Densité, DRM et MRC) et les informations des contraintes du concepteur (Cat match, gestionnaire de texte et de contraintes, etc.). Il occupe une surface totale de 0.3 mm².

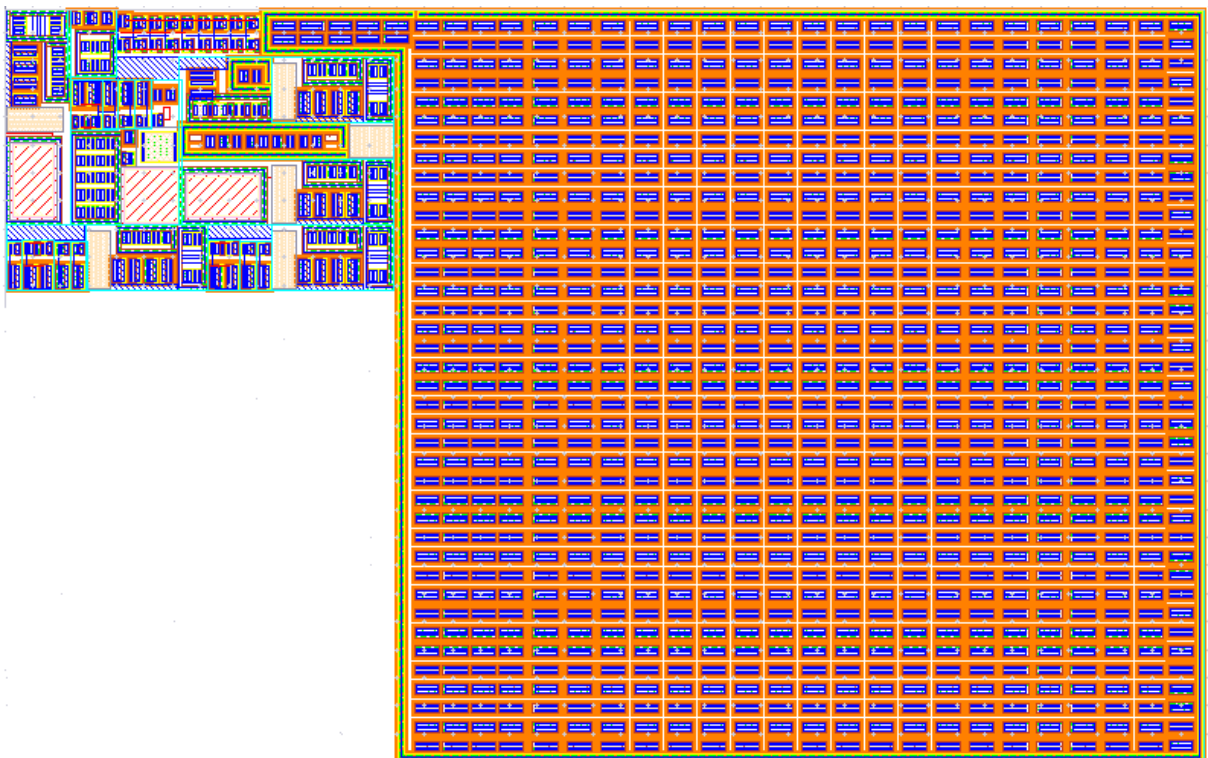


Figure 64 : Layout de l'interface proposée utilisant une technique basée sur la commutation pour le chargeur de batterie Li-Ion

Chapitre IV

Conception et analyse d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant une technique basée sur la commutation

Le tableau 20 résume les résultats de simulation trouvés et une analyse comparative entre l'interface de chargeur de batterie Li-Ion proposé basé sur la commutation et des autres travaux/références.

Tableau 20 : Analyse comparative entre notre chargeur proposé basé sur la commutation et des autres références

| Reference | Topologie | Technologie | Tension d'entrée maximale $V_{IN(max)}$ (V) | Plage de sortie V_{BAT} (V) | Courant de charge maximal, $I_{BAT(max)}$ (A) | Efficacité maximale (%) | Taille (mm ²) |
|---|--------------------------------|-------------------------|--|----------------------------------|--|-------------------------|---------------------------|
| M. El Alaoui et al., 2021, [101] | Basé sur la commutation | TSMC 180 nm CMOS | 4.5 | 2.7-4.2 | 1.7 | 97 | 0.3 |
| C. C. Wang et al., 2019, [102] | Basé sur la commutation | 500 nm CMOS | 8.0-10.0 | 2.5-4.2 | 1.5 | 87.4 (CC) 88.6 (CV) | 7.29 |
| J. F. Wu et al., 2018, [77] | Basé sur la commutation | 250 nm BCD | 25 | 6-22 | 2.5 | 97 | 2.66 |
| Y. Ziadi et al., 2015, [103] | LDO adaptative | 180 nm CMOS | 5 | 2.5-4.2 | 0.448 | 84 | 1.62 |
| M. G. Jeong et al., 2016, [14] | Basé sur la commutation | 130 nm BICMOS | 16 | 2.5-4.2 | 1.5 | 90 | 12.25 |
| K. Chung et al., 2017, [8] | LDO | 130 nm BICMOS | 5 | 3-4.3 | 0.495 | 83.9 | 1.41 |
| C. C. Su et al., 2017, [104] | Basé sur la commutation | 350 nm CMOS | 5.5 | 2.3-4.2 | 0.6 | 92.5 | 2.7126 |
| Y. H. Jung et al., 2017, [105] | Basé sur la commutation +LDO | 180 nm CMOS | 5.5 | 2.8-4.2 | 0.5 | 87.6 | 1.62 |

IV.4 Conclusion

Un faible coût, une taille minimisée et une charge à grande vitesse de l'interface de chargeur de batterie Li-Ion proposée ont été présentés dans ce chapitre. Le nouveau chargeur a été conçu et mis en œuvre avec succès en utilisant la technologie TSMC 180nm CMOS sous le logiciel Cadence Virtuoso. Cette étude comprenait la conception du circuit, la simulation, l'analyse et le Layout. L'interface de chargeur de batterie Li-Ion proposé utilise

Chapitre IV

Conception et analyse d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant une technique basée sur la commutation

une technique de commutation permet d'obtenir une tension de sortie V_{BAT} pouvant aller de 2,7V à 4,2V selon une tension d'entrée V_{IN} égal à 4,9V, et d'obtenir également un courant de charge maximal I_{BAT} égal à 1,7A. Le temps de charge n'est que de trente-trois minutes, l'efficacité atteint 97 % et la surface totale n'est que de 0.3 mm².

Le prochain chapitre présente en détail la conception et l'optimisation d'une autre nouvelle interface de chargeur de batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle des impulsions.

Chapitre V : Conception et analyse d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle par impulsions

Sommaire

| | |
|--|------------|
| V.1 Introduction | 105 |
| V.2 Conception d'un nouveau chargeur utilisant une technique de contrôle par impulsions | 108 |
| V.2.1 Bloc de contrôle du mode courant constant CC | 113 |
| V.2.2 Bloc de contrôle du mode tension constante CV | 115 |
| V.2.3 Blocs " Décaleur de niveau" et " Pilote de grille" | 117 |
| V.2.4 Bloc capteur de courant | 118 |
| V.2.5 Bloc générateur de rampe et d'horloge | 119 |
| V.2.6 Transistor de puissance PMOS (Power PMOS) | 120 |
| V.2.6.1 Principe de fonctionnement | 121 |
| A. État bloqué | 121 |
| B. État passant | 121 |
| V.2.6.2 MOSFET de puissance en commutation | 122 |
| A. Fermeture du MOSFET | 123 |
| B. Ouverture du MOSFET | 123 |
| V.3 Résultats de la simulation et le Layout de chargeur proposé basé sur le contrôle par impulsions | 123 |
| V.3.1 Simulation de chargeur proposé basé sur le contrôle par impulsions | 123 |
| V.3.2 Layout de chargeur proposée basé sur le contrôle par impulsions | 126 |
| V.4 Conclusion | 128 |

V.1 Introduction

Les batteries Li-ion sont plus utilisables dans les appareils électriques mobiles qui nécessitent une batterie puissante et légère, car elles produisent une forte densité de stockage basée sur la faible densité. On peut les diviser en plusieurs types : LiFePO_4 , LiCoO_2 , LiNiMnCoO_2 et LiMn_2O_4 existent selon leur application comme les télécommunications, les ordinateurs portables, les bicyclettes électriques et les véhicules électriques, respectivement. Cet avantage permet de choisir la bonne technologie ou le bon type pour l'application particulière requise. Dans l'industrie automobile actuelle, les batteries Li-Ion sont la meilleure alternative au carburant automobile car elles peuvent être la réponse aux défis auxquels sont confrontés les constructeurs automobiles pour apporter des solutions à la pénurie croissante de pétrole et réduire l'impact environnemental des véhicules. Malgré des contraintes encore importantes comme le temps de recharge, la densité énergétique et le coût, la compétitivité de ces batteries a déjà relancé l'intérêt pour les véhicules électriques.

Les solutions des chargeurs bien connues sont essentiellement classées en deux types : Les chargeurs à faible perte de charge (Low Drop Out) et les chargeurs à commutation d'alimentation (Switching Power Supply) [6]. Le choix de la technique à utiliser dépend de l'application à laquelle elle sera intégrée. Le tableau 21 présente une comparaison entre les deux types de chargeur les plus populaires.

Tableau 21 : Chargeur à base de faible perte de charge (LDO) par rapport au chargeur à base de la commutation d'alimentation (Switching Power Supply)

| | Chargeur à base d'alimentation à commutation (Switching Based Charger) | Chargeur à faible perte de charge (Low Drop Out Based Charger) |
|---------------------------|---|---|
| Plage de tension d'entrée | Grand | Faible |
| Complexité | Moyen | Faible |
| Efficacité | Haut | Faible |
| Taille | Plus petite à haute puissance | Petite-Moyenne |

L'utilisation de la technique de l'alimentation à commutation avec un filtre passe-bas pour abaisser la tension d'entrée, permet d'obtenir des pertes plus faibles qu'avec les chargeurs à faible perte de charge. Elle offre une large plage de tension d'entrée/sortie [79], et elle nécessite également une conception de circuit avancée pour obtenir une efficacité élevée. En outre, le courant de charge maximal de la batterie est compris entre 300mA et 2A. Les chargeurs à commutation d'alimentation présentent de nombreux inconvénients, tels qu'une plus mauvaise répudiation du bruit en cas d'ondulation à un taux de commutation d'alimentation, et une consommation électrique accrue [97]. La taille de la puce des chargeurs à commutation est plus petite à haute puissance. Les différentes implémentations des chargeurs à commutation de puissance sont exposées dans les références [106] [107] [105] [13].

D'autre part, les chargeurs à faible perte de charge LDO sont basés sur un transistor de passage qui fait chuter la tension d'entrée excédentaire afin d'obtenir une régulation de sortie en modulant sa résistance. La simplicité au prix d'un rendement médiocre et la petite taille (pour une puissance faible à moyenne) sont les principaux avantages. Le chargeur à faible perte de charge LDO répond à ces exigences grâce à son faible courant d'ondulation et peut-être insérée dans la puce sans composant descriptif [7]. En outre, le courant de charge maximal de la batterie est compris entre 350mA et 1A. Le faible rendement est l'un des principaux problèmes. L'intégration d'un MOS de puissance (Power MOS) est une solution à son faible rendement et aussi pour minimiser ses pertes [96]. Les différentes implémentations des chargeurs à faible perte de charge LDO sont exposées dans les références [108] [99] [100] [109].

Pour réduire la complexité de la conception des circuits grâce aux améliorations de la technologie CMOS, les chargeurs à faible perte et les chargeurs à alimentation à commutation

sont généralement insérés sur une seule puce. Par la suite, pour réduire le bruit et l'effet d'ondulation, l'interface du chargeur de la batterie est fusionnée en un système sur puce (SoC) [97].

Les modes de charge des batteries Li-Ion en trois étapes sont illustrés à la figure 65. Le premier est le démarrage (Start Up), le second est la charge à courant constant CC et le dernier est la charge à tension constante CV [9].

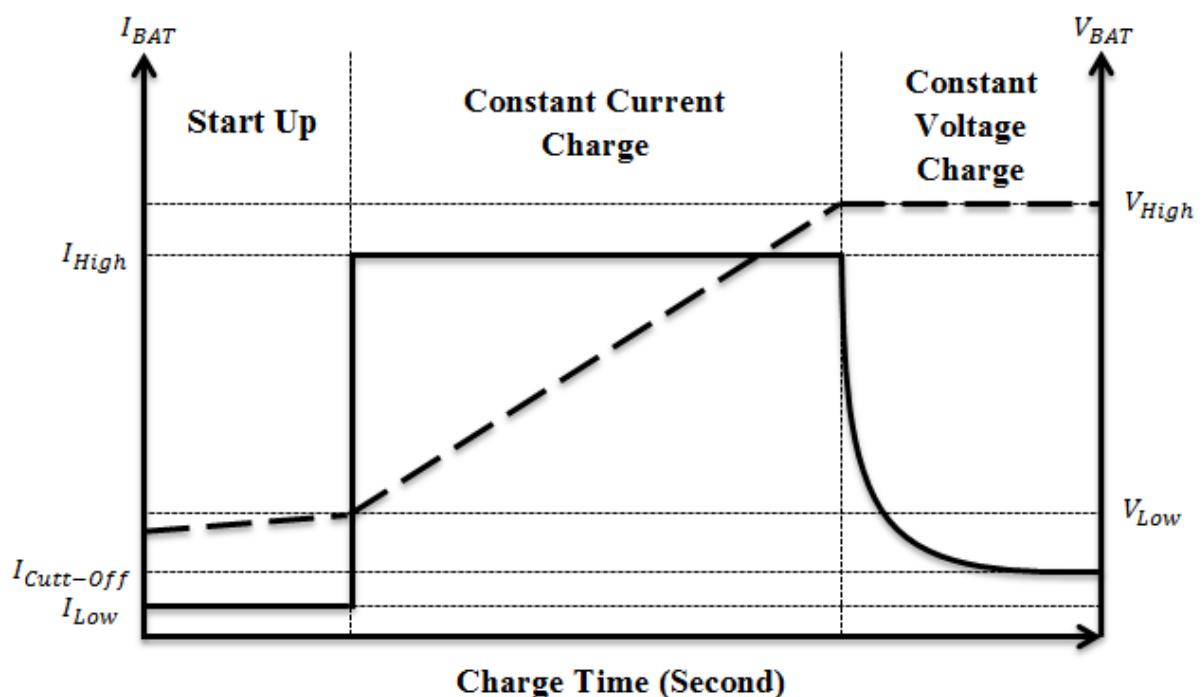


Figure 65 : Modes de chargement des batteries Li-Ion à l'aide de la technique de contrôle par impulsions

Dans la première étape de démarrage, le courant de batterie I_{BAT} est maintenu à une valeur basse constante lorsque la tension de la batterie V_{BAT} est inférieure à la tension basse V_L , ce qui permet de protéger la batterie contre les dommages causés par la surchauffe. Toujours dans la deuxième étape, le mode de charge à courant constant CC, la batterie est chargée avec un fort courant constant qui minimise le temps de charge lorsque la tension de la batterie V_{BAT} se situe entre la tension V_L et la tension haute V_H . Enfin, dans la dernière étape

du mode de charge à tension constante CV, le courant de la batterie I_{BAT} chute à la coupure lorsque la tension de la batterie V_{BAT} augmente pour atteindre la valeur de spécification de la tension V_H . Ce qui fait que le processus de charge se termine.

Ce chapitre se concentre sur la conception d'un chargeur basé sur une alimentation à commutation, qui est bien adapté au fonctionnement entre le mode de charge à courant constant CC et le mode de charge à tension constante CV par la technique de contrôle par impulsions pour obtenir un rendement élevé et garantir que la batterie est rapidement chargée à fond.

V.2 Conception d'un nouveau chargeur utilisant une technique de contrôle par impulsions

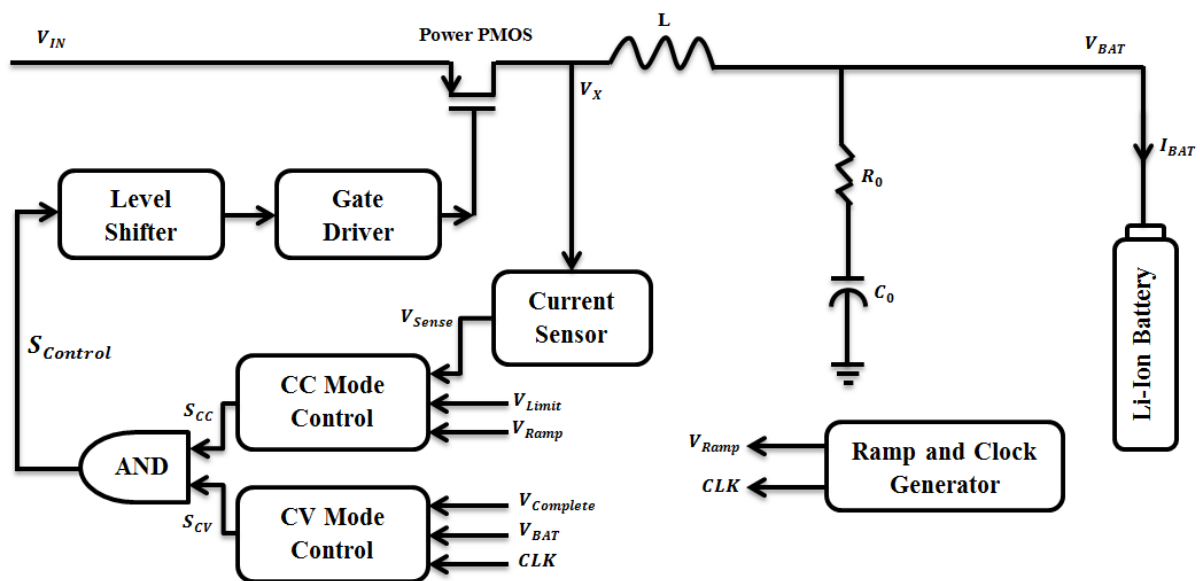


Figure 66 : Conception proposée de l'interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle par impulsions

Le rendement élevé, le courant de sortie important et aussi la tension d'alimentation de sortie constante sont les résultats les plus importants à atteindre dans la conception et la modélisation d'une interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant la technologie TSMC 180nm CMOS. Pour résoudre le problème du faible rendement, du faible courant de sortie et

Chapitre V

Conception et analyse d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle par impulsions

de la tension d'alimentation instable, qui sont les grands problèmes de nombreux chercheurs dans ce domaine, nous avons proposé une nouvelle conception de chargeur utilisant la technique de contrôle par impulsions, comme l'illustré dans figure 66. Il dépend du signal S_{CC} qui agit en mode de charge à courant constant CC et du signal S_{CV} qui agit en mode de charge à tension constante CV. Cela permet d'équilibrer l'efficacité entre les procédures de charge des batteries. La sélection automatique entre le signal S_{CC} et le signal S_{CV} est également assurée par l'utilisation des circuits logiques qui réduisent la perte de conversion et assurent l'efficacité moyenne.

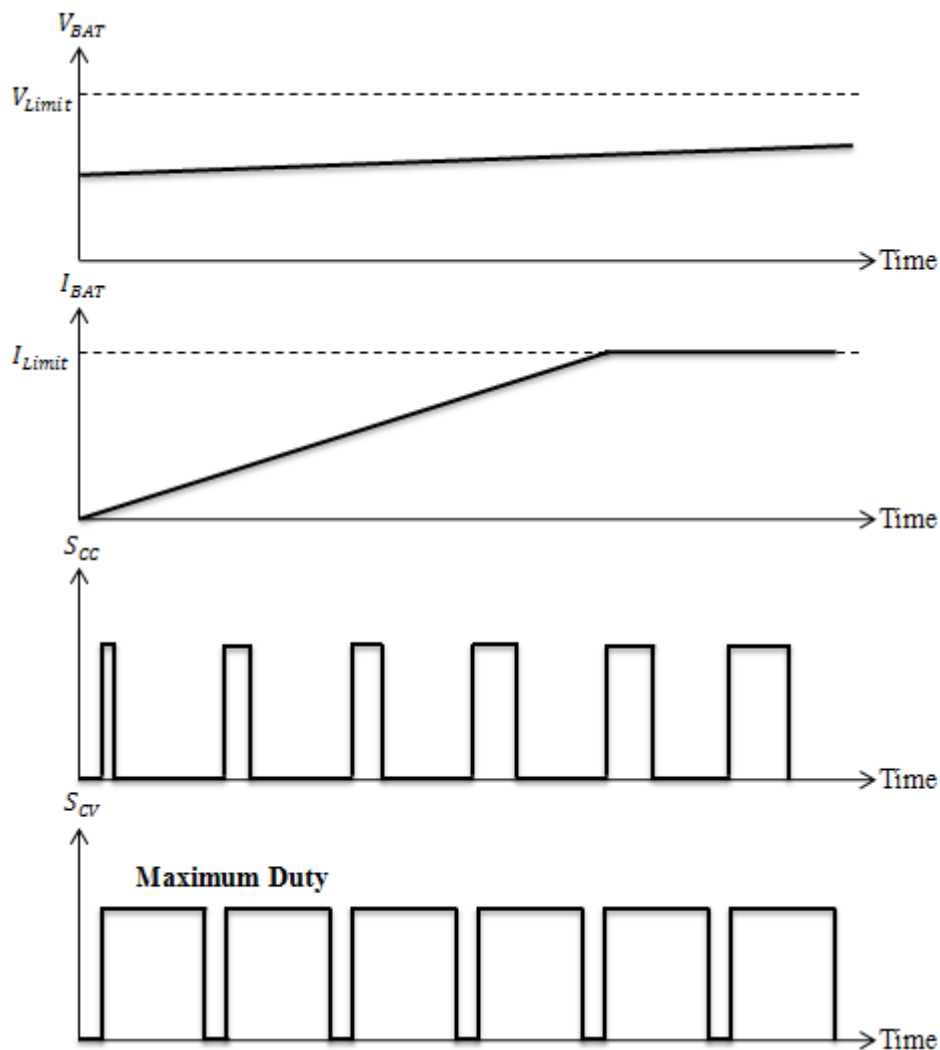


Figure 67 : Formes des courbes de la tension de batterie V_{BAT} , du courant de la batterie I_{BAT} , du signal S_{CC} et du signal S_{CV} , en mode de charge de démarrage

Au démarrage, le signal S_{CV} est initialement réglé à son rapport de charge maximale pour garantir que le chargeur fonctionne en mode de charge à courant constant CC et non en mode de charge à tension constante CV. Lorsque la batterie est vide, le courant de la batterie I_{BAT} augmente rapidement avec le signal S_{CC} croissant, jusqu'à ce que le courant de la batterie I_{BAT} atteigne le courant limite I_{Limit} comme illustré dans la figure 67.

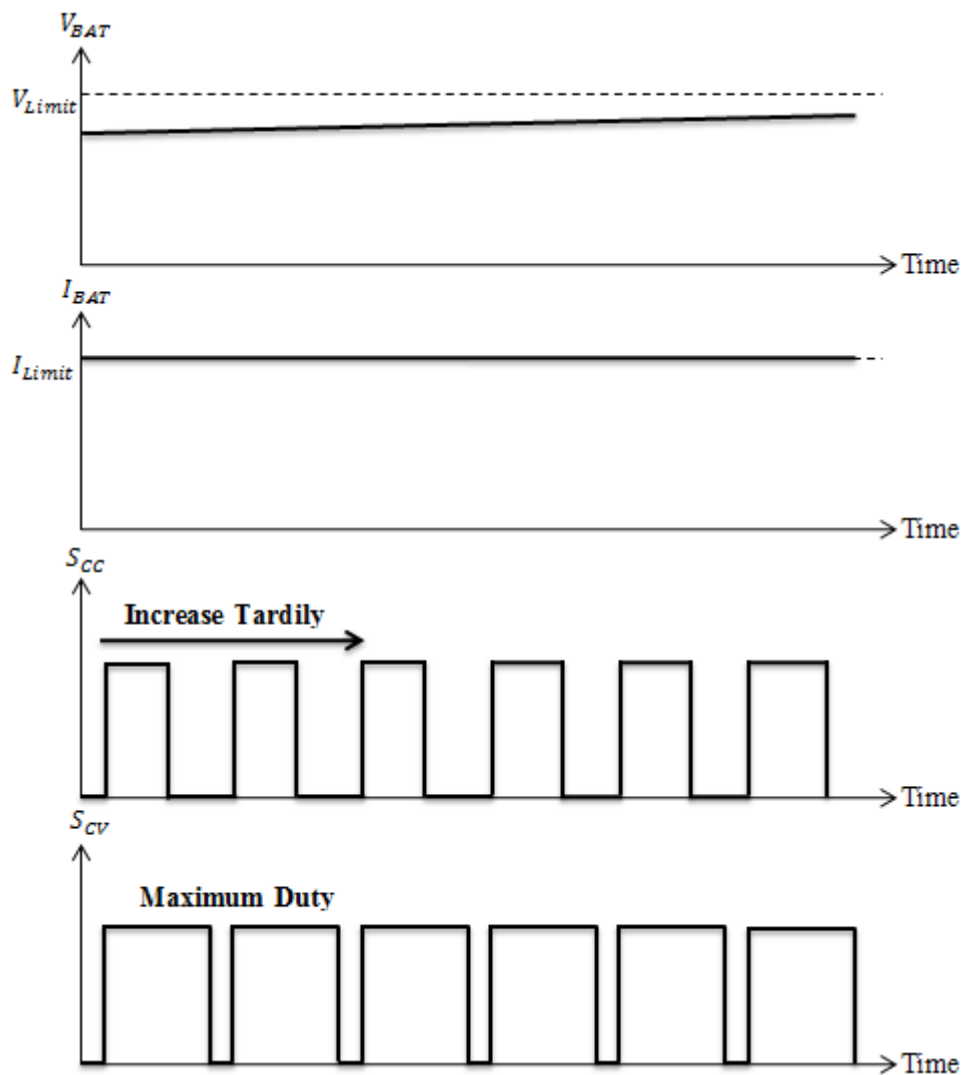


Figure 68 : Formes des courbes de la tension de la batterie V_{BAT} , du courant de la batterie I_{BAT} , du signal S_{CC} et du signal S_{CV} , en mode de charge à courant constant

En raison de l'augmentation progressive de la tension V_{BAT} , le courant I_{BAT} diminuera progressivement si le signal S_{CC} est maintenu au même niveau, comme le montre dans la

figure 68. Par conséquent, le courant I_{BAT} reste stable, en fonction de la lente augmentation du signal S_{CC} .

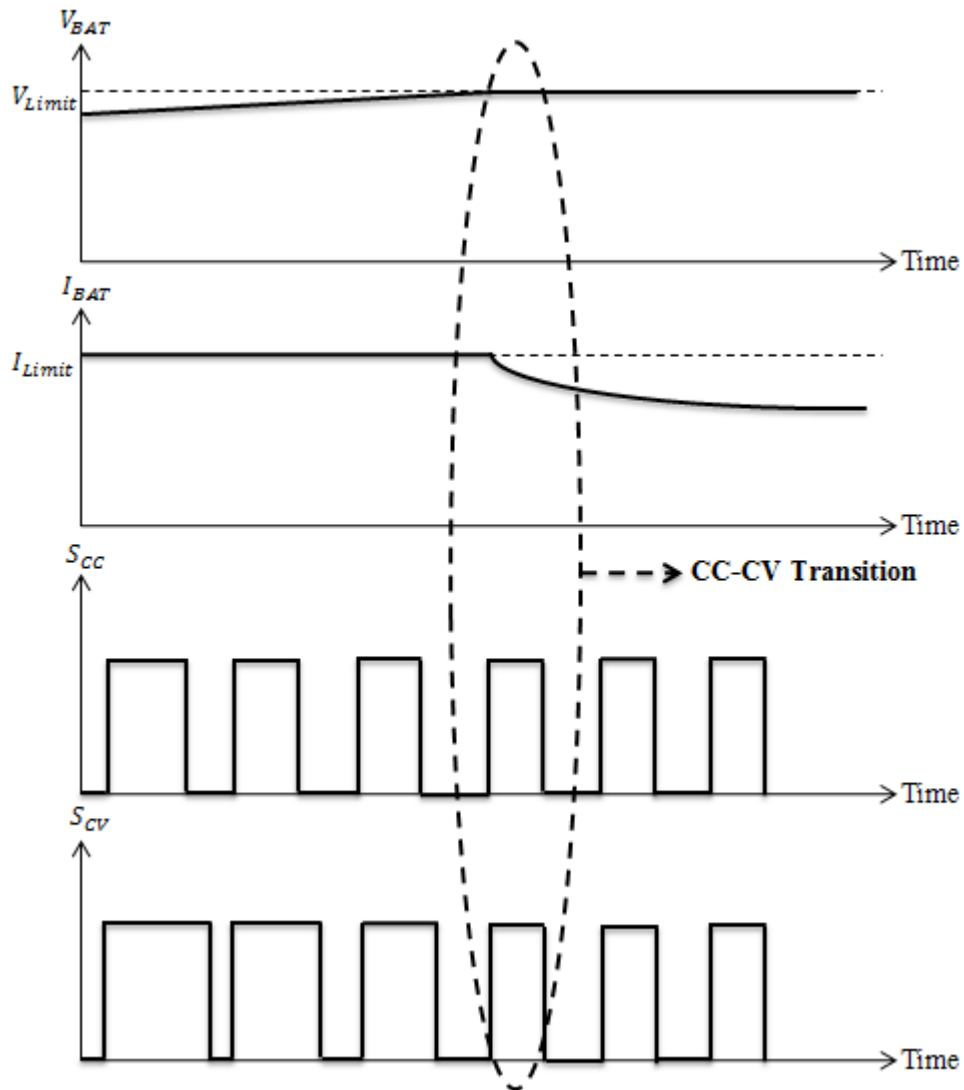


Figure 69 : Formes des courbes de la tension de la batterie V_{BAT} , du courant de la batterie I_{BAT} , du signal S_{CC} et du signal S_{CV} , en transition entre les modes de charge à courant constant CC et à tension constante CV

Le cycle des obligations de la transition CC-CV commence à se réduire lorsque la tension V_{BAT} se rapproche de la tension V_{Limite} , comme le montre dans la figure 69. La tension V_{BAT} et le courant I_{BAT} atteignent respectivement la tension V_{Limite} et le courant I_{Limite} , respectivement, lorsque le signal S_{CV} est exactement le même que le signal S_{CC} .

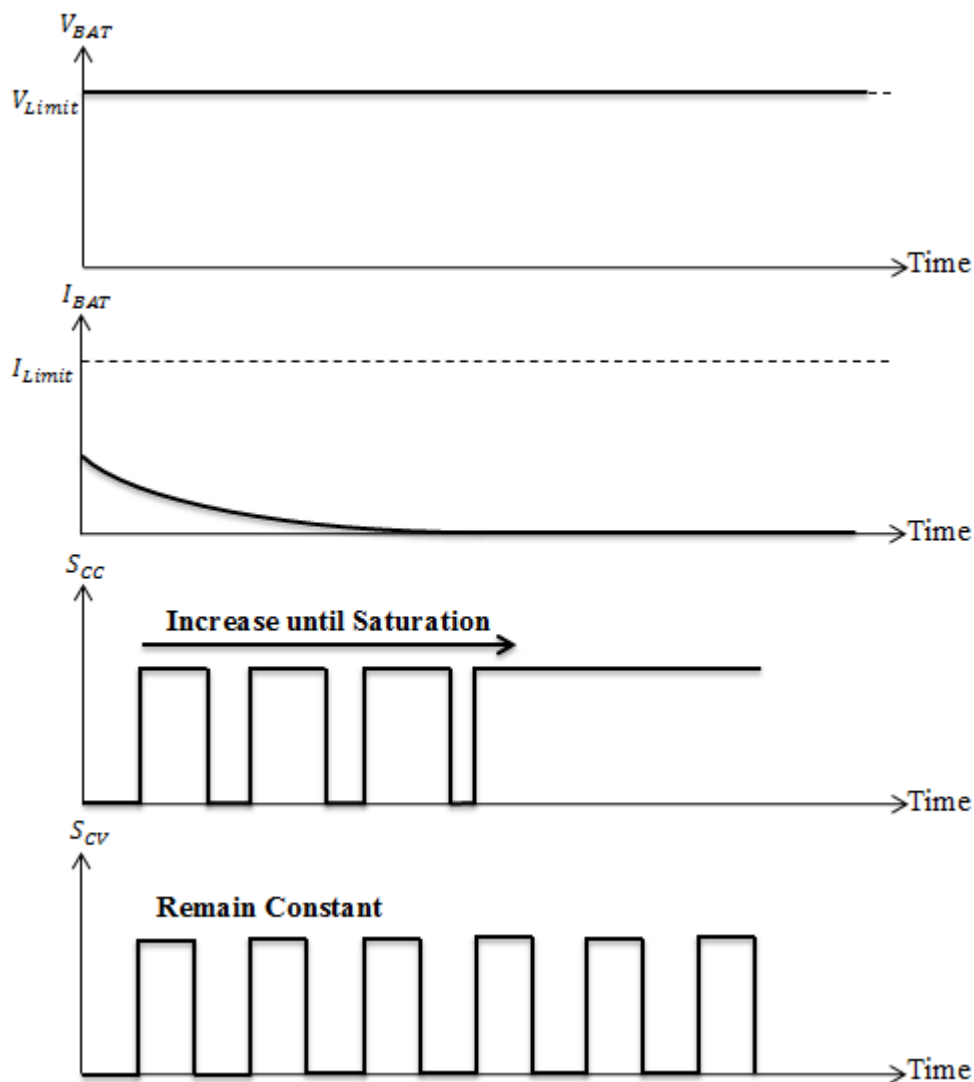


Figure 70 : Formes des courbes de la tension de la batterie V_{BAT} , du courant de la batterie I_{BAT} , du signal S_{CC} et du signal S_{CV} , en mode de charge à tension constante

Le rapport de charge du signal S_{CV} reste le même pour maintenir la tension V_{BAT} constante, tandis que le courant I_{BAT} diminue progressivement et que le rapport de charge du signal S_{CC} continue d'augmenter et finit par saturer, comme l'illustre dans la figure 70.

La conception proposée de l'interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle par impulsions est illustrée à la figure 66. Elle comprend six sous circuits : le bloc de contrôle en mode courant constant (CC Mode Control), le bloc de contrôle en mode tension constante (CV Mode Control), le bloc capteur de courant (Current Sensor), le

pour le déclencher. L'utilisation de la porte logique Bascul-D est garanti des résultats de comparaison corrects. La charge ou la décharge du condensateur C_{CC} est assurée par une paire de source de courant et un puits de courant, qui sont contrôlés par Q et NON Q qui sont les sorties de la porte logique Bascul-D.

De plus, l'utilisation d'un second comparateur à haute vitesse dans la sortie du bloc de contrôle en mode courant constant CC est permet de déterminer le rapport cyclique du signal S_{CC} . Le signal S_{CC} est déterminé à partir d'une comparaison entre la tension du condensateur $V_{C_{CC}}$ et la tension de forme d'onde de rampe V_{Ramp} . Enfin, la fonction de démarrage est également réalisée par l'unité de contrôle dans le bloc de contrôle en mode courant constant CC, car la tension $V_{C_{CC}}$ est chargée par le courant I_{Bias} à partir de zéro, de sorte qu'elle augmente également progressivement à partir de zéro. Pour cela, l'augmentation du condensateur C_{CC} ou la diminution du courant I_{Bias} fait la prolongation du temps de démarrage. Le taux d'augmentation de la tension $V_{C_{CC}}$ peut être exprimé par l'équation :

$$\frac{dV_{C_{CC}}}{dt} = \frac{I_B}{C_{CC}} \quad (16)$$

Le rapport de chaque transistor du bloc de contrôle de mode courant constant CC est donné par le tableau 22.

Tableau 22 : Rapport de chaque transistor du bloc de contrôle de mode courant constant CC

| Transistors | le rapport (W/L) ($\mu\text{m}/\text{nm}$) | Le taux de multiplication (m) |
|---------------|--|-------------------------------|
| PM0, PM1 | 4/180 | 1 |
| PM2 | 0.4/180 | 1 |
| NM0, NM1, NM4 | 2/180 | 1 |
| NM2, NM3 | 2/180 | 2 |

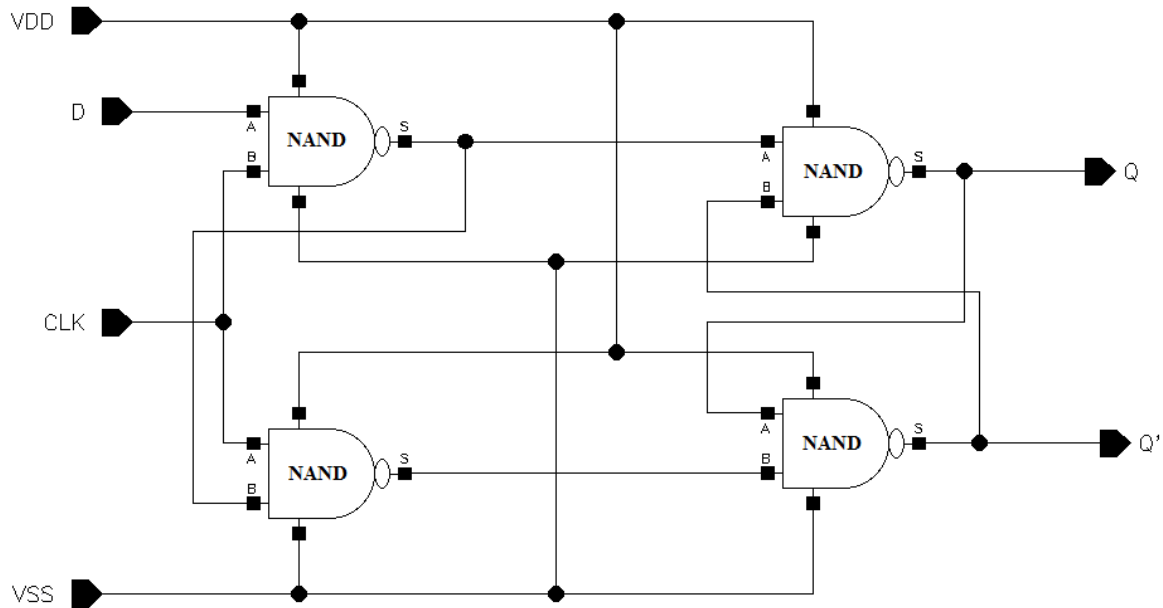


Figure 72 : Schéma du circuit de la porte logique Bascul-D utilisé dans le bloc de contrôle du mode CC

V.2.2 Bloc de contrôle du mode tension constante CV

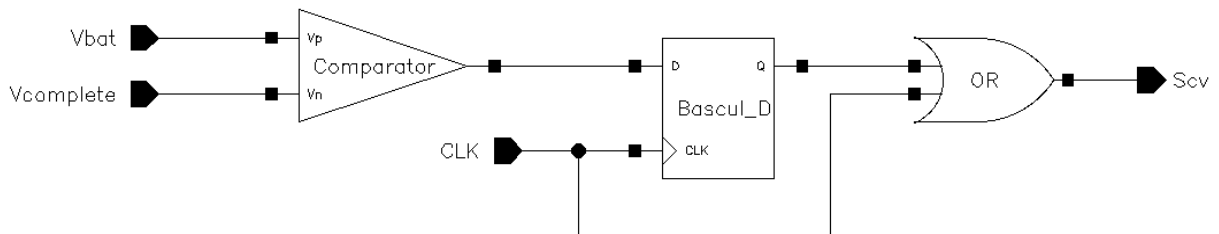


Figure 73 : Schéma du circuit de bloc contrôle du mode tension constante CV

La figure 73 illustre le circuit du bloc de contrôle du mode tension constante CV. Le chargeur est confronté à un scénario de charge légère lorsque la tension de la batterie V_{BAT} est un peu près égale à la valeur de la tension complète $V_{Complete}$. Cependant, le signal S_{CV} sera sélectionné devant le signal S_{CC} par l'utilisation d'une porte logique ET (AND), comme illustré dans la figure 66, ce qui permet de maintenir l'efficacité de la charge légère. Le comparateur à grande vitesse (illustré à la figure 46, qu'a utilisé dans le bloc de contrôle de mode au chapitre IV) est utilisé dans le circuit pour produire un niveau logique bas et haut. Il produit un niveau logique bas lorsque l'un ou l'autre des signaux S_{CV} est égal au signal

d'horloge CLK, si la tension V_{BAT} n'atteindrait pas la tension $V_{Complete}$. D'autre part, il produit un niveau logique élevé pour couvrir le signal d'horloge CLK par le signal S_{CV} , lorsque la tension V_{BAT} et la tension $V_{Complete}$ sont égaux. Le PMOS de puissance est désactivé en raison d'un long cycle de fonctionnement du signal S_{CV} élevé. Le schéma de la porte logique OU (OR) est montré dans la figure 74.

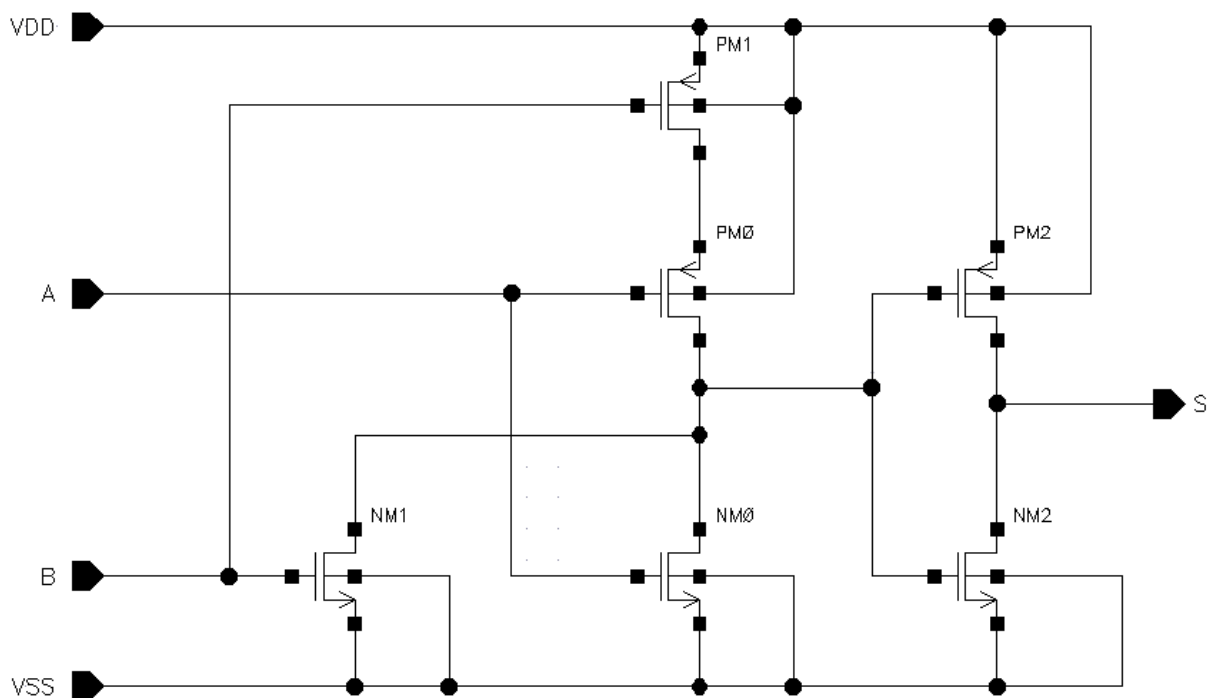


Figure 74 : Schéma du circuit de la porte logique OR utilisé dans le bloc de contrôle du mode CV

Le rapport de chaque transistor du circuit de la porte logique OR utilisé dans le bloc de contrôle du mode CV est donné par le tableau 23.

Tableau 23 : Rapport de chaque transistor du circuit de la porte logique OR utilisé dans le bloc de contrôle du mode CV

| Transistors | le rapport (W/L) ($\mu\text{m}/\text{nm}$) | Le taux de multiplication (m) |
|---------------|--|-------------------------------|
| PM0, PM1, PM2 | 2/180 | 1 |
| NM0, NM1, NM2 | 2/180 | 1 |

V.2.3 Blocs " Décaleur de niveau" et " Pilote de grille"

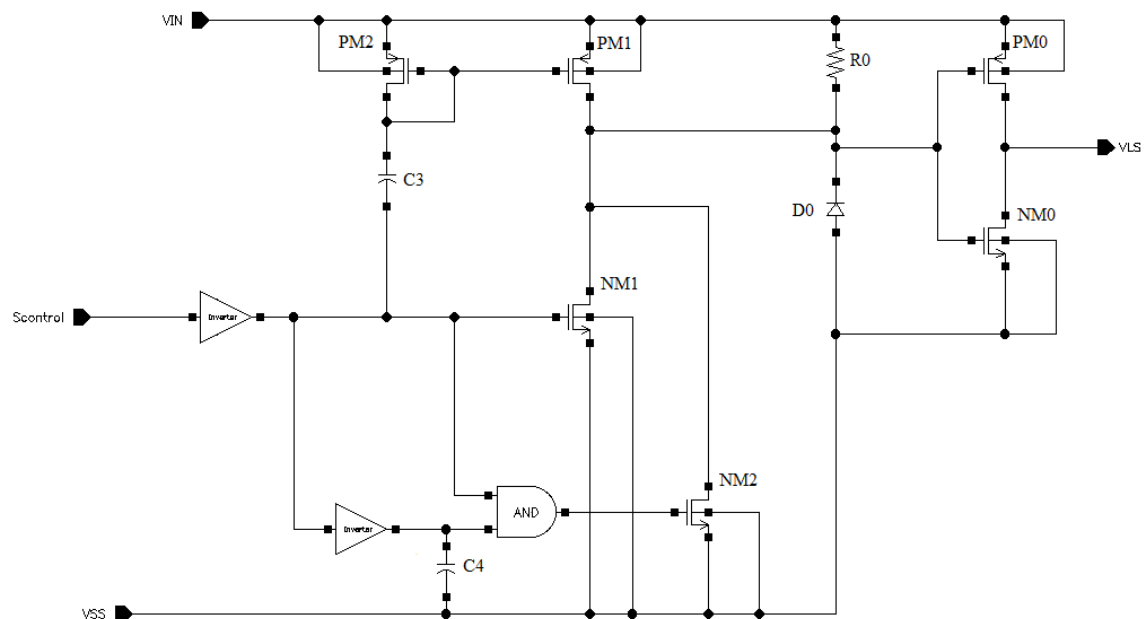


Figure 75 : Schéma du circuit de bloc décaleur de niveau utilisé dans l'interface proposé basée sur la technique de contrôle par impulsions

Le bloc de décaleur de niveau est utilisé pour passer de la basse tension du signal de commande $S_{Control}$ à une tension plus élevée pour piloter le PMOS de puissance (Power PMOS). Son circuit est illustré à la figure 75.

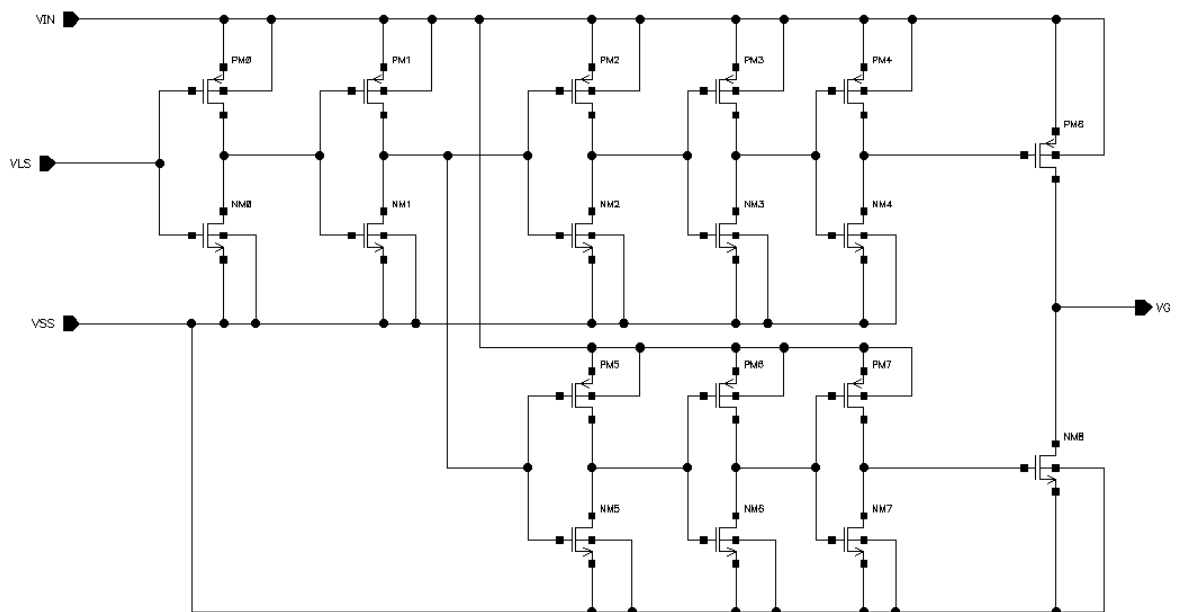


Figure 76 : Schéma du circuit de bloc pilote de grille utilisé dans l'interface proposé basée sur la technique de contrôle par impulsions

En outre, le bloc de pilote de grille est fixé à la grille du PMOS de puissance pour alimenter la charge de la batterie par l'action de commutation et réguler la valeur pratique du courant dans la batterie. Son circuit est illustré à la figure 76.

Le bloc de décaleur de niveau associé avec un bloc de pilote de grille est fournit un temps de montée d'environ 36 picosecondes, un temps de descente d'environ 36 picosecondes, et un temps de propagation d'environ 0,25 nanosecondes [94]. Ils sont bien détaillés dans le chapitre III.

V.2.4 Bloc capteur de courant

L'amplificateur opérationnel (illustré à la figure 53, qu'a utilisé dans le bloc de référence des courants au chapitre IV) est utilisé dans le circuit, comme illustré à la figure 77, pour maintenir la tension de drain V_D du transistor PMOS (PM0) constante et égale à la tension V_{BAT} . En outre, le transistor PMOS (PM0) est utilisé dans la conception comme un capteur de courant de charge. Ce bloc est utilisé pour générer la tension V_{Sense} qui est toujours proportionnelle à la tension V_{BAT} . C'est le même bloc que nous avons utilisé dans l'interface proposé basée sur la commutation (voir chapitre IV).

Le rapport de chaque transistor du circuit de bloc capteur de courant est donné par le tableau 24.

Tableau 24 : Rapport de chaque transistor du circuit de bloc capteur de courant

| Transistors | le rapport (W/L) ($\mu\text{m}/\text{nm}$) | Le taux de multiplication (m) |
|--------------------|--|--------------------------------------|
| PM0, PM1 | 4/180 | 1 |

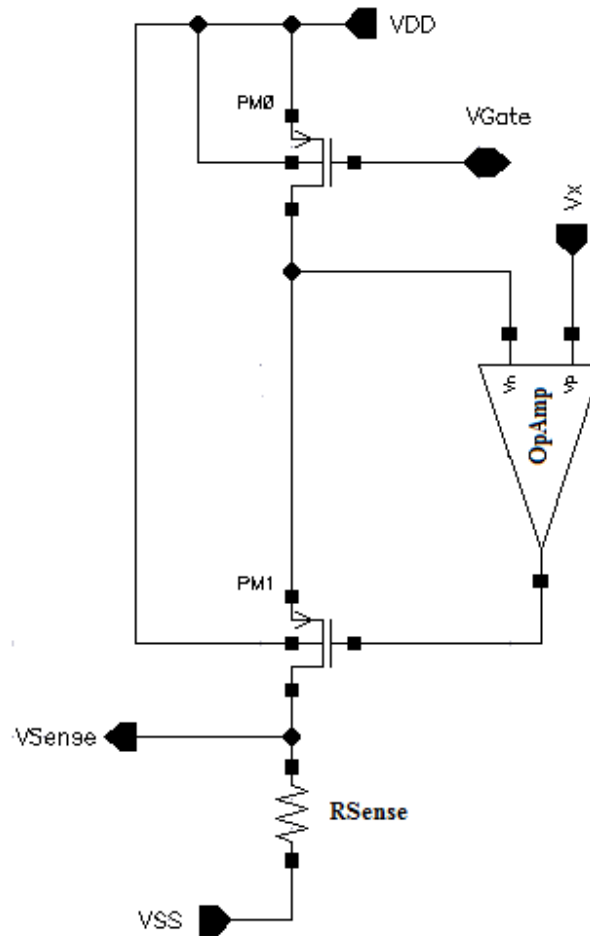


Figure 77 : Schéma du circuit de bloc capteur de courant utilisé dans l'interface proposé basée sur la technique de contrôle par impulsions

V.2.5 Bloc générateur de rampe et d'horloge

Le circuit du bloc générateur de rampe et d'horloge est illustré à la figure 78. Lorsque le transistor PMOS (PM0) est correctement initialisé, le courant I_{Bias1} commence à charger le condensateur C_{Ramp} . Le comparateur à haute vitesse dans le haut de circuit est utilisé pour fournir une logique basse, qui permet de remonter le signal S_{CLK} lorsque la tension V_{Ramp} atteint la tension V_H . Le transistor NMOS (NM1) est mis en marche lorsque le signal S_{CLK} est égal à "1" pour décharger le condensateur C_{Ramp} .

En outre, le comparateur à haute vitesse dans le bas du circuit est utilisé pour fournir une faible logique, qui permet la descente du signal S_{CLK} lorsque la tension V_{Ramp} est

Chapitre V

Conception et analyse d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle par impulsions

supérieure à la C_{Ramp} , qui est également inférieure à la tension V_L . Ainsi, le signal S_{Ramp} est souhaité pour le mécanisme de contrôle du signal S_{CC} et du signal S_{CV} . Les cycles de fonctionnement sont répétés pour fournir le signal S_{Ramp} et le signal S_{CLK} , en attendant que le système soit scellé.

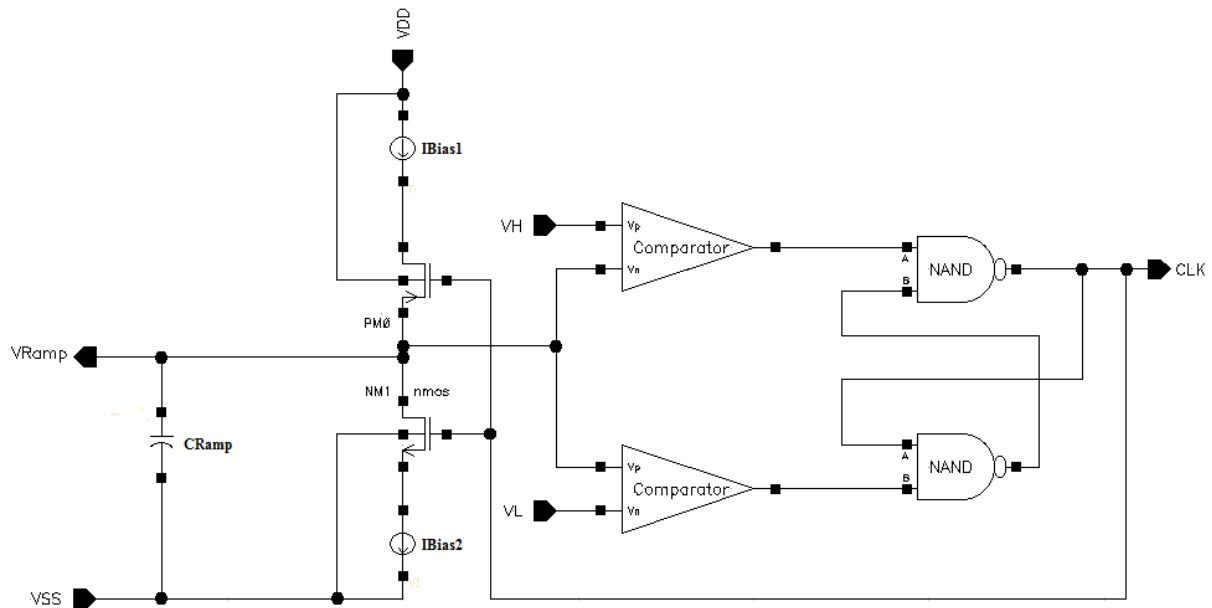


Figure 78 : Schéma du circuit de bloc générateur de rampe et d'horloge

Le rapport de chaque transistor du circuit de bloc générateur de rampe et d'horloge est donné par le tableau 25.

Tableau 25 : Rapport de chaque transistor du circuit de bloc générateur de rampe et d'horloge

| Transistors | le rapport (W/L) ($\mu\text{m}/\text{nm}$) | Le taux de multiplication (m) |
|-------------|--|-------------------------------|
| PM0 | 2/180 | 1 |
| NM1 | 2/180 | 1 |

V.2.6 Transistor de puissance PMOS (Power PMOS)

L'électronique du transistor MOS de puissance est une électronique de commutation. Les composants de puissance en silicium sont des dispositifs de conversion d'énergie

électrique. Ils se différencient de leurs homologues dits de « signal » par la nécessité de supporter des tensions élevées et de conduire des courants importants.

V.2.6.1 Principe de fonctionnement

Comme tous les composants de puissance, Le transistor MOS de puissance joue le rôle d'interrupteur fonctionnant entre deux états :

A. État bloqué

Cet état apparaît lorsque la tension grille-source est inférieure à une tension dite de seuil : le courant ne peut alors pas circuler. La tenue en tension V_{ds} (ou la tension de claquage) d'un transistor MOS est par définition la tension maximale qui peut être appliquée entre drain et source à l'état bloqué, c'est alors la zone de transition (appelée zone de « drift ») de la jonction de drain qui supporte la tension.

B. État passant

Cet état apparaît lors de l'application d'une tension de grille supérieure à la tension de seuil. Il se caractérise par l'apparition d'une zone d'inversion dans le canal, permettant ainsi le passage du courant de drain dont la valeur est limitée par les contraintes géométriques, technologiques de la structure et par les tensions appliquées. Lorsqu'un transistor fonctionne à l'état passant, il se comporte comme une résistance, notée R_{ON} , qui impose une chute de tension V_{DS} a tout simplement pour expression :

$$V_{ds} = R_{ON} * I_D \quad (17)$$

Où I_D est la valeur efficace du courant de drain.

La résistance à l'état passant est un des paramètres les plus importants pour un composant de puissance : plus cette résistance est faible, plus les pertes en conduction sont faibles.

$$P_D = V_{DS} * I_D = R_{ON} * I_D^2 \quad (18)$$

La tension de claquage et la résistance à l'état passant sont étroitement liées : en effet, la zone de drain N faiblement dopée à un double effet, d'une part, elle supporte la quasi-totalité de la tension drain-source à l'état bloqué, et d'autre part, elle a un effet résistif important à l'état passant. Le compromis entre R_{ON} et V_{DS} est une des principales caractéristiques des transistors MOS de puissance.

En ce qui concerne les temps de commutation, ils sont étroitement liés au courant appliqué sur la grille qui devra être élevé afin de permettre à la capacité d'entrée du composant de se décharger. Plus ce courant est "fort", plus la commutation est rapide. De plus, pour bloquer le transistor, il faudra fournir un chemin moins résistif possible au courant afin de permettre à cette capacité d'entrée de se décharger le plus rapidement possible.

V.2.6.2 MOSFET de puissance en commutation

Le modèle utilisé pour représenter le MOSFET est un modèle phénoménologique. En fait, il s'agit ici, à partir du modèle classique de MOSFET en linéaire (dans la zone active du dispositif), de représenter la totalité des commutations. Pour cela, nous les avons décomposées en phases, chacune étant représentée par des schémas électriques équivalents.

Trois phases peuvent être distinguées, correspondant à deux schémas électriques équivalents. Les phases "sous seuil" et "sur seuil", où le MOSFET voit ses circuits de grille et de puissance découplés (état passant ou bloqué), le schéma électrique est alors extrêmement simple (charge ou décharge de la capacité d'entrée du composant). Le troisième état est la phase "active". Les conditions de passage d'une phase à l'autre sont détaillées ci-après, et illustrées dans la figure 79.

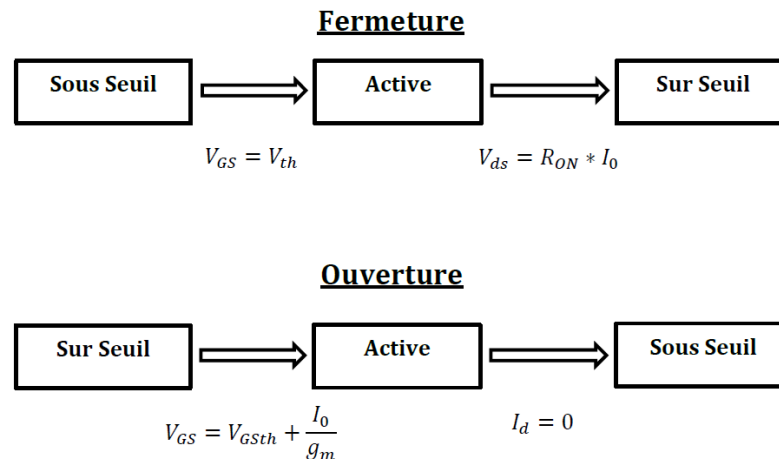


Figure 79 : Enchaînement des différentes phases du MOSFET

A. Fermeture du MOSFET

Phase "sous seuil", la tension grille source croît jusqu'à la tension de seuil V_{GSth} . Le MOSFET passe en zone active. Nous allons avoir ici les commutations en courant et en tension. Quand la tension V_{DS} atteint la tension $V_{ds}=R_{ON} \cdot I_d$, la tension V_{GSth} évolue vers son niveau final.

B. Ouverture du MOSFET

La tension grille source décroît jusqu'à un niveau imposé par le courant du MOSFET : $V_{GS} = V_{GSth} + \frac{I_0}{g_m}$ (Ici g_m est constant car I_D est grand). Le MOSFET passe en zone active, de même que lors de la fermeture, nous allons avoir alors les commutations en tensions puis en courant. Quand le courant MOSFET s'annule, la tension V_{GS} évolue vers son niveau final.

V.3 Résultats de la simulation et le Layout de chargeur proposé basé sur le contrôle par impulsions

V.3.1 Simulation de chargeur proposé basé sur le contrôle par impulsions

La conception proposée d'une interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle par impulsions est réalisée par l'utilisation de la technologie TSMC

Chapitre V

Conception et analyse d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle par impulsions

180nm CMOS sous le logiciel Cadence Virtuoso. La capacité de la batterie sélectionnée est de 5000mAh dans cette simulation. La tension d'alimentation V_{IN} est égale à 5V.

Les résultats de simulation transitoire de la tension V_{BAT} et du courant I_{BAT} dans chaque mode de charge (démarrage "Start Up", courant constant CC et tension constante CV) du chargeur proposé en utilisant la technique de contrôle par impulsions sont présentés à la figure 80. De plus, nous pouvons observer à partir de la simulation que la batterie se charge rapidement en quarante et une minutes (2,5 kilo-seconde).

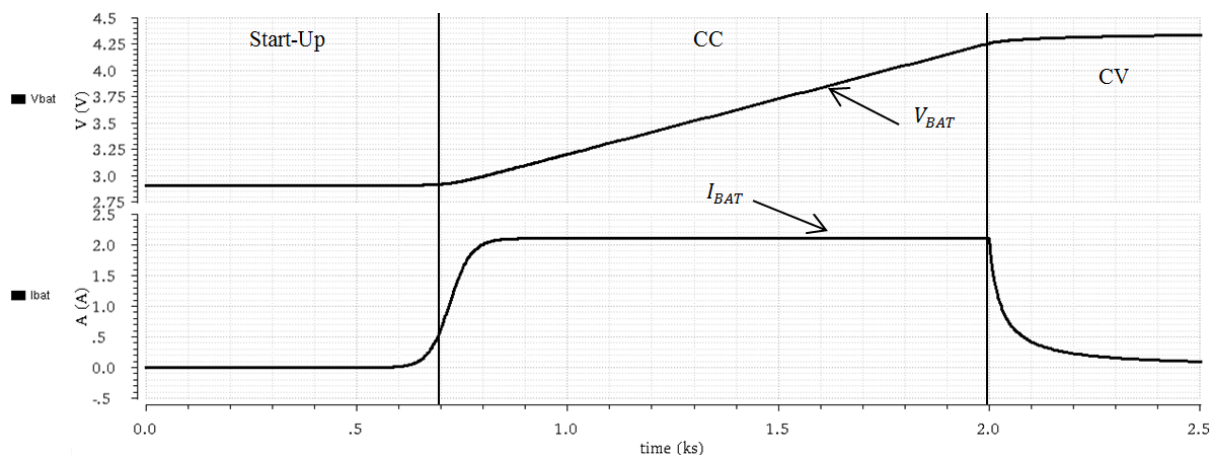


Figure 80 : Simulation transitoire, formes de courbe de la tension de la batterie V_{BAT} obtenue et du courant de la batterie I_{BAT} obtenue

La forme de courbe de la tension de batterie V_{BAT} obtenue est présentée dans la figure 81. Elle montre que la valeur variable de la tension V_{BAT} est d'environ 2.9V à 4.35V. La forme de courbe du courant de batterie I_{BAT} obtenue est présentée dans la figure 82. Elle montre que le courant de charge maximal I_{BAT} est égal à 2.1A en mode de charge à courant constant CC et il atteint également la valeur de courant $I_{Cut-off}$ qui est égale à environ 56mA pour mettre fin à la procédure de charge.

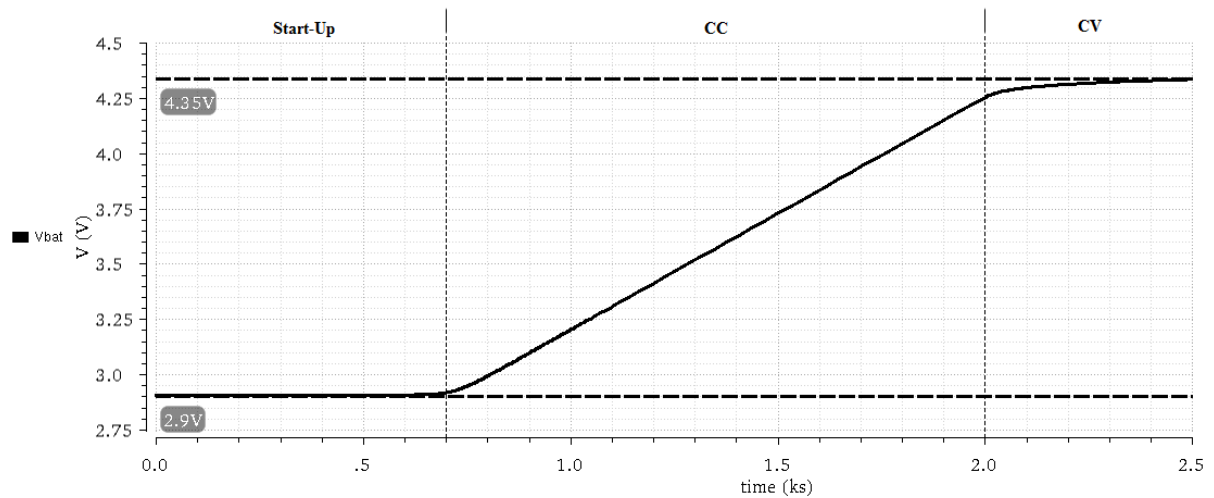


Figure 81 : Simulation transitoire, forme de courbe de la tension de batterie V_{BAT} obtenue

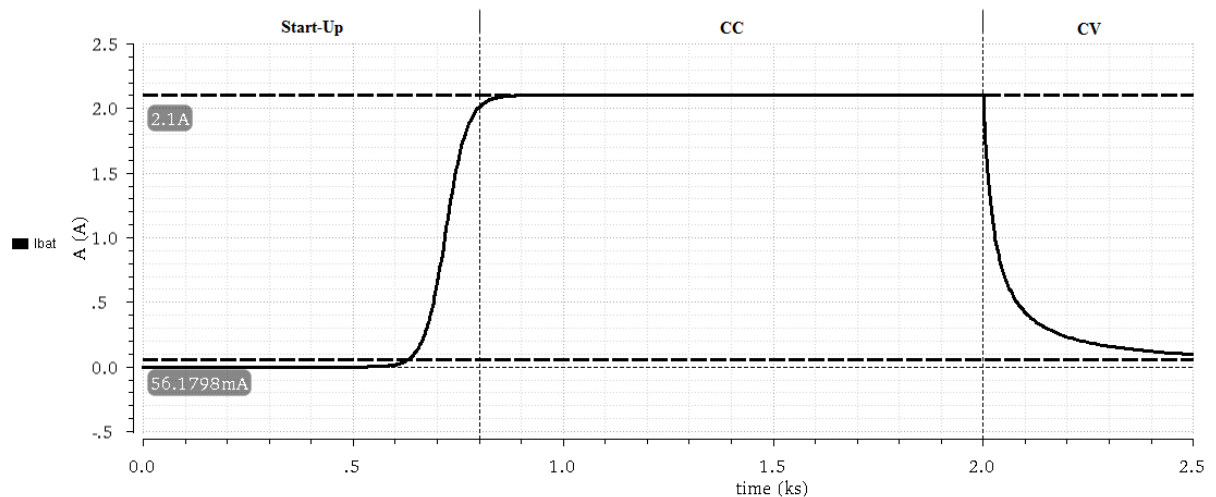


Figure 82 : Simulation transitoire, forme de courbe du courant de batterie I_{BAT} obtenue

L'efficacité de puissance de l'interface de chargeur proposée atteinte 98% lorsque le courant de charge maximal I_{BAT} égale 2,1 A, comme illustré dans la figure 83. Il est déterminé par l'équation :

$$\% \text{Efficacité} = \frac{P_{Out}}{P_{In}} \times 100 \quad (19)$$

Avec,

P_{Out} : est la puissance de sortie en Watts.

P_{In} : est la puissance d'entrée en watts.

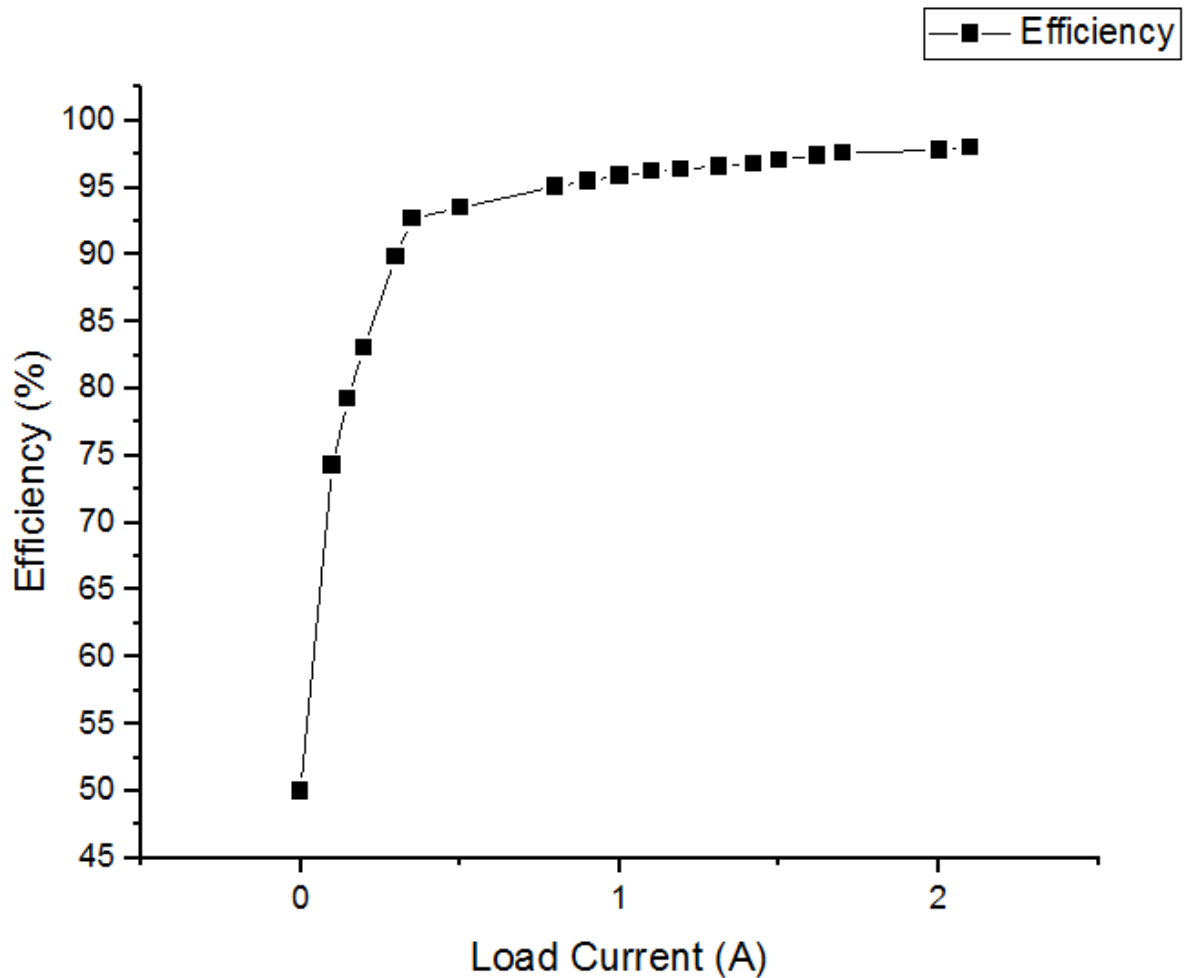


Figure 83 : Courbe résultante de l'efficacité de puissance d'interface proposée pour le chargeur de la batterie Li-Ion

V.3.2 Layout de chargeur proposée basé sur le contrôle par impulsions

Le layout du chargeur proposé est illustré à la figure 84. Un anneau de protection à double couche est utilisé dans tous les circuits sensibles aux interférences électromagnétiques. Il est réalisé en respectant les règles de conception (Densité, DRM et MRC) et les informations des contraintes du concepteur (Cat match, gestionnaire de texte et de contraintes, etc.). Il occupe une surface totale de 0,1mm².

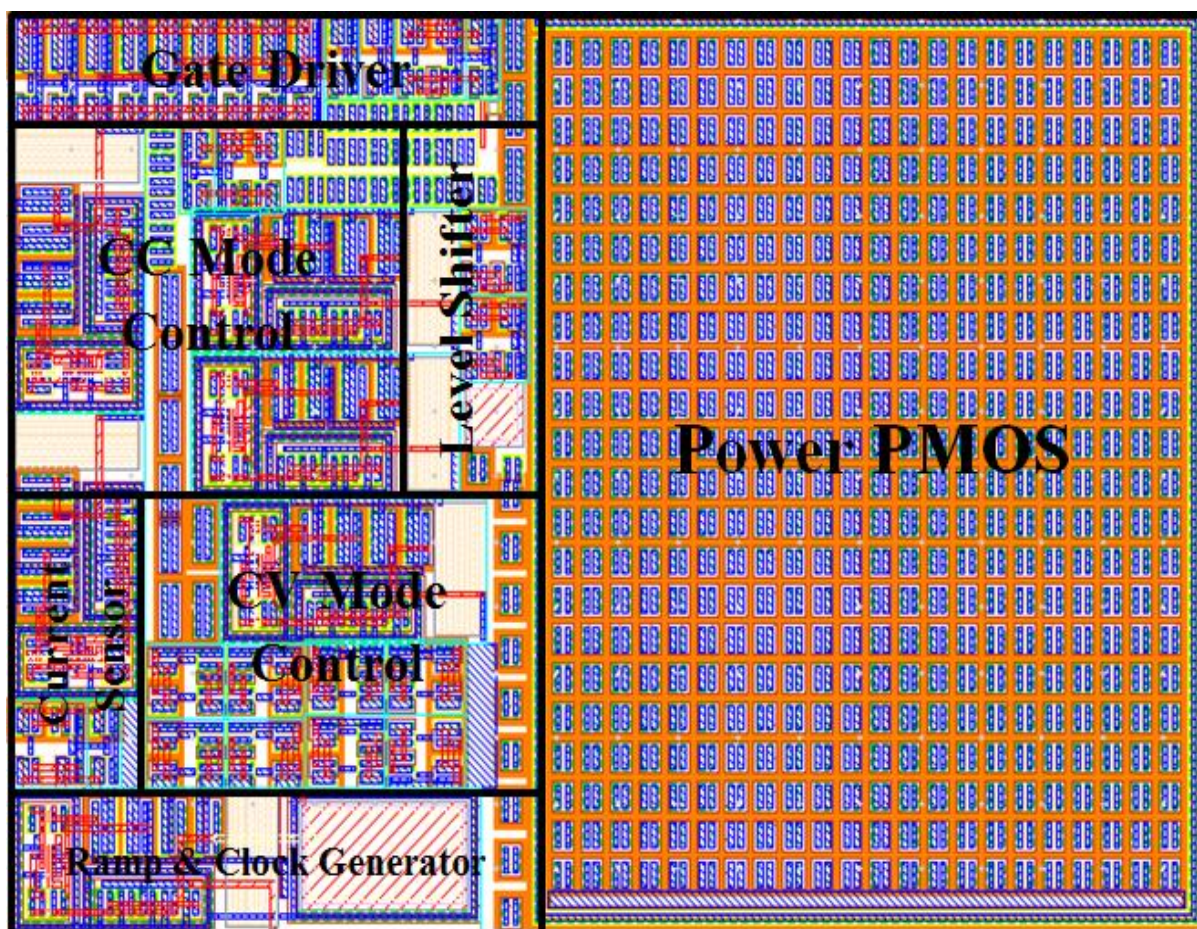


Figure 84 : Layout de l'interface proposée basé sur le contrôle par impulsions

Le tableau 26 résume les résultats de simulation trouvés et une analyse comparative entre l'interface de chargeur de batterie Li-Ion proposé basé sur le contrôle par impulsions et d'autres travaux/références.

Tableau 26 : Analyse comparative entre notre chargeur proposé basé sur le contrôle par impulsions et des autres références

| Reference | Topologie | Technologie | Tension d'entrée maximale $V_{IN(max)}$ (V) | Plage de sortie V_{BAT} (V) | Courant de charge maximal, $I_{BAT(max)}$ (A) | Efficacité maximale (%) | Taille (mm ²) |
|----------------------------------|-------------------------|------------------|--|----------------------------------|--|-------------------------|---------------------------|
| M. El Alaoui et al., 2021, [110] | Basé sur la commutation | TSMC 180 nm CMOS | 5 | 2.9-4.35 | 2.1 | 98 | 0.1 |
| F. Farah et al., 2021, [111] | Basé sur la commutation | TSMC 180 nm CMOS | 4.2 | 2.7-4.5 | 1 | 90.9 | 1.5 |

Chapitre V

Conception et analyse d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle par impulsions

| | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------|---------------|----------|---------|-------|--------------------------|--------|
| Y. H. Jung et al., 2017, [105] | Basé sur la commutation | 180 nm CMOS | 5.5 | 2.8-4.2 | 0.5 | 87.6 | 1.62 |
| C. C. Wang et al., 2019, [102] | Basé sur la commutation | 500 nm CMOS | 8.0-10.0 | 2.5-4.2 | 1.5 | 87.4(C.C.) 88.6(C.V.) | 7.29 |
| Y. Ziadi et al., 2015, [103] | LDO adaptative | 180 nm CMOS | 5 | 2.5-4.2 | 0.448 | 84 | 1.62 |
| K. Chung et al., 2017, [8] | LDO | 130 nm BICMOS | 5 | 3-4.3 | 0.495 | 83.9 | 1.41 |
| M. G. Jeong et al., 2016, [14] | Basé sur la commutation | 130 nm BICMOS | 16 | 2.5-4.2 | 1.5 | 90 | 12.25 |
| C. C. Su et al., 2017, [104] | Basé sur la commutation | 350 nm CMOS | 5.5 | 2.3-4.2 | 0.6 | 92.5 | 2.7126 |

V.4 Conclusion

Une interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle par impulsions a été favorablement conçu et développé en technologie TSMC 180nm CMOS sous le logiciel Cadence Virtuoso. Le chargeur proposé permet d'obtenir une tension de la batterie V_{BAT} pouvant aller de 2,9V à 4,35V selon une tension d'entrée maximale V_{IN} égale à 5 V, et d'obtenir également un courant de charge maximal I_{BAT} égale à 2,1A. Le chargeur proposé permet d'obtenir une charge complète en quarante et une minutes. L'efficacité de charge maximale atteint également 98% et la surface totale occupe une petite taille de 0,1 mm².

Conclusion générale et perspectives

Nous sommes intéressés dans cette thèse à la conception, l'analyse et le développement des interfaces de chargeur pour les batteries Li-Ion. Ces interfaces de chargeur utilisant des différentes techniques ont été capables de charger la batterie plus rapidement et de maintenir le cycle de capacité à long terme sans affecter la capacité de la batterie. Sur la base de ces objectifs, nous avons développé au début un décaleur de niveau associé avec un pilote de grille. Le décaleur de niveau est utilisé pour passer de la basse tension du signal de commande à une tension plus élevée. D'autre part, le pilote de grille est fixé à la grille du transistor PMOS de puissance pour alimenter la charge de la batterie par l'action de commutation et réguler la valeur pratique du courant dans la batterie. Le décaleur de niveau proposé associé avec le pilote de grille a atteint un délai de propagation de 0,25ns pour basculer d'une tension basse à une tension haute.

Ensuite, nous avons conçu, analysé et développé une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant une technique basée sur la commutation. Les normes les plus importantes de cette nouvelle interface sont le haut rendement, la faible surface et la charge rapide. Ce nouveau chargeur de la batterie a permis de charger la batterie complètement par des passages à chaque mode de charge (TC, CC, CV) en trente-trois minutes. Avec une tension d'entrée $V_{IN} = 4,5V$, la tension de sortie de la batterie V_{BAT} a pu varier de 2,7V à 4,2V et le courant de charge maximal de la batterie I_{BAT} est de 1,7A. Le rendement maximal de la nouvelle interface de chargeur a atteint 97% et sa surface totale fut seulement 0.3mm².

Puis, nous avons conçu, analysé et développé une autre nouvelle interface de chargeur de batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle par impulsions. Les principaux standards du chargeur de la batterie Li-Ion sont : la charge rapide, la petite surface et le haut rendement. Nous avons atteint ces objectifs grâce à l'utilisation de la technique de contrôle par

impulsions. Le chargeur proposé a permis de compléter la charge de la batterie en quarante et une minutes en passant par le mode de charge à courant constant CC qui inclut également le mode de démarrage, puis, par le mode de charge à tension constante CV. Selon une tension d'entrée maximale V_{IN} égale à 5V, la tension de la batterie V_{BAT} a varié entre 2,9V et 4,35V et le courant maximal de la batterie I_{BAT} fut de 2,1A en mode de charge CC. Le rendement maximal de la nouvelle interface proposé a atteint 98% et sa surface totale fut seulement 0,1mm².

Tous les résultats présentés dans cette thèse ont été conçu, simulé sous le logiciel Cadence Virtuoso en utilisant la technologie TSCM 180nm CMOS. Ces résultats ont montré que nous avons pu charger la batterie environ trois fois plus vite que la charge industrielle actuelle tout en maintenant la durée de vie du cycle proche de la charge industrielle.

Les résultats de notre thèse offrent de nombreuses possibilités de travaux de recherche pour les futurs chercheurs. Il sera possible d'incorporer des techniques de charge avancées dans un grand bloc des batteries par l'utilisation d'un système de gestion de batterie (BMS). Ce dernier est essentiel pour tout véhicule électrique afin d'entretenir le bloc des batteries. Ce BMS a un lien direct avec les méthodes de charge. Une mauvaise gestion de la charge aura un impact négatif sur les batteries individuelles et pourra détruire le bloc-batterie. Le BMS pourra aider à fournir une distribution égale de la charge entre les batteries. Un système de gestion de la charge avancé pourra faciliter le fonctionnement du bloc-batterie. D'autres perspectives de recherches pourront explorer l'impact des changements de température, de l'état de charge, de l'état de santé, des changements de pression et l'intégration des multi sources d'alimentation dans l'interface de chargeur. L'amélioration de la performance des batteries pourra changer le futur marché des véhicules électriques et des Smartphones.

Références

- [1] I. Buchmann, *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers*, Richmond, BC, Canada: Cadex Electronics Inc., 2011.
- [2] Instruments., Texas, «Lithium-Ion Battery Charger and Power-Path Management IC,» 2017. [En ligne]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24232h.pdf>.
- [3] Intersil, «ISL9230—High Power Li-Ion Charger W/I-Path Management, ISL9230 Datasheet,» 2011. [En ligne]. Available: <http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/isl9/isl9230.pdf>.
- [4] C. H. Lin, C. Y. Hsieh, and K. H. Chen, «A Li-ion battery charger with smooth control circuit and built-in resistance compensator for achieving stable and fast charging,» *IEEE Trans. on Circuits & Systems - I : Regular Papers*, vol. 57, n°12, p. 506–517, Feb. 2010.
- [5] B. D. Valle, C. T. Wentz, and R. Sarpeshkar, «An area and power-efficient analog Li-ion battery charger circuit,» *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, vol. 05, n°102, p. 131–137, Apr. 2011.
- [6] T. C. Huang, R. H. Peng, T. W. Tsai, K. H. Chen, and C. L. Wey, «Fast Charging and High Efficiency Switching-Based Charger With Continuous Built-In Resistance Detection and Automatic Energy Deliver Control for Portable Electronics,» *IEEE Journal Of Solid-State Circuits*, vol. 49, n° 107, pp. 1580-1594, Jul. 2014.
- [7] T. T. H. a. J. W. L. P. H. V. Quang, «A fully integrated multimode wireless power charger IC with adaptive supply control and built-in resistance compensation,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, n° 102, p. 1251–1261, 2015.
- [8] K. Chung, S. K. Hong, and O. K. Kwon, «A fast and compact charger for an Li-ion battery using successive built-in resistance detection,» *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 64, n° 102, p. 161–165, Feb. 2017.
- [9] Y. S. Hwang, S. C. Wang, F. C. Yang, and J. J. Chen, «New compact CMOS Li-ion battery charger using charge-pump technique for portable applications,» *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 54, n° 104, p. 705–712, Apr. 2007.
- [10] J. J. Chen, F. C. Yang, C. C. Lai, Y. S. Hwang, and R. G. Lee, «A high efficiency multimode Li-ion battery charger with variable current source and controlling previous-stage supply voltage,» *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 56, n°107, p. 2469–2478, Jul. 2009.
- [11] M. Chen and G. A. Rincón-Mora, «Accurate, compact, and powerefficient Li-ion battery charger circuit,» *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 53, n° 111, p.

- 1180–1184, Nov. 2006.
- [12] S. H. Yang, J. W. Liu, and C. C. Wang, «A single-chip 60-V bulk charger for series Li-ion batteries with smooth charge-mode transition,» *IEEE Trans. on Circuits & Systems - I : Regular Papers*, vol. 79, n° 17, p. 1588–1597, Jul. 2012.
- [13] R. Pagano, M. Baker, and R. E. Radke, «A 0.18- μm monolithic Li-ion battery charger for wireless devices based on partial current sensing and adaptive reference voltage,» *IEEE Journal Solid-State Circuits*, vol. 47, n° 106, p. 1355–1368, Jun. 2012.
- [14] M. G. Jeong, S. H. Kim, and C. Yoo, «Switching battery charger integrated circuit for mobile devices in a 130-nm BCDMOS process,» *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, n° 111, p. 7943–7952, Nov. 2016.
- [15] Y. C. Kuo, Y. J. Luo, and L. J. Liu,, «Synthesizable integrated circuit and system design for solar chargers,» *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, n° 109, p. 4260–4266, Sep. 2013.
- [16] Y. C. Kuo, W. H. Tung, and L. J. Liu,, «Smart integrated circuit and system design for renewable energy harvesters,» *IEEE J. Photovolt.*, vol. 03, n° 101, p. 401–406, Jan. 2013.
- [17] V. L. Tran, H. N. Vu, D. D. Tran, and W. Choi,, «Design and implementation of a high-efficiency multiple output charger based on the time-division multiple control technique,» *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, n° 102, p. 1210–1219, Feb. 2017.
- [18] P. J. Liu and C. H. Yen, «A fast-charging switching-based charger with adaptive hybrid duty cycle control for multiple batteries,» *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, n° 103, p. 1975–1983, Mar. 2017.
- [19] C. F. Lee and P. K. T. Mok, «A monolithic current-mode CMOS DC–DC converter with on-chip current-sensing technique,» *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 39, n° 101, p. 3–14, Jan. 2004.
- [20] T. R. Crompton, «Battery reference book,» vol. 28, n° 103, pp. 28-1573, 1990.
- [21] M. Randall, «Electrolytic Cells,» *Am. J. Phys.*, vol. 07, n° 105, p. 292–314, 1939.
- [22] D. Andrea, *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*, Norwood, MA: Artech House, 2010.
- [23] B. Saha, K. Goebel, S. Poll, and J. Christophersen,, «Prognostics Methods for Battery Health Monitoring Using a Bayesian Framework,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, n° 102, p. 291–296, Feb. 2009.
- [24] T. Reddy, *Linden’s Handbook of Batteries*, 4th Edition, McGraw Hill, Jun. 2010.
- [25] A. Affanni, A. Bellini, G. Franceschini, P. Guglielmi, and C. Tassoni,, «Battery choice

- and management for new-generation electric vehicles,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, n° 105, p. 1343–, Oct. 2005.
- [26] K. Liu, Y. Liu, D. Lin, A. Pei, and Y. Cui., «Materials for lithium-ion battery safety,» *Science Advances*, vol. 04, n° 106, p. 9820, Jun. 2018.
- [27] N. Kularatna, «Rechargeable Batteries and Supercapacitor Applications,» 2014.
- [28] «Information on the Invention of the Battery - Battery University,» 2016. [En ligne]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/when_was_the_battery_invented. [Accès le 12 03 2019].
- [29] F. Decker, «Volta and the “Pile”,» 2005.
- [30] «Battery History | Dry and Wet Cell Battery History | Energizer,» 19 03 2019. [En ligne]. Available: <https://www.energizer.com/about-batteries/battery-history>.
- [31] M. Winter, B. Barnett, and K. Xu, «Before Li Ion Batteries,» *Chemical Reviews*, vol. 118, n° 123, p. 11433–11456, 12 Dec 2018.
- [32] B. Scrosati, «History of lithium batteries,» *Journal of Solid State Electrochemistry*, vol. 15, n° 17-8, p. 1623–1630, Jul 2011.
- [33] C. A. Vincent, «Lithium batteries: A 50-year perspective, 1959-2009,» *Solid State Ionics*, vol. 134, n° 11-2, p. 159–167, Oct 2000.
- [34] T. Yamabe, K. Tanaka, K. Ohzeki, and S. Yata, «Electronic structure of polyacene. A one-dimensional graphite,» *Solid State Commun*, vol. 44, n° 106, p. 823–825, 1982.
- [35] S. Yata, K. Tanaka, and T. Yamabe, «Polyacene (PAS) Batteries,» *MRS Proc.*, vol. 496, p. 15, Feb. 1997.
- [36] O. Haas and K. Mu, «ChemInform Abstract : Electrochemically Active Polymers for Rechargeable Batteries Electrochemically Active Polymers for Rechargeable Batteries,» n° 1 MARCH 1997, 2015.
- [37] C. A. Vincent, «Lithium batteries: A 50-year perspective, 1959-2009,» *Solid State Ionics*, vol. 134, n°11-2, p. 159–167, Oct 2000.
- [38] R. Baroody, «Evaluation of rapid electric battery charging techniques,» 2009.
- [39] «Power Japan Plus official,» 2014. [En ligne]. Available: <http://powerjapanplus.com/media/media/2.php>. [Accès le 19 04 2019].
- [40] «CeraLink Capacitors - Ceramic Capacitors - Product Catalog - Products - Home - TDK Electronics - TDK Europe,» [En ligne]. Available: <https://en.tdk-electronics.tdk.com/tdk-en/1054426/products/product-catalog/ceramic-capacitors/ceralink-capacitors>.

- [41] C. Daniel and J. O. Besenhard, *Handbook of Battery Materials*, Wiley-VCH, 2, 2011.
- [42] M. Winter and R. J. Brodd, *Chemical Reviews* 104(3), 2004.
- [43] J. M. Tarascon and M. Armand, *Nature* 414(6861), 2001, p. 359–367.
- [44] D. Linden, and T. B. Reddy, *Handbook of Batteries*, McGraw Hill, 3 edition, 1995.
- [45] S. J. Dillon, and K. Sun., *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 16, 2012.
- [46] R. A. Huggins, *Advanced Batteries*, Springer, 2009.
- [47] G. W. Anand Bhatt, «Lithium-ion batteries - Curious,» [En ligne]. Available: <https://www.science.org.au/curious/technology-future/lithium-ion-batteries>. [Accès le 29 04 2019].
- [48] N. Omar et al., «Rechargeable energy storage systems for plug-in hybrid electric vehicles-assessment of electrical characteristics,» *Energies*, vol. 05, n° 108, p. 2952–2988, 2012.
- [49] M. H. Noh, «Charge rapide de batterie Lithium-ion basée sur la compensation de chute-Fast-charging of Lithium-ion batteries,» 2018.
- [50] E. Wikner and T. Thiringer, «Extending Battery Lifetime by Avoiding High SOC,» *Applied Sciences*, vol. 8, n° 110, p. 1825, Oct. 2018.
- [51] E. V. Thomas, H. L. Case, D. H. Doughty, R. G. Jungst, G. Nagasubramanian and E. P. Roth., «Accelerated power degradation of Li-ion cells,» *Journal of Power Sources*, vol. 124, n° 101, p. 254–260, Oct. 2003.
- [52] M. Gauthier, T. J. Carney, A. Grimaud, L. Giordano, N. Pour, H. H. Chang, D. P. Fenning, S. F. Lux, O. Paschos, C. Bauer, F. Maglia, S. Lupart, P. Lamp, and Y. Shao-Horn., «Electrode–Electrolyte Interface in Li-Ion Batteries: Current Understanding and New Insights,» *The Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 06, n° 122, p. 4653–4672, Nov. 2015.
- [53] P. Arora, R. E. White, and M. Doyle., «Capacity Fade Mechanisms and Side Reactions in Lithium-Ion Batteries,» *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 145, n° 110, p. 3647–3667, Oct. 1998.
- [54] M. Broussely, P. Biensan, F. Bonhomme, P. Blanchard, S. Herreyre, K. Nechev, and R. J. Staniewicz., «Main aging mechanisms in Li ion batteries,» *Journal of Power Sources*, vol. 146, p. 90–96, Aug. 2005.
- [55] J. Vetter, P. Novák, M. R. Wagner, C. Veit, K. C. Möller, J. O. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler, and A. Hammouche., «Ageing mechanisms in lithium-ion batteries,» *Journal of Power Sources*, vol. 147, p. 269–281, Sep. 2005.

- [56] M. Hellqvist Kjell, S. Malmgren, K. Ciosek, M. Behm, K. Edström, and G. Lindbergh,, «Comparing aging of graphite LiFePO₂ cells at 22°C and 55°C Electrochemical and photoelectron spectroscopy studies.,» *Journal of Power Sources*, vol. 243, p. 290–298, Dec. 2013.
- [57] R. V. Bugga and M. C. Smart, «Lithium Plating Behavior in Lithium-Ion Cells.,» *ECS Transactions*, vol. 25, p. 241–252, Apr. 2010.
- [58] H. E. Park, C. H. Hong, and W. Y. Yoon,, «The effect of internal resistance on dendritic growth on lithium metal electrodes in the lithium secondary batteries.,» *Journal of Power Sources*, p. 765–768, Apr. 2008.
- [59] L. R. Chen, S. L. Wu, D. T. Shieh, and T. R. Chen,, «Sinusoidal-Ripple-Charging Strategy and Optimal Charging Frequency Study for.,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, n° 101, p. 88–97, Jan. 2013.
- [60] A. Barré, B. Deguilhem, S. Grolleau, M. Gérard, F. Suard, and D. Riu,, «A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications.,» *J. Power Sources*, vol. 241, p. 680–689, 2013.
- [61] H. E. Perez, X. Hu, S. Dey, and S. J. Moura,, «Optimal Charging of Li-Ion Batteries with Coupled Electro-Thermal-Aging Dynamics.,» *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, n° 109, p. 7761–7770, Sep. 2017.
- [62] C. Zou, X. Hu, Z. Wei, T. Wik, and B. Egardt,, «Electrochemical Estimation and Control for Lithium-Ion Battery Health-Aware Fast Charging.,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, n° 108, p. 6635–6645, 2018.
- [63] L. R. Chen and C. H. Wu, «Sinusoidal ripple current charging system with PLL function.,» *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, p. 1836–1841, 2014.
- [64] Q. Lin, J. Wang, R. Xiong, W. Shen, and H. He,, «Towards a smarter battery management system: A critical review on optimal charging methods of lithium ion batteries.,» *Energy*, vol. 183, p. 220–234, 2019.
- [65] R. Xiong, J. Tian, W. Shen, and F. Sun,, «A Novel Fractional Order Model for State of Charge Estimation in Lithium Ion Batteries.,» *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, n° 105, p. 4130–4139, 2019.
- [66] W. Shen, T. T. Vo, and A. Kapoor,, «Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview.,» *Proc. 2012 7th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2012*, p. 1567–1572, 2012.
- [67] E. Ayoub and N. Karami, «Review on the charging techniques of a Li-Ion battery.,» p. 50–55, 2015.
- [68] H. Asadi, S. H. Aghay Kaboli, A. Mohammadi, and M. Oladazimi,, «Fuzzy-control-

- based five-step Li-ion battery charger by using AC impedance technique,» *Fourth Int. Conf. Mach. Vis. (ICMV 2011) Mach. Vision, Image Process. Pattern Anal.*, vol. 8349, p. 834939–6, 2012.
- [69] Y. H. Liu and Y. F. Luo, «Search for an optimal rapid-charging pattern for li-ion batteries using the Taguchi approach,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, n° 112, p. 3963–3971, 2010.
- [70] Y. H. Liu, J. H. Teng, and Y. C. Lin., «Search for an optimal rapid charging pattern for lithium-ion batteries using ant colony system algorithm,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, n° 105, p. 1328–1336, 2005.
- [71] P. H. L. Notten, J. H. G. O. H. Veld, and J. R. G. Van Beek., «Boostcharging Li-ion batteries: A challenging new charging concept,» *J. Power Sources*, vol. 145, n° 101, p. 89–94, Jul. 2005.
- [72] M. Ye, H. Gong, R. Xiong, and H. Mu., «Research on the Battery Charging Strategy with Charging and Temperature Rising Control Awareness,» *IEEE Access*, vol. 06, p. 64193–64201, 2018.
- [73] E. Inoa and J. Wang, «PHEV charging strategies for maximized energy saving,» *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, n° 107, p. 2978–2986, 2011.
- [74] H. E. Perez, X. Hu, S. Dey, and S. J. Moura., «Optimal Charging of Li-Ion Batteries with Coupled Electro-Thermal-Aging Dynamics,» *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, n° 109, p. 7761–7770, Sep. 2017.
- [75] C. Zou, X. Hu, Z. Wei, T. Wik, and B. Egardt., «Electrochemical Estimation and Control for Lithium-Ion Battery Health-Aware Fast Charging,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, n° 108, p. 6635–6645, 2018.
- [76] L. R. Chen and C. H. Wu, «Sinusoidal ripple current charging system with PLL function,» *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, p. 1836–1841, 2014.
- [77] J. F. Wu, C. L. Wei, and Y. Z. Juang, «A monolithic high-voltage Li-Ion battery charger with sharp mode transition and partial current control technique,» *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 65, n° 19, p. 3099–3109, Sep. 2018.
- [78] F. Farah, M. El Alaoui, K. El Khadiri, and H. Qjidaa, «New analog Li-Ion battery charger using pulsed charging method,» *6th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, p. 10–12, May 2018.
- [79] K. El Khadiri, H. Akhmal, and H. Qjidaa, «Li-Ion battery charging with a buck-boost DC–DC converter for a portable device power management,» *Journal of Low Power Electronics*, vol. 13, n° 12, p. 263–270, Jun. 2017.

- [80] M. El Alaoui, F. Farah, K. El Khadiri, H. Qjidaa, A. Aarab, R. EL Alami, and A. Lakhssassi, «Analysis and design of dickson charge pump for EEPROM in 180nm CMOS technology,» *International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, p. 1–5, Apr. 2018.
- [81] G. Maderbacher, T. Jackum, W. Pribyl, S. Michaelis, D. Michaelis, and C. Sandner, «Fast and robust level shifters in 65 nm CMOS,» *Proceedings of the ESSCIRC (ESSCIRC)*, p. 195–198, 2011.
- [82] N. B. Romli, M. Mamun, M. A. Sobhan, and H. Husain, «design of a low Power dissipation and low input voltage range level shifter in Cedec 0.18- μm CMOS process,» *World Applied Sciences Journal*, vol. 19, n° 18, p. 1140–1148, Aug. 2012.
- [83] Y. Moghe, T. Lehmann, and T. Piessens, «Nanosecond delay floating high voltage level shifters in a 0.35 μm HV-CMOS technology,» *IEEE Journal of Solid State Circuits*, vol. 46, n° 12, Feb. 2011.
- [84] P. Gosatwar, and U. Ghodeswar, «Design of voltage level shifter for multi-supply voltage design,» *International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, p. 0853–0857, Apr. 2016.
- [85] M. Vaidya, A. Naugarhiya, and S. Verma, «High speed bootstrapping generic voltage level shifter,» *Second International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAECC)*, p. 1–4, Feb. 2018.
- [86] S. Chatterjee, and U. Rückert, «Scaling down a level shifter circuit in 28 nm FDSOI technology,» *International EUROSIOI Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon (EUROSIOI-ULIS)*, p. 1–4, Mar. 2018.
- [87] P. Liu, X. Wang, D. Wu, Z. Zhang, and L. Pan, «A novel high-speed and low-power negative voltage level shifter for low voltage applications,» *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, p. 601–604, May 2010.
- [88] S. C. Tan, and X. W. Sun, «Low power CMOS level shifters by bootstrapping technique,» *Electronics Letters*, vol. 38, n° 116, pp. 876-878, Aug. 2002.
- [89] K. H. Koo, J. H. Seo, M. L. Ko, and J. W. Kim, «A new level-up shifter for high speed and wide range interface in ultra-deep sub-micron,» *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, p. 1063–1065, 2005.
- [90] M. R. Hoque, and S. S Ang, «Design technique of an integrated gate driver,» *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS)*, p. 22–24, Oct. 2008.
- [91] S. Vaishnavi, S. Ashok, and T. Abbas, «Design and analysis of level shifter in high voltage transmitter,» *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol.

- 4, n° 11, pp. 1-5, Jan. 2014.
- [92] S. Gundala, V. K. Ramanaiah, and P. Kesari, «Nanosecond delay level shifter with logic level correction,» *International Conference on Advances in Electronics Computers and Communications*, p. 1–5, 2014.
- [93] B. Zhai, S. Pant, L. Nazhandali, S. Hanson, J. Olson, A. Reeves, M. Minuth, R. Helfand, T. Austin, D. Sylvester, and D. Blaauw, «Energy efficient sub threshold processor design,» *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 17, n° 18, p. 1127–1137, Aug. 2009.
- [94] M. E. Alaoui, F. Farah, K. E. Khadiri, H. Qjidaa, A. Aarab, A. Lakhssassi and A. Tahiri,, «Design and Analysis of New Level Shifter With Gate Driver for Li-Ion Battery Charger in 180nm CMOS Technology,» *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 15, n° 104, p. 477–484, Dec. 2019.
- [95] F. Farah, M. El Alaoui, A. El Boutahiri, M. Ouremchi, K. El Khadiri, A. Tahiri, and H. Qjidaa, «High Efficiency Buck-Boost Converter with Three Modes Selection for HV Applications using 0.18 μm Technology,» *ECTI-EEC*, vol. 18, n°12, p. 137–144, Aug. 2020.
- [96] M. Ouremchi, M. El Alaoui, F. Farah, K. El Khadiri, H. Qiidaa, A. Lakhssassi, and A. Tahiri, «Li-Ion Battery Charger Based on LDO Regulator for Portable Device Power Management,» *6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, pp. 1-4, Dec. 2018.
- [97] H. M. Nguyen, L. D. Pham, and T. Hoang, «A novel Li-ion battery charger using multi-mode LDO configuration based on 350 nm HV-CMOS,» *Analog Integr Circ Sig Process*, vol. 88, p. 505–516, Jun. 2016.
- [98] S. Dearborn, «Charging Li-ion batteries for maximum run times,» *Power Electronics Technology*, p. 40–49, Apr. 2005.
- [99] C. C. Tsai, C. Y. Lin, Y. S. Hwang, W. T. Lee, and T. Y. Lee, «A multimode LDO-based Li-ion battery charger in 0.35 μm CMOS technology,» *Proceedings the 2004 IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems*, vol. 01, p. 49–52, 2004.
- [100] H. Y. Yang, T. H. Wu, J. J. Chen, Y. S. Hwang, and C. C. Yu, «An omnipotent Li-ion battery charger with multimode controlled techniques,» *IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, p. 531–534, Apr. 2013.
- [101] M. El Alaoui, F. Farah, K. El Khadiri, A. Tahiri, R. EL Alami and H. Qjidaa,, «A high efficiency and high speed charge of Li-Ion battery charger interface using switching-based technique in 180 nm CMOS technology,» *Institute of Advanced Engineering and Science: International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 12, n° 101, pp. 374-384, March 2021.

- [102] C. C. Wang, and G. X. Liu, «A 1.5A 88.6% Li-ion battery charger design using pulse swallow technique in light load,» *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, pp. 1-4, May 2019.
- [103] Y. Ziadi, and H. Qjidaa, «A High Efficiency Li-Ion Battery LDO-Based Charger for Portable Application,» *Active and Passive Electronic Components*, pp. 1-9, Sep. 2015.
- [104] C. C. Su, Y. W. Liu, and C. C. Hung, «A dual-input high-efficiency li-ion battery charger with current-mode smooth transition and ripple reduction circuits,» *IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, p. 468–471, Aug. 2017.
- [105] Y. H. Jung, S. K. Hong, and O. K. Kwon, «Highly accurate and power efficient battery charger with charging current compensator for wearable devices,» *IEEE Electronics Letters*, vol. 53, n° 107, p. 461–463, Mar. 2017.
- [106] M. Du, and H. Lee, «A single-inductor dual-input dual-output buck regulator with enhanced power-delivery capability for portable battery management system,» *53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, pp. 1141-1144, 2010.
- [107] R. Peng et al., «Switching-based charger with continuously built-in resistor detector (CBIRD) and analog multiplication-division unit (AMDU) for fast charging in Li-Ion battery,» *Proceedings of the ESSCIRC (ESSCIRC)*, pp. 157-160, 2013.
- [108] J. A. D. Lima, «A compact and power-efficient CMOS battery charger for implantable devices,» *27th Symposium on Integrated Circuits and Systems Design (SBCCI)*, pp. 1-6, 2014.
- [109] H. N. Van, T. Nguyen, V. Quan, M. Nguyen and L. P. Nguyen, «A topology of charging mode control circuit suitable for long-life Li-Ion battery charger,» *IEEE Sixth International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*, pp. 167-171, 2016.
- [110] Mustapha El Alaoui, Karim El Khadiri, Rachid El Alami, Ahmed Tahiri, Ahmed Lakhssassi and Hassan Qjidaa., «A New High Speed Charge and High Efficiency Li-Ion Battery Charger Interface Using Pulse Control Technique in TSMC 180 nm CMOS Technology,» *Manuscript accepted in Institute of Advanced Engineering and Science: International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2021.
- [111] F. Farah, M. El Alaoui, A. Elboutahiri, M. Ouremchi, K. El Khadiri, A. Tahiri and H. Qjidaa., «A new Li-ion battery charger with charge mode selection based on 0.18 um CMOS for phone applications,» *Institute of Advanced Engineering and Science: International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 11, n° 13, pp. 1994-2002, June 2021.

Biographie de l'auteur



Mustapha El Alaoui est né en 18/06/1994 à l'ancienne Médina, Fès. Il a reçu son diplôme de Licence en science de la matière physique-option électronique, en 2015 à la Faculté Des Sciences Dhar el Mahraz, Fès. Puis, Il a poursuivi ses études au Master Microélectronique dans la même faculté, et il a reçu son diplôme en 2017 avec une mention bien. Actuellement titulaire d'un doctorat, son thèse doctorat Intitulée "Contributions à la conception intégrée des circuits d'interface de chargeur des batteries Li-Ion". Il été un membre du Laboratoire Electronique, Signaux, Systèmes et d'Informatique (LESSI), actuellement est un membre du Laboratoire d'Informatique, Signaux,

Automatique et Cognitivisme (LISAC). Ses principaux intérêts de recherche comprennent : La conception des circuits intégrés en mode mixte CMOS, les énergies renouvelables, les amplificateurs audio à découpage, les techniques de conception pour les RFID, les techniques de conception des interfaces du chargeur des batteries Li-Ion, la gestion de l'énergie des batteries (BMS), les systèmes embarqués.

Résumé

La conception de l'interface de chargeur de batterie Li-Ion utilisée dans les applications mobiles et automobiles requiert des exigences strictes de performance; notamment, celles relatives à la charge rapide de la batterie, à l'efficacité élevée et à la surface réduite. Cette thèse concerne la conception et l'optimisation de deux nouvelles interfaces de chargeur de batterie Li-Ion, l'une utilisant une technique basée sur la commutation et l'autre utilisant la technique de contrôle par impulsions.

La première partie de cette thèse traite l'intégration d'un nouveau décaleur de niveau associé à un pilote de grille dans l'architecture de l'interface de chargeur de batterie Li-Ion. Ils sont conçus pour passer de la basse tension du signal de commande à une tension plus élevée. D'autre part, le délai de propagation est considérablement réduit à 0,25ns. Ce circuit proposé est fixé à la grille du transistor PMOS de puissance pour alimenter la charge de la batterie par une action de commutation et pour réguler la valeur pratique du courant dans la batterie.

La deuxième partie de cette thèse traite la conception d'une nouvelle interface de chargeur de la batterie Li-Ion utilisant une technique basée sur la commutation. Ce nouveau chargeur de batterie permet d'avoir un chargement complet par des passages à chaque mode de charge (TC, CC et CV) en trente-trois minutes. Avec une tension d'entrée $V_{IN} = 4,5V$, la tension de sortie de la batterie V_{BAT} peut varier de 2,7V à 4,2V et le courant de charge maximal de la batterie I_{BAT} est égale à 1,7A. Le rendement maximal de la nouvelle interface du chargeur atteint 97% et sa surface totale est seulement de 0,3mm².

La troisième partie de cette thèse traite la conception d'une autre nouvelle interface du chargeur de batterie Li-Ion utilisant la technique de contrôle par impulsions. Ce nouveau chargeur de batterie permet d'avoir un chargement complet en quarante et une minutes en passant par le mode de charge à courant constant CC qui inclut également le mode de démarrage (Start-Up), et par le mode de charge à tension constante CV. Avec une tension d'entrée maximale V_{IN} égale à 5V, la tension de sortie de la batterie V_{BAT} peut varier de 2,9V à 4,35V et le courant de charge maximal de la batterie I_{BAT} est égale à 2,1A. Le rendement maximal de la nouvelle interface de chargeur atteint 98 % et sa surface totale est seulement de 0,1mm².

Les deux interfaces proposées du chargeur de la batterie Li-Ion, en utilisant la technique basée sur la commutation ou la technique de contrôle par impulsions, atteignent les normes les plus importantes qui sont : le haut rendement, la surface minimisée et la rapidité de charge. Elles sont conçues, simulées sous le logiciel Cadence Virtuoso en utilisant la technologie TSCM 180 nm CMOS.

Mots clés : Chargeur de la batterie Li-Ion, Décaleur de niveau, Pilote de grille, Retard de propagation, Chargeur à faible perte LDO, Chargeur basé sur une alimentation à commutation, Technique de commande par impulsions, Commande en mode courant constant CC, Commande en mode tension constante CV, Détection de courant.