



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen

Faculté des Sciences

Département de Physique

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en physique
énergétique et matériaux

Estimation de la température des batteries (Ni/Cd) par
approche neuro-floue, application au microsatellite
Alsat-1-

Présenté par KADA BELFAR Mohamed Reda

Soutenu le 29 juin 2013

Devant le jury composé de :

Dr Souhila BENSMAINE

Président de jury

Dr Abdellah BENYOUCEF

Examineur

Dr Toufik BAGHDADLI

Examineur

Dr Lotfi MERAD


Encadreur

Année universitaire 2012-2013



REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, j'exprime mes sincères remerciements

- ❖ A mon directeur de mémoire Monsieur Lotfi MERAD pour avoir accepté de diriger ce travail et guider mes travaux qu'il trouve ici jusqu'à la réalisation de ce mémoire. Le témoignage de ma profonde et respectueuse gratitude pour les spéciaux conseils et la confiance qu'il ma permettre en acceptant de diriger ce dernier.
 - ❖ Je tien a exprimer ma reconnaissance à Madame Souhila BENSMAINE pour avoir accepté de présider le jury de mon mémoire.
 - ❖ Mes vifs remerciements à Messieurs Tewfik BAGHDADLI et Abdellah BENYOUCEF d'avoir accepté de juger ce travail ainsi pour m'avoir aidé et me conseillé durant la durée de ce mémoire.
 - ❖ Je tiens à remercier également Monsieur Amine CHIKH pour ses conseils judicieux qu'ils ont été une aide précieuse.
 - ❖ Enfin, je remercie également toute ma famille, mes camarades, et mes amis.
- 



DEDICACES

Je dédie ce raisonnable travail

**A mes parents, pour toutes les peins qu'ils
se sont eus en accompagnant chacun de mes
pas, dans mes études.**

**A toute ma famille, mes enseignants et
mes amis.**

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre 1. Généralités sur les satellites et environnement spatiale

I.1. Introduction	3
I.2. Caractéristiques de l'environnement spatial.....	3
I.2.1. vide	3
I.2.2. Rayonnement énergétique.....	4
I.2.3. Microgravité.....	4
I.2.4. Espace vide.....	4
I.3. Système satellite.....	5
I.3.1. Plateforme.....	5
I.3.2. Charge utile.....	6
I.3.2.1. Structure.....	6
I.3.2.2. Sous système contrôle thermique.....	10
I.3.2.3. Sous système énergie de bord	11
I.3.2.4. Sous-système gestion de bord (Télémessure Télécommande).....	11
I.3.2.5. Sous-système propulsion.....	12
I.3.2.6. Sous-système contrôle d'attitude et de l orbite.....	13
I.3.2.7. Câblage et Pyrotechnie.....	13
I.4. Conclusion.....	13

Chapitre 2. Architectures du système d'énergie de bord d'un satellite

II.1. Introduction.....	15
II.2. Topologies des systèmes photovoltaïques.....	15
II.3. Génération de l'énergie électrique(le générateur solaire).....	16
II.3.1. Généralités.....	16
II.3.2. Conversion (l'effet) photovoltaïque.....	17
II.3.3. Différents types des cellules photovoltaïques	18
II.3.3.1. Cellule en silicium monocristallin.....	18
II.3.3.2. Cellule en silicium multi cristallin.....	18
II.3.3.3. Cellule en silicium amorphe.....	18
II.3.3.4. Cellule a base de Couches minces.....	19
II.3.3.5. Cellule Tandem.....	19
II.3.3.6. Cellule multi jonction (a base de silicium)	20
II.3.4. Définition d'un semi-conducteur.....	21
II.3.4.1. Structure cristalline et bandes d'énergie.....	21
II.3.4.2. Semi-conducteur.....	22
II.3.4.3. Notion de « trou » : génération et recombinaison	22
II.3.4.4. Semi-conducteur dopé.....	23
II.3.5. Assemblage de semi-conducteurs : jonction PN	24
II.3.5.1. Réalisation physique	24
II.3.5.2. Étude à l'équilibre (jonction non polarisée)	24
II.3.5.3. Barrière de potentiel	26
II.3.5.4. Étude de la jonction polarisée	27
II.3.6. Caractéristiques électriques d'une cellule solaire.....	28
II.3.6.1. Courant de court- circuit (I_{cc})	29
II.3.6.2. Tension de circuit ouvert (V_{co})	29
II.3.6.3. Facteur de forme (FF)	29
II.3.6.4. Rendement de conversion (η)	30
II.3.7. Module photovoltaïque.....	30
II.3.7.1. Association en série.....	31
II.3.7.2. Association en parallèle	31

II.4. Stockage d'énergie (Les batteries)	32
II.4.1. Généralités.....	32
II.4.2. Principe de l'accumulateur.....	32
II.4.3. Caractéristiques d'une batterie.....	34
II.4.3.1. Poids et volume.....	34
II.4.3.2. Tension.....	34
II.4.3.3. Durée de vie d'une batterie	35
II.4.3.4. Énergie massique d'une batterie.....	35
II.4.3.5. Profondeur de décharge d'une batterie.....	36
II.4.3.6. Capacité d'une batterie (notée Cn, unité Ampère-heure (Ah)).....	36
II.4.3.7. Rendement d'une batterie.....	38
II.4.4. Problèmes liés aux batteries.....	40
II.4.4.1. Stratification.....	40
II.4.4.2. Sulfatation.....	40
II.4.4.3. Oxydation des électrodes et des bornes.....	40
II.4.4.4. Dégagements gazeux.....	41
II.4.4.5. Autodécharge d'une batterie.....	41
II.4.5. Description de la batterie Ni /Cd	41
II.4.5.1. Introduction.....	41
II.4.5.2. Constitution.....	42
II.4.5.3. Réactions électrochimiques	42
II.4.5.4. Caractéristiques.....	43
II.4.5.5. Différentes familles d'accumulateurs NiCd	45
II.5. Conclusion	46

Chapitre 3. Estimation de la température par la technique neuro-floue

III.1. Introduction.....	48
III.2. Structure de commande neuro floue	48
III.2.1. Définition.....	49
III.2.2. Principe de fonctionnement.....	49
III.2.3. Architectures Neuro-Floues.....	49
III.2.3.1. Première architecture.....	50
III.2.3.2. Deuxième architecture	52
III.2.3.3. Troisième architecture.....	53
III.2.4. Méthodes des combinaisons Neuro-Floues.....	54
III.2.5. Systèmes Neuro-Flous hybrides integres.....	54
III.2.5.1. Systèmes Neuro-Flous integres type Mamdani	54
III.2.5.2. Systèmes neuro-flous integres type Takagi-Sugeno	55
III.2.5.3. Système ANFIS (Adaptative Network Fuzzy Inference System).....	56
III.3. Application pour l'estimation de la température.....	57
III.3.1. Alsat- 1	57
III.3.2. Batterie d'un microsatellite.....	58
III.3.3. Applications.....	58
III.3.3.1. Base d'apprentissage et Mise en forme des données pour un réseau neuro- flou.....	59
III.3.3.2. prétraitement des données.....	59
III.3.3.3. Résultats.....	60
III.4. Conclusion	60
Conclusion générale.....	61
Références bibliographiques.....	62

INTRODUCTION GENERALE

Une exigence essentielle de la mission d'un satellite est la continuité de fonctionnement, en période d'enseillement comme une période d'éclipse, tout au long de sa vie opérationnelle ; Pour cela est nécessaire de pouvoir exploiter une source d'énergie fournissant l'électricité dont l'ensemble de sous-système a besoin. Cette source d'énergie est généralement constituée de trois composants principaux : les générateurs primaires (dans le cas le plus générale, les générateurs primaires des satellites sont des générateurs photovoltaïques), les éléments de stockage (assurés par les accumulateurs électrochimiques) et l'électronique de conditionnement.

Les accumulateurs Nickel/Cadmium (Ni/Cd) équipent malgré leur faible énergie massique, la majorité des applications spatiales depuis le milieu des années 1970 en raison de leur longue durée de vie, la capacité, le rendement, la profondeur de décharge, l'autodécharge, l'énergie massique, et la température de fonctionnement représentent les principaux caractéristiques de la batterie

La plupart des techniques de commande des systèmes sont basées sur la connaissance du processus à commander et de son environnement. Or, les phénomènes mis en cause sont généralement trop complexes pour que l'on puisse établir rigoureusement un modèle mathématique de leur comportement. De plus, l'influence de l'environnement est souvent difficile à estimer et varie avec le temps. En conséquent, on remarque que la plupart des systèmes non linéaires sont caractérisés par des paramètres incertains et/ou variable en fonction du temps, ce qui complique leur commande en vue d'améliorer leurs performances.

L'objectif de ce mémoire vise l'application de nouvelles techniques artificielles et intelligentes de commandes non linéaire pour l'estimation de la température des batteries. Dans ce contexte, nous avons proposé une des solutions pour pallier ce problème consiste à introduire l'approche Neuro-Floue permettant d'estimer la température de la batterie d'Alsat-1. La combinaison Neuro-Floue peut résoudre le problème d'identification en utilisant le réseau de neurone et le problème de contrôle par la logique floue.

Pour cela, il est possible de construire le système neuro-flou durant la phase d'apprentissage en se basant sur un ensemble de solutions obtenues par la télémétrie à partir de la station sol d'Alsat-1(Arzew).

Le premier chapitre sera réservé aux généralités sur les satellites et l'environnement spatial. Une étude théorique est dédiée à la structure du satellite tout en présentant les sous-systèmes et leur fonctionnement.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de l'architecture du système d'énergie de bord du microsatellite ALSAT-1 ; le système photovoltaïque; et l'élément de stockage (la batterie Ni/Cd) avec une présentation de ses caractéristiques et l'influences de la température dans sa performance

Dans le troisième chapitre, nous essayons d'estimer l'effet de la température sur la batterie du microsatellite d'Alsat-1, sur une période de courte durée en utilisant l'approche neuro-floue (réseaux de neurones et logique floue). Le système neuro-flou permet non seulement d'établir des relations analytiques importantes pour la phase d'estimation, mais aussi une grande flexibilité, puisqu'il n'y a aucune restriction quand au nombre de paramètre du système en entrée et en sortie. La phase d'estimation de l'effet de la température devient alors possible grâce à la relation explicite donnée par le système neuro-flou.

Nous achèverons notre manuscrit par une conclusion générale sur tout ce qui a été dit ou obtenu à propos de l'estimation de la température par approche neuro-floue ainsi que les perspectives prometteuses existantes dans ce domaine d'études intéressant les laboratoires de recherche.

Chapitre I

Généralités sur les Satellites et Environnement Spatial

I.1. Introduction

La grande variété des satellites rend difficile d'imaginer une classification rationnelle car il n'existe pas de critère unique selon lequel on peut les comparer. En effet, doit-on les différencier par leur masse ou par leur taille ? Ce critère serait envisageable car l'apparition depuis quelques années de la notion de petits satellites qui seraient plus simples et plus économiques que les grands satellites complexes, suscite un intérêt croissant. Peut-on les classer par la puissance électrique émise ou encore la quantité d'information transmise en bits par seconde ? Doit-on accorder une importance essentielle à leur durée de vie en orbite qui est un facteur important de la rentabilité économique des investissements consentis ? Ou encore, doit-on accorder un poids particulier à leur fiabilité et la sûreté de fonctionnement ? Tous ces critères, pris isolément, conduisent à des classifications quelque peu arbitraires par exemple la classification à partir du type de mission (scientifique, ou application), localisation du satellite dans l'orbite (géostationnaire, héliosynchrone.) ou à partir des caractéristiques physiques (la forme, la masse...).

Dans ce chapitre, nous essayons de présenter les caractéristiques de l'environnement spatial et décrire les concepts de base des satellites, ainsi que les différents blocs qui constituent les satellites.

I.2. Caractéristiques de l'environnement spatial

L'environnement spatial dont on parlera ci-après est celui qui concerne le plus de projets spatiaux, mais il faut bien noter que les projets sont multiples et divers (satellites terrestres, sondes interplanétaires ballons atmosphériques, véhicules planétaires, ...) [1,2].

I.2.1 Vide

Dès 100 km d'altitude la pression atmosphérique autour de la terre n'est plus que de 10^{-3} torrs, soit de l'ordre de 10^{-6} fois la pression au niveau du sol, et à 200 km nous n'avons plus que 10^{-6} Torr. Les échanges thermiques par chocs moléculaires entre les molécules gazeuses constituant l'atmosphère et un satellite en orbite classique seront donc parfaitement négligeables devant les autres formes d'échanges conduction/rayonnement alors que la convection naturelle au sol permet de parler de température ambiante en se référant à la température de l'air.

I.2.2 Rayonnements énergétiques

Pour autant que l'on s'intéresse au bilan thermique du satellite les sources de rayonnement qui interviendront sont le soleil la terre (ou la planète au foyer orbital), la réflexion Albédo du flux solaire par la terre (ou planète).

I.2.3 Microgravité

Le fait que la force centrifuge équilibre la force de gravité au barycentre du satellite implique que tout élément de celui-ci ne sera plus soumis qu'à des "résidus" de force de gravité ou des accélérations «parasites» dues par exemple à la vitesse de spin. Cela amène à parler de microgravité et à ne plus prendre en compte les

effets classiques de la pesanteur terrestre comme la convection naturelle dans un fluide (gazeux ou liquide) et permettra par contre l'utilisation de forces négligeables ou de second ordre au sol (capillarité,...).

I.2.4 Espace vide

Bien que ce terme ne soit pas très adapté, il nous permet de préciser qu'autour du satellite le nombre de corps «proches» et «chaud» est très généralement limité (Terre, Lune, Soleil, un autre véhicule), qu'ainsi les sources de rayonnements «énergétiques» sont bien identifiées et que tout rayonnement émis par le satellite ne reviendra pas sur lui (hormis par réflexion sur un véhicule proche éventuellement). Le fonds du ciel est généralement assimilé à un corps noir à 4 K.

I.3. Système satellite

Un satellite est un objet qui doit remplir des fonctions spécifiques dans un environnement spatial. Son architecture résulte des objectifs définis par la mission et des contraintes particulières liées à son évolution dans l'Espace.

Un satellite est un récepteur/ transmetteur sans fil spécialisé qui répète des radios fréquence. Le satellite est lancé par une fusée et placé en orbite autour de la terre. Tout satellite comporte donc essentiellement une charge utile, constituée par les instruments liés aux objectifs de la mission et une plateforme de service comportant tout ce qui est nécessaire pour assurer le bon fonctionnement des instruments pendant la durée de vie prévue.

Parmi les contraintes particulières au milieu spatial, il faut souligner :

- les contraintes d'autonomie énergétique.
- les contraintes thermiques (-160° C à l'ombre de la Terre ; + 150°C en plein soleil).
- les contraintes mécaniques (accélérations et vibrations lors du lancement).
- les contraintes de masse : le satellite doit être "léger" pour le lanceur [3].

Le schéma ci-contre résume les principaux éléments d'architecture d'un satellite :

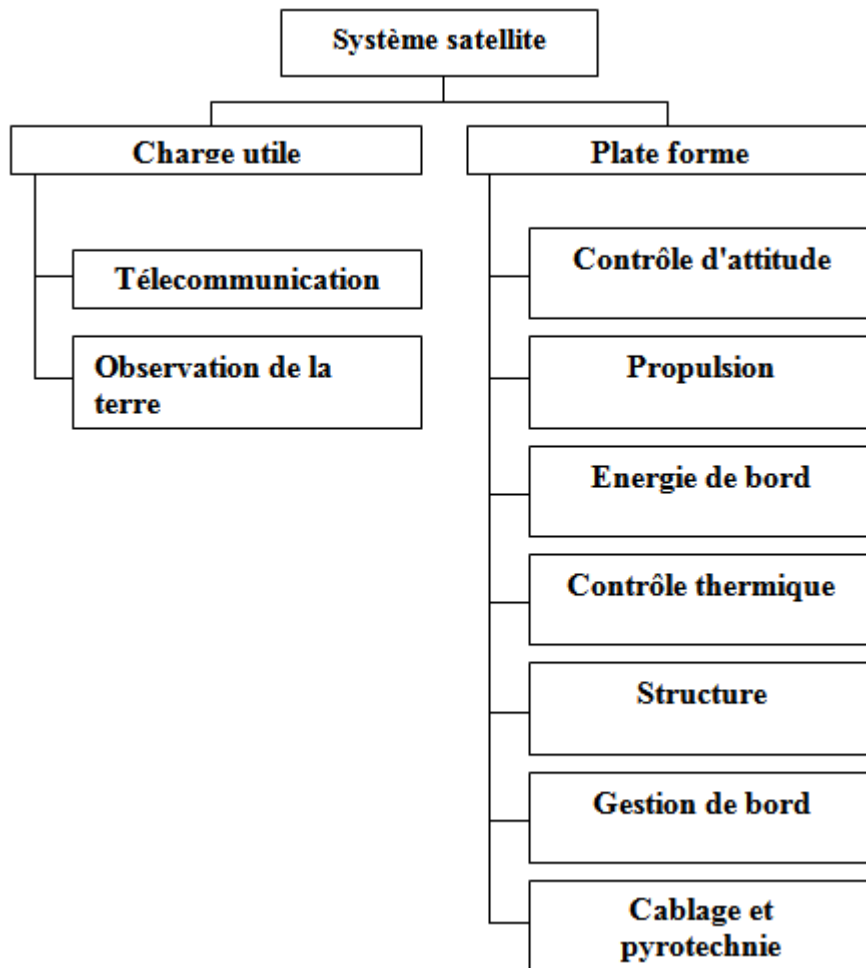


Figure I.1 : Principaux éléments d'architecture d'un satellite

I.3.1 Charge utile :

La charge utile comprend d'une part les instruments spécifiques et d'autre part une case à équipements qui contient les enregistreurs de données et l'informatique de bord comme télescopes, caméras, instruments de mesure d'environnement, radars, etc.

I.3.2 Plate forme :

La plateforme comporte un module de service et un module de propulsion. Ces deux modules regroupent tout ce qui est nécessaire à l'autonomie énergétique du satellite, à sa bonne orientation dans l'Espace, aux corrections éventuelles de trajectoire, à sa communication avec les stations au sol.

Cette plateforme peut être d'un modèle unique pour des satellites dédiés à des missions différentes.

- La structure,
- Sous système de contrôle thermique,
- Sous système énergie de bord,
- Sous système gestion de bord (Télémesure et Télécommande),
- Sous système propulsion,

- Sous système de détermination et de contrôle d'attitude et d'orbite,
- Le câblage et pyrotechnie,

I.3.2.1 Structure

Les fonctions essentielles de la structure consiste à :

- Assurer l'interface avec le lanceur et la distribution des charges dues au lancement.
- Servir de support aux divers équipements.
- Servir d'écran de protection pour les équipements, vis à vis des rayonnements rencontrés dans

l'espace.

I.3.2.2 Sous système contrôle thermique

Comme son nom l'indique, ce sous-système se charge de contrôler les températures des équipements, en les gardant dans leurs plages de températures de fonctionnement, en utilisant un contrôle passif, telles que les couvertures de surface, les isolations, et, ou un contrôle actif tels que les radiateurs, les volets mobiles, etc... [3].

I.3.2.2.1. Besoins

Pour garantir le fonctionnement normal d'un équipement, le contrôle thermique devra assurer que sa température reste dans des gammes prédéfinies (spécifications) :

Niveau de température	- par exemple	$-20^{\circ}\text{C} < T < +50^{\circ}\text{C}$
Stabilité temporelle de température	- par exemple	$dT/dt < 5^{\circ}\text{C}/\text{heure}$
Gradients maximum de température	- par exemple	$dT < 5^{\circ}\text{C}$ sur un équipement

I.3.2.2.2. Environnement thermique en orbite

En raison de la très faible densité de l'atmosphère à l'altitude de l'orbite ($20 \times 10^{-14} \text{ kg/m}^3$) et en raison de la micropesanteur, il ne peut y avoir de convection et la température du satellite est uniquement pilotée par les échanges radiatifs avec son environnement.

Les sources de chaleur sont d'abord les dissipations des équipements. L'énergie consommée par les modules d'électronique est transformée en grande partie en chaleur (effet Joule). La seule énergie qui ne dégénère pas en chaleur est le rayonnement électromagnétique (utile) des antennes. Le fonctionnement des tuyères de contrôle d'orbite produit aussi de la chaleur, de même que la charge et la décharge des batteries.

Les rayonnements externes qui éclairent les murs du satellite constituent la seconde source principale de chaleur. La figure ci-dessous schématise ces flux.

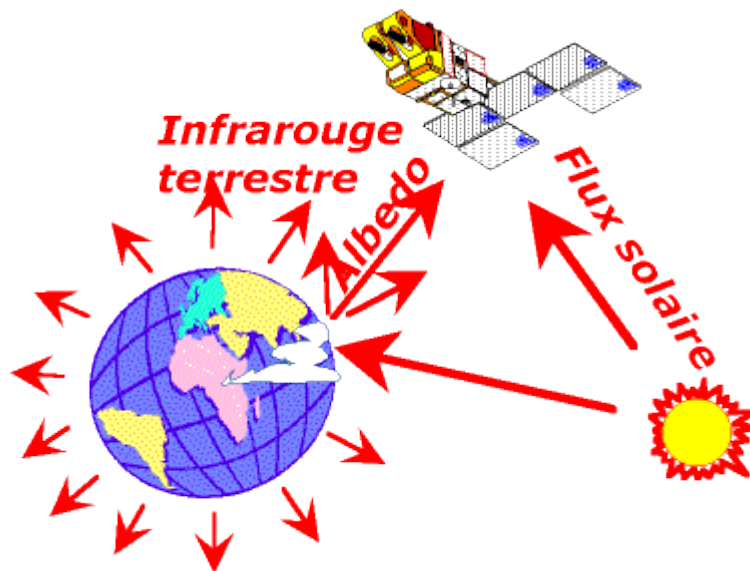


Figure I.2 : Rayonnements externes

Le flux solaire direct hors atmosphère est d'environ 1375 Watts/m². Ce rayonnement est essentiellement situé dans le spectre visible (90 %) et proche infrarouge (10 %).

Le flux albédo est constitué par le flux solaire réfléchi par la Terre et les nuages.

Son spectre est de même nature que celui du Soleil avec quelques bandes d'absorption dues à la traversée de l'atmosphère et à la nature des surfaces réfléchissantes. A l'altitude de SPOT 4 ce flux représente environ 300 W/m² au point subsolaire, avec une moyenne orbitale de 100 W/m² pour les surfaces orientées vers la Terre.

Du point de vue thermique, la Terre vue de l'espace est équivalente à une sphère à -18°C environ. Elle émet en permanence un rayonnement électromagnétique dans le spectre infrarouge aux environs de 10 µm à 12 µm. Cela représente une énergie incidente de 190 W/m² sur les surfaces orientées vers la Terre.

A l'altitude des satellites le fond du ciel est noir. L'ensemble des rayonnements (gamma, X, Ultra Violet, visible, infrarouge et radio) qui proviennent du fond du ciel représentent un total d'énergie extrêmement faible. Thermiquement, le ciel peut être assimilé à un "puits froid" à 3° Kelvin.

Le fond du ciel à 3° K constitue la principale source froide pour les satellites. Cet environnement radiatif entraîne des variations extrêmes de température de "peau" du satellite (on appelle ainsi les revêtements du satellite). Ainsi les feuilles externes des matelas isolants peuvent atteindre 80°C sur la face au Soleil et descendre à -200°C sur les faces à l'ombre du satellite [3].

I.3.2.2.3. Équilibre thermique du satellite



Figure I.3 : Peau super isolante du satellite

Il faut établir un bon équilibre entre les sources de chaleur et les sources de froid. Pour cela des zones radiatives sont aménagées sur les surfaces externes. Ces radiateurs sont couverts par un revêtement spécial, le SSM (Second Surface Mirror) dont les propriétés thermo-optiques permettent un bon dosage entre les flux externes absorbés et le flux rayonné vers le fond du ciel.

Les surfaces non utilisées comme radiateur sont couvertes par des matelas dits "super isolants" dont l'efficacité sous vide est spectaculaire (100 fois meilleure que pour les polystyrènes).

Sur les photographies du satellite, on peut remarquer les radiateurs à leur aspect de miroirs légèrement bleutés. Les matelas super isolants ont une couleur jaune doré due à l'utilisation de films aluminés de polyamide (Kapton R) [3].

I.3.2.2.4. Aménagement thermique interne

Si le dimensionnement des surfaces radiatives permet d'obtenir un niveau moyen de température du satellite correct, il faut ensuite optimiser le contrôle thermique individuel de chaque équipement.

En fonction de la température souhaitée et de la dissipation propre de chaque équipement, celui-ci sera plus ou moins couplé thermiquement avec une surface radiative. Ce couplage sera selon le cas une liaison conductrice (conduction par les structures métalliques du satellite ou liaison spécifique) ou bien un couplage radiatif entre la peau de l'équipement et les murs du satellite.

Bien sûr, cet aménagement doit tenir compte de contraintes liées à l'architecture générale du satellite (contraintes fonctionnelles et contraintes mécaniques).

Pendant les phases froides de la mission et en particulier lorsque les équipements sont peu utilisés, il est nécessaire de les maintenir chauds au moyen de résistances chauffantes. C'est le logiciel de vol qui gère le système de contrôle thermique. Les mesures de température, faites au travers d'un réseau de capteurs sont

comparées à des valeurs de consigne, les éléments chauffants sont activés et pilotés en fonction du juste besoin.

Certains éléments demandent une régulation très fine de température. C'est le cas des gyroscopes ou de l'horloge de bord qui sont pilotés au dixième ou au centième de degrés. Pour assurer cette stabilité, ces composants sont placés dans un environnement plutôt froid et ils sont ensuite réchauffés avec une puissance asservie par une loi de commande du type PI (Proportionnel - Intégral).

En cas de panne grave du satellite (mode survie) celui-ci s'oriente automatiquement dans une direction fixe par rapport au Soleil et seuls les équipements essentiels sont maintenus en activité. Un réseau de réchauffeurs électriques asservi par des thermostats mécaniques (bilames) permet de maintenir un niveau de température assurant la sauvegarde des équipements [3].

1.3.2.2.5. Développement et qualification du contrôle thermique

La définition des moyens à mettre en œuvre pour assurer le contrôle thermique s'appuie sur une modélisation numérique détaillée du satellite et sur de gros logiciels de calcul des flux et des températures.

Des essais en laboratoire sur des échantillons de matériaux et sur des maquettes partielles étayent cette modélisation.

Avant son lancement le satellite subit des essais dans un grand simulateur d'environnement spatial qui permet de reproduire des conditions représentatives de vide et de température.

Pendant les premiers jours en orbite une analyse détaillée des télémessures permet de statuer sur le bon fonctionnement du contrôle thermique et éventuellement de modifier les consignes de régulation [3].

1.3.2.3 Sous système énergie de bord

Le satellite est composé de dispositifs très complexes tels que les panneaux solaires, les antennes de télécommunication, les senseurs....etc. Ces dispositifs comme tous autres, ont besoins d'être alimentés pour fonctionner. Au premier abord, le mot alimentation révèle peu de choses à un utilisateur d'un dispositif usuel, car son seul souci est d'obtenir le moyen pour l'alimenter, sans se préoccuper de la manière dont celui-ci est construit. Pour un spécialiste en spatiale, l'alimentation est la première contrainte qui le préoccupe.

Actuellement, la source la plus utilisée si ce n'est pas l'unique, est le Soleil, car il constitue un moyen non exhaustif et permanent, et son utilisation ne nécessite pas qu'il soit embarqué ou transmis à partir du sol, d'où l'économie en masse du satellite et en coût de la mission.

Le sous-système énergie de bord (figure 1.4) est chargé de fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement du véhicule spatial dans toutes les conditions rencontrées durant sa mission et ceci jusqu'à la fin de la durée de vie prévue [4].

On peut distinguer trois composantes principales :

- les générateurs primaires.

- les générateurs secondaires ou batteries.
- l'électronique de conditionnement.

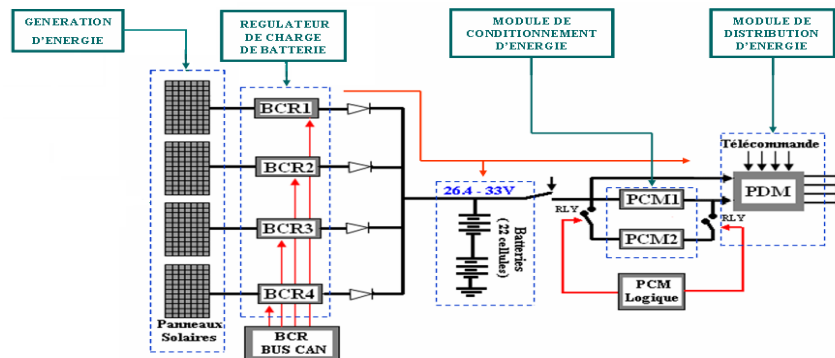


Figure 1.4 : Système d'énergie de bord d'Alsat 1.

I.3.2.4 Sous-système gestion de bord (Télémessure et Télécommande)

Le sous système gestion bord constitue le nœud des informations transitant à bord entre les différents équipements et dont la conception est de plus en plus unifiée autour de microprocesseurs assurant la gestion des données, leur mise en forme, le codage et le décodage et aiguillant les informations vers les équipements en utilisant des artères de données tout en permettant au satellite [1] :

- De transmettre au sol, toutes les informations relatives au fonctionnement du satellite telles que :
 - ✓ les données de servitude : comme les mesures de températures, de tension, de courant. Ces données permettent de contrôler le fonctionnement du satellite ou de détecter des anomalies.
 - ✓ les données concernant la mission du satellite (résultat des mesures spécifiques à la mission : telle que la transmission d'une image dans le cas d'une mission d'observation de la Terre, etc...).
- De recevoir les signaux de télécommande venant du sol.
- De distribuer aux équipements, les ordres ou les séquences d'ordres nécessaires à leur bon fonctionnement ou à la configuration du satellite.

I.3.2.5 Sous-système propulsion

Le sous-système propulsif a pour fonction de créer les accroissements de vitesse nécessaires à toutes les manœuvres du satellite au cours de toute sa vie depuis la manœuvre d'apogée (éventuelle) jusqu'aux manœuvres périodiques de contrôle de poste ou de contrôle d'attitude, et éventuellement, la manœuvre de désorbitation.

On distingue deux grandes classes de systèmes propulsifs qui peuvent être intégrés dans un satellite. La première constitue les systèmes propulsifs utilisés pour transférer le satellite d'une orbite de transfert vers une orbite définitive figure (I.5). Ces systèmes sont comparables aux étages supérieurs des lanceurs. Les moteurs

d'apogée, considérés comme un type classique de ces systèmes, sont destinés dans le cas d'un satellite géostationnaire, à le faire passer de l'orbite de transfert à l'orbite équatoriale géostationnaire. Représentant une masse équivalente à celle du satellite en fin de vie (encore appelée masse sèche du satellite), la masse d'ergol nécessaire pour réaliser un tel transfert, est extrêmement importante. La seconde classe représente les systèmes propulsifs qui assurent pendant toute la durée de vie opérationnelle du satellite, son maintien à poste et en attitude. Les besoins en masse d'ergol sont nettement moins importants par rapport aux systèmes de la première classe ; ils sont pour les satellites géostationnaires et par année de durée de vie, de 1 à 2% de la masse du satellite en fin de vie [1,2].

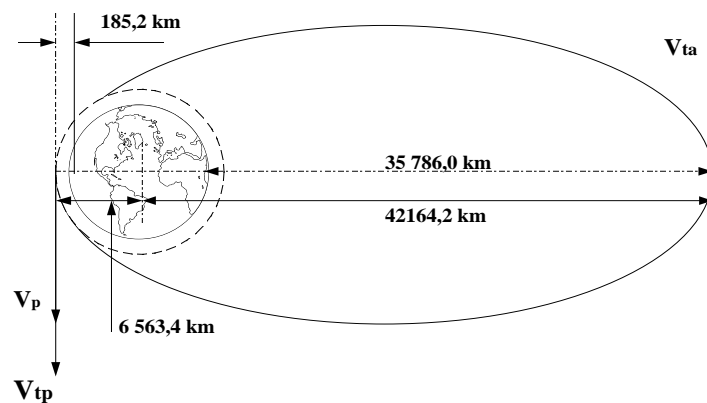


Figure I.5 : Paramètres orbitaux pour les orbites d'attente et de transfert.

1.3.2.6 Sous système contrôle d'attitude et d'orbite

Le contrôle d'attitude et d'orbite détermine l'attitude du satellite par l'orientation d'un système d'axes liés au satellite par rapport à des repères externes (Terre, soleil, étoiles) à l'aide de détecteurs d'attitude et détermine en fonction de l'attitude recherchée les commandes d'attitude en imprimant des corrections de vitesse autour du centre de gravité. Il a en outre pour fonction de déterminer les incréments de vitesse à effectuer pour assurer les manœuvres d'orbite pendant toute la durée de vie de l'engin spatial.

Avant d'exercer une poussée et maintenir toute sa durée de vie, il faut fournir une attitude, afin que l'incrément de vitesse délivré au satellite soit orienté dans la direction optimale pour acquérir l'orbite et la position du satellite par rapport à la terre, son travail commence pratiquement dès la fin de la propulsion du dernier étage du lanceur, il s'arrête avec la fin de vie du satellite.

a. Contrôle d'Orbite

Le contrôle d'orbite nécessite d'intervenir depuis le sol (TC) et l'orbitographie, dont le but d'assujettir le centre de gravité à se déplacer sur une orbite définie.

Le satellite est soumis à des forces perturbatrices qui modifient son orbite, alors il s'écarte de sa position nominale, or pour chaque satellite il y a une fenêtre qui est vue par une station terrestre (surveillé), et que le satellite doit rester dans cette dernière.

b. Contrôle d'Attitude

Le contrôle d'attitude est réalisé à bord du satellite, dont le but est selon la mission : de maintenir un ou deux axes liés au véhicule dans une direction déterminée qui peut être variable dans le temps [1].

Le SCAO est la disposition de la charge utile (contrôle d'attitude) pour assurer un pointage des antennes vers les zones terrestres désirées, ce pointage satellite → terre est dit «pointage géocentrique » (vers le centre de la terre).

Il y a deux modes pour la stabilisation du satellite :

- Stabilisation passive : pas de moyen de pilotage.
- Stabilisation active : L'existence de moyen de pilotage capable de créer des couples de contrôle en utilisation des tuyères (petit propulseur) et des roues à réaction.

La stabilisation d'un satellite fait appel en général à plusieurs sous ensembles :

✓ La mesure d'attitude : sont des ensembles de détecteurs optiques pour la plupart, qui associent à une horloge de bord, permettant de déterminer la position du satellite par rapport aux astres, le soleil et la terre.

✓ Les moyens de contrôle : Sont le plus souvent des jets de gaz de propergols, ils peuvent également faire appel à des moyens électromagnétiques en utilisant l'interaction avec le champ magnétique terrestre pour orienter le satellite.

✓ Les électroniques de traitement : Qui à partir des informations des senseurs élaborent les calculs de position du satellite et les manœuvres à effectuer pour la corriger.

I.3.2.7 Câblage et Pyrotechnie

- Câblage : Transmet à chaque équipement la puissance électrique nécessaire à son alimentation, les ordres de télécommande qui lui sont destinés, ou les paramètres de télémétrie [4].

- Surveillance : Ensemble de capteurs enregistrant les paramètres thermiques, l'état des relais...

- Pyrotechnie :

- ✓ Circuits électriques de commande.

- ✓ Éléments pyrotechniques nécessaires à la mise en configuration du satellite (déblocage d'éléments mécaniques tels que le générateur solaire, les antennes, les vannes de propulsion de leur configuration).

I.4. Conclusion

On ne peut pas, a priori, donner de recette pour définir la configuration générale, l'architecture d'un satellite. Celle-ci est influencée au premier lieu par la définition de la mission qui peut être différente d'un satellite à l'autre...

On peut cependant identifier deux grands types de mission :

- Missions scientifiques.
- missions d'application.

Les satellites scientifiques sont les premiers qui ont été lancés. Ils ont permis d'une part de mieux connaître l'environnement terrestre et donc de préparer la voie aux successeurs, et d'autre part d'effectuer des découvertes qui ont considérablement augmenté notre niveau de connaissances.

Les satellites d'application se caractérisent, en gros, par le fait qu'ils sont à vocation pratique, donc terrestres.

Deux grandes catégories peuvent être dégagées :

- satellites d'observation de la terre (météo-ressources terrestres-observations),
- satellites de télécommunications.

Chapitre II

Architecture du Système d'Énergie de Bord d'un Satellite

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse tout particulièrement à l'architecture du système d'énergie de bord du microsatellite ALSAT-1 à savoir : le système photovoltaïque et la batterie.

II.2. Topologies des systèmes photovoltaïques

Tous les systèmes d'énergie quelque soit la mission ont une chose en commun, ils prennent un grand pourcentage de la masse du satellite. Pour cette raison, il n'y a pas un modèle de topologie de système d'alimentation standard, et pour chaque mission le système d'alimentation doit être conçu selon les besoins afin d'obtenir un compromis entre performances optimales, poids et une quantité minimale de cellules solaires, etc. Chaque conception d'un système d'alimentation débute avec un bilan de puissance. C'est de calculer et d'évaluer la taille du système d'alimentation et combien de cellules sont nécessaires, etc. La durée de vie de la mission doit être prise en considération, ainsi que la dégradation des composants, de l'orbite, etc., avant de prendre des décisions très difficiles, particulièrement quand le reste de l'engin spatial est toujours dans un état de conception et que tout est susceptible de changer plusieurs fois avant la conception finale de l'engin spatial [5].

Il existe deux types fondamentaux de configuration du système d'alimentation :

1. Le bus non régulé ou distribué.
2. Le bus régulé ou centralisé.

Le bus non régulé représenté par la figure II.1 signifie que le sous système à alimenté reçoit l'alimentation électrique directement du GPV. Le sous système doit lui même prendre soin de réguler les fluctuations de la puissance d'entrée.

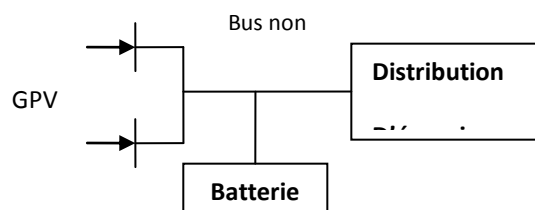


Figure II.1 : Bus non régulé.

Dans le cas du bus régulé, l'énergie électrique issue du GPV est directement régulée et distribuée sous forme de tensions électriques fixes. Souvent une combinaison des deux techniques est utilisée ; un bus régulé pour des tensions standard et un bus non régulé pour la batterie. Le bus régulé tel que le montre la figure II.2 est donc de nouveau subdivisé en plusieurs architectures.

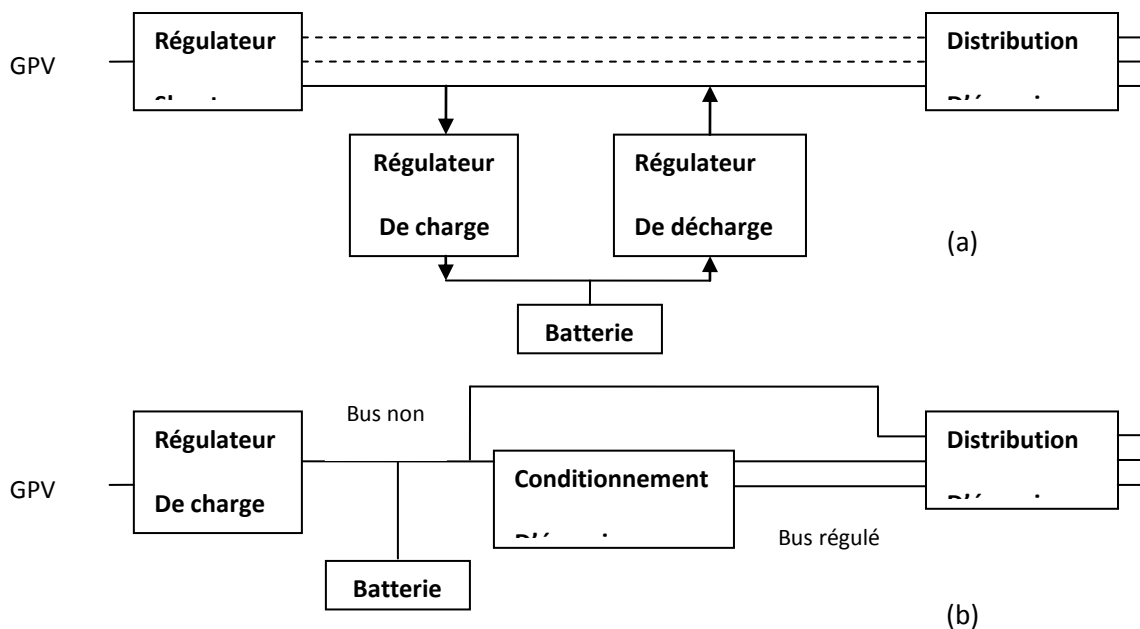


Figure II.2 : Bus régulé.

Dans le premier système figure II.2 (a), un régulateur shunt prend soin de convertir l'énergie solaire dans un bus régulé. Un régulateur de charge de batterie prend soin de charger la batterie en convertissant la tension du bus en tension de batterie. Un régulateur de décharge de batterie convertit la tension de batterie en tension de bus régulée pendant les périodes d'éclipse.

Le deuxième système figure II.2 (b) représente la configuration utilisée dans la conception du système énergétique d'Alsac-1 qui sera discutée plus tard. Le premier système tend à être plus efficace pour un engin spatial avec relativement des durées d'éclipse courtes. Le deuxième système est plus efficace pour un engin spatial avec de grandes durées d'éclipse et orbite basse (LEO)

II.3. Génération de l'énergie électrique (le générateur solaire)

Dans ce point la on 'essaye de donner quelque notion sur la conversion photovoltaïque et les différents types des cellules solaires et qu'il est concernée par les applications spatiales

II.3.1. Généralités

Afin d'éviter d'embarquer un générateur thermonucléaire, trop dangereux et contraignant, ou bien une pile à combustible nécessitant l'emport d'une quantité de réactif incompatible avec la durée de vie de 5 ans souhaitée, le choix s'est naturellement porté sur une source renouvelable, disponible et écologique : le soleil.

La définition du générateur solaire prend en compte les variations du flux solaire, les flux de radiation de particules électrons et protons, les bombardements de micrométéorites, les ultraviolets qui créent une dégradation de performance estimée à moins de 2 % par an.

Les panneaux présentent une structure mécanique rigide en nid d'abeille sur une peau en fibre de carbone ; le bras reliant la voile au corps du satellite est formé de tubes de carbone. Ils sont développés par

l'Aérospatiale. Une fois la voile déployée, la surface totale est de 25 m². 8 640 cellules photovoltaïques au silicium de 24 cm² chacune, fabriquées par ASE en Allemagne, sont collées sur une face et totalisent une puissance supérieure à 2 200 W.

Un mécanisme appelé MEGS (Mécanisme d'Entraînement du Générateur Solaire) développé par la SEP permet, par l'intermédiaire du bras, une orientation optimale des panneaux vers le soleil tout au long de l'orbite. Le transport de l'énergie électrique du générateur solaire vers le satellite est réalisé par 10 paires de câbles (associées à 10 sections) qui cheminent le long du bras. La liaison électrique entre la voile solaire et le satellite est réalisée par des contacts de type bagues sur balais collecteurs [3].

II.3.2. Conversion (l'effet) photovoltaïque

L'effet Photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu utilisable. Les cellules photovoltaïques sont donc capables à la fois de permettre le transfert d'énergie du photon absorbé à un électron et la collecte de cet électron de plus haute énergie par un circuit extérieur.

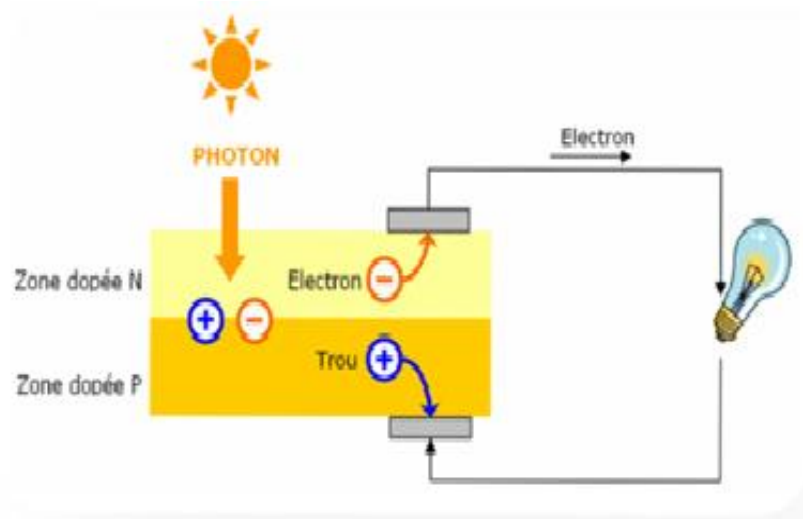


Figure II.3 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique

II.3.3. Différents types des cellules photovoltaïques

II.3.3.1. Cellule en silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal (mono cristallin) de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules.

Ces cellules ont en général d'un bleu uniforme. (Figure II.4).



Figure II.4: Cellule en silicium monocristallin

II.3.3.2. Cellule en silicium multi cristallin

Une cellule photovoltaïque à base de silicium multi cristallin pendant le refroidissement du silicium, il se forme en plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme. On distingue des motifs créés par les différents cristaux. (Figure II.5).



Figure II.5: Cellule en silicium multi cristallin

II.3.3.3. Cellule en silicium amorphe

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaire". (Figure II.6)



Figure II.6: Cellule en silicium amorphe

Remarque : ces cellules sont des premières générations

II.3.3.4. Cellule a base de Couches minces

Les cellules PV (photovoltaïques) dites couche mince constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses.

On distingue deux types

– les cellules en couches minces silicium : Ces cellules ont une ou plusieurs jonctions (a-Si:H + alliages de a-Si:H et/ou c-Si). La faible épaisseur (quelques μm) les rend moins chères mais les rendements sont aussi inférieurs. Les meilleurs rendements sont de l'ordre de 14 % pour des cellules. Le rendement des modules de ce type entre 5 % et 10 %. C'est la seconde technologie en termes de vente avec 5 % environ du marché.

– les cellules en couches minces de la famille des chalcopyrites. Les recherches actuelles sur les matériaux PV portent également sur d'autres matériaux que le silicium, mieux adaptés à une utilisation en couches minces et délivrant de hauts rendements à des coûts relativement bas. Des filières semblent s'imposer progressivement, l'une basée sur le tellure de cadmium (notée CdTe) et l'autre sur les alliages Cuivre-Indium/Gallium-Sélénium (noté CIGS). Il s'agit des cellules en $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ ou $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{Se,S})_2$ (resp. CIGS et CIGSS). Les meilleures cellules CIGS sans cadmium affichent des rendements de 15 % et des modules de 8 % à 14 %. Cette technologie possède de nombreux avantages mais, pour l'instant, reste handicapée par l'utilisation importante d'indium pour devenir une industrie produisant des millions de MW. [6]

II.3.3.5. Cellule Tandem

En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin) absorbant dans des domaines spectraux se chevauchant, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines. (Figure II.7)



Figure II.7: Cellule tandem

II.3.3.6. Cellule multi jonction (a base de silicium)

Les cellules multi jonctions sont constituées de plusieurs couches minces qui utilisent l'épitaxie par jet moléculaire. (Figure II.8)

L'utilisation de cellules triple-jonctions est aussi possible en utilisant des semi-conducteurs à base de Gallium et de Germanium (GaInP/GaInAs/Ge). Ces trois matériaux sont empilés, chacun destiné à convertir une certaine partie du spectre du soleil (ondes courtes, ondes moyennes, rayonnement infrarouge). Les cellules solaires multi-jonctions, qui servent aux applications spatiales (par exemple l'exploration de Mars) depuis presque 20 ans, présentent des rendements impressionnants. Leur potentiel est considérable : en laboratoire, les rendements de conversion de l'énergie lumineuse dépassent 41 %, soit près de deux fois le rendement des cellules photovoltaïques traditionnelles.

L'utilisation d'optiques à concentration pour capturer la lumière du soleil sur ces cellules multi-jonctions permet de réduire considérablement la surface de matériau semi-conducteur nécessaire à la fabrication de ces cellules – seulement quelques millimètres carrés – pour des modules dont l'efficacité est élevée et le coût de fabrication faible.



Figure II.8: Cellule multi jonction

II.3.4. Définition d'un semi-conducteur

II.3.4.1. Structure cristalline et bandes d'énergie

Une structure cristalline est constituée d'un assemblage régulier d'atomes (Figure II.9). Ils mettent en commun des électrons de leur couche périphérique pour constituer des liaisons covalentes.

La couche électronique périphérique assure la stabilité de l'atome. Elle est complète lorsqu'elle comporte 8 électrons pour atteindre la saturation (la couche périphérique ne peut en comporter d'avantage).

Une structure cristalline est constituée d'un assemblage régulier d'atomes (Figure II.9). Ils mettent en commun des électrons de leur couche périphérique pour constituer des liaisons covalentes.

La couche électronique périphérique assure la stabilité de l'atome. Elle est complète lorsqu'elle comporte 8 électrons pour atteindre la saturation (la couche périphérique ne peut en comporter d'avantage).

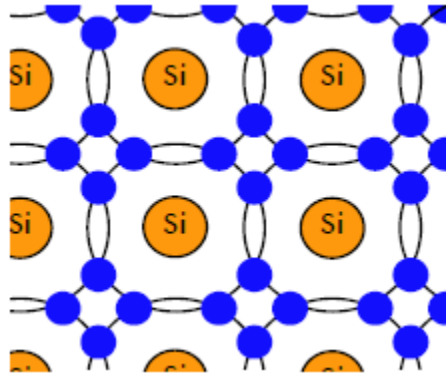


Figure II.9 : Structure cristalline

Dans cette description, les résultats de mécanique quantique montrent que chaque électron possède un niveau d'énergie déterminé. Les deux dernières sont :

- la bande de valence si l'électron est attaché à l'atome ;
- la bande de conduction si cet électron se libère de l'atome (On dit alors qu'il est libre).

Des bandes interdites séparent tous ces niveaux.

Pour illustrer ce phénomène, la représentation énergétique de la Figure II.10 est particulièrement adaptée. La distance énergétique séparant les bandes de conduction et de valence est appelée « gap ». Sa valeur détermine la plus ou moins bonne conductivité du matériau : plus le gap est faible, plus le matériau est conducteur [7,8].

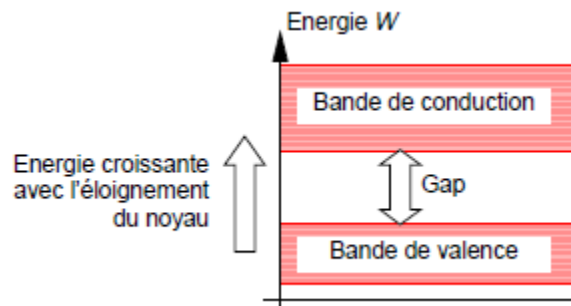


Figure II.10 : Représentation énergétique

II.3.4.2. Semi-conducteur

Un matériau semi-conducteur (SC) est un isolant possédant un faible gap. Il est parfaitement isolant à 0 K, mais devient progressivement conducteur lorsque la température augmente ou par apport d'énergie sous une forme quelconque (lumière ou tout rayonnement électromagnétique, chauffage, etc.). Il reste cependant proche de l'isolant à température ambiante. S'il est pur —on dit que le semi-conducteur est intrinsèque— c'est un élément chimique de valence 4 (la couche périphérique comporte 4 électrons).

Exemples de semi-conducteurs purs (entre parenthèses le symbole puis le numéro atomique) : carbone (C, 6), silicium (Si, 14), germanium (Ge, 32).

Remarque : semi-conducteurs composés avec des éléments de valence 3 et 5 (ex : Arséniure de gallium, GaAs) [7,8].

II.3.4.3. Notion de « trou » : génération et recombinaison

Lorsqu'un électron quitte la bande de valence pour atteindre la bande de conduction, il se déplace librement dans le réseau. L'atome qu'il laisse n'est plus neutre, mais s'ionise positivement. Cet atome dispose donc d'une place inoccupée appelée « trou » (on dit aussi « lacune »).

Un électron venant d'un atome voisin peut alors occuper la place libre en laissant un trou à son tour : c'est le mécanisme de recombinaison d'une paire électron-trou illustré à la Figure II.11

Le mouvement des charges négatives s'accompagne donc nécessairement d'un mouvement des trous dans le sens inverse.

La résistivité électrique du matériau semi-conducteur est très sensible aux variations de la température. Pour la maîtriser, les recombinaisons sont contrôlées par dopage du semi-conducteur.

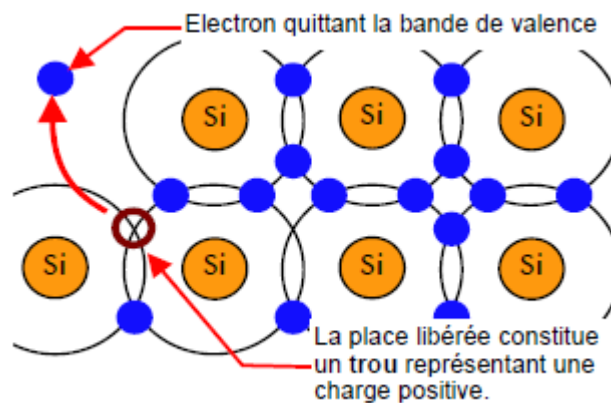


Figure II.11 : Recombinaison paire électron-trou

II.3.4.4. Semi-conducteur dopé

Un semi-conducteur dopé est une structure cristalline dans laquelle on a introduit des atomes étrangers de valence 3 ou 5. L'état électronique s'en trouve modifié : le dopage accroît la conductibilité du cristal tout en le maintenant entre l'isolant et le conducteur.

II.3.4.4.1. Semi-conducteur dopé P

En substituant des atomes de valence 3 (bore, aluminium, gallium, indium), des électrons manquent pour compléter les couches périphériques voisines (Figure II.12). Ceci entraîne la présence de charges positives excédentaires : le semi-conducteur est dopé P (ou type P). A température ambiante, tous les atomes dopants sont ionisés. Chacun a généré un trou qui est libre de circuler dans le réseau. Tout en restant globalement neutre, on distingue donc deux types de porteurs de charges :

- des trous libres ;
- des ions négatifs fixes (les atomes dopants qui gagnent un électron).

II.3.4.4.2. Semi-conducteur dopé N

En choisissant un dopant de valence 5 (phosphore, arsenic, antimoine), le semi-conducteur contient des électrons excédentaires qui traduisent des charges négatives supplémentaires : le semi-conducteur est de type N (Figure II.12).

A température ambiante, tous les atomes dopants sont ionisés, mais le matériau reste neutre. Chacun a libéré un électron qui circule dans le réseau. On distingue alors deux types de porteurs de charges :

- des électrons libres.
- des ions positifs fixes (les atomes dopants qui perdent un électron) [7,8].

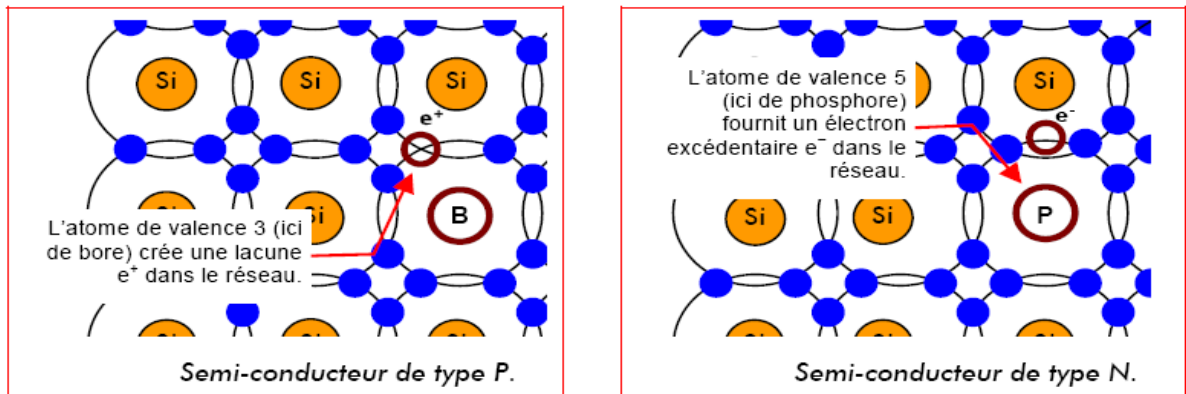


Figure II.12 Type de semi-conducteur

II.3.5. Assemblage de semi-conducteurs : jonction PN

II.3.5.1. Réalisation physique

On dispose de deux barreaux semi-conducteurs. Le premier de type N est juxtaposé au second de type P. C'est à la frontière des deux matériaux que l'on met en place une jonction.

Dans chaque région, on recense différents porteurs :

- la région N contient des ions positifs (cations) fixes et des électrons mobiles qui constituent l'essentiel des porteurs. On dit alors qu'ils sont majoritaires.

- La région P contient des ions négatifs (anions) fixes et des trous mobiles

(Figure II.13).

La quantité de charges reste globalement la même : Chaque région est électriquement neutre.

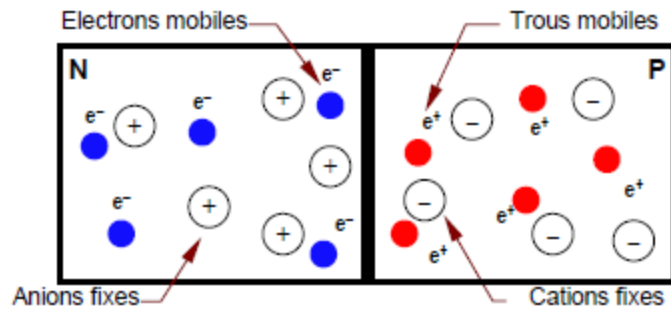


Figure II.13 : Mise en place de la jonction (juste avant)

II.3.5.2. Étude à l'équilibre (jonction non polarisée)

On met en contact les deux semi-conducteurs.

II.3.5.2.1. Processus de diffusion

Les porteurs mobiles ont tendance à occuper tout l'espace disponible. Ils se répandent donc par diffusion dans la région opposée.

Ces porteurs se recombinent avec ceux de signe opposé.

Initialement neutre, la région libérée prend la charge des ions fixes dont le signe est contraire à celui des porteurs (Figure II.14).

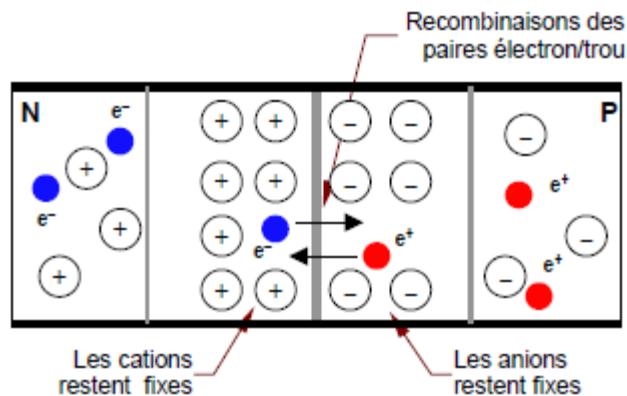


Figure II.14 : Recombinaison des paires électron-trou

II.3.5.2.2. Stabilisation de la diffusion

La recombinaison des porteurs libres laisse alors apparaître deux régions chargées de signes contraires : des cations du côté N, des anions du côté P. Cette région est appelée zone de charge d'espace (ZCE).

Du fait du déséquilibre de charges, un champ électrique \vec{E} apparaît dans la ZCE. Il crée un mouvement de charges opposé au mouvement de diffusion. A l'équilibre la jonction est le siège de deux courants égaux et opposés :

- un courant de diffusion I_d concernant de chaque côté les porteurs majoritaires.

- un courant de conduction (ou de saturation) I_s concernant les porteurs minoritaires attirés par le champ E [7,8].

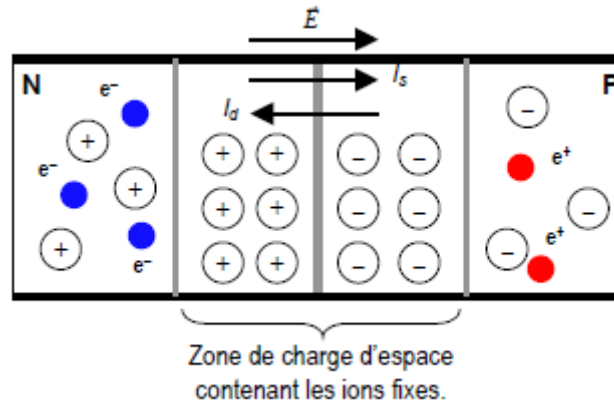


Figure II.15 : Apparition d'une zone de charge d'espace

II.3.5.3. Barrière de potentiel

Pour simplifier l'étude, on envisage une densité de porteurs libres ρ constante de part et d'autre de la jonction au niveau de la ZCE (on dit que la jonction est abrupte). Les longueurs X_N et x_p sont les profondeurs de recombinaison de part et d'autre de la jonction.

La neutralité de la ZCE impose :

$$\rho_N X_N = -\rho_p X_p$$

Avec l'équation de Poisson ($\text{div}E = \frac{-\rho}{\epsilon}$) et moyennant quelques hypothèses, le profil du champ électrique dans la ZCE est linéaire.

Le champ est maximal sur la ligne de jonction :

$$E_{\max} = \frac{\rho_N X_N}{\epsilon} = \frac{-\rho_p X_p}{\epsilon}$$

Par définition, $\vec{E} = -\text{grad}V$. Le profil du potentiel interne de la jonction est parabolique. Une différence de potentiel apparaît aux bornes de la ZCE, c'est la barrière de potentiel U_0 :

$$U_0 = \frac{1}{2} E_{\max} (X_N + X_p)$$

Remarque : $U_0 \approx 0,7$ V pour le silicium et $U_0 \approx 0,3$ V pour le germanium [7,8].

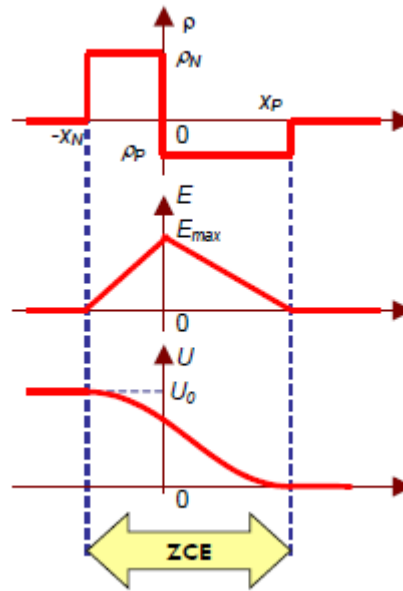


Figure II.16 : Densité de charge ρ , le champ E et la tension U

II.3.5.4. Étude de la jonction polarisée

II.3.5.4.1. Polarisation directe (potentiel le plus positif sur P)

L'application d'une tension v_d à la jonction dans le sens direct tend à abaisser, voire inverser la barrière de potentiel.

Le champ E ne bloque donc plus les porteurs majoritaires : le courant de diffusion augmente rapidement avec v_d . La jonction devient passante et le courant suit une loi exponentielle :

$$i_d = i_s \left(e^{\frac{v_d}{U_T}} - 1 \right) \quad \text{avec } U_T = \frac{kT}{q} \quad (\text{tension thermodynamique})$$

Et k : constante de Boltzman ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$)

T : température en Kelvin(K)

q : charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

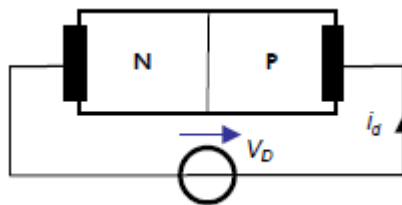


Figure II.17 : Polarisation en direct

II.3.5.4.2. Polarisation inverse (potentiel le plus positif sur N)

Dans le cas d'une polarisation inverse, v_d renforce la barrière de potentiel. Le courant de diffusion est diminué et le courant de saturation est favorisé car le champ E est plus important. Ce dernier reste cependant faible car il ne concerne que les porteurs minoritaires.

La jonction est bloquée et le courant inverse est faible [7,8].

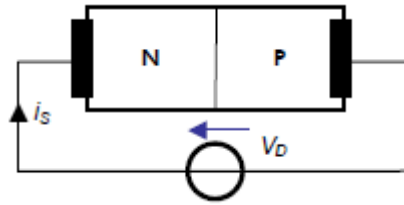


Figure II.18 : Polarisation en inverse

II.3.6. Caractéristiques électriques d'une cellule solaire

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire réelle est :

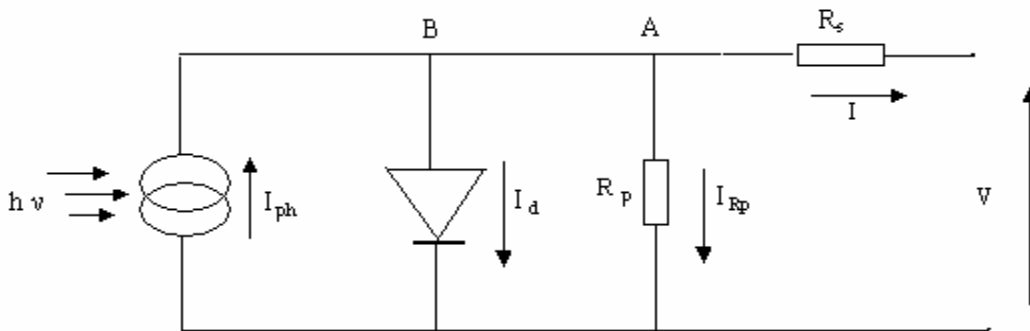


Figure II.19 : Schéma électrique équivalent de cellule solaire

L'équation caractéristique d'une cellule solaire réelle $I = f(V)$, est obtenue en appliquant la loi de nœuds au point A

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{nKT}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V+R_s I}{R_p}\right) \quad (II.1)$$

Cette est une fonction implicite à quatre variables (I_{ph} , I_0 , R_s , R_p).

✓ R_s Est la résistance série. Elle représente la contribution des résistivités du matériau dans les différentes zones de la cellule et des résistances des contacts métalliques. Elle doit alors être la plus faible possible pour permettre facilement la circulation des charges.

✓ R_p ou R_{sh} Est la résistance parallèle (shunt). Elle représente les court-circuits dans la cellule. Cette valeur doit être la plus élevée possible.

✓ R_{charge} ou R_c Est la résistance de charge à laquelle est transmise la puissance utile de la cellule. Sa valeur doit être adaptée au point de fonctionnement optimum.

✓ A : Facteur d'idéalité

✓ I_0 : courant de saturation

✓ I_{ph} : photo courant

Et K : constante de Boltzmann

n : facteur d'idéalité de diode ($n = 2$ pour les faibles tensions et $n = 1$ pour les tensions élevées)

Une cellule solaire est caractérisée par quatre grandeurs :

II.3.5.1 Courant de court-circuit (I_{cc})

D'après l'équation (II.1) on court-circuit, $V = 0$ on a

$$I_{cc} = I_{ph} = K_L \phi \quad (II.2)$$

Avec :

K_L : Constante qui dépend du semi-conducteur.

ϕ : Flux incident.

II.3.5.2 Tension de circuit ouvert (V_{co})

Cette tension est obtenue pour $I = 0$, donc :

$$V_{co} = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (II.3)$$

II.3.5.3 Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme ou le facteur de remplissage (FF) caractérise la forme de la caractéristique de charge. Ce facteur est mesuré pour découvrir l'influence de la résistance série (R_s) et la résistance shunt (R_{sh}) sur la cellule solaire. Il est définie par :

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_{co}} \quad (II.4)$$

Avec :

I_m Courant maximal

V_m : Tension maximale

Chacune de ces grandeurs (V_m , I_m , V_{co} , I_{cc}) est représentée sur la figure

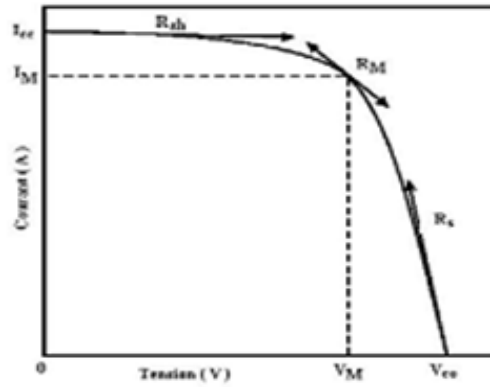


Figure II.20: Points et valeurs remarquables de la caractéristique courant - tension.

II.3.5.4 Rendement de conversion (η)

C'est la grandeur la plus importante dans l'étude d'une cellule solaire. Il donne le rapport entre la puissance électrique optimale délivrée et la puissance solaire reçue par la cellule à une température donnée. Il est définie par :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{inc}}} = \frac{I_m V_m}{P_{\text{inc}} A} = FF \frac{I_{cc} V_{co}}{P_{\text{inc}}} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

A: facteur d'idéalité $A = 1/3$

I_m : Courant optimal.

V_m : Tension optimal

P_{inc} : puissance incidente

II.3.7. Module photovoltaïque

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules auront donc généralement 36 cellules. De plus la fragilité des cellules exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation.

II.3.7.1. Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste la même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

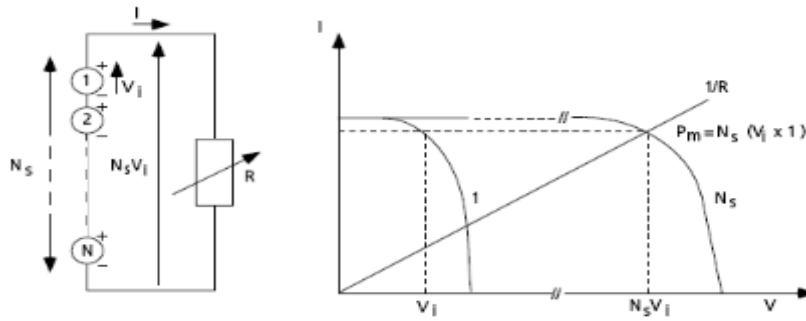


Figure II.21 : Cellules identiques en série

II.3.7.2. Association en parallèle

En additionnant les modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

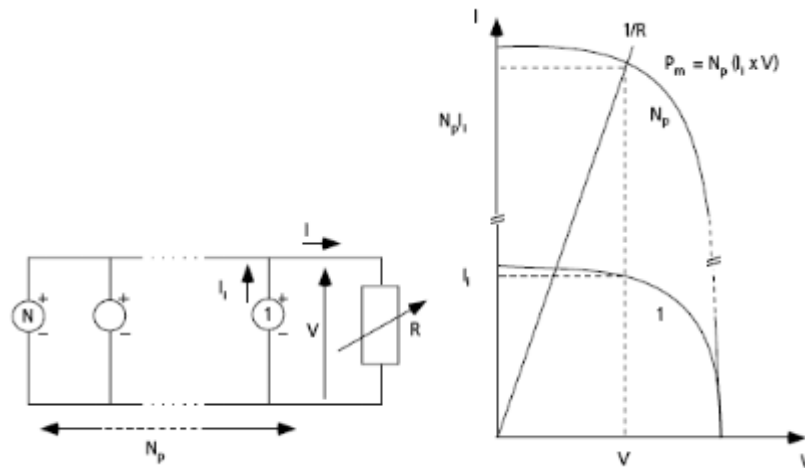


Figure II.22: Cellules identiques en parallèles

II.4. Stockage d'énergie (Les batteries)

II.4.1. Généralités

Compte tenu de l'orbite choisie, le générateur solaire se trouve à l'ombre de la terre à chaque orbite durant une période d'éclipse d'environ 35 min et éclairé pendant 65 min. Le courant n'est généré par les cellules que pendant les périodes éclairées. Il faut donc un élément capable de stocker de l'énergie pendant le jour et de la restituer en éclipse pour alimenter de façon permanente le satellite. De même, pendant les phases de lancement, avant que le générateur solaire ne soit déployé, l'alimentation du satellite doit être assurée.

Elles sont rechargées au sol avant le lancement et autorisent ainsi une autonomie d'énergie de l'ordre de 3 orbites pour attendre que le satellite dispose de courant tant que le générateur solaire n'est pas opérant.

II.4.2. Principe de l'accumulateur

L'accumulateur est un dipôle polarisé. Le pôle positif et le pôle négatif sont toujours bien identifiés.

Entre les deux pôles, la continuité électrique est assurée par un premier système conducteur électronique, puis un système conducteur ionique et à nouveau un système conducteur électronique.

L'association en série des deux jonctions électronique-ionique ou électrode-électrolyte constitue le cœur du système. Chacune des jonctions est polarisée (différence de potentiel E), et est le siège d'une réaction d'oxydoréduction (quantité de courant nF).

Le produit de ces deux grandeurs est l'énergie électrique [9].

Les batteries utilisées pour stocker l'énergie des installations photovoltaïques autonomes sont particulières. On les appelle « batteries à décharge lente », « batteries à décharge profonde » ou encore « batteries stationnaires ». La façon dont on les utilise diffère beaucoup des autres batteries, comme celles des voitures, appelées « batterie de démarrage ».

On demande à la batterie d'une voiture de pouvoir fournir une forte intensité sur un court laps de temps (lors du démarrage) et se recharger très vite lorsque le moteur tourne. Une batterie solaire doit fournir un courant continu sur de longues périodes (parfois plusieurs jours) et se décharger profondément sans se détériorer. Dans les deux cas, cette opération doit pouvoir se renouveler régulièrement pendant des années.

Par conséquent, ces batteries n'ont pas été conçues de la même façon. Il est déconseillé d'utiliser une batterie de voiture à la place d'une batterie solaire, et réciproquement. Même si celle de la voiture revient moins cher et que cela fonctionne en apparence, les économies ne seront que provisoires : la batterie se détériorera vite et il faudra la remplacer beaucoup plus souvent.

Plusieurs éléments techniques rendent les batteries solaires différentes :

1. Leurs électrodes sont plus épaisses, donc plus résistantes, mais offrent moins de surface de contact avec la solution. Cette réduction de surface réduit l'intensité maximale que peut fournir la batterie. Il sera donc impossible de démarrer une voiture avec une batterie stationnaire.

2. Les batteries solaires doivent rester chargées durant de longues périodes sans se vider d'elles-mêmes. La solution (l'électrolyte) qui les compose est davantage purifiée afin d'éviter cette autodécharge. La batterie d'une voiture n'ayant pas été utilisée depuis quelques temps aura besoin d'être rechargée pour que la voiture démarre. Cela n'arrive pas sur une batterie solaire car l'autodécharge est faible.

3. Enfin, il n'y a pas de catalyseurs dans les batteries solaires. Celui-ci augmente la capacité des batteries à fournir de forts courants électriques sur de courts laps de temps, ce qui est utile dans une batterie de démarrage. Mais il accélère également la sulfatation de la batterie lorsqu'elle n'est pas complètement chargée. Or, une batterie de démarrage se recharge très vite lorsque le véhicule roule tandis qu'une batterie solaire reste souvent en partie déchargée [10].

A chaque orbite, les batteries effectuent un cycle complet décharge - recharge. Pour tenir la durée de vie souhaitée, une gestion très fine des batteries s'impose ; des lois de contrôle ont été mises au point après de longues expérimentations :

- contrôle de la quantité d'électricité déchargée par rapport à la capacité nominale de la batterie : la profondeur de décharge ne doit pas dépasser 25 %.
- contrôle des quantités d'électricité rechargées et déchargées : leur rapport, ou coefficient de recharge, doit être géré tout juste au dessus de 1 ; sa valeur dépend de la température.
- contrôle de la tension de charge de chaque batterie par rapport à un certain seuil qui dépend aussi de la température. Il faut limiter le courant de charge. Cette gestion est assurée par un équipement électronique - le régulateur shunt jonction (RSJ) - capable de réguler le courant et la tension de charge tout en assurant l'alimentation correcte du satellite.

Enfin, il est impératif de contrôler la température des batteries. Elle est nominalement maintenue entre - 5 °C et 0 °C [3].

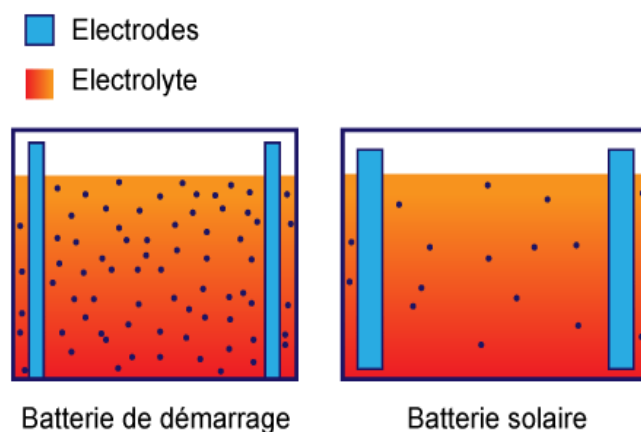


Figure II.23: Batterie de démarrage comporte de nombreuses impuretés et plus de surface de contact entre ses électrodes et l'électrolyte

II.4.3. Caractéristiques d'une batterie

Le poids et le volume sont deux des caractéristiques d'une batterie qu'il ne faut pas négliger. Mais ce qui la définit principalement c'est sa tension (en volts, V), sa capacité (en ampères-heures, Ah), et sa durée de vie (en cycles) [10].

II.4.3.1. Poids et volume

On ne choisit pas une batterie en fonction de son poids ou de son volume, mais il faut savoir que les batteries au plomb (les plus utilisées) sont, par exemple, au minimum 5 fois plus lourdes que les batteries Ni/Cd. Le principal intérêt d'une batterie légère est que l'on paye moins de frais de transport lors de l'achat puisque ceux-ci dépendent du poids du colis. L'astuce permettant d'économiser consiste à acheter des batteries plomb sans leur électrolyte. En effet, il suffit d'ajouter de l'eau distillée (en vente n'importe où) dans la batterie pour le créer. Étant donné qu'une batterie légère est souvent moins résistante, il vaut mieux ne pas se concentrer sur le poids et le volume pour

faire son choix, à moins de devoir respecter des contraintes très particulières [10].

II.4.3.2. Tension

Une batterie est constituée d'éléments de base ayant une **tension** nominale de 2V (en réalité entre 1,9 et 2,1 selon l'état de charge). Il existe bien entendu des batteries 6,12 ou 24V, mais se sont des assemblages en série de plusieurs éléments (respectivement 3x2V, 6x2V et 12x2V). Vu de l'extérieur, on ne voit pas cet assemblage sauf pour les batteries à **électrolyte liquide** qui disposent de bouchons sur chaque élément pour la remise à niveau. La batterie de 12V est de loin la plus utilisée car un certain nombre d'appareils électriques fonctionnent sous cette tension : les lampes à économie d'énergie, la plupart des appareils électriques des camping-cars ou des bateaux...

II.4.3.3. Durée de vie d'une batterie

Pour exprimer la durée de vie d'une **batterie solaire**, on ne compte pas vraiment en nombre d'années, mais plutôt en nombre de « cycles ». En effet, la durée de vie dépend énormément de la façon dont on utilise la batterie: plus on s'en sert, plus vite elle vieillit. Un cycle correspond à la charge et à la décharge complète de la batterie, ce qui ne correspond pas forcément à une journée. Une batterie moyenne est conçue pour durer 300 cycles. Ce qui conditionnera le plus son espérance de vie est le taux maximum de décharge qu'on lui fera subir. Ainsi, si une batterie est prévue pour 300 cycles à 100% de décharge, elle pourra résister 600 cycles à 50% de décharge, 900 cycles à 33%, etc.

Les **décharges profondes** accélèrent les phénomènes de sulfatation ou de stratification. Les **batteries stationnaires** résistent mieux à ces contraintes que les batteries classiques, mais il ne faut pas en abuser. Le maintien de la batterie dans un état prolongé de décharge, même si ce n'est pas une décharge profonde, accélère aussi la corrosion, la sulfatation et la stratification. Le sous dimensionnement de son parc de batteries (batterie trop petite) doit donc être évité.

Les surcharges provoquent de la corrosion et une déformation des électrodes, ainsi qu'un dégagement gazeux qui peuvent, eux aussi, réduire la durée de vie.

Les batteries sont prévues pour un fonctionnement optimal autour de 20°C. A 30°C, leur espérance de vie est déjà divisée par 2, à 40°C elle est divisée par 4.

Le vieillissement d'une batterie correspond à une perte de **capacité**. On considère qu'il faut la changer lorsqu'on ne peut plus dépasser 50% de sa capacité initiale. L'électrolyte est alors d'une couleur noirâtre [10].

II.4.3.4. Énergie massique d'une batterie

Il existe plusieurs termes qui permettent d'exprimer l'encombrement d'une **batterie**. On parle ainsi « d'énergie massique », de « densité massique » ou encore « d'énergie spécifique » pour représenter l'énergie contenue dans une certaine masse (en Wh/kg ou Ah/kg). « Énergie volumique » et « densité volumique » permettent de connaître la quantité d'énergie en fonction du volume de la batterie (en Wh/L ou Ah/L).

Les batteries les moins encombrantes sont bien-sûr celles dont l'énergie massique et l'énergie

volumique sont les plus grandes. On peut ainsi conserver beaucoup d'électricité dans de petites batteries.

Énergie massique:

Batterie plomb-acide : 25 à 35 Wh/kg

Batterie Ni-CD (Nickel-Cadmium) : 40 à 70 Wh/kg

Batterie Ni-MH (Nickel-Métal-Hydrure) : 40 à 60 Wh/kg

Batterie Li-ion (Lithium-ion) : 150 à 200 Wh/kg

Pour convertir les Wh/kg en Ah/kg, unité plus couramment utilisée pour mesurer la capacité d'une batterie, il faut tenir compte de la **tension** de la batterie: $1\text{Wh} = 1\text{Ah} \times \text{tension}$. Les plus courantes sont 12 Vdc, 24 Vdc ou encore 48 Vdc pour les plus grosses installations.

II.4.3.5. Profondeur de décharge d'une batterie

Pour accroître la **durée de vie d'une batterie**, il est conseillé de ne pas la décharger complètement. C'est pour cela que l'on respecte toujours une profondeur de décharge (PDD) maximum lors du dimensionnement d'une installation électrique autonome. Cette donnée représente la quantité d'énergie qui peut être prélevée dans la **batterie**. Il s'agit donc d'un pourcentage, d'un rapport entre ce qui est utilisable et ce qui est réellement utilisé. Par exemple, une batterie chargée d'une **capacité** de 200Ah dont la profondeur de décharge autorisée est de 60% pourra fournir 120Ah. Cela veut dire qu'il restera encore 40% d'énergie dans la batterie, soit 80Ah. On pourrait utiliser ces 80Ah restant, mais ce n'est pas conseillé. Descendre trop bas endommage rapidement la batterie.

Selon les cas, on peut fixer des profondeurs de décharge très différentes. Cela dépend beaucoup du **modèle de la batterie** et de l'utilisation que l'on en fait. De façon générale, on imposera un faible taux de décharge (0,4 ou 0,5) aux batteries qui ne sont pas prévues pour un grand nombre de cycle, et pour les installations très souvent sollicitées. A l'inverse, on peut fixer une profondeur de décharge allant jusqu'à 0,9 et même 1 (100%) pour les batteries les plus résistantes, et les installations dont les batteries ont peu de chances d'être déchargées complètement. Si les besoins en électricité varient fortement (ce qui n'est pas simple à gérer avec des énergies renouvelables), il est préférable d'appliquer un fort taux de décharge. Cependant, s'il est souvent atteint, il faudra sérieusement envisager d'agrandir le parc de batteries. Pour finir sur un dernier exemple, dans une installation de secours, le taux est forcément de 1 car le « secours », par définition, n'est pas souvent sollicité. Les batteries seront donc plus usées par le temps que par les décharges profondes [10].

II.4.3.6. Capacité d'une batterie (notée Cn, unité Ampère-heure (Ah))

Si l'on compare une **batterie** à un réservoir, la capacité représente la quantité de liquide qui se trouve à l'intérieur, sauf qu'on ne compte pas les litres qu'elle contient, mais les ampères. La capacité correspond donc à ce que la batterie peut fournir comme quantité de courant (sur une durée précise au bout de laquelle la batterie est déchargée). Cette capacité s'exprime en ampères-heures (Ah) et se note Cn.

La capacité représente la quantité de courant présent dans la batterie, mais pas la quantité d'énergie. Pour connaître cette quantité d'énergie (qui s'exprime en Watt-heure (Wh)), il faut multiplier la capacité par

la tension de la batterie : $Ah \times V = Wh$. Il est important de ne pas confondre quantité de courant et quantité d'énergie. Par exemple, si on branche deux batteries 12V 100Ah en série on obtient l'équivalent d'une batterie de ... 100Ah, alors que la quantité d'énergie a doublé.

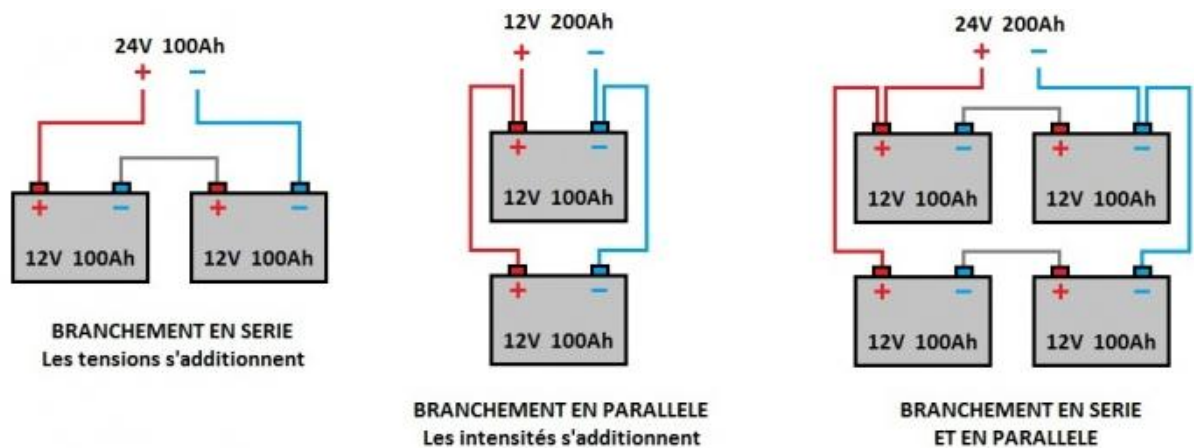


Figure II.24 : Différents branchement des batteries

C_n ou C/n indique la durée pendant laquelle on a déchargé la batterie (ici "n" heures). Une batterie d'une capacité $C_{10} = 250Ah$ peut donc fournir un courant de 25 ampères pendant 10 heures. Courant \times durée = capacité, ou $A \times h = Ah$. C'est un outil très pratique pour la comparaison des batteries entre elles, qui est cependant limité par ce que l'on appelle "l'effet Peukert" : la capacité d'une batterie varie en fonction de la vitesse à laquelle on la décharge. Ainsi, la même batterie peut être à la fois « $C_{10}, 90Ah$ » mais aussi « $C_{20}, 100Ah$ » ou « $C_{100}, 120Ah$ ». Plus on décharge la batterie lentement, plus elle est capable de fournir d'énergie au final.

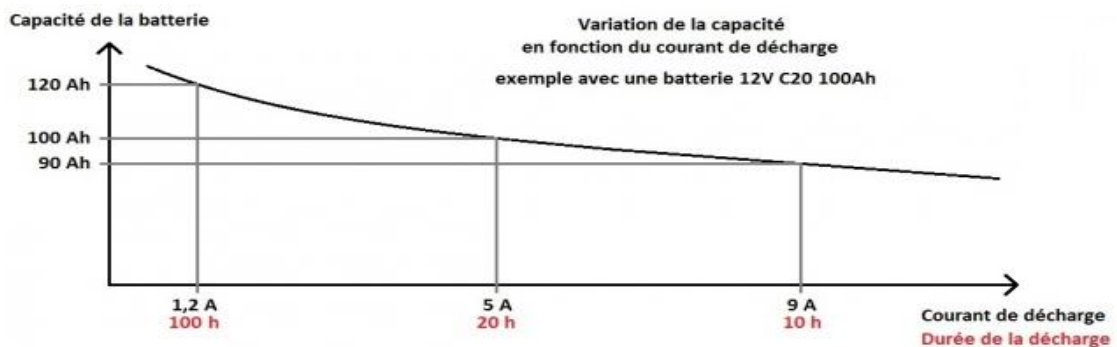


Figure II.25 : Variation de la capacité en fonction du courant de décharge

Si la capacité d'une batterie varie en fonction du courant de décharge, c'est essentiellement due à la résistance interne de la batterie. Celle-ci augmente lors de la décharge car il y a de moins en moins de réactifs dans l'électrolyte. Plus l'intensité de la décharge est forte, plus la résistance augmente. La tension de la batterie chute donc rapidement et atteint le seuil de coupure où le régulateur cesse de prélever l'énergie de la batterie. Il interprète les données comme une décharge complète de la batterie, alors que celle-ci pourrait encore fonctionner à une intensité moins élevée. C'est pour cela qu'il est souvent conseillé de ne pas décharger une batterie en moins de 10 heures. Dans le cas des installations photovoltaïques, les batteries doivent permettre plusieurs jours d'autonomie en cas de mauvais temps. On utilise donc plutôt une

base de 100h pour les comparer ou faire nos calculs, soit C100, ce qui est proche de 4 jours. Variation de la capacité en fonction de la température: La température a beaucoup d'effet sur une batterie. Par exemple, des températures élevées peuvent provoquer des surcharges, des emballements thermiques, une forte autodécharge, etc... Alors que des températures négatives peuvent entraîner des sous-charges, des destructions par le gel, etc... La capacité est elle aussi influencée par la température. Lorsque l'on exprime une capacité, par exemple C100 50Ah, il s'agit toujours de la capacité à 20°C. Il s'agit de la température optimale de fonctionnement pour une batterie, celle sur laquelle les constructeurs se basent. Au delà de 20°C, la capacité de la batterie augmente légèrement, alors qu'en-dessous elle diminue rapidement. Cependant, en aucun cas il ne faut placer ses batteries dans un endroit chaud pour profiter de cette augmentation de capacité. Les effets secondaires cités plus haut sont beaucoup trop néfastes [10].

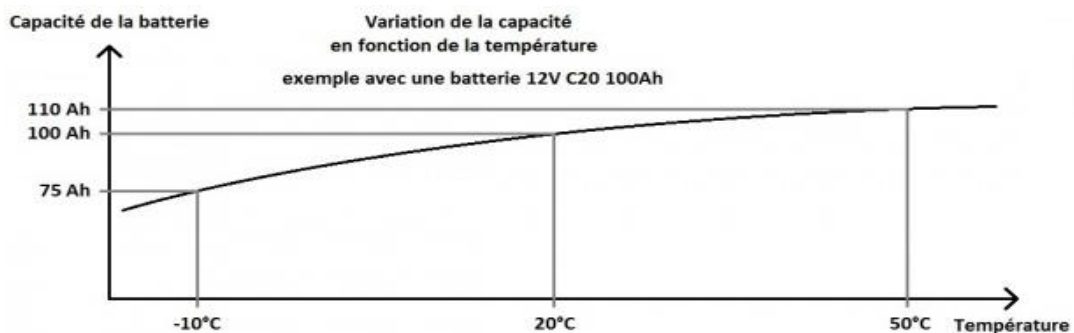


Figure II.26 : Variation de la capacité en fonction de la température

II.4.3.7. Rendement d'une batterie

Le rendement de la batterie est une donnée indispensable à prendre en compte dans le dimensionnement des installations électriques autonomes. On peut calculer deux formes de rendements différents, qu'il ne faut pas confondre pour ne pas se tromper dans ses calculs.

Le rendement correspond à la différence entre l'énergie reçue par la batterie pendant la charge, et celle qui est restituée à la décharge. Les réactions chimiques qui se produisent dans la batterie provoquent des pertes, notamment sous forme de chaleur. Afin que la rentabilité de son installation électrique autonome soit maintenue au maximum, il est important de connaître ces rendements et de savoir les limiter.

II.4.3.7.1. Types de rendements

On distingue deux formes de rendements: le rendement énergétique, et le rendement faradique. La façon dont on les calcule est très différente, ainsi que le résultat obtenu.

II.4.3.7.1.1. Rendement faradique (rendement en ampères-heures)

Qui mesure la différence entre la quantité d'électricité (en Ah) de la décharge et celle de la charge. Autrement dit, on compte le nombre d'électrons qui sortent de la batterie, et on le compare au nombre d'électrons qui étaient entrés. Pour une batterie stationnaire au plomb comme celle que l'on utilise dans les installations photovoltaïques autonomes, ce rendement gravite en fonction des cas autour de 90%.

II.4.3.7.1.2. Rendement énergétique

Qui tient compte d'un facteur supplémentaire : la différence entre la **tension** d'entrée et la tension de sortie. Ce n'est plus la quantité d'électricité que l'on mesure, mais la **puissance (en Wh)**. La tension de charge d'une batterie 12V plomb se situe aux environs de 14,1V et la tension de décharge autour de 12,5V. Le rendement énergétique est donc bien inférieur au rendement faradique, et se situe autour de 70 – 75%.

Cette différence de résultat pose problème quand il s'agit de comparer la performance des batteries, car il est rarement précisé de quel rendement il s'agit. La plupart des revendeurs ne présentent que le rendement faradique, bien meilleur que le rendement énergétique. C'est un piège à éviter lorsque l'on souhaite acquérir une batterie.

II.4.3.7.2. Amélioration du rendement

On ne peut pas atteindre un rendement parfait sur une batterie car les pertes font parties de ses caractéristiques intrinsèques. On peut toutefois l'améliorer en agissant sur les deux principales causes de pertes : l'**autodécharge** et la résistance interne

L'autodécharge est comparable à une fuite. La batterie se comporte comme un réservoir percé se vidant petit à petit, même lorsqu'on ne l'utilise pas. L'âge de la batterie et la température à laquelle elle se trouve influencent fortement cette fuite d'énergie. Ainsi, au-delà de 20°C et tous les 10°C supplémentaires, l'autodécharge double. Il faut donc conserver la batterie dans l'endroit le plus frais possible, sans pour autant l'exposer au gel. A savoir: l'autodécharge est au maximum les 24 premières heures après une recharge, et augmente également quand la batterie est très chargée.

L'autre facteur qui peut réduire fortement les rendements est la résistance interne. Toutes les batteries en possède une, mais elle augmente avec l'âge et pose par conséquent de plus en plus de problèmes. En effet, la résistance est un frein au passage du courant, et dissipe une partie de l'électricité sous forme de chaleur. L'importance des pertes qu'elle engendre dépend du courant de charge: plus il est important, plus les pertes augmentent. Il ne faut donc pas recharger la batterie trop vite pour éviter le gaspillage [10].

II.4.4. Problèmes liés aux batteries

Les batteries, quelque soit la technologie qu'elles utilisent, peuvent poser un certain nombre de problèmes, souvent évitables lors d'une utilisation correcte ou en s'équipant du matériel adéquat.

II.4.4.1. Stratification

Ce phénomène signifie que l'électrolyte n'est pas homogène. L'acide étant plus lourd que l'eau, il s'accumule au fond de la batterie et l'eau au dessus. La réaction ne se fait plus aussi bien, le haut des électrodes s'oxyde et risque de geler, tandis que le bas est attaqué par l'acide. On remédie facilement à cela par une charge d'égalisation délivrée périodiquement par le **régulateur**.

II.4.4.2. Sulfatation

La sulfatation apparaît naturellement lorsque la batterie se décharge. Il se forme alors une accumulation de sulfate de plomb sur les électrodes, ce qui réduit les surfaces de contact avec l'électrolyte et par conséquent l'intensité du courant. Quand la batterie est rechargée, la sulfatation disparaît sauf en cas de forte température, de décharge trop profonde ou de dégagement gazeux.

II.4.4.3. Oxydation des électrodes et des bornes

Lorsque le niveau de l'électrolyte est trop faible, les électrodes sont exposées à l'air et s'oxydent. Il en va de même pour les bornes de la batterie si celle-ci n'est pas dans un endroit sec ou si les cosses ne sont pas assez serrées. L'oxydation empêche de manière définitive le courant de circuler.

II.4.4.4. Dégagements gazeux

Ils se produisent en fin de charge, ou lorsque la tension et la température sont trop élevées. Les **batteries gel et AGM** souffrent moins de ce problème. Les gaz sont dus à l'électrolyse de l'eau, provoquant l'apparition d'oxygène et d'hydrogène et réduisant le volume d'électrolyte. Cette réduction du volume est faible mais elle pose des complications. L'oxygène et l'hydrogène qui s'échappent de la batterie sont explosifs, mais ce n'est dangereux que si on possède un nombre important de batteries.

II.4.4.5. Autodécharge d'une batterie

Une partie de l'énergie stockée dans la **batterie** se dissipe avec le temps. Cette autodécharge est principalement causée par la température et l'âge de la batterie. Dans une installation autonome, les batteries doivent rester chargées durant de longues périodes sans se vider d'elles-mêmes. C'est pourquoi la solution qui les compose (l'électrolyte) est davantage purifiée que dans une batterie classique.

Les pertes sont au maximum juste après la recharge, et se réduisent ensuite sans jamais disparaître. Elles suivent une courbe asymptotique qui tend, pour les **batteries plomb-acide**, vers une moyenne de 5% par mois. L'autodécharge de ce type de batterie fait partie des meilleurs.

La température est le seul facteur sur lequel il est possible d'intervenir. En effet, il suffit de 10°C supplémentaires pour doubler l'autodécharge. Plus l'endroit où sont stockées les batteries est frais, moins les pertes sont grandes. Cependant, la température agit également sur la **capacité de la batterie**: lorsqu'il fait trop froid, la réaction chimique a plus de mal à se faire, et la batterie fournit moins de puissance. C'est pour cela que l'on choisit souvent de stocker les batteries dans un local ventilé, autour de 15 à 20°C [10].

II.4.5. Description de la batterie Ni /Cd

II.4.5.1. Introduction

Ces accumulateurs, dans leur version portable, sont apparus dans les années 1950 après la découverte, par Neumann en Europe, du fonctionnement en mode étanche sur le principe de la recombinaison de l'oxygène.

Ils restent de nos jours les mieux adaptés dans les applications qui demandent une forte puissance (outils portables par exemple) ou une température relativement élevée (blocs autonomes d'éclairage de sécurité).

Ils sont robustes et présentent une excellente durée pour des conditions moins contraignantes que d'autres couples. Ils acceptent de longues durées de stockage et sont aptes à l'utilisation dans une plus large plage de température que les autres accumulateurs portables

Ils sont progressivement remplacés par des accumulateurs au nickel-métal hydrure ou au lithium dans les applications qui demandent une forte énergie volumique ou massique : téléphonie GSM, ordinateur portable, caméscope... [9].

II.4.5.2. Constitution

L'accumulateur Ni Cd est constitué par :

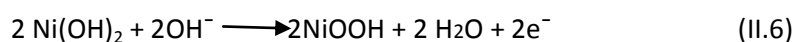
- une électrode positive constituée par le couple : hydroxyde de nickel/oxyhydroxyde de nickel.
- une électrode négative constituée par le couple : hydroxyde de cadmium/cadmium-métal.
- un séparateur en matériau non tissé de polyamide ou de polyoléfine placé entre les électrodes ; il les isole électriquement, mais permet le passage des ions, de l'eau et de l'oxygène.
- un électrolyte alcalin, solution aqueuse concentrée (de l'ordre de 6 à 8 M, M molarité : nombre de moles par litre) de potasse (KOH) ou de soude (NaOH) additionnée ou non de lithine (LiOH), imprégné dans les trois constituants précédents.
- un boîtier étanche bipolaire, muni d'une soupape de sécurité réversible pour les accumulateurs cylindriques ou parallélépipédiques et irréversible pour les boutons. La soupape de sécurité réversible est du côté de la polarité positive [9].

II.4.5.3. Réactions électrochimiques

II.4.5.3.1. Charge et décharge des matières actives

Les réactions de charge sont :

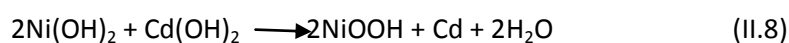
- pour l'électrode positive :



- pour l'électrode négative :



- avec un bilan :



En décharge, ce sont les réactions inverses qui sont mises en œuvre.

Ce bilan fait apparaître un électrolyte presque invariant. La quantité d'ions est globalement conservée et on observe seulement une dilution modérée en charge.

La création d'eau est de 0,67 mL/Ah pour un volume d'électrolyte qui dépasse 2 mL/Ah.

II.4.5.3.2. Fin de charge

L'électrode positive limite la capacité en charge par conception. Il est en effet nécessaire que l'électrode négative présente un excédent de capacité de façon à ne pas provoquer de dégagement d'hydrogène. Il faut éviter la réaction :



La vitesse de disparition de l'hydrogène sur l'électrode positive (oxydation) est en effet beaucoup plus lente que celle de l'oxygène sur l'électrode négative (réduction). Dans le cas où l'excédent négatif est insuffisant en charge, la pression interne d'hydrogène s'élève rapidement et la fuite est inévitable si l'on n'interrompt pas ce dégagement gazeux.

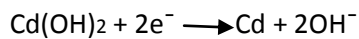
L'accumulateur est donc constitué pour favoriser, en fin de charge, la création d'oxygène, son transfert à travers le séparateur vers l'électrode négative et sa réduction en eau. Cette réaction est appelée recombinaison.

Vers la fin de charge sur l'électrode positive, l'électrolyte s'oxyde suivant :



Sur l'électrode négative doit se produire, en fait, une réduction qui est :

— soit la charge du cadmium relation (II.7) :



Avec un bilan :



Limitée par la disponibilité de l'hydroxyde de cadmium et la montée en pression d'oxygène ;

— soit la réaction de l'oxygène sur l'électrode négative qui est exactement l'inverse de la réaction d'oxydation sur l'électrode positive :



II.4.5.4. Caractéristiques

- La tension d'équilibre à température ambiante, à l'état 50 % chargé, est voisine de 1,30V.
- Elle change légèrement suivant les additifs de la matière active et la composition de l'électrolyte.
- Elle est affectée d'un coefficient de température voisin de $-0,5 \text{ mV/K}$, et qui varie de $-0,7$ à $-0,2 \text{ mV/K}$ suivant l'état de charge. Ce coefficient de température ne s'applique pas aux réactions concernant l'oxygène (cas de la surcharge) ; le coefficient est alors de l'ordre de $-1,8 \text{ mV/K}$ [11].

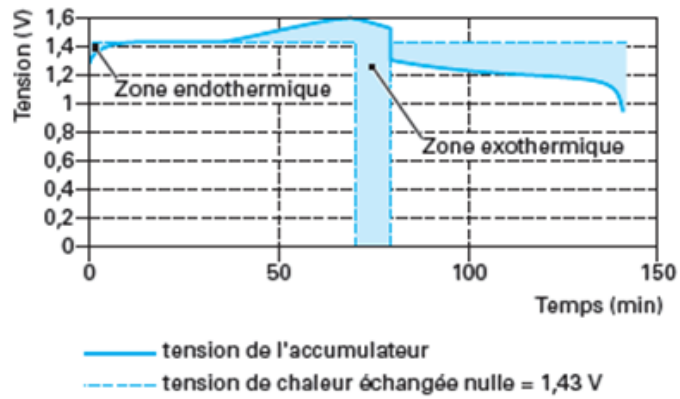


Figure II.27: Échange de chaleur en charge et décharge d'un accumulateur Ni Cd

Température	minimale (°C)	maximale (°C)
de stockage	- 30	50 (1)
de charge	0	45 (1)
de décharge	- 20	60

(1) Il existe des séries « haute température » qui peuvent supporter des températures plus élevées.

Tableau II.1: Températures d'utilisation du NiCd

- La tension nominale est définie à 1,2 V.
- Les énergies massique et volumique varient environ de 30 à 60 Wh/kg et de 80 à 160 Wh/L (hors correction, cf.
- Les températures d'utilisation données par les fabricants sont généralement celles du tableau II.1
- La tension de chaleur nulle est 1,43 V.
- Quand on charge les matières actives, la réaction électrochimique des matières actives est donc endothermique quand la tension en charge est inférieure à 1,43 V ou en décharge supérieure à 1,43 V (ce dernier cas n'est pas physiquement possible).
- Par contre, lorsqu'il n'y a plus d'hydroxyde de nickel à charger, l'accumulateur fonctionne avec la recombinaison de l'oxygène. La tension de chaleur nulle passe de 1,43 V à 0 V. Le flux de chaleur est multiplié par 10 environ. Les effets liés à ce phénomène thermique sont utilisés pour détecter la fin de charge.
- La capacité thermique massique est voisine de 840 J/ (kg · K).
- L'accumulateur Ni Cd est très robuste mécaniquement.
- Pour des vibrations à basse fréquence (5 à 200 Hz), il peut supporter 30 g. À plus hautes fréquences 10 g.
- Il supporte aussi les chocs : 75 g pendant 11 ms selon la norme MIL-STD 810 C, méthode 516.2.
- La fragilité mécanique du pack batterie est souvent inférieure à celle de l'accumulateur [9].

— Les fabricants préconisent des conditions de stockage définissant les températures maximales et minimales, l'humidité et la durée. Les accumulateurs Ni Cd supportent des conditions de stockage peu contraignantes.

—Après un stockage prolongé (plus d'un an à température ambiante sauf indication contraire du fabricant), il est conseillé d'effectuer, si possible, une charge qui ne soit pas trop rapide et de réaliser quelques cycles pour atteindre la pleine capacité [9].

II.4.5.5. Différentes familles d'accumulateurs NiCd

Les fabricants proposent plusieurs familles spécialement optimisées suivant l'application. On distingue ainsi les familles :

- standard.
- énergie.
- puissance.
- charge rapide.
- haute température.
- secours de mémoire.

En comparaison de la série standard, les distinctions suivantes peuvent être faites [9].

II.4.5.5.1. Énergie

Ces accumulateurs sont optimisés pour l'énergie massique et volumique. La quantité de matière active est augmentée le plus possible. Le boîtier est aussi optimisé. On trouve, également, dans ces séries des boîtiers parallélépipédiques.

Les applications sont : téléphone portable, caméscope, bureautique, jouets, instruments médicaux ou scientifiques... [9].

II.4.5.5.2. Puissance

Ces accumulateurs sont optimisés pour une grande disponibilité de la matière active et une faible résistance interne.

Ils sont souvent aptes à la charge ultrarapide.

Les applications sont : perceuse, visseuse, modélisme... [9].

II.4.5.5.3. Charge rapide

On peut distinguer la charge rapide en 1 h et la charge ultrarapide en 15 min.

La charge en 1 h est devenue courante pour les accumulateurs de haute énergie et de haute puissance. Ce type de charge se généralise pour toutes les applications de cyclage.

Les accumulateurs pour charge ultrarapide sont optimisés pour la recombinaison de l'oxygène. Ce sont généralement des accumulateurs haute puissance [9].

II.4.5.5.4. Haute température

Ces accumulateurs ont des composants optimisés pour les hautes températures (séparateur polyoléfine, boîtier avec un joint spécial et électrolyte à base de soude et de lithine), présentant un meilleur rendement d'utilisation en charge et décharge assez lentes et une longue durée en charge permanente.

Ce sont généralement des accumulateurs utilisés en secours dans les alarmes ou les blocs d'éclairage de sécurité. Ils ne sont pas destinés à réaliser un grand nombre de cycles [9].

II.4.5.5.5. Secours de mémoire

Ces accumulateurs présentent une conservation de charge optimisée. Ils sont généralement haute température. Par contre, les régimes de charge et de décharge sont très lents. On trouve les boutons dans ces séries, mais, aussi et surtout, des piles (primaires non rechargeables) au lithium-métal [9].

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés d'une part la topologie générale du système PV et d'une autre part donné des définitions sur le système de génération d'énergie (panneaux solaire) et sur le système de stockage représenté par les accumulateurs Nickel-cadmium

Les cellules solaires multi-jonctions, qui servent aux applications spatiales depuis presque 20 ans, présentent des rendements impressionnants. Leur potentiel est considérable : en laboratoire, les rendements de conversion de l'énergie lumineuse dépassent 41 %, soit près de deux fois le rendement des cellules photovoltaïques traditionnelles.

Les accumulateurs au nickel-cadmium portables sont-ils une « espèce en voie de disparition » ou bien demeurent-ils une source d'énergie fiable et économique et non égalée pour certaines applications ayant des contraintes de puissance ou de température ?

Bien utilisés, ils peuvent rendre un bon service pendant de nombreuses années.

Leur principal problème est le risque de contamination de l'environnement et le maillon faible est la mise en place d'une collecte efficace.

Chapitre III

**Technique neuro-floue et
applications**

III.1. Introduction

Dans ce chapitre on présentera la technique neuro-floue avec les différentes architectures et algorithmes, nous présentons aussi l'application de cette technique à notre problème pour l'estimation de la température de la batterie d'Alsac-1.

III.2. Structure de commande neuro floue

L'utilisation conjointe des réseaux de neurones et de la logique floue permet de tirer les avantages des deux méthodes ; les capacités d'apprentissage de la première et la lisibilité et la souplesse de la seconde.

Diverses combinaisons de ces deux méthodes ont été développées depuis 1988. Elles ont donné naissance aux systèmes neuro-flous, qui sont le plus souvent orientées vers la commande de système complexe et les problèmes de classification [11].

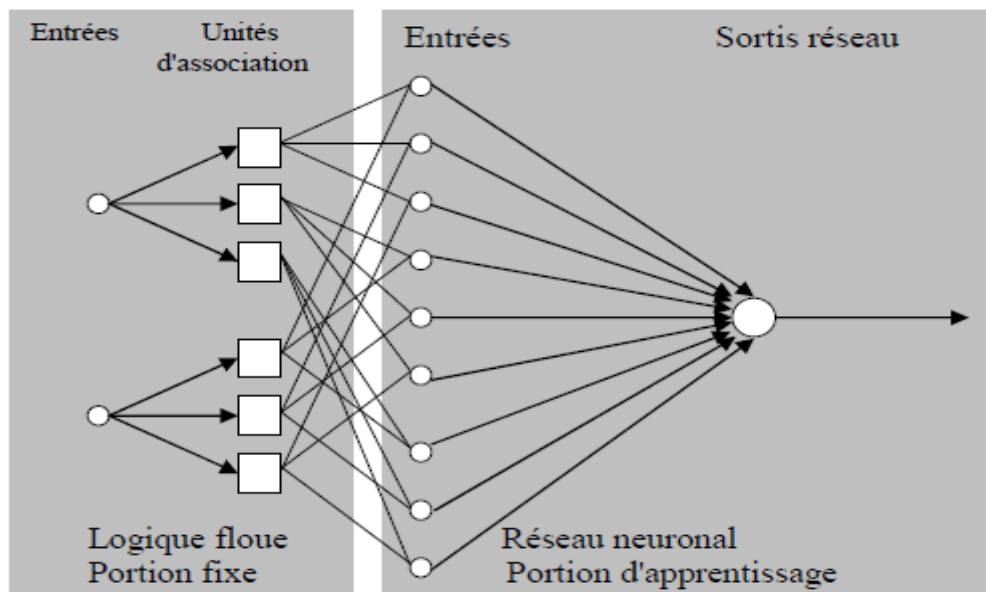


Figure III.1 : Structure générale d'un neuro-floue

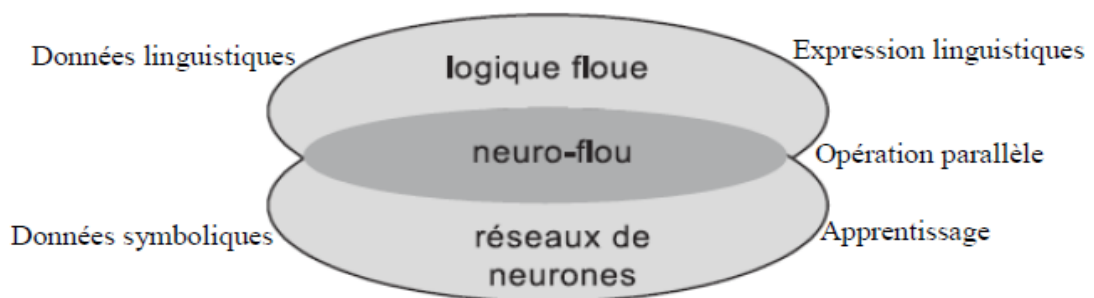


Figure III.2 : Principe d'un système neuro flou

La figure III.2 résume le principe du système Neuro-floue qui représente l'intersection entre la logique floue et les réseaux neurones.

III.2.1. Définition

Un système neuro-flou hybride est un réseau de neurone avec un signal flou, des poids flous, une fonction de transfert floue et un module d'adaptation de la structure de RNF par un apprentissage d'un ensemble de données.

III.2.2. Principe de fonctionnement

Les Réseaux Neuro flous hybride apprennent des rapports et des modèles en utilisant un algorithme d'apprentissage supervisé qui examine les données dans un ensemble de la formation qui consiste en exemples d'entrées et leurs sorties associées. Pendant la phase d'apprentissage, un Réseau neuro-flou hybride modifie sa structure interne pour refléter le rapport entre les entrées et les sorties dans l'ensemble de la formation (base de connaissance). L'exactitude d'un Réseau Neuro-flou est vérifiée après que le cycle de d'apprentissage soit complet en utilisant un ensemble séparé d'entrées et sorties appeler l'ensemble de la validation

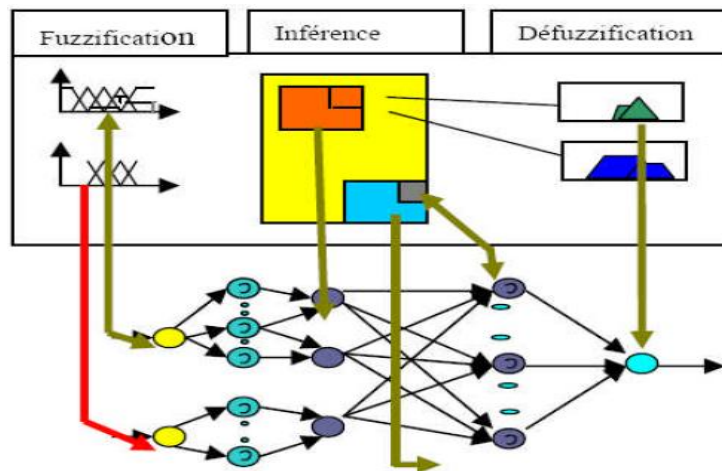


Figure III.3 : Principe de fonctionnement d'un Réseau Neuro-flou.

III.2.3. Architectures Neuro-Floues

Plusieurs architectures ont été développées depuis les années quatre vingt et sont orientées généralement vers la commande des systèmes complexes et les problèmes de classification [12], [13] En conséquence, il existe trois architectures hybrides Neuro-floues :

III.2.3.1. Première architecture

La première méthode neuro-floue consiste au codage du système d'inférence floue sous la forme d'un réseau de neurones multicouches dans lequel les poids correspondent aux paramètres du

système. L'architecture du réseau dépend du type de règle et des méthodes d'inférences, d'agrégation et de défuzzification choisies.

Par exemple, pour des règles de la forme "si V_1 est A_{i1} et V_2 est A_{i2} alors W est w_i ", on fait appel à un réseau de neurones qui admet pour entrées les valeurs x_1 et x_2 prises par les variables V_1 et V_2 et dont les deux couches cachées correspondent respectivement au calcul de la valeur des fonctions d'appartenances A_{i1} pour x_1 et A_{i2} pour x_2 , et à celui de la valeur prise par la conjonction des conditions de chaque règle utilisant un opérateur de conjonction adéquat. Cette situation est schématisée sur la figure III.4

Les fonctions d'appartenance intervenant dans les règles sont considérées comme des paramètres ajustés par l'intermédiaire des poids entrant dans la première couche cachée. Les conclusions w_i des règles sont également des paramètres ajustables par l'intermédiaire des poids associés à la dernière couche.

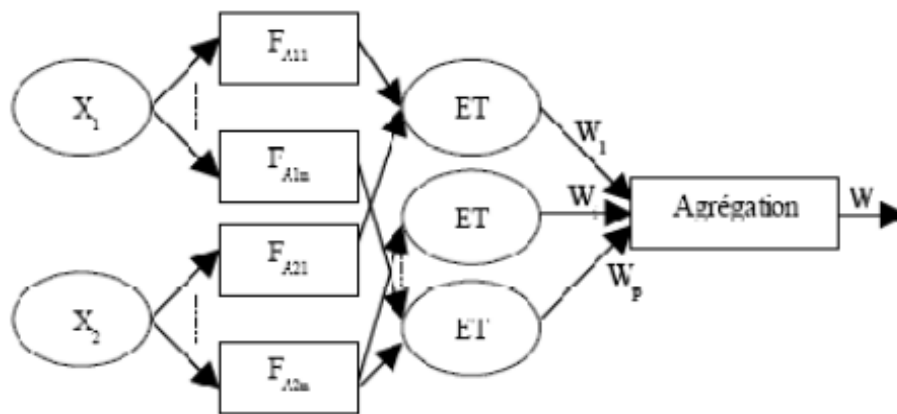


Figure III.4 : Première architecture Neuro-floue

Comme il est indiqué sur la figure (9), les données vont subir trois étapes de calcul :

➤ La première couche s'occupe du calcul des degrés d'appartenance de chaque entrée.

Les paramètres de cette couche vont caractériser la fonction d'appartenance.

Le calcul des degrés d'appartenance s'effectue par des neurones spécialisés, dont la fonction d'activation est la fonction d'appartenance. La fonction la plus utilisée dans ce type d'architecture est la fonction gaussienne ; elle est donnée par :

$$y = e^{-2(a.x+b)} \quad (III.1)$$

Donc les neurones de la première couche ont la forme suivante :

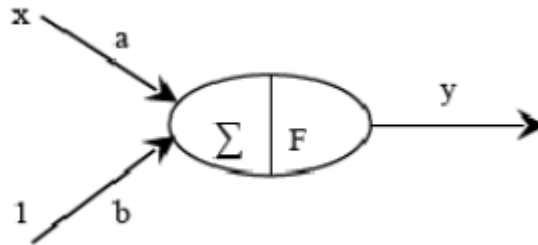


Figure III.5 : Forme d'un neurone

➤ La deuxième couche cachée évalue en parallèle les prémisses des règles. Les paramètres de cette couche définissent dans ce cas l'opérateur de conjonction ET.

Plusieurs méthodes ont été proposées pour l'évaluation floue de l'opérateur ET (cette évaluation est appelée aussi calcul de la valeur de vérité). Généralement on utilise celle qui a été proposée par Lukasiewicz, cette dernière présente une certaine facilité d'implémentation neuronale moyennement satisfaisante. Elle est définie par :

$$ET[fA_1(x_1), fA_2(x_2)] = \text{Max}(0, fA_1(x_1) + fA_2(x_2) - 1) \quad (\text{III.2})$$

Si on pose :

$$u = fA_1(x_1) + fA_2(x_2) - 1 \quad (\text{III.3})$$

La fonction $\text{Max}(0, u)$ peut être évaluée approximativement par une fonction continue sigmoïde, elle est donnée par :

$$f = \text{Max}(0, u) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{-u-0.5}{0.227}\right)} \quad (\text{III.4})$$

Donc notre opérateur de conjonction ET va prendre la forme suivante :

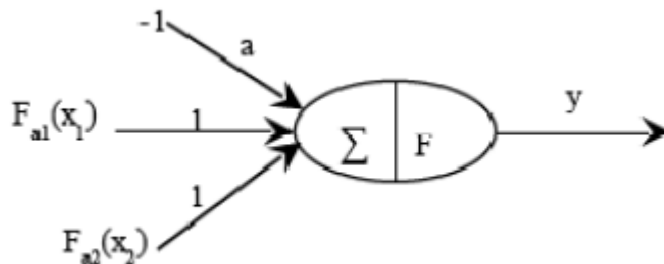


Figure III.6 : Forme d'opérateur flou ET

➤ La dernière couche réalise l'opération d'inférence. Ayant calculé les valeurs de vérités produites par les opérateurs de conjonction, on doit maintenant établir une procédure permettant de

déduire une sortie en fonction de ces valeurs de vérités. Cette procédure est réalisée soit en choisissant parmi ces valeurs, celle qui est la plus représentative, c'est à dire celle qui a le plus grand degré de vérité, soit en calculant le barycentre de toutes les valeurs. Une telle approche peut être effectuée par un seul neurone, où les valeurs de vérités sont pondérées par les poids synaptiques de ce neurone.

Les poids synaptiques du neurone qui calcule le barycentre (qui fait la défuzzification) sont d'une grande importance, car ce sont eux qui pondèrent les résultats des règles. Une rétro propagation serait indispensable à appliquer sur cette couche (c'est à dire sur les poids synaptiques du neurone chargé de la défuzzification).

Algorithme d'apprentissage: Cet algorithme est basé sur l'algorithme de la rétro propagation du gradient descendant. Il est le même que celui qui a été utilisé pour l'apprentissage des réseaux de neurones type PMC .La seule différence qui existe, est que les entrées du neurone chargé de la défuzzification seront normalisées.

Cette normalisation est nécessaire car elle permet de manipuler des valeurs inférieures ou égales à l'unité. Une telle approche est réalisée par la division de chaque entrée de ce neurone, sur la somme de toutes ses entrées.

III.2.3.2. Deuxième architecture

Cette méthode utilise des réseaux de neurones et des systèmes flous associés en série ou en parallèle. Plusieurs variantes sont ainsi possibles :

- Le réseau de neurones fonctionne en amont du système flou (figure III.7). Les variantes d'entrées du système flou sont déterminées à partir des sorties du réseau de neurones (dans le cas où elles ne sont pas mesurables directement) ou encore un réseau de neurones effectue une tâche de classification ou de reconnaissance de formes, suivie d'un système flou d'aide à la décision.

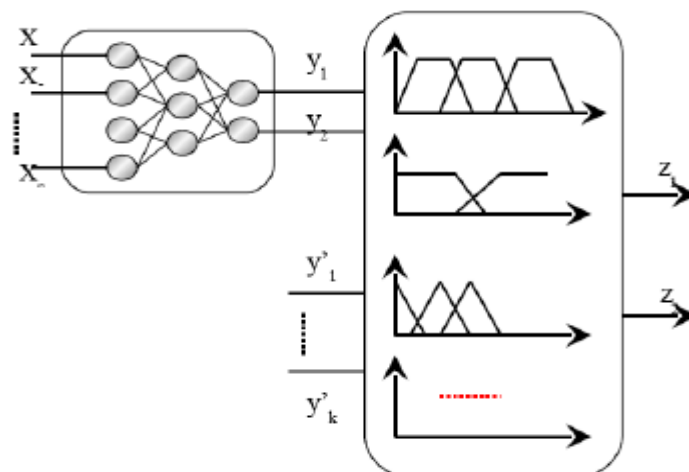


Figure III.7 : Deuxième architecture des réseaux Neuro-Flou Réalisation en série

- Un réseau de neurones qui fonctionne en aval du système flou (La figure III.8), dans le but d'ajuster les sorties d'un système de commande floue à de nouvelles connaissances obtenues, les variables de sorties étant les erreurs sur les variables de sortie du système flou.

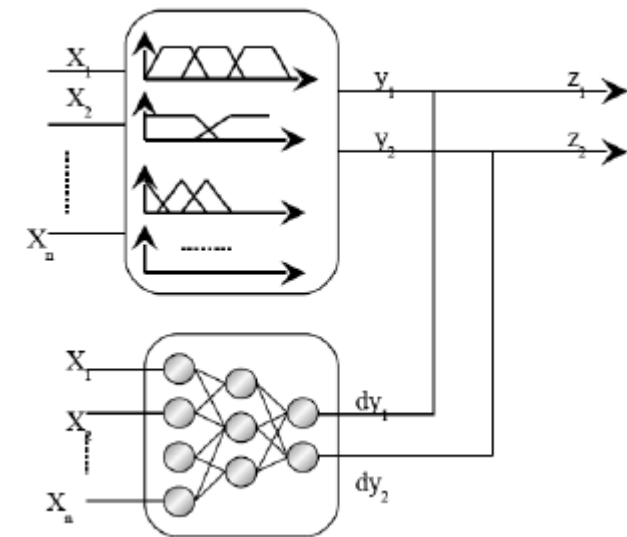


Figure III.8 : Réseau de neurones fonctionnant en aval d'un système flou

III.2.3.3. Troisième architecture

Ce type d'association entre réseau de neurones et systèmes flous, correspond à l'utilisation des réseaux de neurones pour remplacer toutes ou quelques composantes d'un système flou. De tels réseaux servent à l'apprentissage des fonctions d'appartenance, au calcul de l'inférence, à la réalisation de la phase d'agrégation et de défuzzification. Ils peuvent réaliser l'extraction des règles floues, en analysant la corrélation qui existe entre les entrées et les sorties du réseau de neurones.

Ces approches ont une grande importance car elles sont capables de résoudre des problèmes importants :

- La détermination et l'apprentissage des fonctions d'appartenances.
- La détermination des règles.
- L'adaptation à l'environnement du système.

III.2.4. Méthodes des combinaisons Neuro-Floues

Il existe quatre grandes catégories de combinaisons des réseaux de neurones avec la logique floue [13] :

- **Réseau flou neuronal** : Dans ces réseaux, les techniques floues sont employées pour augmenter les possibilités du processus d'apprentissage et d'exécution des réseaux de neurones.
- **Système neuronal/flou simultanément** : Le réseau de neurone et le système flou fonctionnent ensemble sur la même tâche, mais sans s'influencer, c.-à-d. ni l'un ni l'autre n'est

employé pour déterminer les paramètres de l'autre. Habituellement le réseau neuronal traite les entrées, ou post-traite les sorties du système flou.

- **Modèles neuro-flous coopératifs** : Le réseau de neurone est employé pour déterminer les paramètres (les règles et les ensembles flous) d'un système flou. Après la phase d'apprentissage, le système flou fonctionne sans le réseau de neurone. C'est une forme simple des systèmes neuro-flous.

- **Modèles neuro-flous hybrides** : Les approches neuro-floues modernes sont de cette forme. Un réseau neuronal et un système flou sont combinés dans une architecture homogène. Le système peut être interprété comme un réseau neuronal spécial avec des paramètres flous ou comme un système flou mis en application sous une forme distribuée parallèle.

III.2.5. Systèmes Neuro-Flous hybrides integres

III.2.5.1. Systèmes Neuro-Flous integres type Mamdani

Le système neuro-flou de type Mamdani utilise la technique d'apprentissage par rétropropagation pour apprendre les paramètres des fonctions d'appartenance. Il contient cinq couches.

La première couche : C'est la couche d'entrée, chaque nœud dans cette couche correspond à une seule variable d'entrée, son rôle est de transmettre les valeurs d'entrée directement à la couche suivante.

La deuxième couche : c'est une couche de fuzzification, chaque nœud, dans cette couche correspond au seul label linguistique pour une des variables d'entrée dans la couche 1 c.-à-d., le lien de sortie représente la valeur d'appartenance, qui spécifie le degré avec lequel une valeur d'entrée appartient à un ensemble flou, est calculé dans la couche 2. Un algorithme de classification décide du nombre initial et des types de fonctions d'appartenance à attribuer pour chacune des variables d'entrée. Les formes finales des fonctions d'appartenances seront réglées avec précision durant l'apprentissage du réseau.

La troisième couche c'est la couche de règles antécédentes, un noeud dans cette couche représente la partie antécédente d'une règle. D'habitude, un opérateur est utilisé dans ce noeud. La sortie d'un noeud de la couche 3 représente le sens (firing strenght, en anglais) de la règle floue correspondante.

La quatrième couche c'est une couche de règles conséquentes, ce noeud, en fait, deux tâches : Combiner les antécédents de règles et déterminer le degré avec lequel ils appartiennent au label linguistique de sortie. Le nombre de noeuds dans cette couche est égal au nombre de règles.

La cinquième couche c'est une couche de défuzzification, ce noeud effectue la combinaison de toutes les parties conséquentes des règles utilisant un opérateur qui calcule enfin la sortie nette (non floue) après défuzzification [14].

III.2.5.2. Systèmes neuro-flous integers type Takagi-Sugeno

Les systèmes neuro-flous type Takagi-Sugeno utilisent une combinaison de l'algorithme de rétro propagation pour apprendre les fonctions d'appartenance et la méthode d'estimation par moindres carrés pour déterminer les coefficients des combinaisons linéaires dans les conclusions de règles. Une étape dans la procédure d'apprentissage possède deux parties : dans la première partie les entrées sont propagées et les paramètres d'une conclusion optimale sont estimés par une procédure des moindres carrés, pendant que les parties antécédentes (fonctions d'appartenance) sont supposées fixes pour le cycle courant à travers l'ensemble d'apprentissage. Dans la seconde partie, les entrées sont propagées encore une fois et, pendant cette itération, la rétropropagation est utilisée pour modifier les paramètres antécédents pendant que les paramètres conclusion restent fixes. Cette procédure est alors réitérée. Ce système contient six couches.

Les couches 1, 2 et 3 est similaire aux couches 1,2 et 3 du système type Mamdani.

Dans la couche 4 (normalisation sens de la règle), chaque nœud de cette couche calcule le rapport du sens de la $i^{\text{ème}}$ règle par rapport à la somme des sens de toutes les règles.

La cinquième couche 5 (couche conséquent de règle), chaque noeud dans cette couche est doté d'une fonction noeud. Les paramètres conséquents sont déterminés par l'algorithme des moindres carrés moyens.

La sixième Couche (couche inférence de règle) : L'unique noeud de cette couche calcule la sortie globale par addition de tous les signaux entrant.

III.2.5.3. Système ANFIS (Adaptative Network Fuzzy Inference System)

Le système ANFIS est une classe de réseau adaptatif proposé par Jang [15]. Il peut être vu comme un réseau de neurones non bouclé pour lequel chaque couche est un composant d'un système neuro-flou. Le modèle ANFIS : modèle le plus utilisé en pratique. Des applications dans de traitement du signal et le filtrage adaptatif ont été réalisées avec cette architecture. Plusieurs ouvrages et articles montrent un bon rendement du modèle ANFIS lorsqu'il est utilisé dans la commande de moteur [16], [17].

Cette architecture affine les règles floues obtenues par des experts humains pour décrire le comportement d'entrée-sortie d'un système complexe. Une version modifiée du modèle ANFIS est capable d'implémenter le système d'inférence floue de Tsukamoto [18]. La version d'origine utilise un modèle flou de type Sugeno.

La sortie globale dans le modèle de Tsukamoto, est donnée par la moyenne pondérée de chaque sortie nette de règle induite par le sens de la règle (le produit ou minimum des degrés d'adéquation avec la partie prémisse) et les fonctions d'appartenance de sortie. Le modèle ANFIS contiens cinq couches. La première couche cachée est pour la fuzzification des variables d'entrée.

Des opérateurs utilisés dans la deuxième couche cachée pour calculer la partie antécédente de règle. La troisième couche normalise les sens des règles, elle est suivie de la quatrième couche

où les paramètres conséquents de la règle sont déterminés. La couche de sortie calcule la sortie totale par addition de tous les signaux entrant.

Le procédé d'apprentissage du modèle ANFIS, ne se préoccupe que de l'adaptation de paramètres dans des structures fixes. En effet, chaque terme linguistique est représenté par un seul ensemble flou. La procédure d'apprentissage utilise un mélange de rétro propagation et une estimation par moindres carrés moyen.

Notons, que le système ANFIS est implémenté dans la boîte à outils "Neuro- Fuzzy "de MATLAB [19]. Ce modèle donne de très bons résultats en poursuite de trajectoire, approximation non linéaire, commande dynamique et traitement du signal.

Parmi tous les systèmes neuro-flous, le modèle ANFIS présente la plus faible erreur moyenne quadratique. Ceci est probablement dû à l'implémentation de règles type Takagi- Sugeno dans le modèle ANFIS comparé au système flou type Mamdani.

III.3. Application pour l'estimation de la température

Dans le cadre de notre étude, nous allons essayer d'estimer la température de la batterie du microsatellite Alsat-1 sur une période de courte durée en utilisant l'approche neuro-floue. Cette technique permet non seulement d'établir des relations analytiques importantes pour la phase d'estimation, mais aussi une grande flexibilité, puisqu'il n'y a aucune restriction quant au nombre de paramètres du système en entrée et en sortie. La phase d'estimation de l'effet de la température devient alors possible grâce à la relation explicite donnée par l'approche neuro-floue.

Pour cela, il est possible de construire le système neuro-floue durant la phase d'apprentissage en se basant sur un ensemble de solutions obtenues par télémétrie à partir de la station sol d'Alsat-1(Arzew). Les résultats de simulation montrent l'efficacité et le bien fondé de la méthode utilisée.

III.3.1. Alsat– 1

Le satellite Alsat-1 fait partie d'une nouvelle génération de satellites avec grandes capacités de commande d'attitude et d'orbite et un downlink à haut débit. La structure de ce satellite utilise les modules standards de SSTL de tailles différentes (aluminiums usinés) pour loger l'électronique et les sous-systèmes.

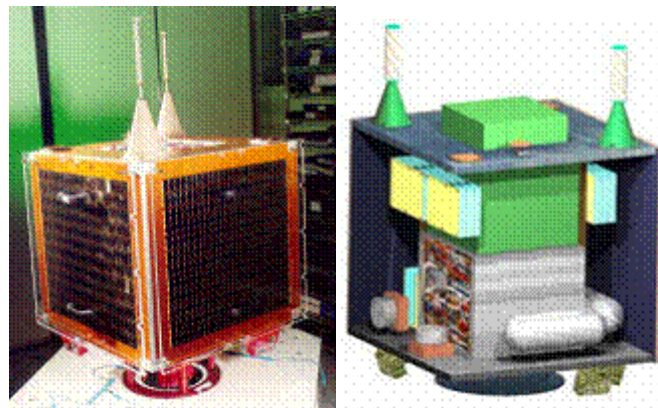
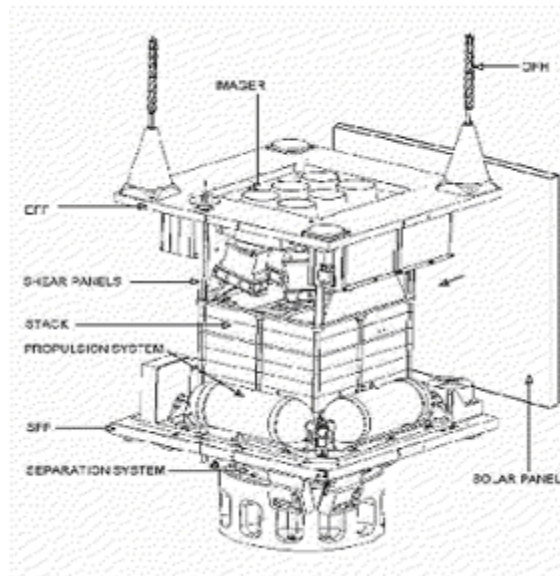


Figure III.9 : micro satellite Alsat 1

La plateforme augmentée du microsatellite utilisée pour AISAT-1 a des dimensions d'environ de $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ dans la configuration de lancement (figure III.9). Les panneaux solaires du satellite utilisent des cellules de GaAs/Ge et fournissent une puissance totale d'environ de 240 W. L'énergie est stockée dans une batterie rechargeable (NiCd) de 4 ampères-heure. AISAT-1 a une masse totale approximative de 92 kilogrammes. Un système de propulsion à gaz liquéfié, augmenté d'un résistojet, permet le maintien en orbite pendant la durée de vie de la mission [4].

III.3.2. Batterie d'un microsatellite

Le sous-système énergie de bord a la charge d'assurer l'alimentation électrique des différents équipements d'un satellite à partir de l'énergie instantanée issue du générateur solaire et des possibilités de stockage et de restitution énergétique de la batterie. Cette dernière constitue l'élément de stockage d'énergie permettant l'alimentation des équipements au cours des éclipses. Sa masse est, de loin, la plus importante par rapport aux autres éléments du sous-système de puissance. Elle est composée par une mise en série d'éléments Nickel Cadmium. L'un des facteurs le plus essentiel qui conditionne la durée de vie des éléments (accumulateurs NiCd) est la température.

III.3.3. Applications

Pour notre application, nous avons utilisé la boîte à Outils «Fuzzy logic » disponible sur Matlab [19]. Cette boîte permet de faire l'apprentissage et une visualisation de l'erreur commise du réseau.

III.3.3.1. Base d'apprentissage et Mise en forme des données pour un réseau neuro-flou

L'apprentissage de réseau se fera par un modèle d'apprentissage parallèle. Afin de pouvoir générer l'apprentissage du réseau, il est nécessaire de créer une base d'apprentissage. Comme l'apprentissage est supervisé, cette base doit contenir à la fois l'entrée du réseau et la sortie souhaitée. Lorsque la phase d'apprentissage est terminée, on procède de la manière suivante :

1. Test du réseau.

2. Si le test fournit de bons résultats, alors le réseau sera prêt à calculer la sortie correspondant à une entrée donnée. Si non, il faut régler les paramètres du système, pour augmenter les performances du réseau, et répéter la phase précédente.

De manière générale, les bases de données doivent subir une phase de prétraitement (Preprocessing) et une phase de post-traitement (Postprocessing) (Figure III.10) afin, d'être adaptées aux entrées et aux sorties du réseau neuro-flou et de rendre la formation de réseau neurologique plus efficace. Le prétraitement et le post-traitement configurent les interfaces de réseau pour exécuter les fonctions particulières.

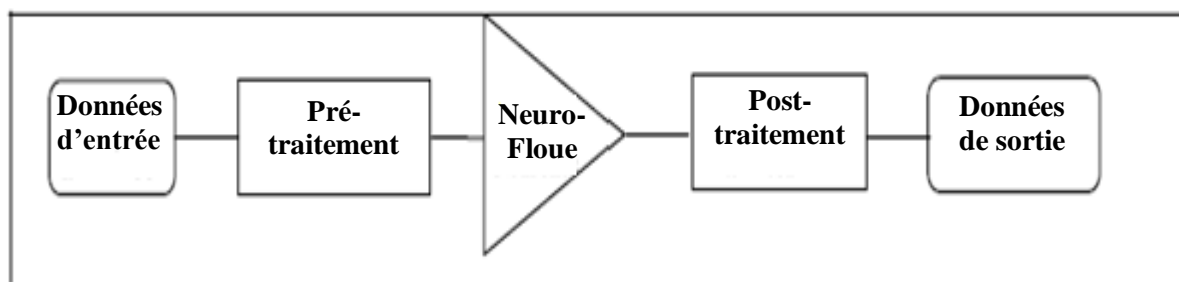


Figure III.10 : Phase de prétraitement et de post-traitement

III.3.3.2. prétraitement des données

Un prétraitement courant consiste à éliminer les discontinuités artificielles dans l'espace de fonction d'entrée et de ramener les entrées de problème à un ensemble d'information approprié. Ensuite il faut faire une normalisation appropriée, qui tienne compte de l'amplitude des valeurs acceptées par le réseau.

Dans notre étude, le prétraitement des données est une étape importante car elle permet de sélectionner, dans l'espace de représentation "l'information" nécessaire à l'application. Cette sélection passe par la conversion de la date en une valeur numérique (exp : le 18 octobre 2005 correspond à 1, le 19 octobre correspond à 2, ainsi de suite jusqu'au 12 janvier 2006).

Nous avons construit un fichier de données correspondant à notre étude ; ainsi à chaque journée, correspond la température de la batterie pris à 12h00.

Les paramètres du modèle d'apprentissage sont les suivants :

- nombre d'itérations : 20 et 200000,
- fonctions d'appartenance : bell,
- nombre de fonctions d'appartenance : 25.

III.3.3.3. Résultats

Les figures III.11 et III.12 représentent respectivement l'évolution de la température des batteries au cours de la période (18 octobre 2005 jusqu'au 12 janvier 2006). On remarque que l'approche neuro-floue donne de bons résultats, avec une très bonne concordance avec les mesures en utilisant un nombre d'itérations égale à 200000.

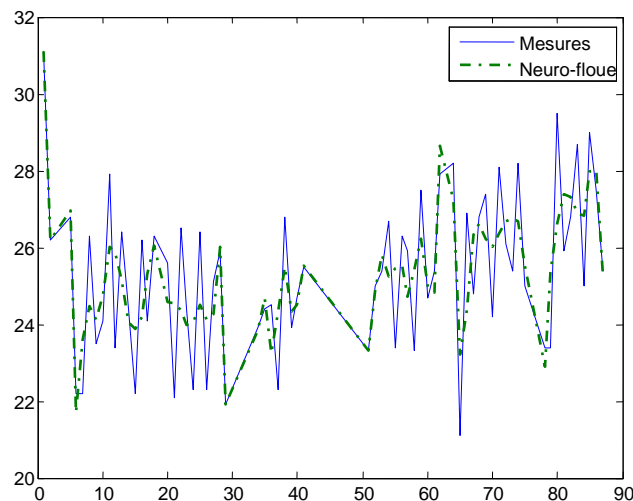


Figure III.11 : Évolution de la température sur une période (itérations=20)

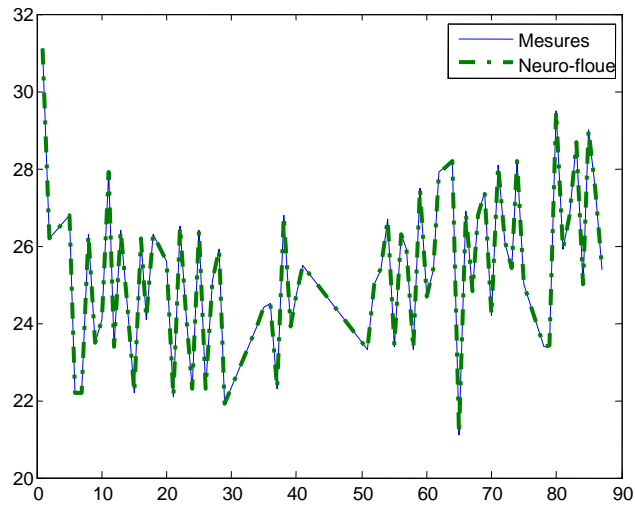


Figure III.12 : Evolution de la température sur une période (itérations =200000)

III.4. Conclusion

Nous avons présentés dans ce chapitre une description générale de la théorie floue et Neuro-floue et nous nous sommes intéressés principalement aux systèmes qui intègrent des règles floues dans des réseaux, aux systèmes qui font l'extraction de règles floues à partir des réseaux et les systèmes qui implémentent des neurones flous. Enfin, nous avons appliqué cette approche pour l'estimation de la température. Les résultats de simulation montrent le bien fondé de cette approche.

CONCLUSION GENERALE

La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire est une des alternatives qui, depuis l'avènement des grands programmes spatiaux, a montré sa grande souplesse et son aptitude à fonctionner en milieu hostile. Il s'agit d'une solution intéressante aux moyens de productions conventionnels.

Pour assurer le fonctionnement d'une batterie à son point idéal, nous avons présenté une stratégie d'hybridation entre deux techniques : les réseaux de neurones, et la logique floue en vue d'élaborer un modèle d'estimation de la température de la batterie.

L'estimation par l'approche ANFIS a montré l'efficacité de cette dernière. L'utilisation de l'approche neuro-flou (ANFIS) a permis une génération automatique des règles floues.

Selon les résultats obtenus, on peut conclure que le système neuro-flou fait apparaître un bon compromis entre la caractérisation et l'efficacité des calculs. sa robustesse, sa rapidité et la précision de ses sorties lui permettent de donner des décisions correctes et d'éviter les cas d'indécisions, les réseaux de neurones avec leurs capacités à s'adapter à des situations inconnues par le biais de l'apprentissage, et la logique floue avec sa capacité de modélisation de connaissances imprécises et gestion de l'incertitude.

Les résultats de simulation montrent l'efficacité de l'approche utilisée de point de vue précision.

En ce qui concerne les perspectives de ce travail, nous pouvons citer :

- ✓ Estimation de la température par approche SV Régression
- ✓ Utilisation des réseaux de neurones artificiels pour l'estimation de la température.

Références bibliographiques

Chapitre 1

- [1] G. Maral and M.Bousquet, "Satellite Communications Systems", John Wiley and Sons, 1986.
- [2] V. Marinus Van Der Zel, "Autonomous power system for low earth orbit Micro satellite. Guildford", UK, University of Surrey, 1990.
- [3] <http://www.eduscol.education.fr>
- [4] M. Bekhti, M.N Sweeting, and W. Sun, "Alsat-1: The first step into space for Algeria," in Proc. 53rd IAC and World Space Congress., Houston, TX., 2002.

Chapitre 2

- [5] B. Marty, "practical switching power supply design", Academic press, INC, Edition 1993.
- [6] P. Siffert, "Nouvelles techniques de réalisation de photopiles au silicium", Centre de Recherches Nucléaires Groupe de Physique et Applications des Semi-conducteurs (PHASE), 67037 Strasbourg-Cedex, France, 1979.
- [7] P. Leturcq et G. Rey. "Physique des composants actifs à semi-conducteurs". Dunod. 1978.
- [8] J.-D. Chatelain. "Dispositifs à semi-conducteurs". Traité 3E. Dunod. 1979.
- [9] G. CAILLON, " Accumulateurs portables ", Ingénieur de Recherche et Développement Société SAFT, Ingénieur de l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la ville de Paris (ESPCI), 2001.
- [10] [http // www.arebor-energie.fr](http://www.arebor-energie.fr)

Chapitre 3

- [11] T. Benmiloud, " Techniques de Modélisation et de Commande Neuro-floue Adaptative (ANFIS) ", Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran, USTO, 2006.

- [12] S. Varkiani, " Application des Réseaux Neuronaux Flous à l'Identification et la Protection d'un Transformateur Triphasé ", Mémoire présenté à l'université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, Avril 1998.
- [13] M. Mordjaoui, " Modélisation des effets électromagnétiques Apport de la logique floue et Neuro-floue" Thèse de doctorat es-sciences, Université De Batna, Juin 2008.
- [14] O. Kisi, " Suspended sediment estimation using neuro-fuzzy and neural network approaches ", Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques, Vol. 50, No 4, August 2005, pp. 683-696.
- [15] J.S.R. Jang, " Neuro-Fuzzy Modeling : Architectures, Analyses and Applications ", Doctor of Philosophy in Electrical Engineering and Computer Science in the Graduate Division of the University of California, Berkely, United States of America, July 1992.
- [16] Y. Miloud, "Commande Neuro-floue d'une Machine Asynchrone " Mémoire de Magister, Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf d'Oran USTO 2002.
- [17] M. Zerikat, M. Bendjebbar and N. Benouzza « Dynamic Fuzzy-Neural Network Controller for induction motor drive », IEEE Transactions on Engineering, Computing and Technology, World Enformatika Society, Vol. 12, No10, pp.278-283, December.2005.
- [18] J.S.R Jang, " ANFIS : Adaptive-Network based Fuzzy Inference Systems ", IEEE, Trans on System, Man and Cybernetics, Vol. 23, N°5, May 1993, pp. 665-685.
- [19] Math works Inc, Fuzzy logic Toolbox User's Guide. 1998.

Résumé:

L'objectif de ce mémoire vise l'application de nouvelles techniques artificielles et intelligentes de commandes non linéaire pour l'estimation de la température des batteries. Dans ce contexte, nous avons proposé une des solutions pour pallier ce problème consiste à introduire l'approche Neuro-Floue permettant d'estimer la température de la batterie d'Alsat-1. La combinaison Neuro-Floue peut résoudre le problème d'identification en utilisant le réseau de neurone et le problème de contrôle par la logique floue.

Pour cela, il est possible de construire le système neuro-flou durant la phase d'apprentissage en se basant sur un ensemble de solutions obtenues par la télémétrie à partir de la station sol d'Alsat-1 (Arzew).

Mots clés: Batterie, Alsat-1, neuro-floue, estimation