

DOMAINE: SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
FILIERE : GENIE ELECTRIQUE  
SPECIALITE : AUTOMATIQUE

DEPARTEMENT: GENIE ELECTRIQUE  
FACULTE: TECHNOLOGIE  
N° D'ORDRE: .....



---

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

**MASTER**

**Automatique et systèmes**

**Présenté par :**

**FERAHTIA Seydali**

**Proposé et dirigé par :**

**Dr. CHOUDERE Aissa**

**Thème :**

---

**Contrôle de la mise en parallèle des batteries dans un  
micro réseau DC**

---

# *Remerciements*

*Tout d'abord, Je remercie Dieu, je voudrais remercier tous ceux qui  
m'ont donné la force et la patience pour accomplir cette tâche  
.modeste*

*A la fin de ce travail, je transmets mes sincères remerciements à  
mon encadreur Professeur: CHOUDER. A me permettre de profiter  
de son grande connaissance du sujet, ses compétences et son aider à  
précieux afin de transférer ses connaissances et ses conseils tout au  
.long de ce projet, même dans les moments les plus difficiles*

*Je vous remercie vraiment pour l'encadrement et je suis fier d'être  
.votre étudiant*

*Je ne manque pas l'occasion de vous remercier beaucoup, Dr:  
BERRABAH.F le chef de département pour son aide, tous les  
.professeurs de notre département de génie électronique*

*Je remercie aussi les étudiants doctorants LOUASAA.K et  
.BOUKHARDJA.M pour l'aide et l'encouragement*

*Nous remercions tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, nous  
ont toujours soutenus par leur respect et leur gentillesse*

# *Dédicace*

*Je dédie mon travail*

*À mes parents " Messoud et Saadia ", mes frères, mes sœur ainsi que toute ma famille pour leurs encouragements et prières qui m'ont permis de finaliser ce travail. Et n'oublier pas le grand merci à mes amies sur tout Boubakar, Amin, Khaled, Aymen, Nadjmo et Saïdo*

*Enfin, j'exprime ma gratitude à tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'élaboration de ce travail.*

*Sidali*

## **TABLE DES MATIERES**

Table des Matières  
Liste des Figures  
Liste des Tableaux  
Liste des abréviations  
Introduction générale

**Chapitre I : les micro-réseaux et les batteries**

1- Les réseaux intelligents .....2  
2- Les réseaux intelligents .....2  
3- Les micro-réseaux intelligents .....2  
4- L'état de charge dans les micro réseaux intelligents .....3  
5- La structure des micro-réseaux .....3  
6- Les avantages des micro réseaux .....4  
7- Contrôle de l'offre et la demande par les batteries de stockage .....4  
8- Les batteries électrochimiques .....5  
    a. Principe de fonctionnement .....5  
    b. Les inconvénients des batteries électrochimiques .....5  
    c. Les caractéristiques des batteries électrochimiques .....6  
    d. Classification des batteries électrochimiques .....6  
    e. les batteries Plompe Acide (lead acide) .....7

**Chapitre II : Modélisation et commande du système**

1- Modele d'une batterie .....9  
2- Deux batteries mis en parallèle .....10  
3- Droop contrôle .....11  
4- Hacheur réversible en courant .....14  
    a. Analyse de fonctionnement.....16  
    b. Linéarisation de système .....17  
    c. Compensation du système .....21  
        i. Correcteur type 3 .....22  
        ii. Correcteur PI .....25  
        iii. Comparaison des correcteurs .....26

5- Vitesse d'équilibrage .....	27
6- Equilibrage des batteries distincts .....	28
7- Les limites de alpha .....	30
a. Exigence de régulation de tension de bus .....	31
b. Limitaion de courant de sortie de batterie .....	31
c. Limitaion de puissance transims .....	31
8- Résumé de chapitre.....	32

### **Chapitre III : Simulation du système**

1- Deux batteries supportent une seule charge.....	34
a. Décharge deux batteries identiques .....	35
b. Décharge deux batteries distincts .....	37
c. Déconnexion d'une batteries .....	39
2- Deux batteries supportent avec une source d'énergie .....	40
a. Système avec source d'énergie faible .....	41
b. Système avec source d'énergie suffisent .....	43
c. Système charge décharge .....	45
3- Résumé de simulation .....	47
Conclusion .....	49

## LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX, ABREVIATION

### Liste des figures

- Figure 1.1 : structure générale des réseaux intelligents .....	2
- Figure 1.2 : schéma fonctionnelle d'un micro-réseau .....	4
- Figure 1.3 : schéma fonctionnelle d'un micro-réseau .....	5
- Figure 1.4 : batterie plomb acide .....	7
- Figure 2.1 : schéma simplifié d'une batterie .....	9
- Figure 2.2 : les variations de la tension de batterie .....	9
- Figure 2.3 : 2 batteries en parallèle .....	10
- Figure 2.4 : l'état de charge des batteries .....	11
- Figure 2.5 : la tension de batterie en fonction de son courant .....	12
- Figure 2.6 : la caractéristique V-I pour deux batteries distinctes .....	12
- Figure 2.7 : les graphes de Droop conventionnel et de Droop en fonction de SoC.....	13
- Figure 2.8 : schéma de système globale .....	14
- Figure 2.9 : hercheur réversible en courant .....	15
- Figure 2.10 : commande complémentaire .....	15
- Figure 2.11 : commande séparé .....	16
- Figure 2.12 : la réponse temporelle sons correction .....	20
- Figure 2.13 : la réponse fréquentielle sons correction .....	21
- Figure 2.14 : le schéma de correction .....	22
- Figure 2.15 : la réponse fréquentielle du correcteur .....	23
- Figure 2.16 : la réponse temporelle du système corrigé avec CT3.....	22
- Figure 2.17 : la réponse fréquentielle du système corrigé avec CT3.....	24
- Figure 2.18 : la réponse temporelle du système corrigé avec PI.....	25
- Figure 2.19 : la réponse fréquentielle du système corrigé avec PI.....	26
- Figure 2.20 : la réponse avec CT3 et avec PI .....	26
- Figure 2.21 : SoCs des batteries distincts .....	29
- Figure 2.22 : puissances des batteries avec Ce déferents .....	29
- Figure 2.23 : SoC des batteries avec R ajusté .....	30
- Figure 2.24 : puissances des batteries avec SoCs balancées .....	30
- Figure 3.1 : bloc de simulation .....	34

- Figure 3.2 : schéma de deux batteries avec une charge .....	35
- Figure 3.3 : les SoCs des batteries identiques .....	35
- Figure 3.4 : les puissances des batteries identiques .....	36
- Figure 3.5 : la tension de bus avec des batteries identiques .....	36
- Figure 3.6 : les SoCs des batteries distincts .....	37
- Figure 3.7 : les puissances des batteries distincts .....	38
- Figure 3.8 : la tension de bus avec des batteries distincts .....	38
- Figure 3.9 : les SoCs des batteries avec batterie déconnectée .....	39
- Figure 3.10 : les puissances des batteries avec batterie déconnectée .....	40
- Figure 3.11 : la tension de bus avec une batterie déconnectée .....	40
- Figure 3.12 : schéma de deux batteries avec une source .....	41
- Figure 3.13 : les SoCs avec sources insuffisant .....	42
- Figure 3.14 : les puissances avec sources insuffisant .....	42
- Figure 3.15 : la tension de bus avec sources insuffisant .....	43
- Figure 3.16 : les SoCs avec sources suffisant .....	43
- Figure 3.17 : les puissances avec sources suffisant .....	44
- Figure 3.18 : la tension de bus avec sources suffisant .....	44
- Figure 3.19 : les SoCs avec sources variable .....	45
- Figure 3.20 : les puissances avec sources variable .....	46
- Figure 3.21 : la tension de bus avec sources variable .....	46

## Liste des tableaux

- Tableaux 2.1 : modélisation du système .....	17
- Tableau 2.2 : les paramètres du système .....	20
- Tableau 3.1 : paramètres des batteries identiques .....	35
- Tableau 3.2 : paramètres des batteries distincts .....	37
- Tableau 3.3 : paramètres des batteries .....	39
- Tableau 3.4 : paramètres des batteries identiques .....	41

## Liste des abréviations

- SoC : l'état de charge
- $V_{bus}$  : la tension de bus
- $V_{co}$  : la tension de la batterie en circuit ouverte

- $V_{ref}$  : la tension de référence

## Introduction générale :

La croissance des besoins mondiaux en énergie [11] électrique exige l'amélioration et l'optimisation des réseaux de distribution de l'énergie. Ces exigences ont données naissance au concept des micro-réseaux [12]. Ce concept consiste en une combinaison entre plusieurs parties. Parmi ces parties, on trouve la gestion des ressources énergétiques [13]. Cette nouvelle conception des réseaux de distribution d'énergie offre des avantages considérables par rapport aux réseaux traditionnels. Parmi ces avantages on trouve, l'amélioration de la stabilité du système, haute efficacité énergétique, haut niveau de fiabilité et de sûreté et en fin les faibles coûts de maintenance.

La problématique fondamentale des micro-réseaux est posée quand les sources distribuées (décentralisée) sont appelés à travailler en parallèle pour alimenter une charge unique. En effet, la participation doit être équilibrée entre toutes les sources. Pour les systèmes équipés de dispositifs de stockage d'énergie (batteries), il est nécessaire que ces dispositifs absorbent ou fournissent l'énergie de manière équilibrée, selon leur état de charge (SoC) pour profiter le maximum de sa durée de vie [3], où la sortie doit être gardée constante. Une des solutions proposées dans la littérature est d'associer des convertisseurs bidirectionnelles qui peuvent contrôler le flux d'énergie entre les batteries en tenant compte de leur état de charge initiale [2] le bus DC commun. La méthode de contrôle pour commander les batteries mis en parallèle basé sur le Droop contrôle, cette méthode utilisée dans plusieurs thèmes de recherche concernant le contrôle des batteries [14], [15], [16] et [17].

Ce mémoire est divisé en trois chapitres : Le premier chapitre introduit aux micro-réseaux et les batteries ; le deuxième chapitre explique la méthode de contrôle proposée telle que l'intégration du 'Droop contrôle' avec l'état de charge (SoC) et le dernier chapitre présente les résultats des simulations sous différentes conditions.

Chapitre I :

---

## **Les micro-réseaux et les batteries**

---

---

Ce chapitre est une présentation de la notion de micro réseaux, les avantages des microgrids par rapport les réseaux classiques, ce chapitre présent aussi les batteries et le rôle de ces dernière dans les micro-réseaux

---

## 1- Les réseaux intelligents :

Les réseaux électriques intelligents sont aussi appelés Smart grids. Ce sont les réseaux électriques publics auxquels sont ajoutés des fonctionnalités issues des nouvelles technologies de l'information et de la communication. Le but est d'assurer l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité à tout instant et de fournir un approvisionnement sûr, durable et compétitif aux consommateurs.

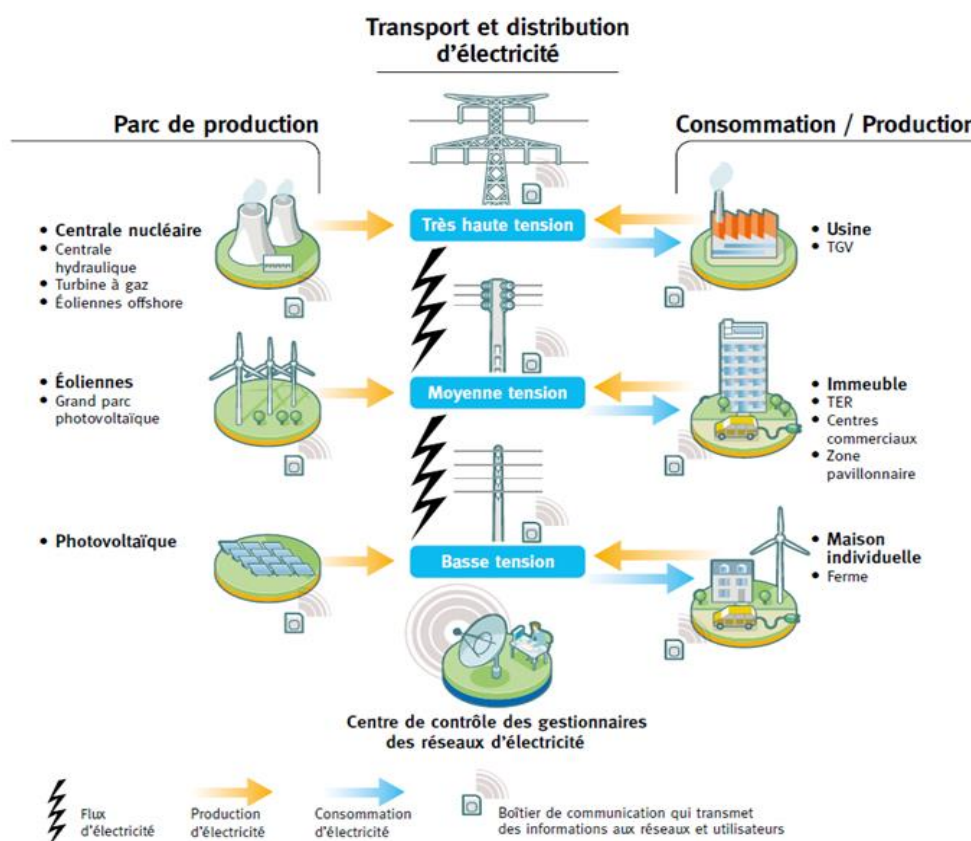


Figure 1.1 : structure générale des réseaux intelligents [6]

## 2- Les motive de création :

Selon [13] les buts de création des réseaux intelligents DC peut cité comme :

- a. Argumenter la participation des ressources d'énergie DC
- b. Réduire la dissipation d'énergie et les coûts d'installation résultant de la conversion AC / DC en intégrant la jonction entre un réseau commercial et un bus DC qui connecte les unités PV et les accumulateurs
- c. Fournir de l'électricité aux charges via des lignes de distribution régulières (lignes non exclusives en cas d'urgence) même pendant la panne des réseaux commerciaux.

## 3- Les micro-réseaux intelligents :

Appelé aussi mini Smart grids ou micro-réseaux intelligents ou microgrids, les microgrids sont des réseaux électriques de petite taille, conçus pour fournir un approvisionnement électrique fiable

et de meilleure qualité à un petit nombre de consommateurs. Ils agrègent de multiples installations de production locales et diffuses (micro-turbines, piles à combustible, petits générateurs diesel, panneaux photovoltaïques, mini-éoliennes, petite hydraulique), des installations de consommation, des installations de stockage et des outils de supervision et de gestion de la demande. Ils peuvent être raccordés directement au réseau de distribution ou fonctionner en mode isolé. La figure 1.2 explique le principe des micro-réseaux.

En Europe, les micro-réseaux sont définis par la Commission européenne dans le cadre des projets « Microgrids » et « More Microgrids », comme : des systèmes « qui comportent des systèmes de distribution de basse tension avec des sources d'énergie distribuée, telles que les micro-turbines, les piles à combustibles, les systèmes photovoltaïques, etc., des systèmes de stockage tels que les volants d'inertie, les supercondensateurs et les batteries, et des charges contrôlables, qui ont des possibilités d'être contrôlées vis-à-vis de l'opération du réseau. Les micro-réseaux sont connectés au réseau de distribution mais peuvent également fonctionner en mode îloté, en cas de défaut dans le réseau principal » [1].

#### **4- L'état de charge dans les réseaux intelligents :**

L'état de charge (SOC) de la batterie de stockage selon [13] indique toujours l'intégrale dans le temps de la différence entre l'alimentation et la demande dans le système de micro-réseau DC. La quantité et la direction du flux de puissance d'un réseau sont contrôlées en fonction du SOC. Cependant, l'alimentation électrique du micro-réseau pourrait être régulée pour stabiliser le flux d'énergie du réseau. Par conséquent, des informations sur la situation du réseau sont essentielles pour le fonctionnement du système de micro-réseau. Ce schéma nécessite une communication bidirectionnelle entre les micro-réseaux et le réseau.

#### **5- La structure des micro-réseaux :**

Un micro-réseau est généralement composé d'un ou plusieurs générateurs (installations de production d'électricité de sources renouvelables variables, mais également installations de production conventionnelles), d'installations de stockage d'énergie, de charges communes, de système de contrôle et de systèmes d'informations. L'ensemble de ces technologies doit aussi permettre au microgrid de se déconnecter du réseau principal pour s'isoler c'est-à-dire fonctionner indépendamment du réseau principal.

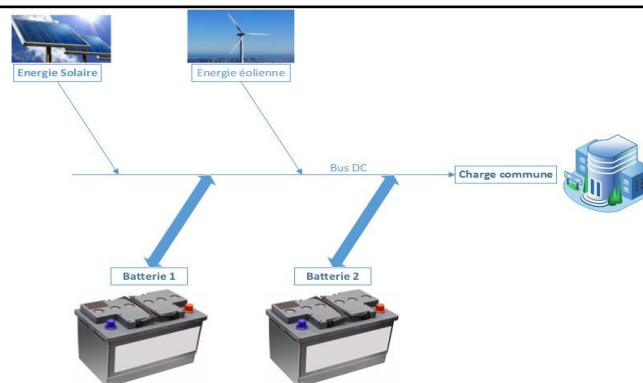


Figure 1.2 : schéma fonctionnelle d'un micro-réseau DC

## 6- Les avantages des micro-réseaux :

L'intégration de cette technologie dans le monde réel a des effets , lesquelles :

- **côté technique** : les microgrids offre une gestion optimisée de la production d'électricité d'origine renouvelable à l'échelle locale. Ils peuvent apporter un service auxiliaire au réseau public de distribution, en l'aidant à maintenir la stabilité de la tension et en l'allégeant lorsque coupure du réseau de distribution.
- **côté économique** : Les microgrids offre également des occasions de l'investissement de réseaux, la proximité entre production et consommation permettant d'optimiser l'acheminement de l'énergie. Ils permettent aussi de réduire le volume des pertes techniques.
- **côté sociétal** : un microgrid fournit des réponses à l'évolution des besoins fondamentaux d'un territoire en énergie. Il offre notamment un réseau plus sûr et plus fiable en cas d'incident. Parce qu'il s'agit d'un projet local, il facilite également la création d'initiatives et de nouveaux partenariats entre les acteurs locaux.
- **côté environnemental** : ils permettent de mieux intégrer les énergies de sources renouvelables sur les réseaux et ainsi d'éviter l'installation de centrales thermiques en zones populaire, alors les microgrids sont favorables pour déminé la pollution.

## 7- Contrôle de l'offre et de la demande par les batteries de stockage :

Le micro-réseau DC mentionné ci-dessus nécessite des batteries de stockage et des unités de contrôle comme composants clés. Pour répondre à un surplus ou à une insuffisance de puissance à court terme, les batteries d'accumulateurs doivent répéter les opérations de charge et de décharge fréquemment dans des conditions où le courant varie rapidement.

Le micro-réseau DC nécessite des batteries qui répondent rapidement aux variations de courant et assurent une grande durabilité dans un fonctionnement aussi exigeant. Grande capacité (de

plusieurs centaines de kWh à quelques MWh) devraient être disponibles pour une communauté composée de plusieurs dizaines ou centaines de ménages. De plus, une détection précise du SOC pendant les fréquents changements de fonctionnement est également indispensable pour gérer la charge d'énergie et contrôler la quantité d'énergie achetée ou vendue au réseau.

### 8- Les batteries électrochimiques :

Les batteries électrochimique sont les systèmes de stockage les plus courants utilisés pour stocké l'électricité, elle est disponible sous plusieurs formes et avec différents capacités, il existe plusieurs types des batteries électrochimique selon la matière, les types les plus connues batteries Lithium Fer Phosphate (Li-ion) et les batteries a plombe acide (lead-acide).

a- **Principe de fonctionnement :** Fondamentalement, les batteries se composent par des cellules électrochimiques, chaque cellule contient deux électrodes (anode et cathode) avec l'électrolyte. Les cellules électrochimiques sont des systèmes réversibles où elle convertit l'énergie électrochimique en énergie électrique lorsque la batterie se décharge. En outre, la cellule peut convertir l'énergie électrique en énergie électrochimique lorsqu'elle est fournie par une source externe qui a appelé le processus de charge. La figure 1.3 montre le principe de fonctionnement d'une batterie plombe acide.

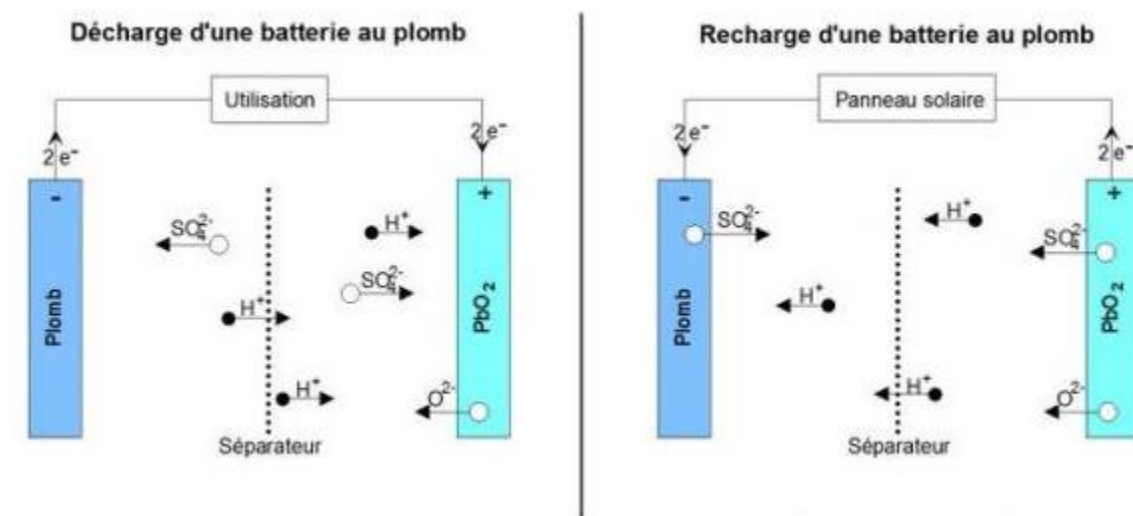


Figure 1.3 : schéma fonctionnelle d'un micro-réseau

Toutes les batteries électrochimiques ont le même principe de fonctionnement, le processus de la charge/décharge basé sur le phénomène de l'émigration des électrons entre les deux électrodes.

b- **Les inconvénients des batteries électrochimiques :** Cependant, les batteries présentent deux inconvénients majeurs qui peuvent entraver son fonctionnement :

Le premier étant son comportement électrique complexe qui rend les batteries difficiles à modéliser.

Le deuxième inconvénient est sa dégradation de la capacité avec le temps et il n'est pas qualifié après sa durée de vie.

**c- Les caractéristiques des batteries électrochimiques :** les batteries ont plusieurs caractéristiques les quelles :

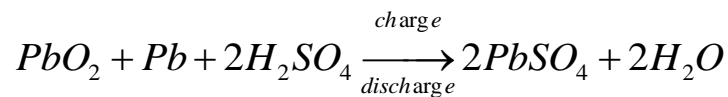
- **La tension nominale (V) :** tension moyenne d'une batterie observée sur la plus grande partie de sa courbe de décharge.
- **La tension à vide (V) :** tension mesuré aux bornes d'une batterie non connecté a une charge.
- **La tension en charge (V) :** tension mesuré aux bornes d'une batterie connectée a une charge. C'est-à-dire délivrant un courant.
- **La capacité :** La quantité d'énergie pouvant être stockée dans une batterie s'appelle la "capacité", elle est exprimée en Ampère-heure (Ah). En multipliant cette capacité par la tension de la batterie on obtient une quantité d'énergie en Watt-heure (Wh). Exemple : Une batterie 12V / 100Ah à une capacité de  $100\text{Ah} \times 12\text{V} = 1200\text{Wh}$  soit 1.2 kWh.
- **Energie massique ou densité énergétique (Wh/Kg):** le rapport entre la capacité d'une batterie à délivrer une certaine puissance pendant certain temps et son poids
- **L'état de charge (SoC) :** 'stat of charge en anglais', exprimé en %, est le rapport entre la capacité résiduelle et la capacité nominale de l'accumulateur. C'est à dire l'énergie restant dans la batterie
- **La profondeur de décharge (DoD):** 'Depth of discharge en anglais', exprimé en %, est le rapport entre la capacité déjà déchargée et la capacité nominale de l'accumulateur. C'est à dire l'énergie consommée dans la batterie.
- **L'autodécharge :** est une réaction électrochimique provoquant une réduction progressive du niveau de charge d'un accumulateur électrique, en l'absence d'un appareil consommateur de courant, lorsqu'il n'est pas sollicité pendant une période donnée.

**d- Classifications des batteries électrochimiques :** on distincts deux types :

- **Les piles électriques :** Eléments non rechargeables ( $D \sim 180\text{Wh/kg}$ ).
- **Les accumulateurs :** Eléments rechargeables, dont les plus utilisés en modélisme sont (Classement par ordre de densité énergétique croissante) :
  - Les Accus au plomb : Pb ( $D \sim 40\text{Wh/kg}$ )
  - Technologie Nickel :
    - NiCd ( $D \sim 55\text{Wh/kg}$ )

- NiMh (D=~ 80Wh/kg)
- Technologie Lithium:
  - Li-Ion (D=120~150Wh/kg)
  - Li-Po (D=150~170Wh/h)

e- **Les batteries plombe acide (lead acide) :** En raison de son faible coût, les batteries rechargeables au plomb sont les plus utilisées pour de nombreuses applications. La cathode de ces batteries est en  $PbO_2$ , l'anode en  $Pb$  et l'électrolyte est composé d'acide sulfurique. L'avantage de cette conception est que l'électrolyte participe aux réactions des deux électrodes et que les deux électrodes se transforment en sulfate de plomb lors de la décharge. Le modèle chimique est représenté par l'équation suivante :



La figure 1.4 montre une présentation des éléments de la batterie à plombe telle que les plaques positives sont  $PbO_2$  et les plaques négatives sont  $Pb$  et l'électrolyte est  $2H_2SO_4$ , les réactions chimiques entre les plaques et l'électrolyte et l'immigration des électrons entre les bornes peuvent stocker ou libérer l'énergie en forme d'électricité.

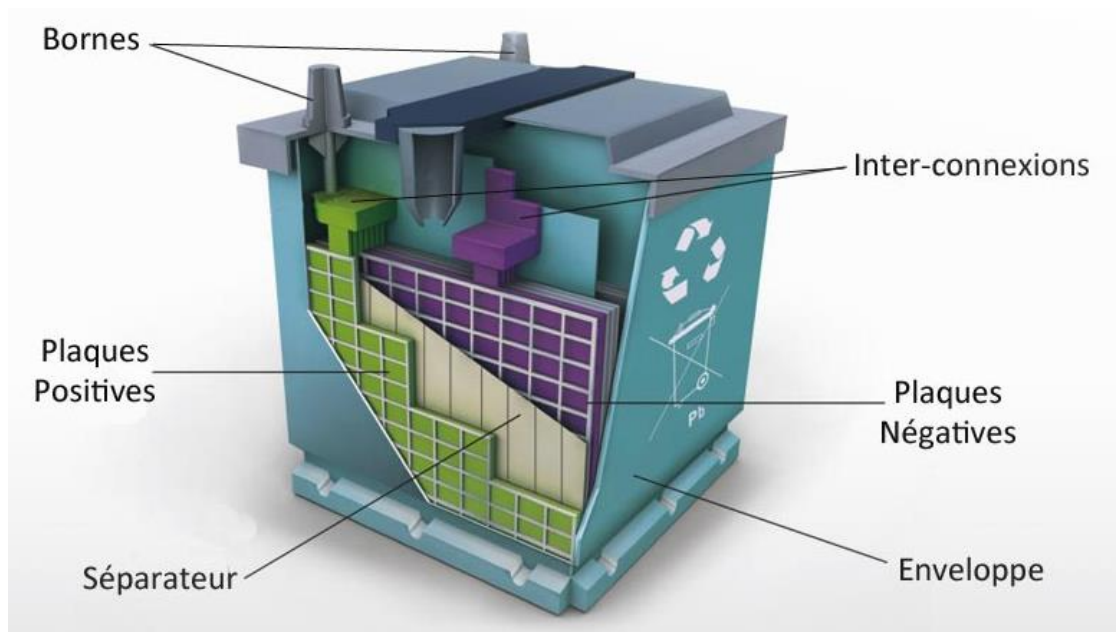


Figure 1.4 : batterie plomb acide

Un élément Pb a une tension nominale de 2,1V environ. Une batterie 12,6V est donc constituée de 6 éléments.

**Les avantages :**

- Peu cher, solide, capable de fournir des courants élevés
- Faible auto décharge (1%/mois)

**Inconvénients**

- Risque de fuites d'acide sulfurique si la batterie est non étanche.
- Densité énergétique faible.
- Risque de cristallisation du sulfate de Pb si laissée trop longtemps déchargée, et donc perte de capacité irréversible.

**Recharge :**

- Que ce soit pour des batteries Pb à électrolyte liquide ou gélifié (étanche), il est conseillé de les recharger à tension constante de 13,8V MAX (2,3V/élément) avec un courant de C/10 à C/3 (C/2 maximum), et ce pendant maximum 20 heures.
- Par contre si vous rechargez à 13,6V (2,25V/élément), vous pouvez laisser votre chargeur connecté pendant quelques jours sans problème. (Floating mode).
- En charge de maintien à C/1000 environ, votre chargeur peut rester connecté indéfiniment si vous ne dépassez pas 13,2V (2,2V/élément). Cela ne charge pas, mais compense juste l'auto décharge.

**Décharge:** Ne pas descendre sous 11,7V sous de faibles courants de décharge et recharger aussitôt. Sinon risque de dégradations internes. Sous de grands courants (5C....7C) ne pas descendre sous 10V au MIN.

**Stockage :** Toujours maintenir la batterie chargée. Il est à noter que ce phénomène de cristallisation sur les électrodes se produit surtout pour une batterie déchargée, mais aussi, dans des proportions moindres, pour une batterie chargée qui ne travaille pas. Le mieux est donc de toujours faire charger la batterie pour garder le plus longtemps possible (5 ans ou même plus).

**Duré de vie :** Environ 500 cycles avec décharges à 50%, à 1000 cycles à 30%. En général au bout de 5 ans la capacité n'est plus que de 60% et la batterie est considérée comme usée.

Chapitre II :

---

## **Modélisation et commande du système**

---

---

Ce chapitre présente la méthode de contrôle des batteries avec la charge commune, on utilise la méthode du 'Droop Contrôle', les lois le modèle et la synthèse de commande sont présentés dans ce chapitre.

---

Les systèmes à batterie sont des sources de tension variables, son comportement est lié par plusieurs facteurs (l'état de charge, la température, le type ..... ) alors il est très complexe et difficile de modéliser le comportement, la batterie étudiée considérée comme une source de tension variable en fonction de son état de charge, l'effet des autres facteurs est négligeable.

**1- Modèle d'une batterie :**

La tension de sortie ( $V_{bat}$ ) varie en fonction de l'état de charge de la batterie (SoC) alors  $V_{bat} = f(\text{SoC})$  la figure suivante représente un schéma simplifié de la batterie :

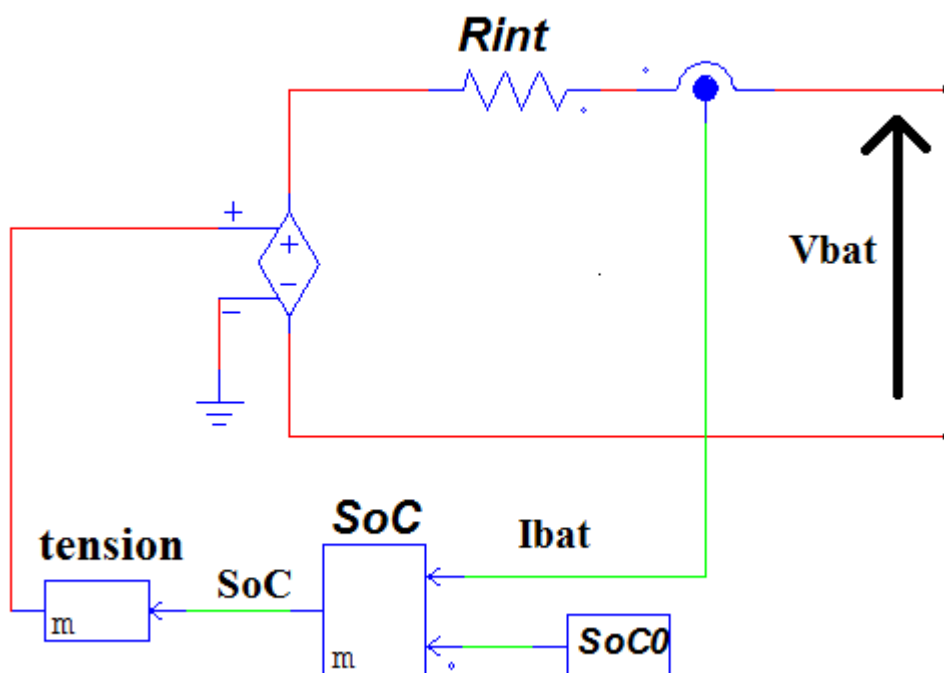


Figure 2.1 : schéma simplifié d'une batterie

Le modèle de la batterie étudiée dans ce mémoire est un modèle empirique les variations de la tension  $V_{bat}$  est illustrées dans la figure suivante :

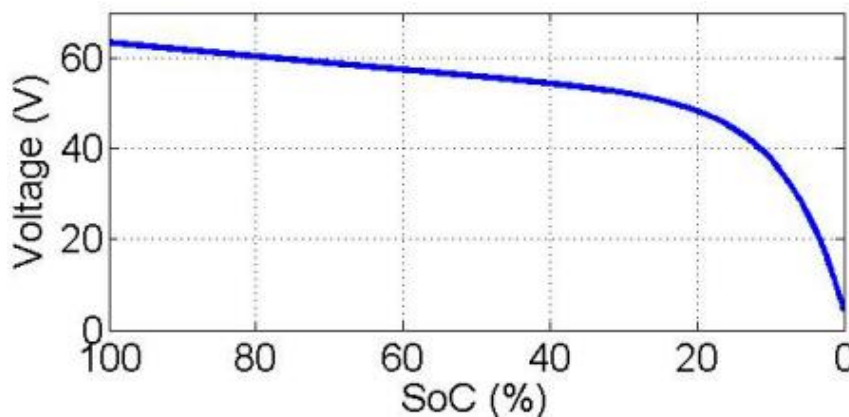


Figure 2.2 : les variations de la tension de batterie

La tension  $V_{bat}$  peut exprimer par la fonction [2] :

$$V_{bat} = 49.76e^{(0.2454SoC)} - 45.17e^{(-12.35SoC)} \quad (2.1)$$

Alors il est nécessaire d'estimer la valeur de SoC pour connaître le comportement de la batterie.

Le SoC est défini par la relation [2] :

$$SoC(t) = SoC0 - \frac{1}{Ce} \int (I_{bat}) dt \quad (2.2)$$

## 2- Deux batteries mise en parallèle :

On suppose le système à deux batteries identiques illustré dans la figure suivante :

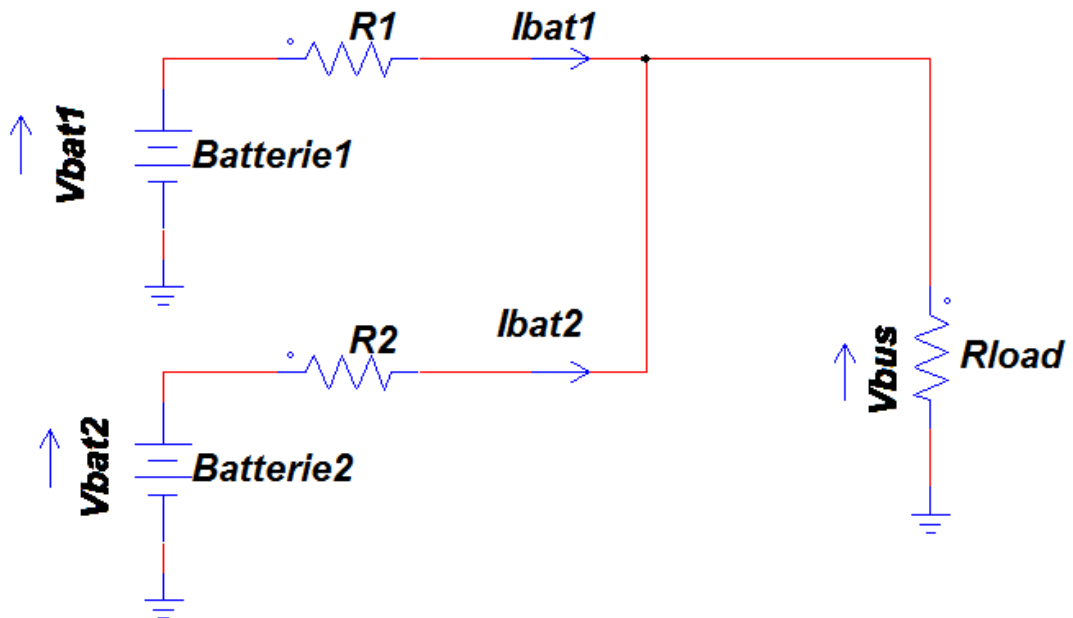
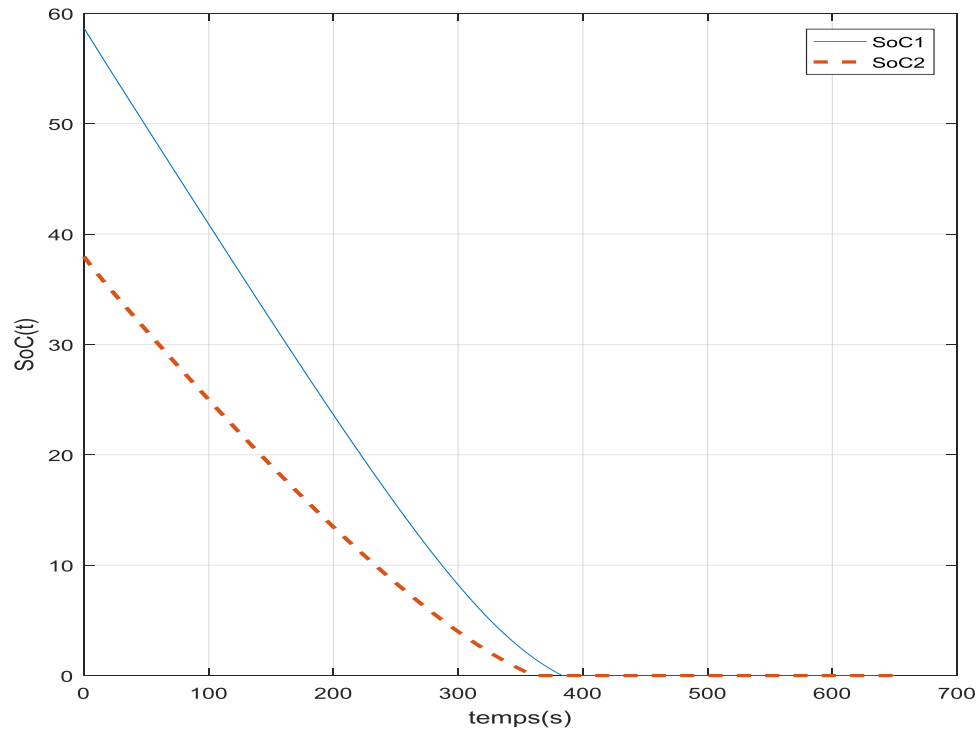


Figure 2.3 : 2 batteries en parallèle

Avec  $V_{bat1}$ ,  $V_{bat2}$  sont les tensions des batteries 1 et 2 ;  $I_{bat1}$ ,  $I_{bat2}$  sont les courants délivrés par les batteries ;  $R1$  et  $R2$  sont les résistances des fils ;  $R_{load}$  est la charge commune et  $V_{bus}$  la tension de bus.



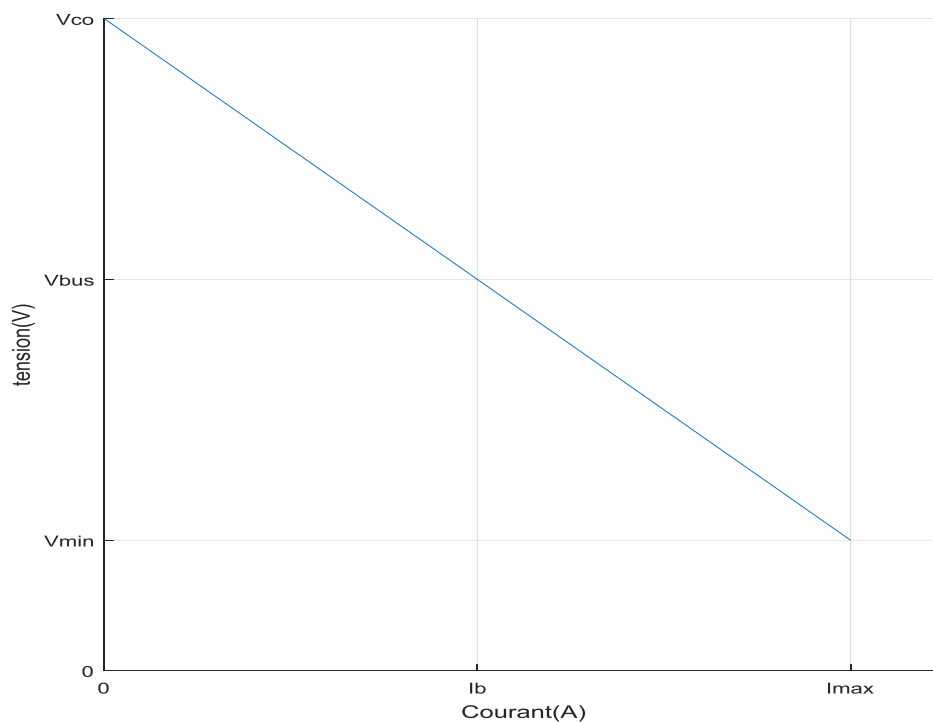
**Figure 2.4 : l'état de charge des batteries**

La figure 2.4 montre les variations des SoC des batteries, un problème de partage dès que la batterie qui a moins SoC étend toute son énergie dans le même temps, l'autre batterie fournit encore de l'énergie. La charge épuise la batterie 2 pour participer en vide, cela déminer la durée de vie de cette batterie. Pour éviter ce problème, l'équilibrage des SoC est proposé.

### 3- Droop contrôle :

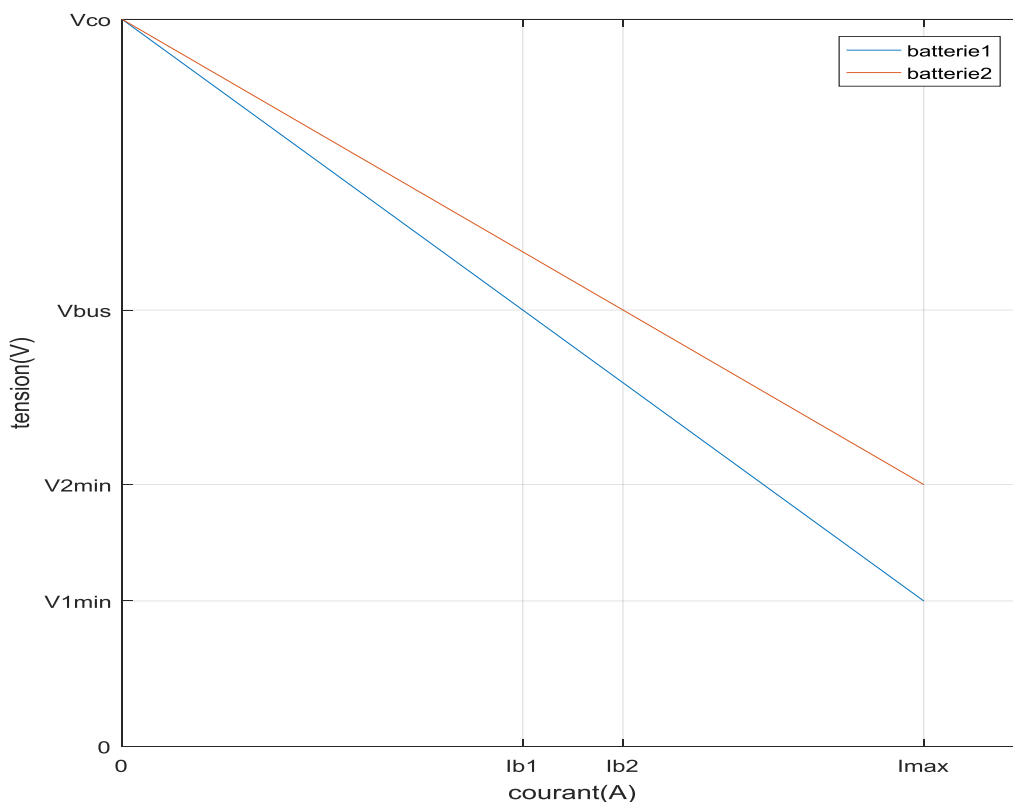
Pour les batteries lise en parallèles ces tensions de sorties doit être égales à la valeur de tension de bus. Comme toutes les sources de tension en peut tracer la caractéristique tension-courant

$$V = V_{co} - R.I \quad (2.3)$$



**Figure 2.5 : la tension de batterie en fonction de son courant**

La figure 2.5 montre la caractéristique  $V=f(I)$ ,  $V_{co}$  c'est la tension en circuit ouverte et  $R$  la résistance interne ; alors pour une tension  $V=V_{bus}$  la source doit délivrer un courant  $I_b$ . 'Droop Contrôle' basé sur cette caractéristique dès que plusieurs sources (batteries) mise en parallèle, supposent deux batteries distinctes :



**Figure 2.6 : la caractéristique V-I pour deux batteries distinctes**

Droop contrôle exige les batteries à fournir les courants  $I_{b1}$  et  $I_{b2}$  pour que  $V_{b1}=V_{b2}=V_{bus}$ , mais le problème de l'équilibrage des SoC n'a pas encore résolu. La solution proposée est d'intégrer l'état de charge avec le 'Droop contrôle', la formulation de la caractéristique V-I devient :

$$V = V_{co} - R.I + SoC . \alpha \tag{2.4}$$

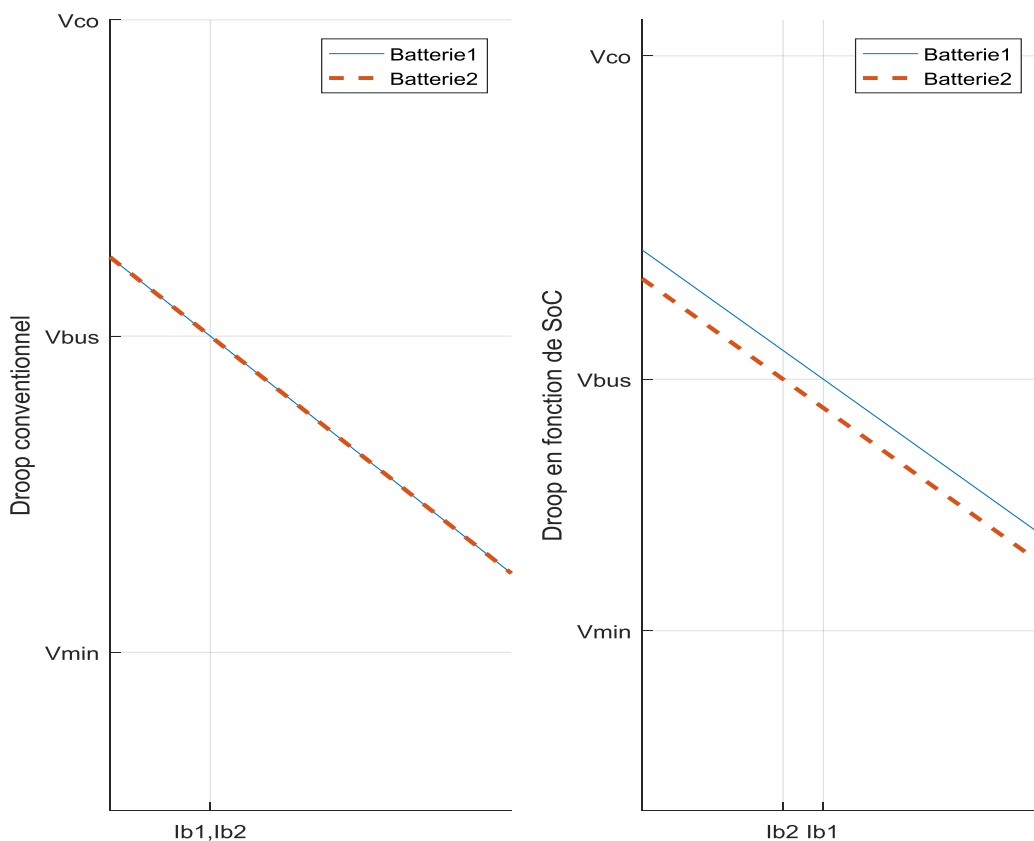
Avec  $\alpha$  c'est le facteur de Droop ; alors la tension de référence devient :  $V_{ref} = V_{co} + SoC . \alpha$  (2.5)

(2.4) peut être écrit sous la forme :

$$V = V_{ref} - R.I \tag{2.6}$$

$$V_{ref} = V_{co} + \alpha . SoC \tag{2.7}$$

En supposant deux batteries identiques avec SoC différents ( $SoC1 > SoC2$ ), la figure 2.7 montre la différence entre le Droop conventionnel et le Droop modifié en fonction de SoC.



**Figure 2.7 : les graphes de Droop conventionnel et de Droop en fonction de SoC**

La batterie 1 a SoC plus élevé par rapport la batterie 2 alors  $I_{b1}$  devient plus grand que  $I_{b2}$  pour la tension  $V_{bus}$ , ce signifie que la batterie 1 va partager une puissance beaucoup plus que la deuxième batterie, par conséquent elle déchargera plus rapide que l'autre et le SoC1 converge vers le SoC2. La vitesse de l'équilibrage est liée par le facteur alpha ' $\alpha$ ', la vitesse de l'équilibrage et les limites de choix de alpha est discuté plus tard.

Pour contrôler les courants de sorties des batteries un convertisseur DC/DC doit associer avec chaque batterie, le convertisseur utilisé est un hacheur réversible en courant (bidirectionnel) pour commander les promesses de charge/décharge comme montre la figure suivante :

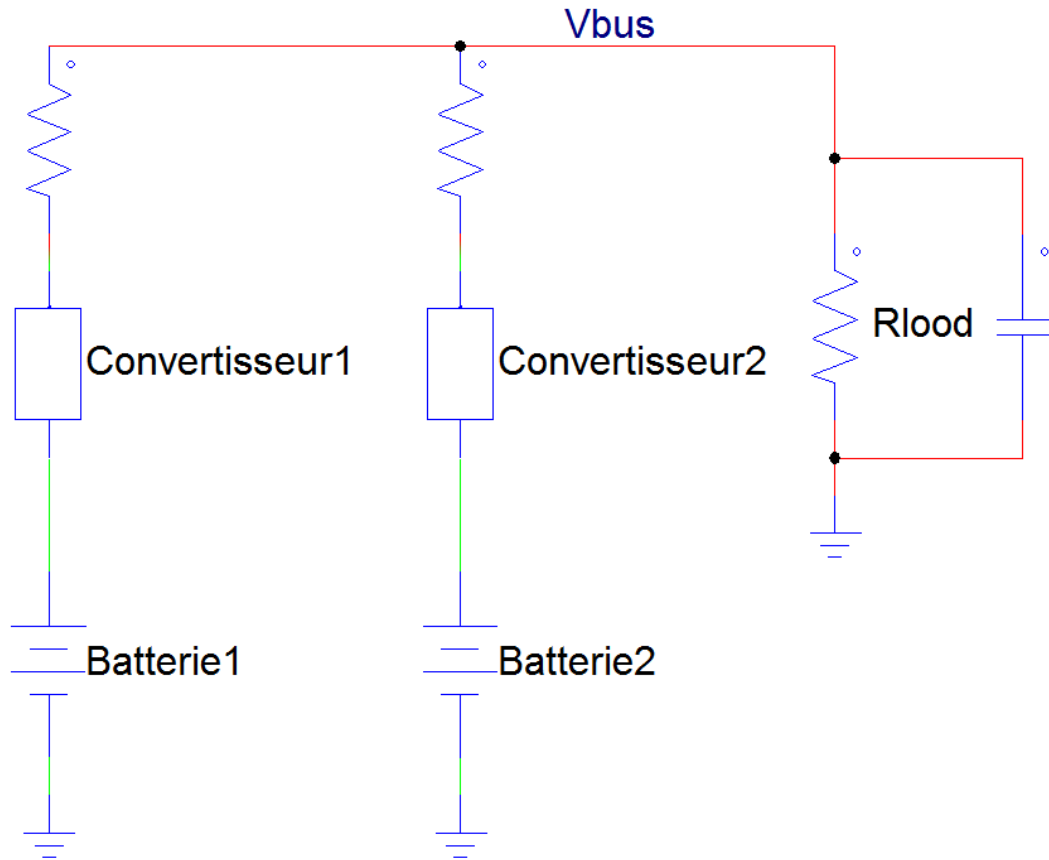


Figure 2.8 : schéma de système globale

#### 4- Hacheur réversible en courant :

Cette type des convertisseurs caractérisé par ça pouvoir d'inverser le flux de courant et de fonctionner en 2 modes soit abaisseur ou élévateur. La tension du bus et la tension de la batterie sont toujours positives. Lorsque la batterie est en charge,  $i_L$  est positive, T1 et T2 conduit alternativement le courant. Lorsque la batterie est déchargée,  $i_L$  est négatif, T1 et T2 alternativement conduire. Alors le convertisseur fonctionne en deux quadrants (tension positive ; courants négatif ou positif). La figure 2.9 présent la structure du hacheur :

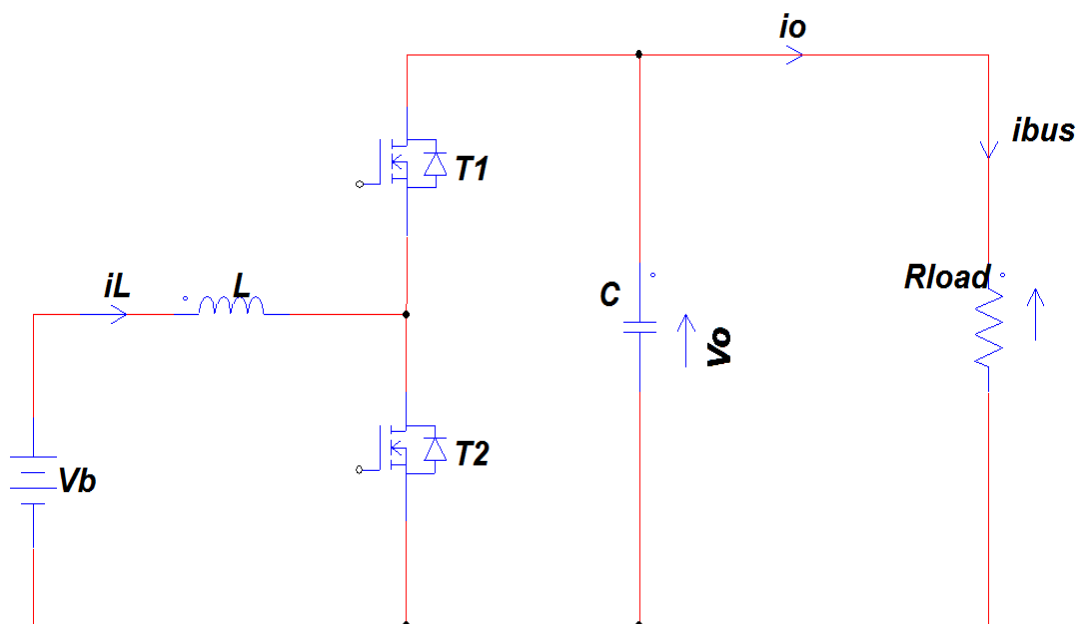


Figure 2.9 : hacheur réversible en courant

Le fonctionnement du hacheur dépend par le flux du courant, selon le transistor actif le courant circule de la batterie vers le bus commun (boost) ou l'inverse (buck). Deux méthodes de commande sont possibles pour contrôler le convertisseur, la méthode traditionnelle de séparation des contrôleurs (buck et boost contrôleurs), le contrôle complémentaire du signal de commande permet de contrôler les deux transistors simultanément :

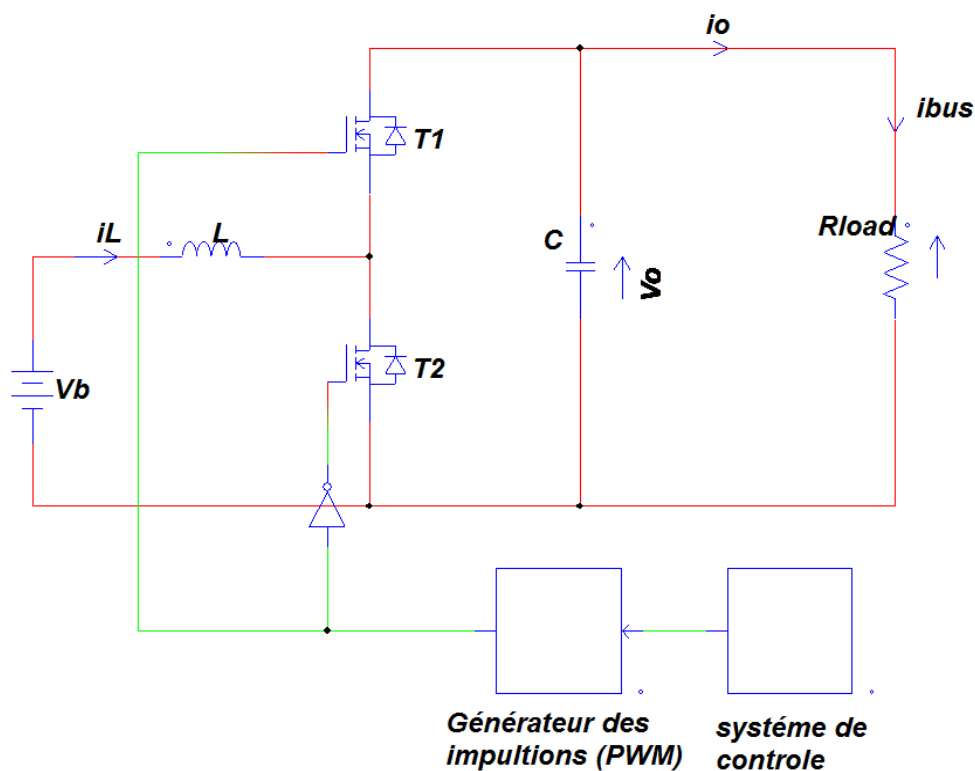


Figure 2.10 : commande complémentaire

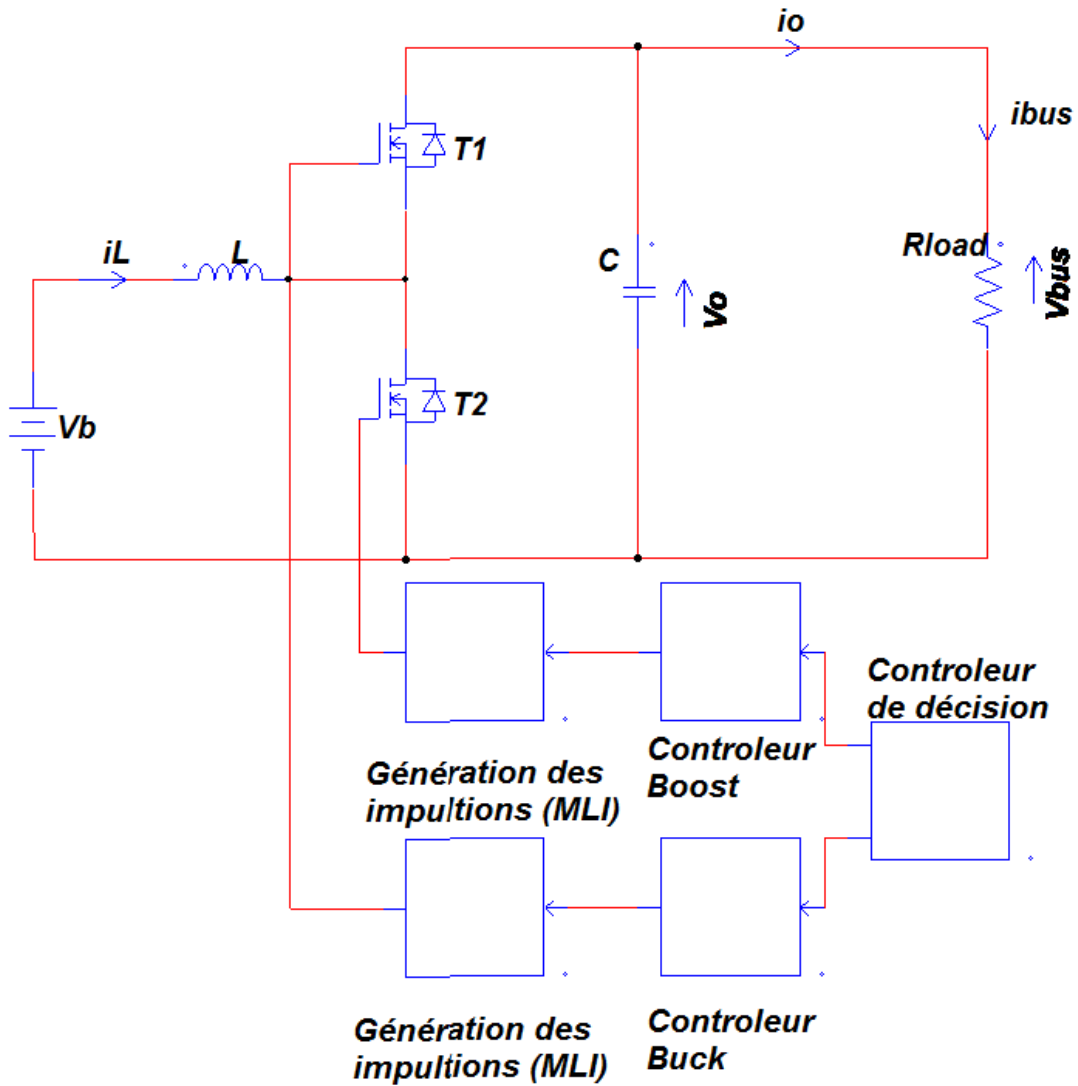


Figure 2.11 : commande séparé

Le type de commande utilisé est la commande complémentaire, la construction de modèle globale est établie sur la base de cette commande.

**a. Analyse de fonctionnement :**

Le fonctionnement du hacheur dépend par le flux du courant, selon le transistor actif le courant circule de la batterie vers le bus commun (boost) ou l'inverse (buck).

Le modèle global peut décrit comme  $D(mode1) + (1-D)(mode2)$

<b>T1=1 T2=0</b>	<b>T1=0 T2=1</b>
$L \frac{diL}{dt} = Vb - V_o$ $C \frac{dV_o}{dt} = iL - \frac{V_o - V_{bus}}{R_{load}}$ $\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} iL \\ V_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} iL \\ V_o \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix} Vb$	$L \frac{diL}{dt} = Vb$ $C \frac{dV_o}{dt} = -\frac{V_o - V_{bus}}{R_{load}}$ $\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} iL \\ V_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_{load}C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} iL \\ V_o \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix} Vb$
<b>Modèle globale</b>	
$L \frac{diL}{dt} = Vba - (D-1)V_o$ $C \frac{dV_o}{dt} = (D-1)iL - i_o$ $i_o = \frac{V_o - V_{bus}}{R_{load}}$ $\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} iL \\ V_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1-D}{L} \\ \frac{1-D}{C} & -\frac{1}{R_{load}C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} iL \\ V_o \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix} Vb$	

**Tableaux 2.1 : modélisation du système**

**b. Linéarisation de système :**

On utilise la méthode de petite perturbation, avec  $V_{bus} = 0$  et  $R_{load} = R$  supposons que :

$$\begin{cases} V_o = V_o + \hat{v}_o \\ Vb = Vb + \hat{v}_b \\ iL = iL + \hat{i}_l \\ D = D + \hat{d} \end{cases} \quad (2.8)$$

Le système peut décrit comme :

$$\begin{cases} L \frac{d(iL + \hat{i}_l)}{dt} = (Vb + \hat{v}_b) - (1 - D - \hat{d})(V_o + \hat{v}_o) \\ C \frac{d(V_o + \hat{v}_o)}{dt} = (1 - D - \hat{d})(iL + \hat{i}_l) - \frac{(V_o + \hat{v}_o)}{R} \end{cases} \quad (2.9)$$

La simplification de l'expression de système avec la suppression de la partie DC et les perturbations de deuxième ordre :

$$\begin{cases} L \frac{d\hat{i}L}{dt} = \hat{v}b - \hat{v}o + D\hat{v}o + \hat{d}V_o \\ C \frac{d\hat{v}o}{dt} = \hat{i}L - D\hat{i}L - \hat{d}iL - \frac{\hat{v}o}{R} \end{cases} \quad (2.10)$$

Les éléments DC sont :

$$\begin{cases} L \frac{diL}{dt} = Vb + V_o - DV_o = 0 \\ C \frac{dV_o}{dt} = iL - DiL - \frac{V_o}{R} = 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Alors au point d'équilibre :

$$\begin{cases} V_o = \frac{1}{1-D} Vb \\ iL = \frac{1}{1-D} \frac{V_o}{R_{load}} = \frac{Vb}{R_{load}(1-D)^2} \end{cases} \quad (2.12)$$

Les équations (2.8) peut traduisent en l'espace d'état suivent :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \hat{i}L \\ \hat{v}o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1-D}{L} \\ \frac{1-D}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{i}L \\ \hat{v}o \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix} \hat{v}b + \begin{pmatrix} \frac{V_o}{L} \\ -\frac{iL}{C} \end{pmatrix} \hat{d} = A\hat{x} + B\hat{u} + F\hat{d} \quad (2.13)$$

La transforme de Laplace avec  $\hat{u}=0$

$$\hat{x}(sI - A) = F\hat{d} \quad (2.14)$$

$$\frac{\hat{x}}{\hat{d}} = (sI - A)^{-1} F \quad (2.15)$$

$$\frac{\begin{pmatrix} \hat{i}L \\ \hat{v}o \end{pmatrix}}{\hat{d}} = \begin{pmatrix} s & \frac{1-D}{L} \\ -\frac{1-D}{C} & s + \frac{1}{RC} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \frac{V_o}{L} \\ -\frac{iL}{C} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s + \frac{1}{RC} & -\frac{1-D}{L} \\ \frac{1-D}{C} & s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{V_o}{L} \\ -\frac{iL}{C} \end{pmatrix} = \frac{\begin{pmatrix} \frac{V_o}{L} (s + \frac{1}{RC}) + \frac{iL(1-D)}{C} \\ \frac{V_o(1-D)}{L} - \frac{iL}{C} \end{pmatrix}}{s^2 + \frac{s}{CR} + \frac{(1-D)^2}{LC}} \quad (2.16)$$

$$\begin{cases} \frac{\widehat{i_l}}{\widehat{d}} = \frac{\frac{V_o}{L}(s + \frac{1}{RloadC}) - iL \frac{1-D}{CL}}{s^2 + \frac{s}{CRload} + \frac{(1-D)^2}{LC}} \\ \frac{\widehat{v_o}}{\widehat{d}} = \frac{\frac{V_o(1-D)}{L} - \frac{iLs}{C}}{s^2 + \frac{s}{CRload} + \frac{(1-D)^2}{LC}} \end{cases} \quad (2.17)$$

$$\begin{cases} \frac{\widehat{i_l}}{\widehat{d}} = \frac{\frac{Vb}{L(1-D)}(s + \frac{1}{RC}) - (\frac{Vb}{LCR(1-D)})}{s^2 + \frac{s}{CR} + \frac{(1-D)^2}{LC}} \\ \frac{\widehat{v_o}}{\widehat{d}} = \frac{\frac{Vb}{LC} - (\frac{Vb}{RC(1-D)^2})s}{s^2 + \frac{s}{CR} + \frac{(1-D)^2}{LC}} \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\frac{\widehat{v_o}}{\widehat{d}} = \frac{\frac{Vbat}{LC} - (\frac{Vbat}{RC(1-D)^2})s}{s^2 + \frac{s}{CR} + \frac{(1-D)^2}{LC}} = \frac{(\frac{Vbat}{LC})(1 - s(\frac{L}{R(1-D)^2}))}{(s^2 + s\frac{1}{CR} + \frac{(1-D)^2}{LC})} \quad (2.19)$$

On pose :  $D' = 1 - D$ ,  $G_{v0} = \frac{Vbat}{D'}$ ,  $W_z = \frac{RD'^2}{L}$ ,  $W_0 = \frac{D'^2}{\sqrt{LC}}$ ,  $Q = D'R\sqrt{\frac{C}{L}}$

$$G(s) = \frac{\widehat{v_o}}{\widehat{d}} = G_{v0} \frac{1 - \frac{s}{W_z}}{(\frac{s}{W_0})^2 + \frac{s}{QW_0} + 1} \quad (2.20)$$

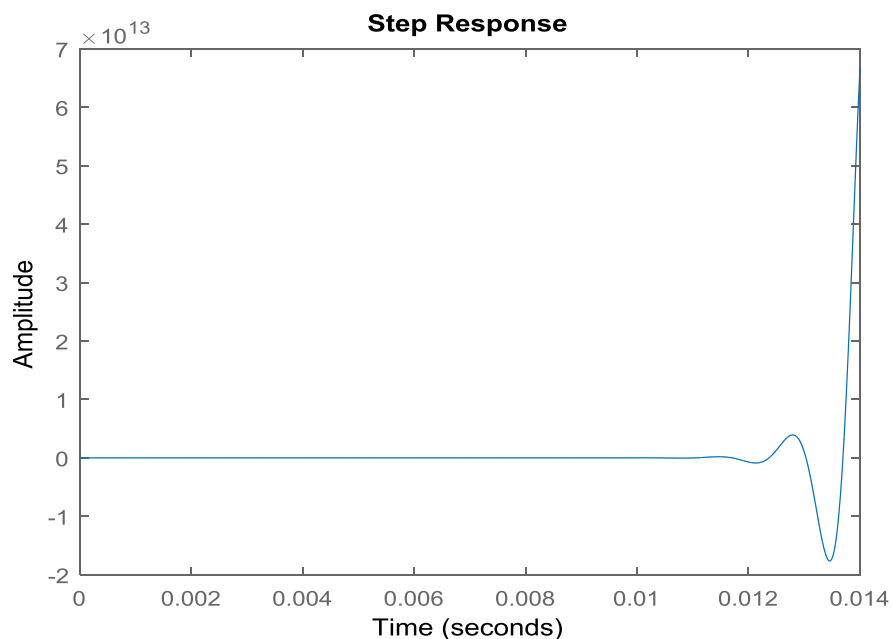
$$G(jw) = \frac{\widehat{v_o}}{\widehat{d}} = G_{v0} \frac{1 - j \frac{w}{W_z}}{-\left(\frac{w}{W_0}\right)^2 + j \frac{w}{QW_0} + 1} \quad (2.21)$$

On prend les paramètres dans le tableau suivant :

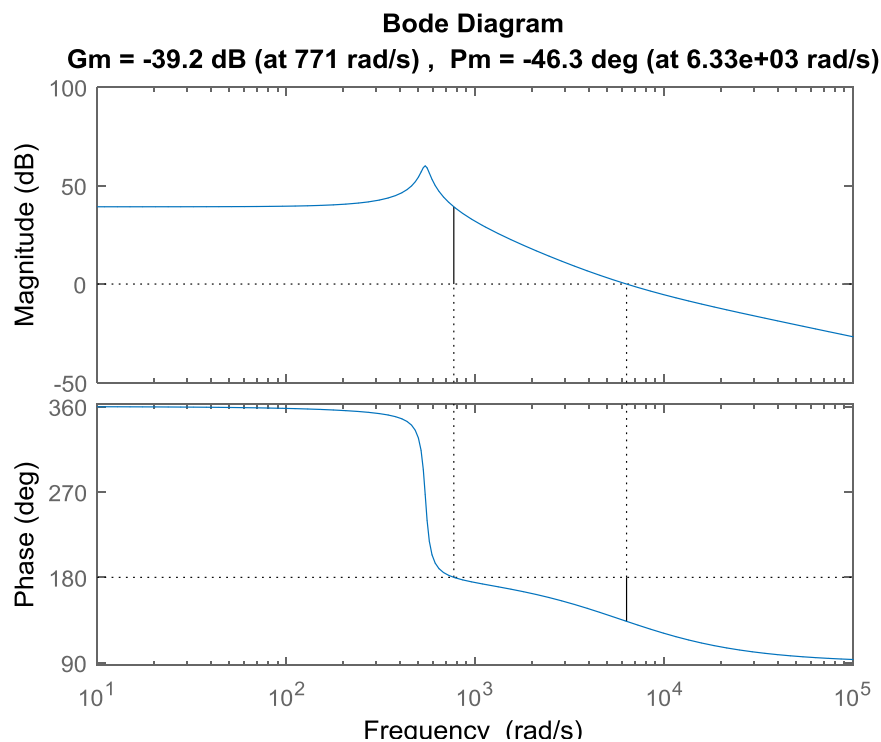
L'élément	Le symbole	La valeur	L'unité
La capacité	C	1	mH
L'inductance	L	1000	U F
La résistance	R	20	$\Omega$
La tension de batterie	Vbat	50	V
La tension de sortie	Vo	110	V

**Tableau 2.2 : les paramètres du système**

La réponse temporelle en boucle ouverte illustré dans la figure 2.12 montre que le système est instable, l'analyse de la réponse fréquentielle montré dans la figure 2.13 nous donne une mauvaise marge de phase, et marge de gain moins que la marge désiré. Pour cela la correction est essentielle pour garantir la stabilité et améliorer la performance.



**Figure 2.12 : la réponse temporelle sans correction**



**Figure 2.13 : la réponse fréquentielle sans correction**

**c. Compensation de système :**

L'intérêt de la correction est d'augmenter la marge de phase vers ou plus que  $60^\circ$  avec fréquence de coupure  $W_c$  pré-donné. Pour atteindre une performance acceptable (système rapide, stable et précis), deux correcteurs proposés : un correcteur Type 3 est associé comme la figure 3.14 montre. C'est un correcteur qui augmente la marge de phase de système vers la marge désiré. Il aussi exige au système une fréquence de coupure  $w_0$  sélectionné par le concepteur. Et un correcteur proportionnel intégrateur PI

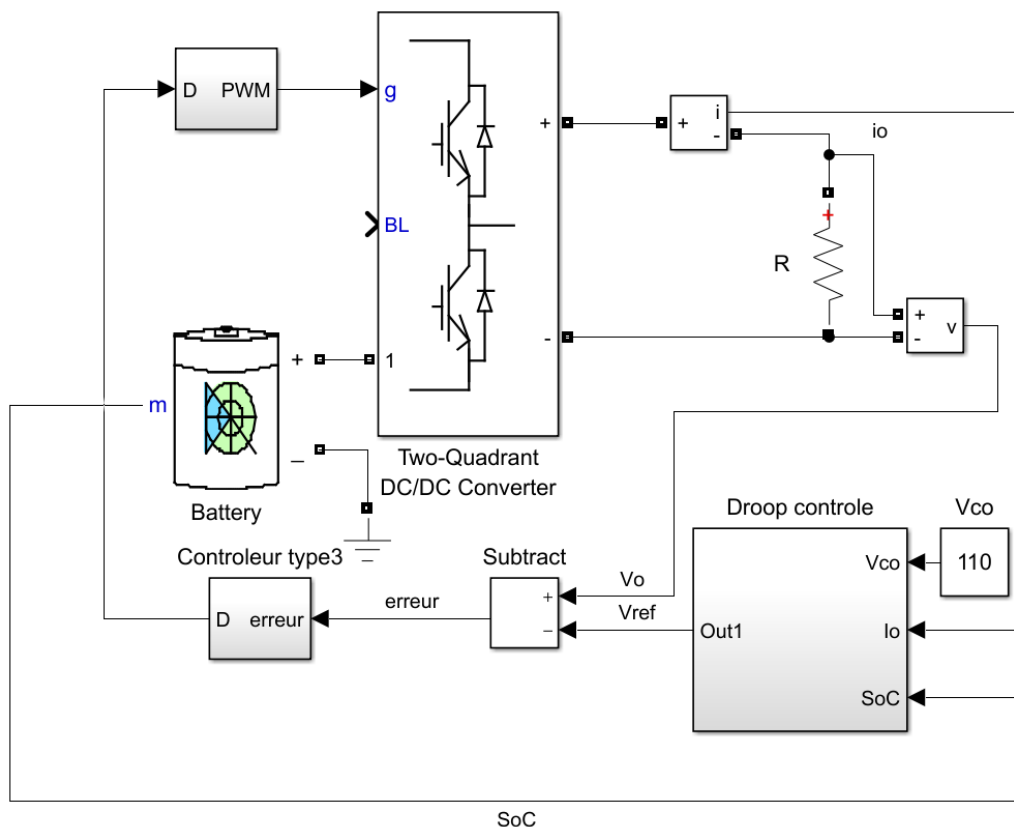


Figure 2.14 : le schéma de correction

**1-1 Correcteur Type 3 :**

La fonction de transfert de correcteur est de la forme  $G_C(s) = \frac{B(1 + s / w_{zc})^2}{s(1 + s / w_{pc})^2}$  ; le correcteur

contient un intégrateur  $\frac{B}{s}$  qui élimine l'erreur et un passe bande entre les pôles et les zéros

$\frac{(1 + s / w_{zc})^2}{(1 + s / w_{pc})^2}$  qui élevé la marge de phase dans la fréquence de coupure désiré. La figure (2.15)

montre la trace de bode de ce correcteur :

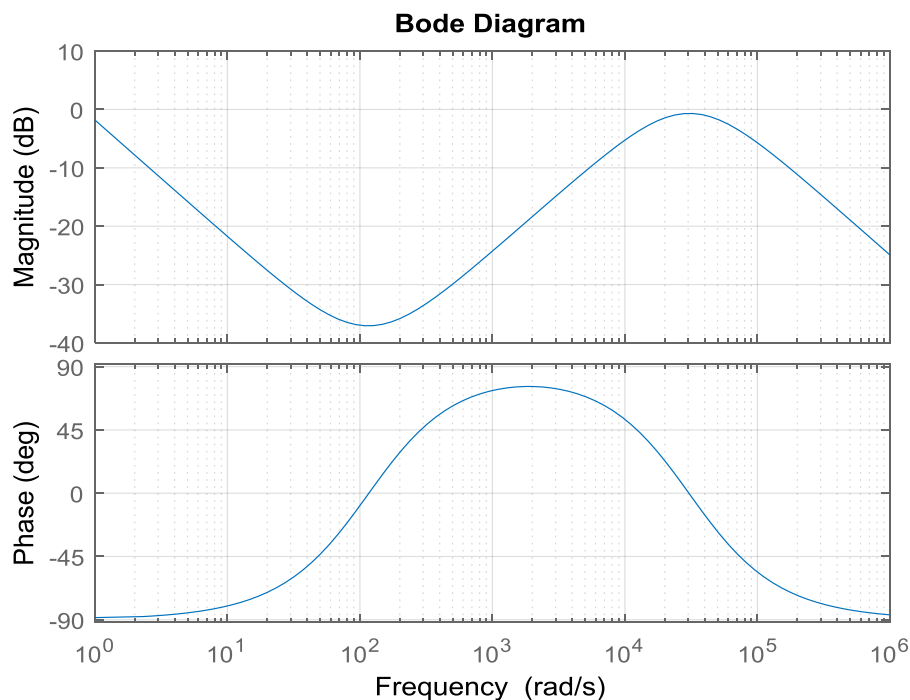


Figure 2.15 : la réponse fréquentielle du correcteur

**Conception du correcteur type 3 [10] :**

- 1- Le choix de la fréquence de coupure  $f_c$  et la marge de phase : la fréquence de coupure doit être inférieure à la fréquence de commutation dix fois, on pose  $f_c=1\text{KHz}$  ; pour un système stable la marge de phase doit être égale ou supérieur à  $60^\circ$ .
- 2- L'amplitude et la phase à  $f=f_c$  :

$$\|G(j\omega_c)\| = \left\| Gv_0 \frac{1 - j \frac{\omega_c}{W_z}}{-\left(\frac{\omega_c}{W_0}\right)^2 + j \frac{\omega_c}{QW_0} + 1} \right\| = Gv_0 \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_c}{W_z}\right)^2}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega_c}{W_0}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{\omega_c}{QW_0}\right)^2}}$$

$$PM_{fc} = -180 + \tan^{-1}\left(\frac{-\omega_c}{W_z}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\frac{\omega_c}{QW_0}}{1 - \left(\frac{\omega_c}{W_0}\right)^2}\right)$$

3- La phase boost :  $\phi_{Boost} = PM_{désiré} - |G(j\omega_c)| - 90$

4- Les paramètres du correcteur :

$$k = \left(\tan^{-1}\left(\frac{\phi_{Boost}}{4}\right) + 45\right)^2$$

$$\omega_{zc} = \frac{2\pi f_c}{\sqrt{K}}$$

$$\omega_{pc} = 2\pi f_c \sqrt{K}$$

$$B = 2\pi f_c k \|G(j\omega_c)\|$$

Après le calcul numérique :  $G_c(s) = \frac{56702(1+s/115.9594)^2}{s(1+s/30641)^2}$

La réponse temporelle illustrée dans la figure (2.16) est stabilisée avec erreur statique nulle et temps de réponse de 0.4s, la réponse fréquentielle (2.17) montre les marges de stabilité (marge de phase 60° et marge de gain de 15 dB)

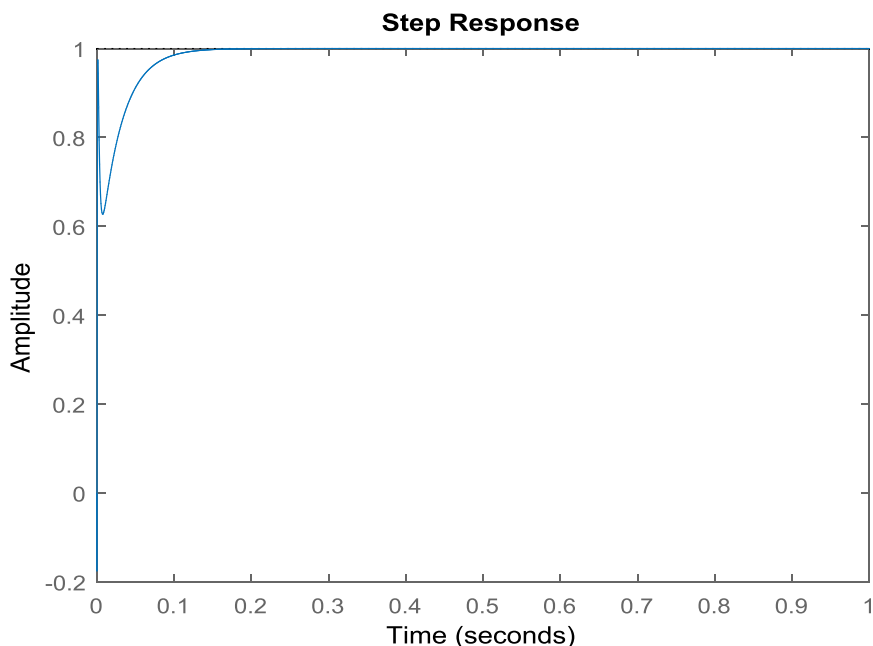


Figure 2.16 : la réponse temporelle du système corrigé avec CT3

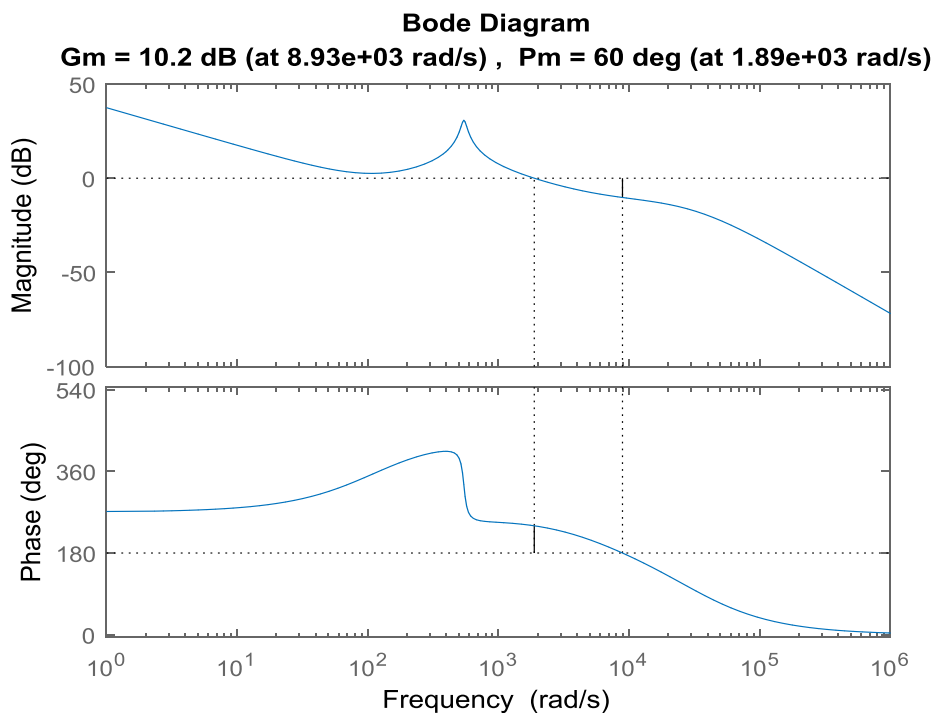


Figure 2.17 : la réponse fréquentielle du système corrigé avec CT3

Le fonctionnement des convertisseurs est garanti par le correcteur avec une très bonne performance. La gestion de puissances entre la charge et les batteries est manipulé par le ‘Droop control’. Après de garantie ces points critiques la vitesse d’équilibrage va discuter dans la partie suivent.

**1-2 Correcteur PI**

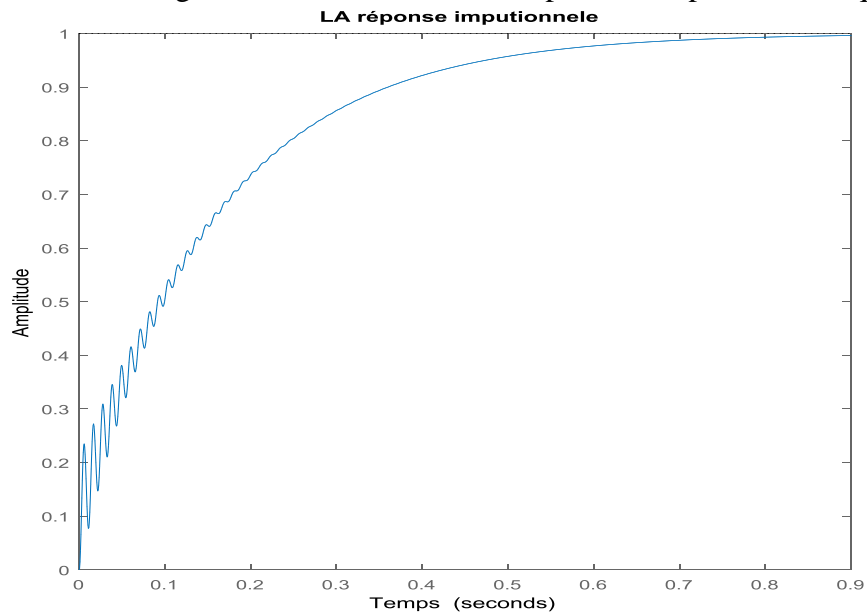
Correcteur proportionnel intégrateur avec

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} = \frac{K_p(1 + \omega_C)}{s}$$

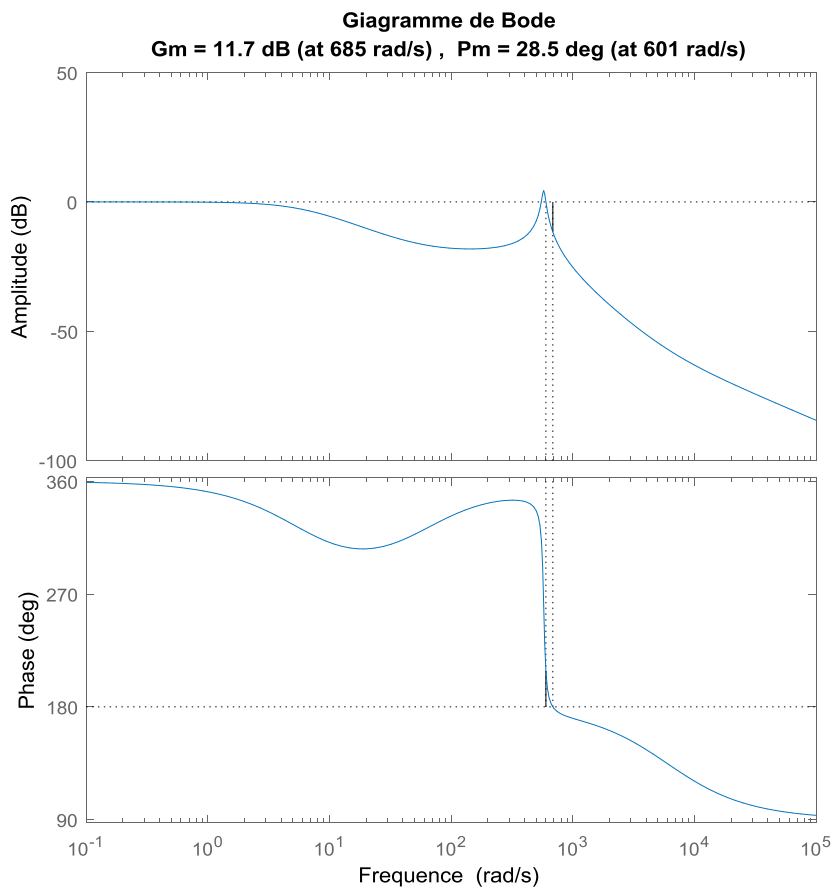
$$K_p = \frac{1}{|G(s)|}$$

$$K_I = \frac{\omega_C}{10} K_p = \frac{2\pi f_C}{10} K_p$$

On pose  $f_C=0.09e3$ , les figures suivent montrent les réponses temporelle et fréquentielle

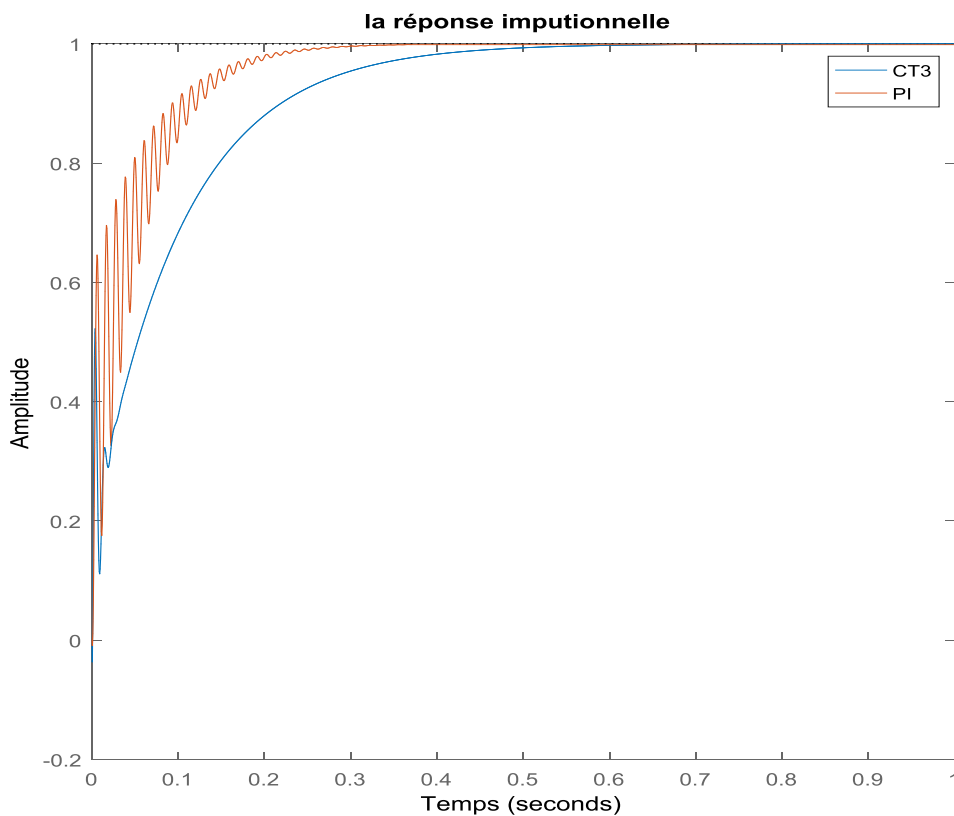


**Figure 2.18 : la réponse temporelle du système corrigé avec PI**



**Figure 2.19 : la réponse fréquentielle du système corrigé avec PI**

**1-3 comparaison entre les deux correcteurs :**



**Figure 2.20 : La réponse avec CT3 et avec CPI**

Pour meilleur stabilité on choisit le correcteur type 3

### 5- Vitesse d'équilibrage :

Selon l'équation de 'droop' (2.4)  $\alpha$  joue le rôle du pas de convergence plus que  $\alpha$  est grand les convergent plus vite. Si  $v$  la vitesse de variation de SoC :

$$v = \frac{dSoC}{dt} = -\frac{I_{bat}}{Ce} \quad (2.22)$$

$$v_1 - v_2 = -\frac{i_{bat1}}{Ce_1} - \left(-\frac{i_{bat2}}{Ce_2}\right) \quad (2.23)$$

Par l'application de la loi de Kirchhoff sur le système (2.23) on trouve :

$$V_{bus} = \frac{R_{load} (R_2 V_{ref1} + R_1 V_{ref2})}{R_{load} R_2 + R_{load} R_2 + R_1 R_2} \quad (2.24)$$

$$I_1 = \frac{R_2 V_{dc1} + R_{load} (V_{ref1} - V_{ref2})}{R_{load} R_2 + R_{load} R_2 + R_1 R_2} = \frac{R_2 (V_{co} + \alpha_1 SoC_1) + R_{load} (\alpha_1 SoC_1 - \alpha_2 SoC_2)}{R_{load} R_2 + R_{load} R_2 + R_1 R_2} \quad (2.25)$$

$$I_2 = \frac{R_1 (V_{co} + \alpha_2 SoC_2) + R_{load} (\alpha_2 SoC_2 - \alpha_1 SoC_1)}{R_{load} R_2 + R_{load} R_2 + R_1 R_2} \quad (2.26)$$

$$P_1 = V_{ref1} I_1 = (V_{co} + \alpha_1 SoC_1) \frac{R_2 (V_{co} + \alpha_1 SoC_1) + R_{load} (\alpha_1 SoC_1 - \alpha_2 SoC_2)}{R_{load} R_2 + R_{load} R_2 + R_1 R_2} \quad (2.27)$$

$$P_2 = V_{ref2} I_2 = (V_{co} + \alpha_2 SoC_2) \frac{R_1 (V_{co} + \alpha_2 SoC_2) + R_{load} (\alpha_2 SoC_2 - \alpha_1 SoC_1)}{R_{load} R_2 + R_{load} R_2 + R_1 R_2} \quad (2.28)$$

Supposons que  $R_1 = R_2 = R$  et  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$

$$P_1 = (V_{co} + \alpha SoC_1) \frac{SoC_1 (R + R_{load}) \alpha - \alpha R_{load} SoC_2 + R V_{co}}{(2R_{load} + R) R} \quad (2.29)$$

$$P_2 = (V_{co} + \alpha SoC_2) \frac{SoC_2 (R + R_{load}) \alpha - \alpha R_{load} SoC_1 + R V_{co}}{(2R_{load} + R) R} \quad (2.30)$$

$$dP = P_1 - P_2 = \frac{\alpha (R + R_{load}) (SoC_1 - SoC_2) (2V_{co} + \alpha (SoC_1 + SoC_2))}{(2R_{load} + R) R} \quad (2.31)$$

$$\overline{SoC} = \frac{SoC_1 + SoC_2}{2} \quad (2.32)$$

$$dP = \frac{2\alpha(R + R_{load})(SoC_1 - SoC_2)(V_{co} + \alpha\overline{SoC})}{(2R_{load} + R)R} \quad (2.33)$$

$$v_1 = \frac{dSoC_1}{dt} = -\frac{i_{bat1}}{Ce_1} = -\frac{P_1}{V_{bat1}Ce_1} ; v_2 = \frac{dSoC_2}{dt} = -\frac{i_{bat2}}{Ce_2} = -\frac{P_2}{V_{bat2}Ce_2} \quad (2.34)$$

Supposons que les batteries sont identiques  $Ce_1 = Ce_2 = Ce$  et  $V_{bat1} = V_{bat2} = V_{bat}$  en remplaçons dans l'équation (2.22) :

$$v_1 - v_2 = -\frac{1}{CeV_{bat}}(P_1 - P_2) = -\frac{1}{CeV_{bat}}(dP) \quad (2.35)$$

$$v_1 - v_2 = -\frac{2\alpha(R + R_{load})(SoC_1 - SoC_2)(V_{co} + \alpha\overline{SoC})}{CeV_{bat}(2R_{load} + R)R} \quad (2.36)$$

Pour les batteries identiques la vitesse de convergence dépend par :

- $\alpha$  ( $\alpha$ ) : coefficient réglable qui joue le rôle de pas de convergence, la vitesse est proportionnel a la valeur de alpha, plus que alpha est grand les SoCs convergent plus vite.
- La différence de SoC ( $SoC_1 - SoC_2$ ) : valeur qui a un effet sur la vitesse de l'équilibrage, si les SoCs sont plus proches la vitesse va diminuer.
- L'état global de charge  $\overline{SoC}$  : si les batteries ont des SoCs plus élevés la chute de SoC va être plus vite.
- La capacité des batteries  $Ce$  : si la capacité est plus grande selon (2.2) la variation de SoC est plus lente alors la converge prend plus de temps.

## 6- Equilibrages des batteries distincts :

L'étude précédent fais sur des batteries identiques, mais pour un système contient de batteries distincts ont des capacités différents, supposons que deux batteries ont le même SoC initial mais  $Ce_1 > Ce_2$ , selon (2.2) la batterie 1 se décharge plus lent que la batterie 2, par conséquent  $v_1 < v_2$ , la figure (2.18) montre les variations de SoC des batteries, un décalage (baise) entre les SoCs. Ce bais entre les SoCs traduit par un bais entre les puissances (figure 2.19) et entre les courants ; cette phénomène et interprété par l'équation (2.2), la variation du SoC dépend par le courant et la capacité. Alors dans le ce cas ordinaire l'équilibrage des SoC des batteries distincts est impossible.

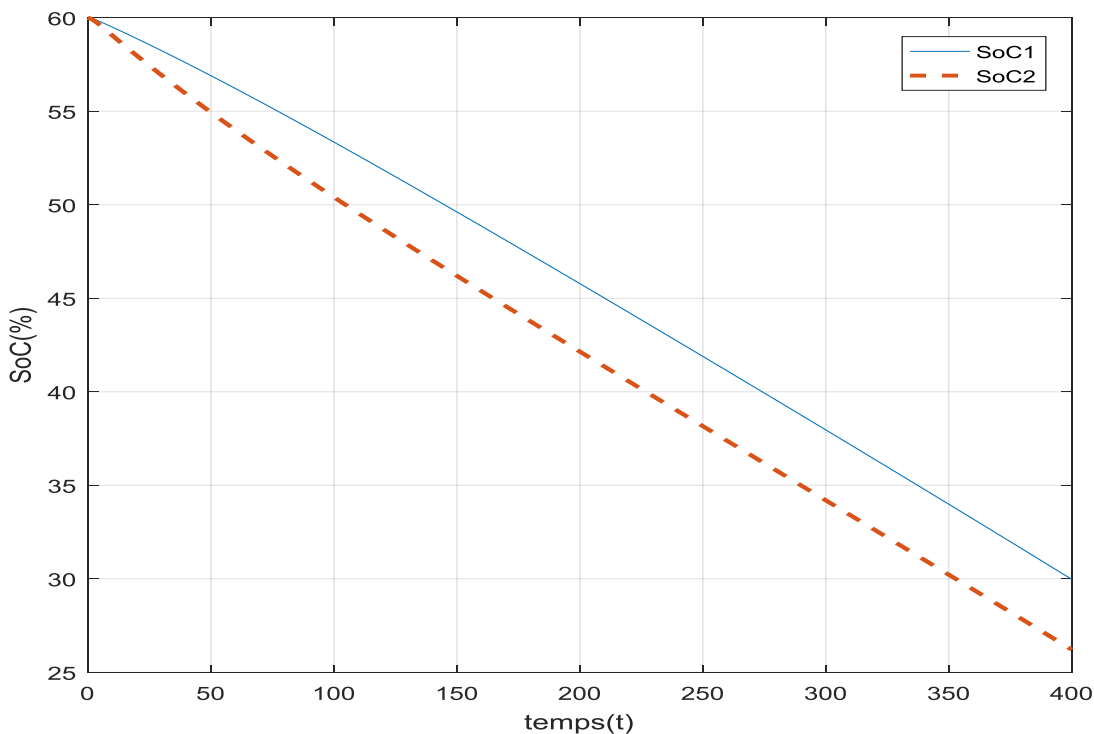


Figure 2.21 : SoCs des batteries distincts

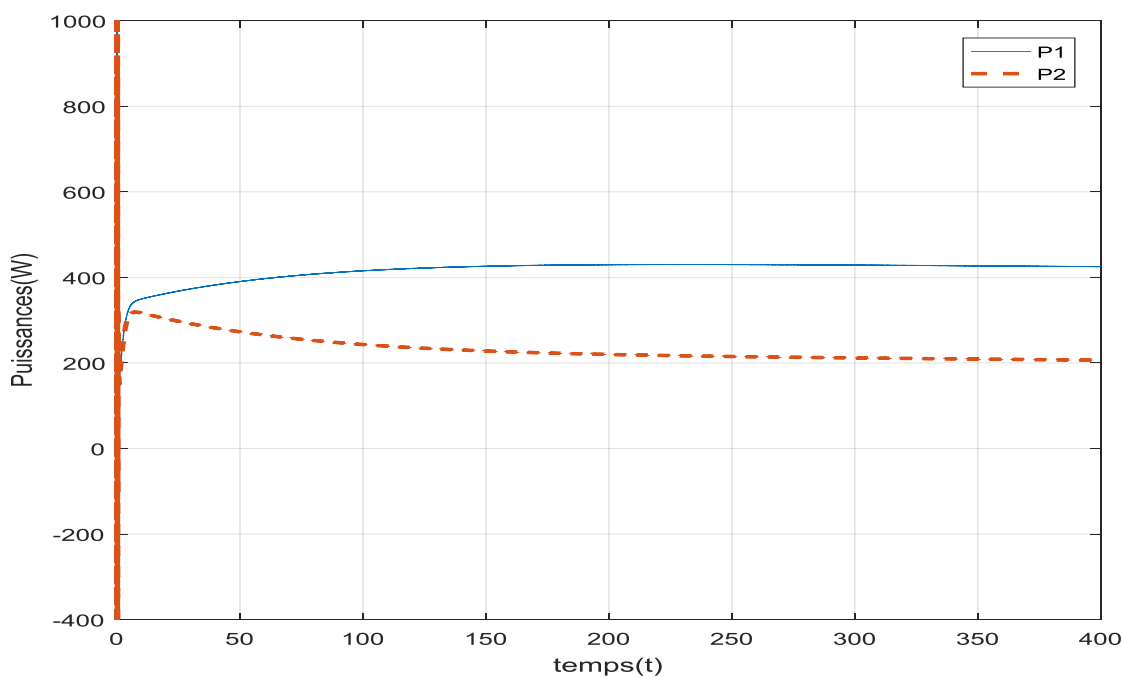


Figure 2.22 : puissances des batteries avec Ce différents

Pour résoudre ce problème on utilise la caractéristique tension-courant de la source :

On a  $I_{bat1} = \frac{V_{bat1}}{R_1}$  et  $I_{bat2} = \frac{V_{bat2}}{R_2}$  en remplaçons dans l'équation (2.9) :

$$v_1 - v_2 = -\left(\frac{V_{bat1}}{R_1 C e_1} - \frac{V_{bat2}}{R_2 C e_2}\right)$$

A la point d'intersection  $SoC1=SoC2$  et  $V_{bat1} = V_{bat2}$  alors  $R_1 C e_1 = R_2 C e_2$ . Pour que  $v_1 - v_2 = 0$  la résistance  $R_1 = \frac{R_2 C e_2}{C e_1}$ . La figure 2.20 montre les SoCs après la modification de R et la figure

2.21 montre les puissances :

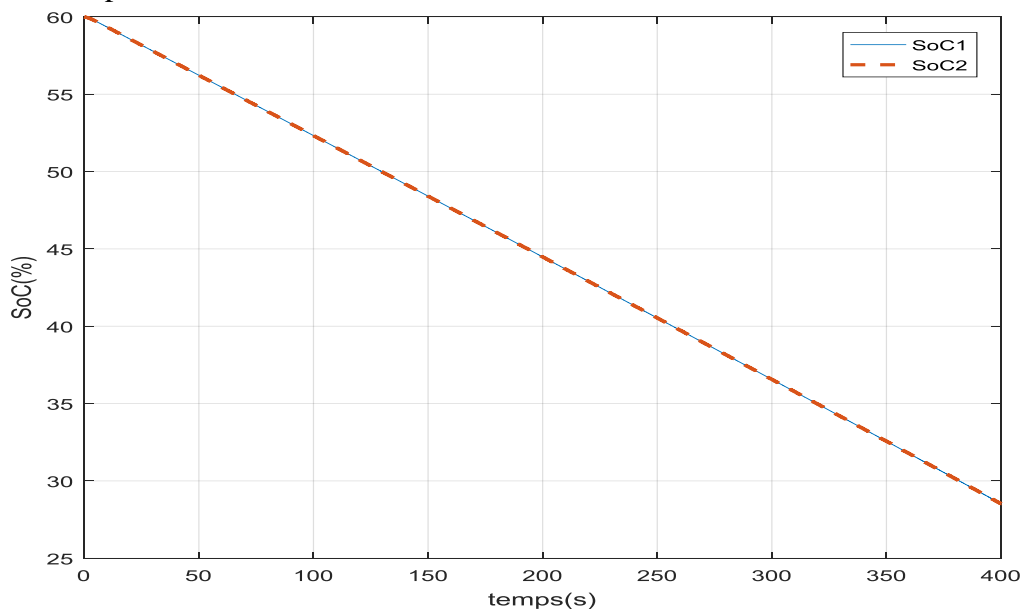


Figure 2.23 : SoC des batteries avec R ajusté

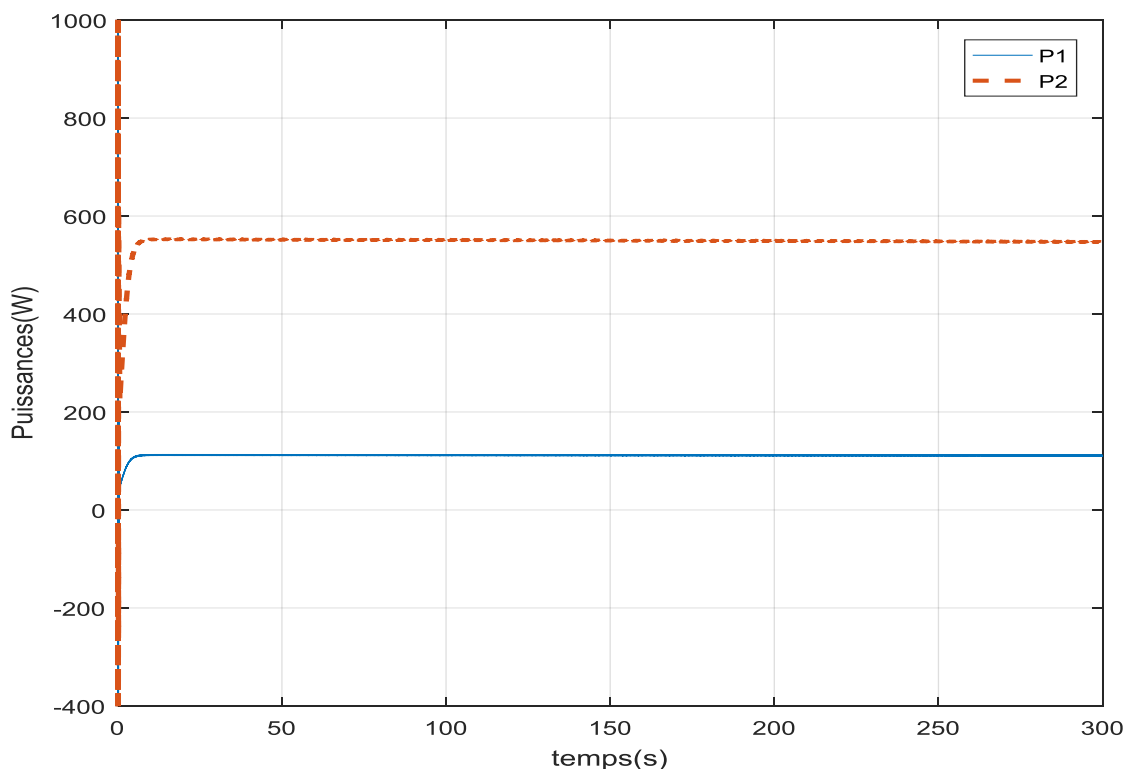


Figure 2.24 : puissances des batteries avec SoCs balancées

### 7- Les limites de alpha :

Bien qu'un grand coefficient  $\alpha$  puisse augmenter la vitesse d'équilibrage du SoC, il existe plusieurs limites dans le choix pratique, qui inclut les exigences de régulation de tension de bus, les limites de courant de batterie et les limites de puissance transmis.

**a. Exigence de régulation de tension de bus :**

La plupart des charges nécessitent une tension stable sur la ligne de bus. Selon les différentes exigences de charge et de stabilité du système, la plage de fonctionnement autorisée de la tension pourrait varier. En supposant que la plage de régulation de tension requise est de  $\pm u\%$  et que la résistance virtuelle est  $R$ , avec une limitation de courant de batterie  $I_{e-max}$  et  $I_{s-max}$ , le facteur de SoC doit remplir

$$\alpha + I_{max} R < uV$$

**b. Limitation du courant de sortie de batterie :**

En raison de la limitation de la capacité et de l'état du matériel, la batterie a une limitation pour sa puissance de sortie maximale, elle est marquée comme limitation de courant. En supposant que la tension nominale de la batterie est  $V_{bat}$  et a une limitation de courant comme  $I_{max}$ , considérer la pire situation qu'une batterie complètement chargée fournit de l'énergie à la charge (SoC=1), le facteur de SoC devrait remplir :

$$V_{bat} + \alpha - I_{max} R < I_{max} R_{load}$$

$$\frac{V_{bat} + \alpha}{R_{load} + R} < I_{max}$$

$$\alpha < ((R_{load} + R) I_{max} - V_{bat})$$

**c. Limitation de puissance transmis :**

Selon (2.15), avec un facteur  $\alpha$  suffisamment élevé pour le contrôle SoC, au moment de l'équilibrage du SoC, l'une des batteries essaiera de fournir de la puissance à une autre, ce qui signifie  $I_1 I_2 < 0$ . Il est également fortement recommandé de minimiser ce type d'opération car cela réduirait la durée de vie de la batterie [3]. En supposant que la batterie 1 a un plus grand SoC initial et sa différence avec la batterie 2 est  $dSoC$ , pour s'assurer que  $I_1 I_2 < 0$  le facteur SoC doit remplir

$$\alpha < \frac{RV_{ref}}{dSoC R_{load} - R SoC_2}$$

**8- Résumé du chapitre :**

Dans ce chapitre, le modèle de la batterie est construit en prise en considération l'état de charge seulement (modèle simplifié), le convertisseur utilisé ici est un hacheur

bidirectionnelle en courant, les tensions aux bornes de ce convertisseur sont constantes (les bornes de la tension basse raccordées avec la batterie et les bornes de la tension haute raccordées avec le bus commun), l'étude se fait sur le mode de conduction continu. Mais pour que le système soit en boucle fermée, un correcteur doit être ajouté à la boucle de retour. Un correcteur de type 3 est démontré selon le modèle linéaire du système, les performances du système sont atteintes : stabilité assurée, temps de réponse petit avec une précision très élevée, les limites de la vitesse d'équilibrage sont bien démontrées. Pour valider les résultats obtenus dans ce chapitre, une simulation de différentes conditions se fait dans le chapitre suivant.

Chapitre II :

---

## **Simulation du système**

---

---

Dans ce chapitre, des simulations du système sous différents conditions de travail, pour valider la robustesse et la fiabilité du système.

---

La simulation est réalisée à l'aide de MATLAB / Simulink R2016b, les modèles de simulation utilisés ont été construits selon le modèle globale illustré dans le tableau (2.1), les blocs de simulations sont montés dans la figure (3.1). Plusieurs scénarios différents seront simulés : deux batteries supportent une charge, deux batteries avec une source d'énergie. Les SoCs, les puissances et la tension de bus sont illustré dans chaque cas.

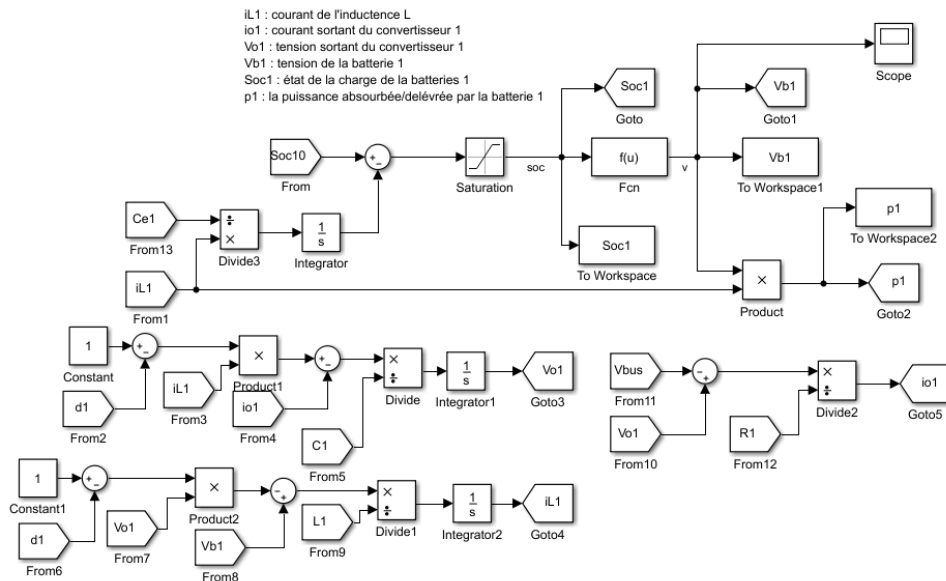


Figure 3.1 : bloc de simulation

### 1- Scenario de deux batteries supportent une seule charge :

Dans ce scénario deux batteries alimentent une charge résistive avec des SoCs initiales déferents, le schéma de simulation est monté dans la figure 3.2, les paramètres du convertisseur sont monté dans le tableau 2.1, ces paramètres sont sélectionné pour être en mode de conduction continu. Deux cas sont simulés : décharge deux batteries identiques et décharge deux batteries distinctes.

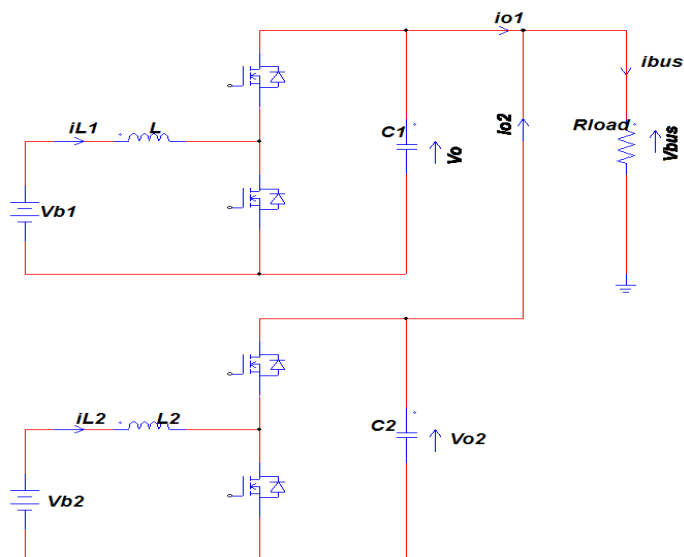


Figure 3.2 : schéma de deux batteries avec une charge

a) Décharge deux batteries identiques :

Deux batteries ont la même capacité mais avec des SoCs différents :

	Batteries 1	Batteries 2
La capacité du stockage(Ah)	5000	5000
alpha	10	10
L'état de charge 'SoC' (%)	70	60

Tableau 3.1 : paramètres des batteries identiques

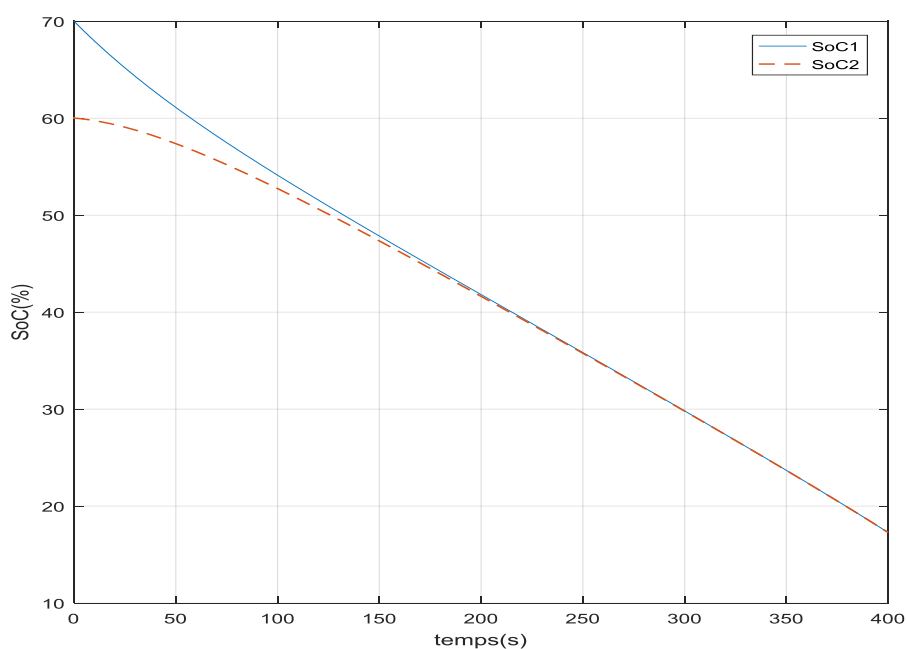
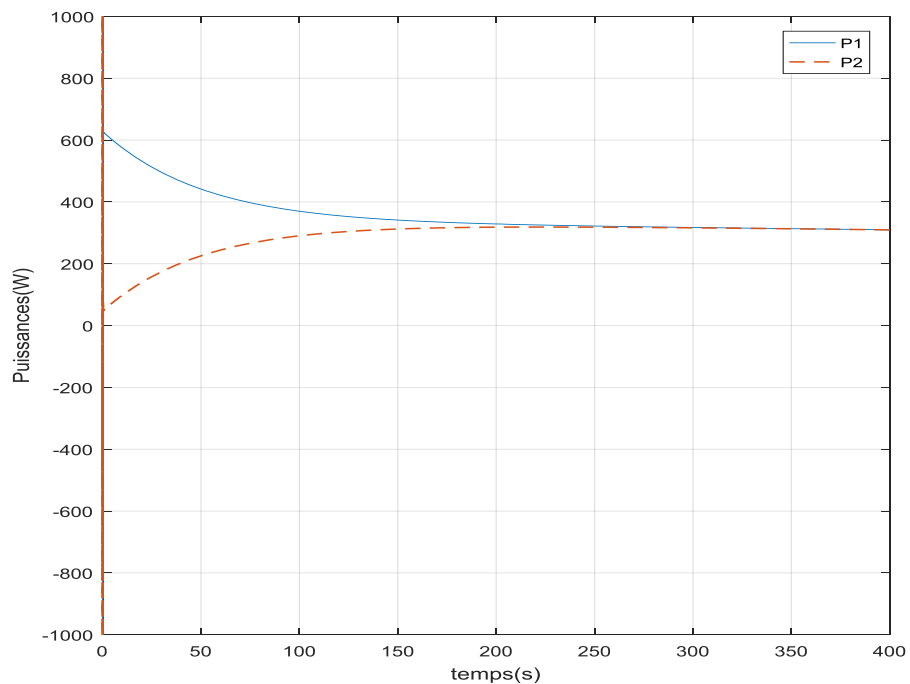
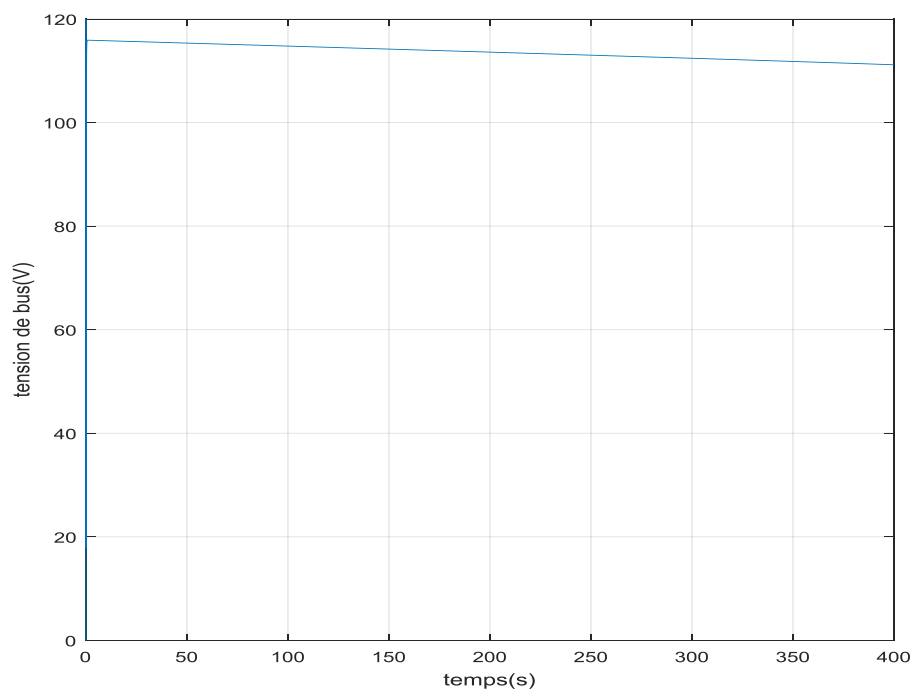


Figure 3.3 : les SoCs des batteries identiques



**Figure 3.4 : les puissances des batteries identiques**



**Figure 3.5 : la tension de bus avec des batteries identiques**

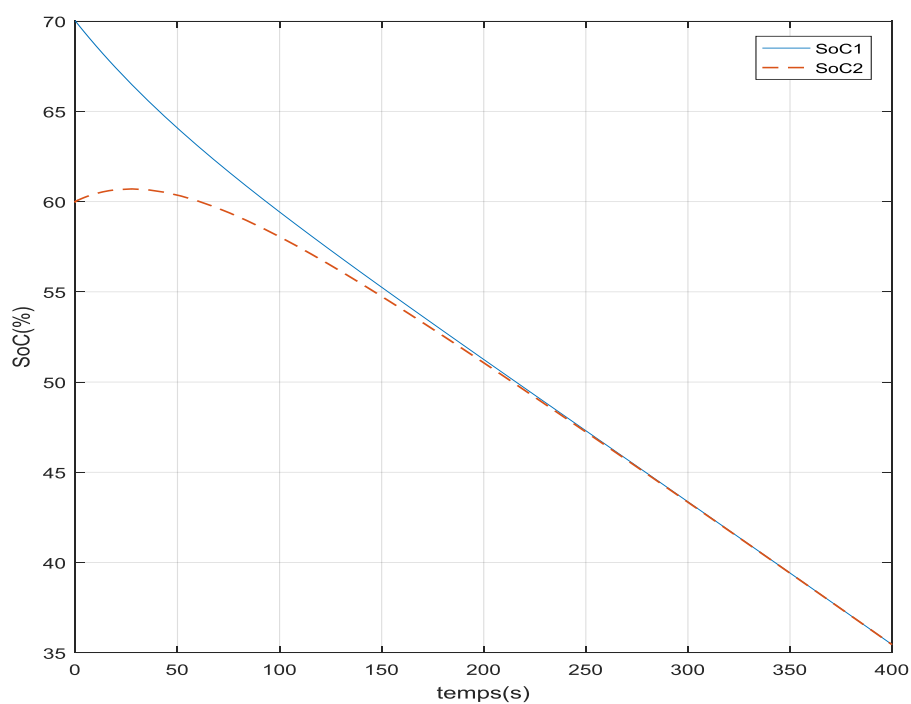
La figure 3.2 montre que les deux SoCs convergent jusqu'à l'équilibrage (après 200s), les puissances partagées sont aussi équilibrées comme montre la figure 3.4, une diminution de tension de bus interprétée par la diminution de l'état de charge globale de système par conséquent la diminution tension de référence selon l'équation (2.7).

**b) Decharge deux batteries distincts :**

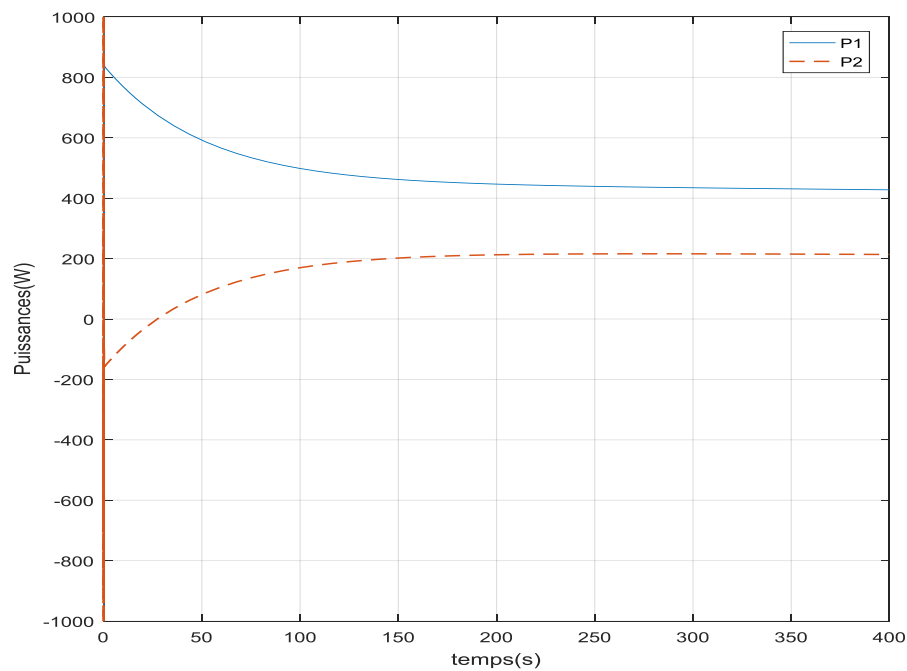
Deux batteries ont la déférents capacités et déférebts SoCs :

	Batteries 1	Batteries 2
La capacité du stockage(Ah)	10000	5000
alpha	10	10
L'état de charge 'SoC' (%)	70	60

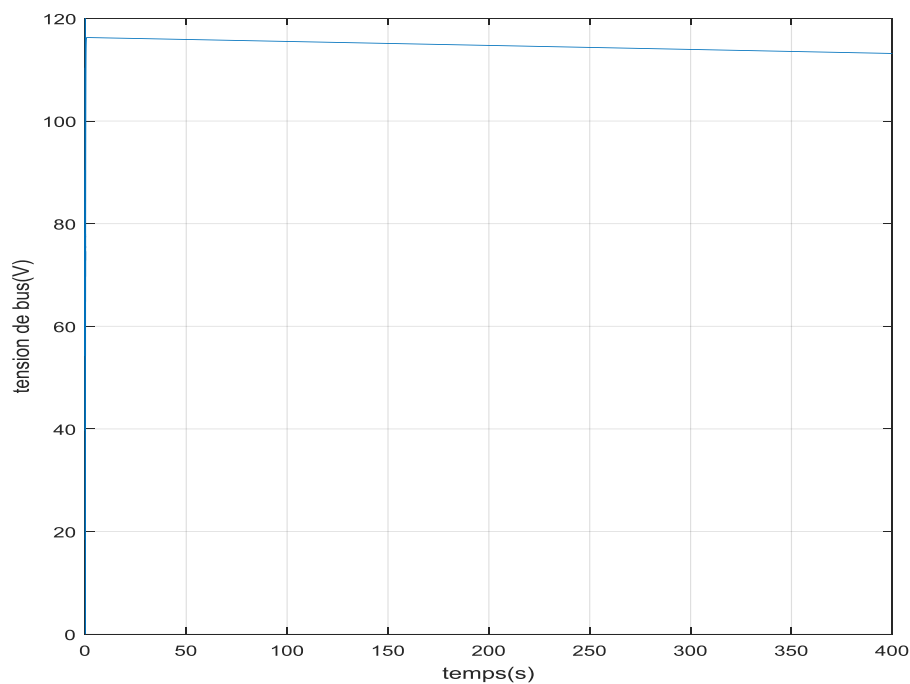
**Tableau 3.2 : parametres des batteries distincts**



**Figure 3.6 : les SoCs des batteries distincts**



**Figure 3.7 : les puissances des batteries distincts**



**Figure 3.8 : la tension de bus avec des batteries distincts**

D'après la figure 3.5 les SoCs sont équilibrées par la technique mentionnée dans le chapitre 2 partie 6, la batterie 1 partage une puissance beaucoup plus que la batterie 2 comme la figure 3.7 montré, ce baisse de puissances interprété par la différence dans les capacités des batteries, la figure 3.8 prouve que la tension de bus reste suivre la référence.

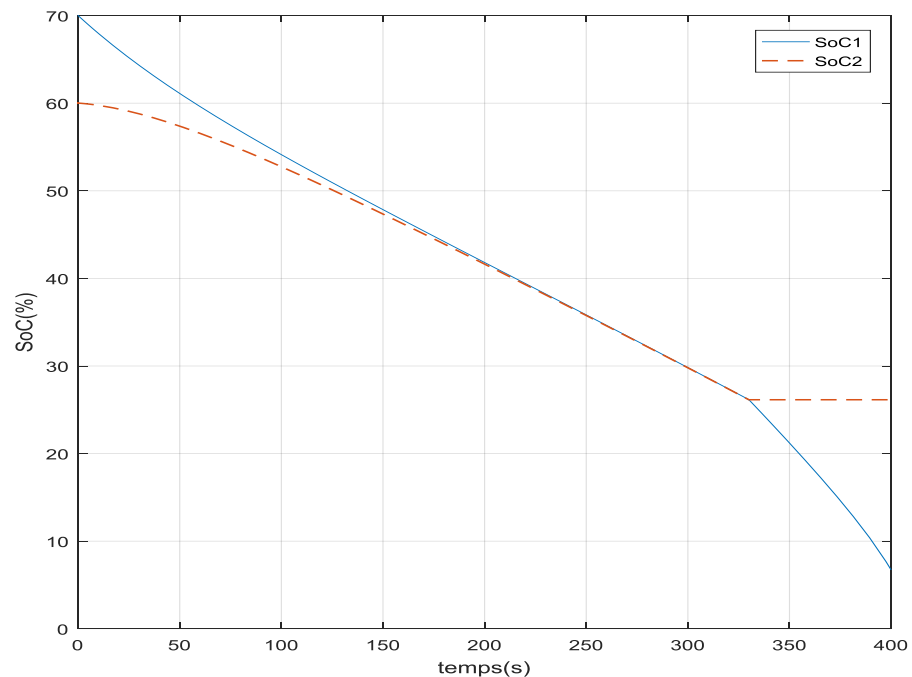
### c) Déconnexion d'une batterie :

Dans ce cas une batterie déconnectera après 300s, la batterie connectée doit fournir l'énergie pour garder la stabilité du bus commun, les paramètres des batteries données dans le tableau suivant :

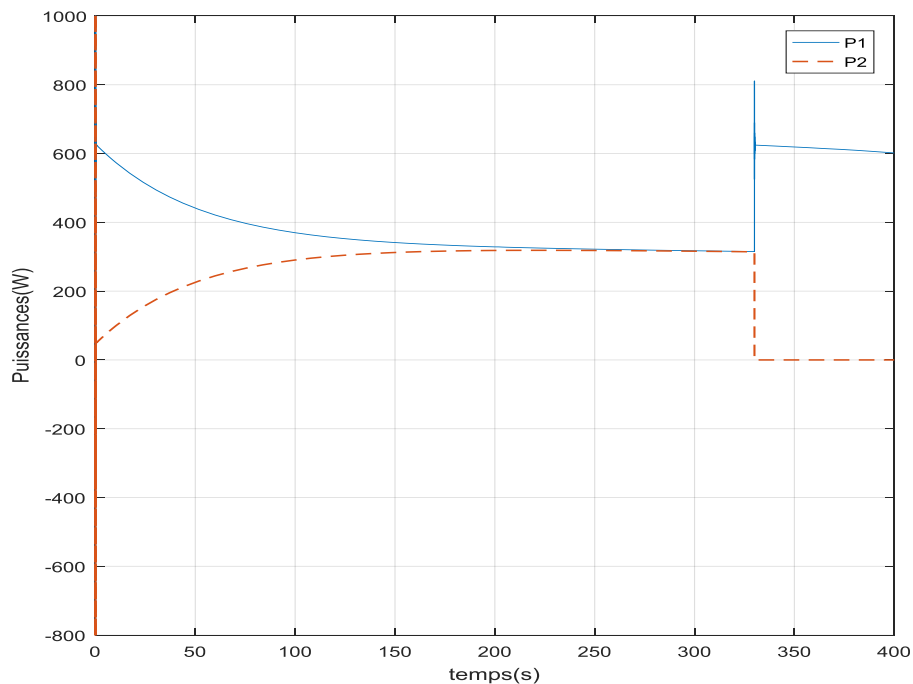
	Batteries 1	Batteries 2
La capacité du stockage(Ah)	10000	10000
alpha	10	10
L'état de charge 'SoC' (%)	70	60

**Tableau 3.3 : paramètres des batteries**

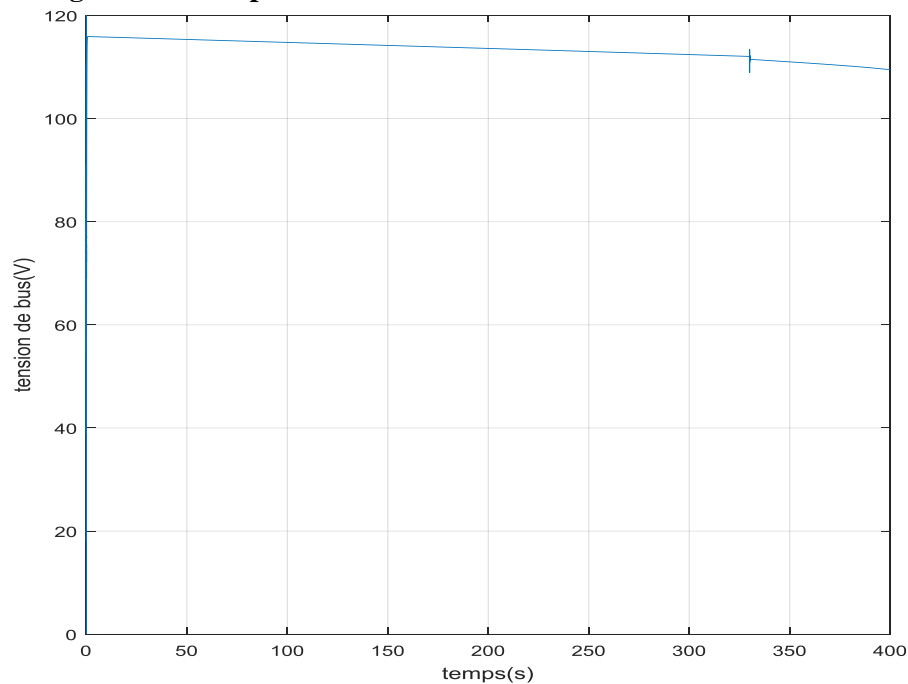
La tension de bus doit être constante et la puissance partagée entre les batteries doit être équilibrée, dès qu'une batterie est déconnectée l'autre doit composer la puissance, alors elle doit fournir double puissance comme montre dans la figure 3.9, la tension de bus est toujours gardée (la figure 3.11).



**Figure 3.9 : les SoCs des batteries avec batterie déconnectée**



**Figure 3.10 : les puissances des batteries avec batterie déconnectée**

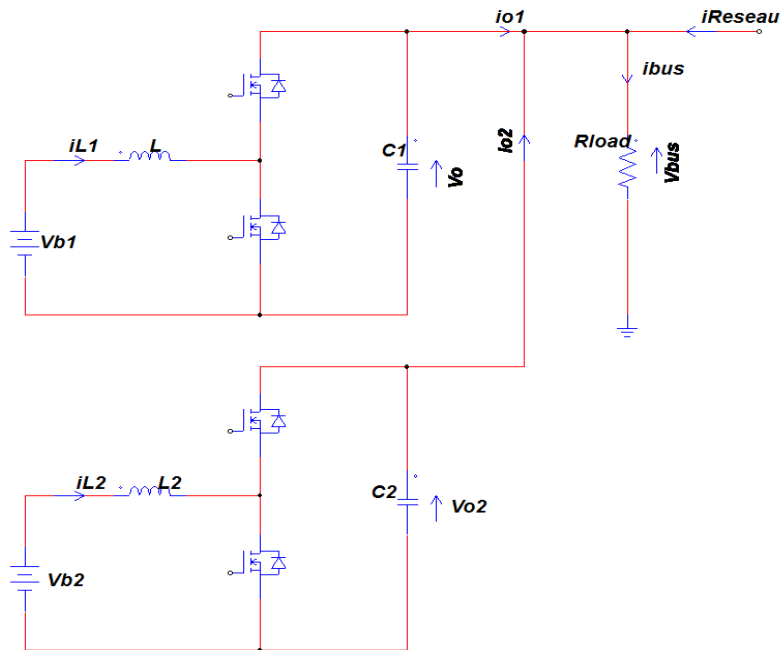


**Figure 3.11 : la tension de bus avec une batterie déconnectée**

## 2- Scenario de deux batteries avec une source d'énergie :

Dans le monde réel, les batteries sont des sources d'énergie axillaire pour compenser l'insuffisance du réseau principal, ou pour stocker le surplus de l'énergie. Supposons que le réseau délivre un courant  $I_{reseau}$  vers le bus commun, plusieurs cas peuvent être étudiés : système avec source d'énergie faible, système avec source d'énergie suffisante, système charge décharge. Le schéma du système est illustré dans la figure 3.12.

Les batteries sont identiques (cas des batteries distincts est étudié dans la partie de la décharge), les paramètres des convertisseurs sont mentionnés dans la table 3.1.



**Figure 3.12 : schéma de deux batteries avec une source**

	Batteries 1	Batteries 2
La capacité du stockage(Ah)	5000	5000
alpha	10	10
L'état de charge 'SoC' (%)	30	20

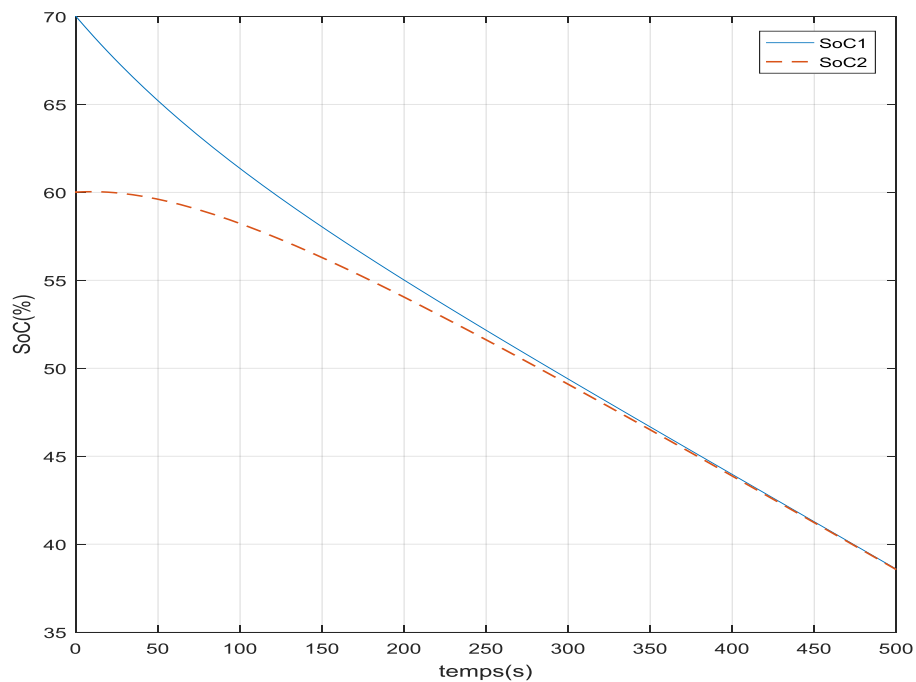
**Tableau 3.4 : paramètres des batteries identiques**

Pour que la tension de bus soit stable, la charge commune  $R_{load}$  demande un courant  $I_{bus}$  telle que :

$$I_{bus} = \frac{V_{bus}}{R_{load}} \quad \text{avec } V_{bus} = V_{co} + \alpha \overline{SoC} \quad \text{alors } I_{bus} = \frac{V_{co} + \alpha \overline{SoC}}{R_{load}} = (I_{o1} + I_{o1}) + I_{reseau} .$$

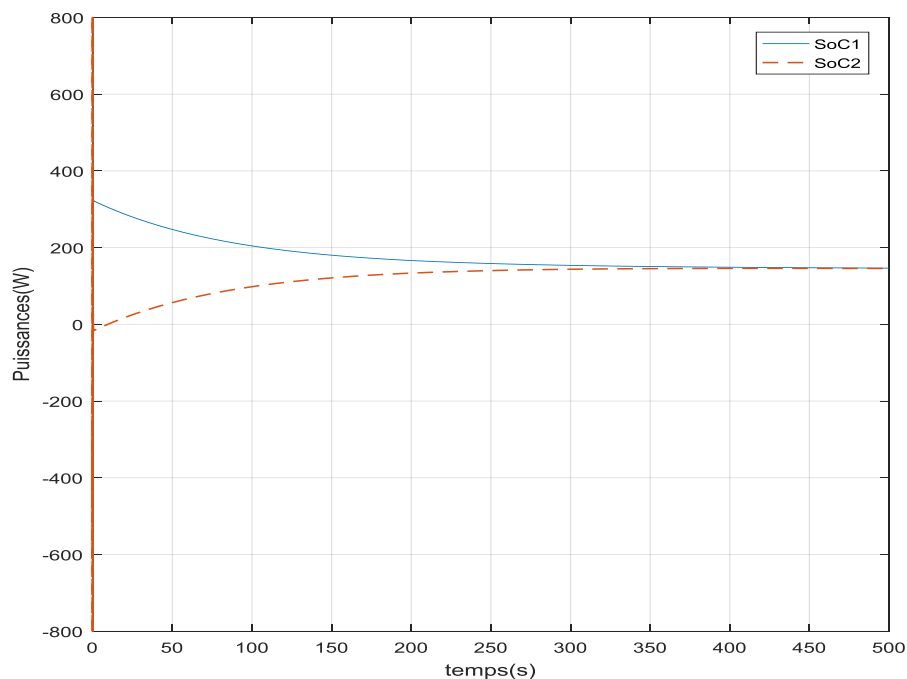
**a) système avec source d'énergie faible :**

Dans ce cas le courant de réseau  $I_{reseau}$  est inférieur que le courant de bus  $I_{bus}$  , les batteries doivent partager un courant pour être  $I_{bus} = (I_{o1} + I_{o1}) + I_{reseau}$

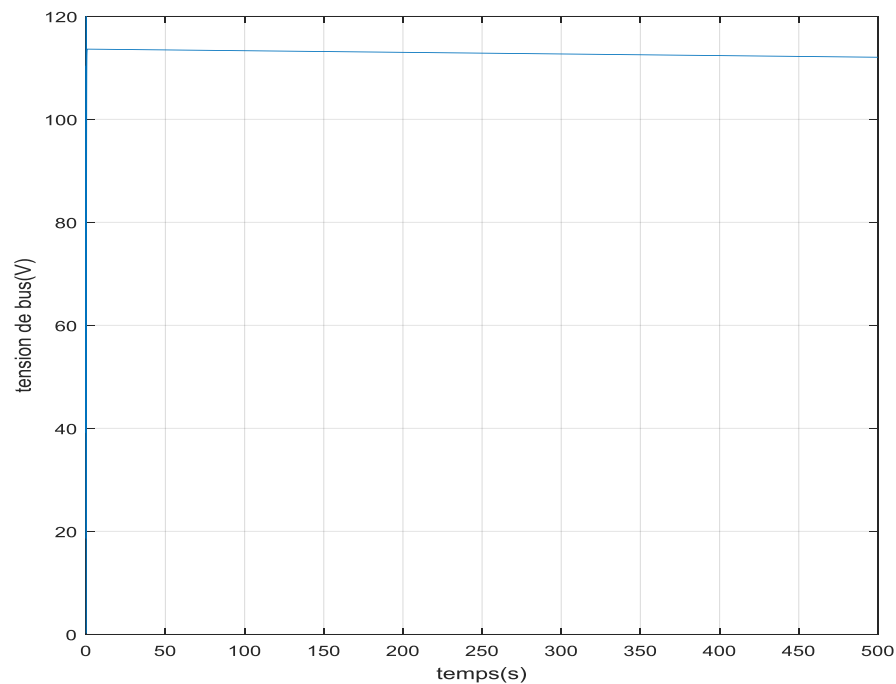


**Figure 3.13 : les SoCs avec sources insuffisant**

Les SoCs sont équilibrées mais après temps plus grand (300s), la vitesse de l'équilibrage est lié par  $\alpha$  comme mentionnée dans le chapitre 2 partie 5, dans ce cas  $\alpha$  est limité (5), la limitation de puissance transmise (Chap2-partie7-c), c'est pour ça la vitesse est lente.



**Figure 3.14 : les puissances avec sources insuffisant**



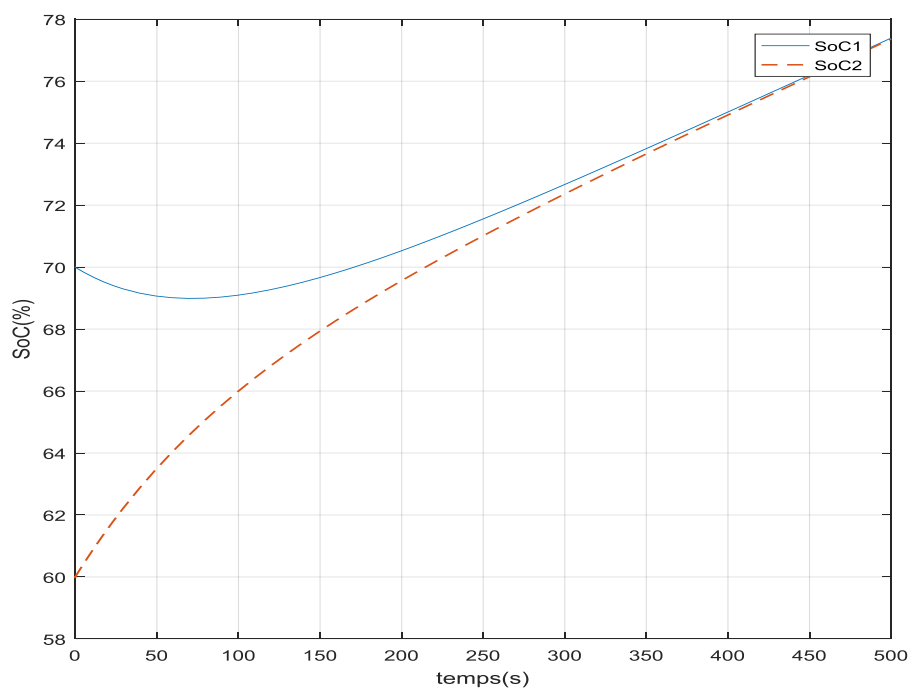
**Figure 3.15 : la tension de bus avec sources insuffisant**

Les puissances sont équilibrées et la tension de bus est toujours autour de la référence.

**b) système avec source d'énergie suffisant :**

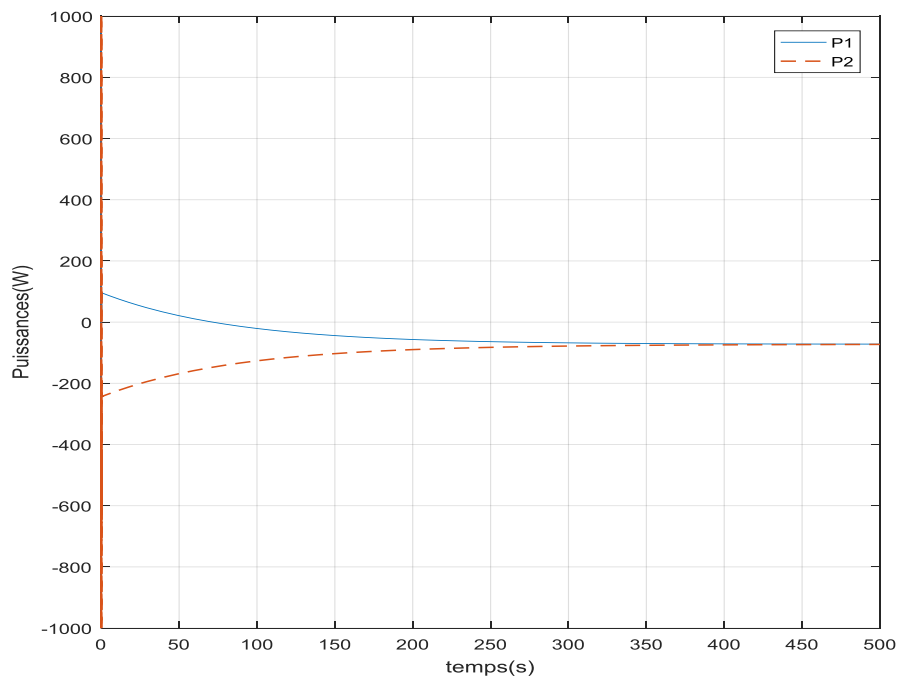
Dans ce cas le courant de réseau  $I_{reseau}$  est supérieur que le courant de bus  $I_{bus}$ , pour que

$I_{bus} = (I_{o1} + I_{o1}) + I_{reseau}$  les courants des batteries sont négatifs alors les batteries chargent.



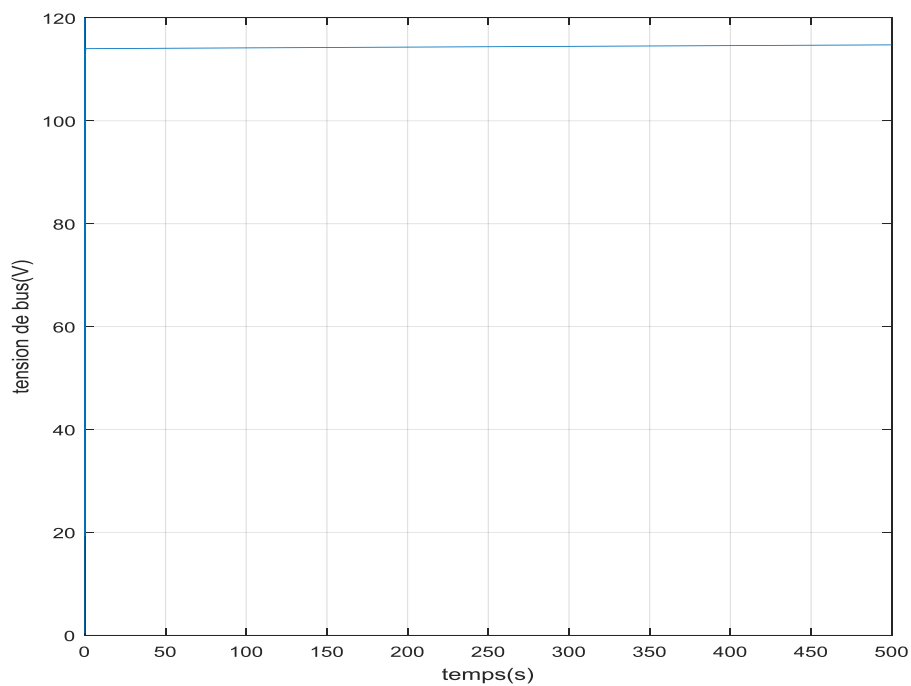
**Figure 3.16 : les SoCs avec sources suffisant**

Les batteries chargent est les SoCs sont équilibrées, mais au débit la batterie 1 qui a SoC plus élevé essayer de charger la batterie 2, c'est l'effet de alpha mais pour alpha plus petit les SoC convergent plus lent.



**Figure 3.17 : les puissances avec sources suffisant**

Les puissances dans le régime permanent sont négatives signifie que les batteries absorbent l'énergie (courant négatif).

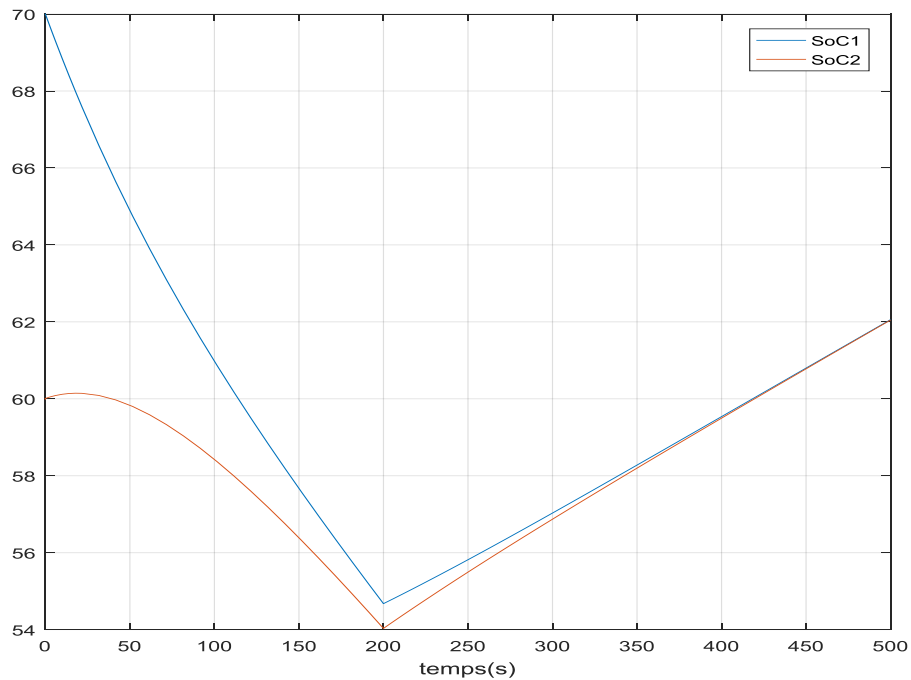


**Figure 3.18 : la tension de bus avec sources suffisant**

On remarque une petite croissance dans la tension de bus lie à l'évolution de SoC globale du système.

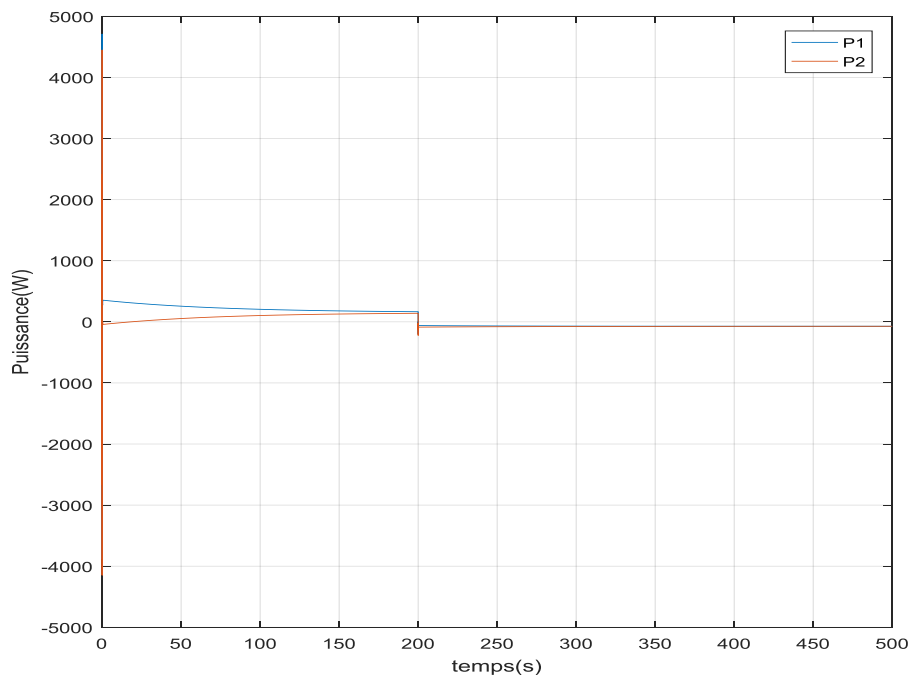
**c) système charge décharge :**

Dans ce cas le courant de réseau  $I_{\text{reseau}}$  est variable, au débit le courant est faible, après 200s le réseau injecte un courant plus grand que le courant de bus  $I_{\text{bus}}$ .



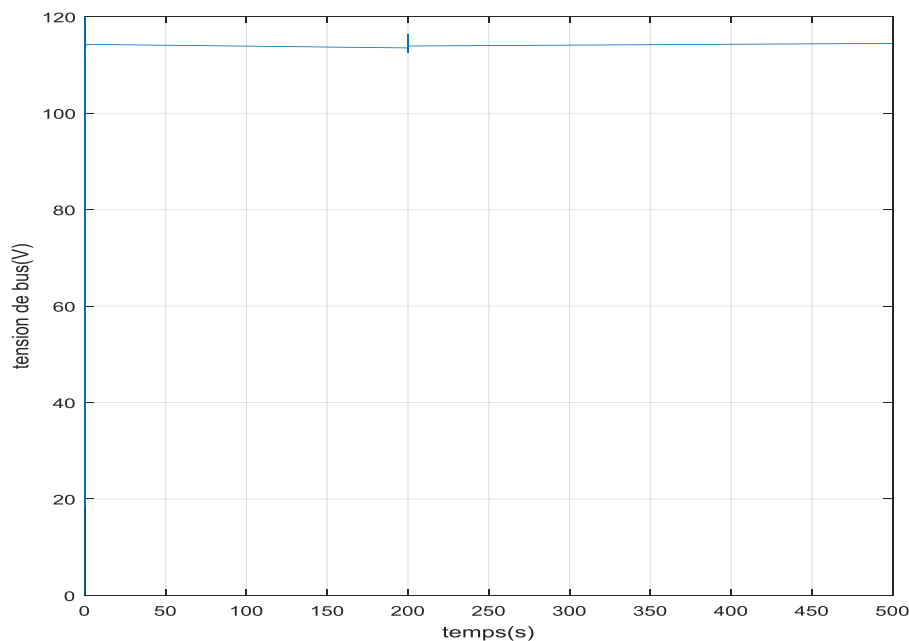
**Figure 3.19 : les SoCs avec sources variable**

Les SoCs convergent dans les deux phases soit la charge ou la décharge comme la figure 3.46 montre, après 350s les SoCs sont équilibrée, le temps d'équilibrage est lie alpha, ce dernier soumis à des critères de choix qui peuvent limiter la vitesse d'équilibrage.



**Figure 3.20 : les puissances avec sources variable**

D'après la figure 3.20 les puissances sont positives alors les batteries fournissent l'énergie dès que l'insuffisance du réseau pour le compenser, après l'injection du  $I_{reseau}$  plus fort le courant circule dans la charge commune  $R_{load}$  et dans les batteries aussi, alors les puissances sont négatives, les batteries absorbent l'énergie. La figure 3.48 montre la tension de bus, dans la phase de décharge une petite diminution de tension lie a la diminutions de SoC globale, des que la charge des batteries la croissance de SoC augment la tension de bus.



**Figure 3.21 : la tesnion de bus avec sources variable**

### 3- Résumé de la simulation

Comme l'ont montré les simulations ci-dessus, le contrôle de l'équilibre SoC pourrait effectivement partager la puissance en fonction de SoC de la batterie, l'effet de cette méthode est que toutes les batteries connectées au bus partageraient le même SoC. Il y a une condition qui affecte l'effet d'équilibrage, qui est la capacité de la batterie : le processus d'équilibrage de SoC aurait un certain biais dû à la différence des capacités entre les batteries. Simulation concernant le processus de charge des batteries a été fait, dans les batteries de simulation ont été chargés en fonction de leurs SoC, les résultats ont montré que les batteries partageaient des SoC identiques à la fin. Enfin, une simulation concernant le processus de la charge/décharge les SoCs toujours convergent et la tension de bus reste constante.

## Conclusion

---

Cemémoire présente une méthode de gestion de puissance entre des batteries mise en parallèle et d'équilibrage des états de charge de ces batteries. C'est la méthode de 'Droop contrôle' adaptée avec le SoC. Le principe de fonctionnement, les avantages et les limites ont été démontrés, et plusieurs simulations avec différents conditions ont été effectuées. Généralement, cette méthode basée sur la modification de l'équation de 'Droop' (caractéristique tension-courant) de chaque batterie en fonction de son état de charge, alors la tension de référence lie avec la valeur SoC de la batterie.

L'analyse mathématique a montré que cette méthode avait des limites pour le choix de son facteur alpha, et il y a un compromis entre la vitesse d'équilibrage du SoC et le partage du courant, plus que le courant partagé est plus grand plus que la vitesse d'équilibrage est plus vite.

Plusieurs modèles utilisés dans la simulation dans ce mémoire, y compris le modèle de batterie, de convertisseur et de la charge, étaient idéaux ou simplifiés.

En conséquence, toutes les unités de batterie appliquant cette méthode dans un micro-réseau s'approchent d'une valeur de SoC identique. La tension du bus devient liée à l'état SoC moyen dans le système. Les résultats de la simulation ont montré que cette méthode pouvait bien gérer le problème d'équilibrage des SoC.

Les travaux futurs consisteraient à approfondir l'étude de la compensation des batteries dès que les capacités sont différentes. Le facteur alpha a besoin de plus d'études aussi, car sa valeur affecte également l'effet d'équilibrage et le fonctionnement de la batterie, ce qui en fait un bon sujet d'étude de l'optimisation. Pour une application réelle, le coefficient de décharge de la batterie n'est pas constant, son changement pourrait affecter le résultat de l'équilibrage. Enfin, test pratique sur de vraies batteries, en considérant les scénarios de charge et de décharge.

---

---

## LISTE DES REFERENCES

- [1] <http://www.smartgrids-cre.fr>
- [2] STATE OF CHARGE BALANCING DROOP CONTROL, R. Hu 2015
- [3] P.F. Ribeiro, B.K. Johnson, M.L. Crow, A. Arsoy, and Y. Liu. Energy storage systems for advanced power applications. Proceedings of the IEEE, 89(12):1744–1756, Dec 2001
- [4]- Xiaonan Lu, Kai Sun, J.M. Guerrero, J.C. Vasquez, and Lipei Huang. State of charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in dc microgrid applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61(6):2804–2815, June 2014.
- [5] Ned Mohan-Power electronics \_ a first course-Wiley (2012)
- [6] <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=comprendre-les-smart-grids>
- [7] Battery Reference Book. British Library Cataloguing in Publication Data a catalogue record for this book is available from the British Library. ISBN 07506 4625 X.
- [8] Shen Guo. The Application of Genetic Algorithms to Parameter Estimation in Lead-Acid Battery Equivalent Circuit Models. Thesis submitted in accordance with the requirements of the University of Birmingham for the degree of Master of Philosophy.
- [9] <https://www.solaris-store.com/content/43-principe-de-fonctionnement-d-une-batterie-solaire>
- [10] Robert W. Erickson, Dragan Maksimović (auth.)-Fundamentals of Power Electronics-Springer US (2004)

---

---

[11] <https://www.planetoscope.com/energie>

[12] Micro-réseaux et autoproduction dans les énergies renouvelables.

CIRCUTOR, SA - Vial Sant Jordi, s/n 08232 (Barcelone) Espagne

[13] DC Micro Grid System ; Naoki AyAi, Toshiya HisAdA, Toshikazu HibATA,  
Hidekazu MiyosHi, Takashi iwAsAki and ken-ichi kiTAyAMA

[14] A generalized droop control approach for islanded DC microgrids hosting  
parallel-connected DERs

[15] Droop-Control-Based State-of-Charge Balancing Method for Charging and  
Discharging Process in Autonomous DC Microgrids

[16] A Novel Battery Management System Using a Duality of the Adaptive Droop  
Control Theory

[17] State-of-Charge (SOC)-Balancing Control of a Battery Energy Storage  
System Based on a Cascade PWM Converter

[18] La gestion active des réseaux de distribution : des micro-réseaux aux réseaux  
intelligents ; Yannick Phulpin, INESC Porto, Portugal

## **Résumé général :**

Ce mémoire présente une méthode de participation d'énergie entre des batteries câblées en parallèle. L'objectif de cette méthode est d'équilibrer l'état de charge de chaque batterie connectée en parallèle et permettent de détecter l'état globale de charge (la charge moyenne). Le principe est de commander la tension de sortie par un convertisseur bidirectionnel en courant, alors il permet de charger ou décharger la batterie, selon l'énergie disponible dans le bus commun. Pour assurer la stabilité et pour atteindre la meilleure performance possible un régulateur type 3 est ajouté au boucle de retour.

## **General resume :**

This memoir presents a method of energy participation between batteries wired in parallel. The purpose of this method is to balance the state of charge of all parallel connected batteries and to detect the overall state of charge (the average load). The principle of this method is to control the output voltage by a bidirectional current converter, so it can charge or discharge the battery, depending on the energy available in the common bus. To ensure stability and achieve the best possible performance a Type 3 regulator is added to the feedback loop.

## **ملخص عام:**

تقدم هذه المذكرة طريقة لمشاركة الطاقة بين البطاريات الموصولة بشكل متواز. والغرض من هذه الطريقة هو موازنة حالة شحن جميع البطاريات الموصولة مع الشبكة والكشف عن الحالة العامة للشحن (متوسط الحمل). مبدأ هذه الطريقة هو التحكم في جهد الخرج بواسطة محول تيار ثنائي الاتجاه، حتى يمكنه شحن البطارية أو تفريغها، اعتماداً على الطاقة المتوفرة في الشبكة الرئيسية. لضمان الاستقرار وتحقيق أفضل أداء ممكن، تتم إضافة منظم من النوع 3 إلى حلقة التحكم.