

Chapitre

6

Modélisation du comportement de l'accumulateur à l'aide de la logique floue

6. Modélisation du comportement de l'accumulateur à l'aide de la logique floue

Nous tenterons utiliser les informations du chapitre précédent pour proposer une stratégie pour l'évaluation du niveau de charge et de l'usure de l'accumulateur électrochimique. Nous allons tout d'abord nous livrer à une étude des moyens à notre disposition.

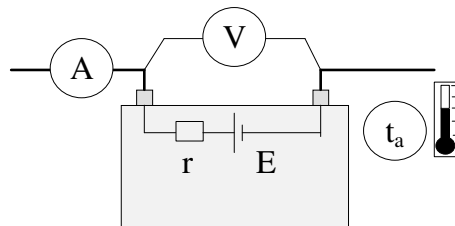
6.1 L'évaluation des accumulateurs

L'accumulateur offre des grandeurs accessibles qui sont dépendantes les unes des autres et des conditions de fonctionnement. Les relations non linéaires qui les relient et la forte influence du passé font de l'évaluation de l'accumulateur et de la création d'indicateur fiable une chose difficile. De plus une des grandeurs stratégiques de la batterie est la quantité d'énergie stockée qui reste inaccessible car son meilleur estimateur est la quantité de matière active disponible.

Les quelques grandeurs accessibles sont sur l'accumulateur plomb étanche :

- la tension aux bornes de l'accumulateur (FEM en circuit ouvert),
- l'intensité qui traverse le circuit,
- la température ambiante ou celle du bac de la batterie
- la température interne pour les rares cas où un capteur de température est intégré.

Figure 6-1 « Les grandeurs accessibles de l'accumulateur »

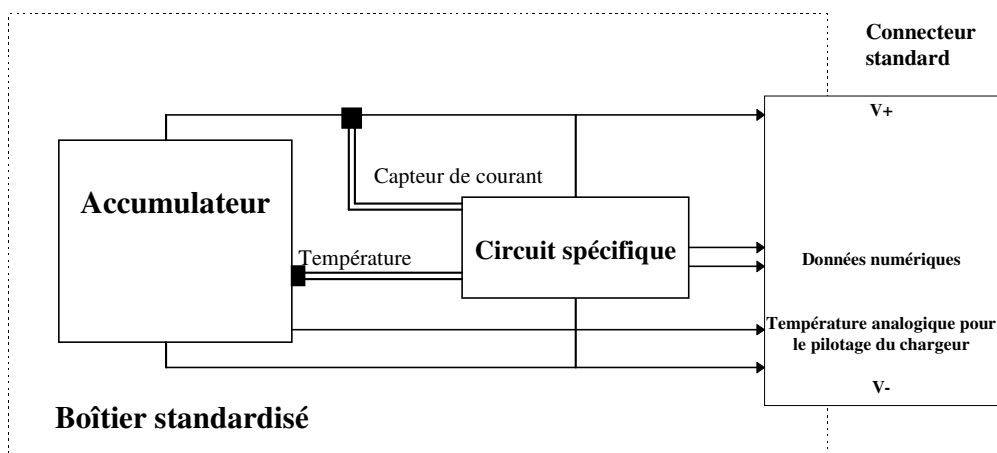


6.1.1 Les méthodes rencontrées

Ces méthodes ont généralement vu le jour dans le cadre d'applications bien particulières. Les principaux domaines où elles sont utilisées sont :

- les installations isolées utilisant des générateurs photovoltaïques (principalement des stations radios ou météorologiques, centraux téléphoniques, des phares maritimes),
- les véhicules autonomes (bateaux, voitures, bus, trains),
- les équipements portables (ordinateur, instruments de communication et de mesure). Ces derniers ont fait l'objet d'une proposition de standard par deux industriels : *Duracel* et *Intel* [JCG94]. Les spécifications portent le nom de SBD (Smart Battery Data) et de SMBus (System Management Bus). Elles définissent les flux de données qui circulent entre l'accumulateur intelligent et l'équipement hôte. Le temps de fonctionnement restant est calculé en fonction de la capacité stockée, de la température, du courant débité instantané et moyen, du nombre de cycles déjà effectués. Des retours directs d'information notamment sur les défauts (surcharge en courant ou élévation anormale de la température) sont également disponibles pour le chargeur de batterie. Le produit intègre trois capteurs (tension, courant, température).

Figure 6-2 « Constitution d'un accumulateur intelligent vu par Intel et Duracel »



Leurs principales applications sont :

- la détection de panne,
- la prédiction d'autonomie,
- l'évaluation de l'usure.

L'évaluation peut être :

- *Ponctuelle* : l'évaluation est réalisée à des moments précis, périodiquement ou à l'occasion d'une décharge de l'accumulateur. Ces tests permettent de contrôler l'état de l'accumulateur à un instant t mais ne permettent pas de prévoir sa défaillance avant un nouveau test.

- *Continue (monitoring)* [ZIM78] : l'évaluation est faite au *fil de l'eau* et permet de détecter une variation rapide des performances, signe d'une défaillance prochaine.

■

6.1.1.1 Le test de grandeurs corrélées à l'état du système

Ces méthodes sont très utilisées pour la détection de panne. La stratégie est d'utiliser une grandeur accessible corrélée avec le phénomène ou la grandeur inaccessible à tester [CIG88]. Le problème de ces grandeurs accessibles est d'être fonction d'autres grandeurs de l'accumulateur. Il faut donc poser des approximations restrictives pour utiliser ces méthodes ou mettre en place un système d'analyse pour fiabiliser le résultat.

Parmi les grandeurs les plus utilisées nous citerons :

- *L'impédance interne* [GOP79, BOU91, MAR92, RYB96]. C'est probablement la méthode la plus usitée. La valeur mesurée si elle n'est pas aberrante, n'offre que peu d'intérêt et ce sont plutôt ses variations qui sont intéressantes.
- *La tension d'équilibre U_0* [HIG87]. Dans des conditions d'usure fixes connues, elle permet une évaluation avec une précision supérieure à 10%, cependant une mesure ne peut être effectuée qu'après avoir déconnecté l'accumulateur du circuit pendant 24 heures.
- *La densité d'électrolyte*. Lorsqu'elle est accessible, c'est un très bon indicateur bien que très sensible aux phénomènes de déshydratation. Cette solution n'est utilisée que dans des cas très spécifiques (sous-marins de combat).
- *L'évaluation de la chute de tension initiale*. Elle est principalement utilisée lors de décharge à très fort régime.

6.1.1.2 Comparaison à des performances précédentes ou théoriques

Le test s'effectue en comparant le relevé de deux caractéristiques ou les performances obtenues à un point de fonctionnement de référence. Les données de référence peuvent être un réseau de courbes, des performances théoriques ou des mesures antérieures. Les grandeurs les plus utilisées sont la tension et la résistance interne.

Ces méthodes utilisent les cycles de charge et décharge (partiels ou complets) et peuvent s'effectuer à l'arrêt ou en fonctionnement. Dans ce cas, elles ont le désavantage de consommer de l'énergie stockée et empêchent l'accumulateur d'être pleinement opérationnel jusqu'à sa recharge complète. Pour palier ce défaut, il est possible d'utiliser les cycles de décharge naturels du circuit. Cependant une fréquence faible et des conditions de fonctionnement trop éloignées de celles utilisées pour le point référence rendent les tests non significatifs et non fiables.

- ***La décharge complète***

Elle est adaptée aux mesures en laboratoire ou hors fonctionnement. Cette méthode est très utilisée pour l'évaluation des batteries de matériels portables avant une intervention sur le terrain ou lors des phases de maintenance des véhicules (voiture ferroviaire, bateaux) [HIG87]. L'utilisateur simule les conditions de décharge de son installation et effectue le comptage de la capacité par un compteur ampère-heure mètre. Ces mesures peuvent se répéter lors de la recharge (*application du Nivac 3M d'ARNATRONIC*).

Ces tests s'ils sont répétés et poussés peuvent diminuer la durée de vie de la batterie.

- **La décharge partielle**

Elle est effectuée sur l'installation qui possède la possibilité de faire débiter la batterie. Ce débit peut s'effectuer dans le circuit, dans un récepteur étalon ou vers le réseau pour récupérer l'énergie [BAM96]. Seule une partie de la capacité sera déchargée (environ 30% à 40%) pour ne pas rendre la batterie totalement indisponible. L'efficacité de ces méthodes est suffisante pour détecter des pannes ou de forte dégradation des performances, cependant les variations significatives de la tension et de la résistance interne n'apparaissent vraiment qu'après une décharge d'environ 50%.

Pour palier ce problème de consommation de l'énergie, il est possible de s'orienter vers les solutions de test à fort courant qui ont pour effet d'amplifier les phénomènes liés à la chute de tension initiale et à la résistance interne.

- **Etude de la réponse à un échelon en courant**

Pour être efficace et consommer peu d'énergie, il doit s'effectuer à un régime de décharge soutenu pendant un temps très court (exemple: pour une batterie de capacité 10 Ah, une décharge de 100A pendant 10s correspond à 0,27 Ah déchargé). Les performances en tension sont alors comparées à d'autres batteries réputées bonnes ou à un gabarit de tension de référence permettant l'extrapolation de la capacité de la batterie sur l'installation (*application du Nivac Plomb d'ARNATRONIC*).

6.1.2 Les modèles connus d'accumulateurs

Ils sont obtenus par :

- *La modélisation* : qui consiste à décomposer en sous systèmes mis en équation d'après les lois physiques. La concaténation de l'ensemble des relations aboutit à un modèle global appelé modèle de connaissances dont la manipulation est fastidieuse et nécessite de la puissance de calcul.
- *L'identification* : qui consiste à mesurer les entrées et sorties du système et à appliquer des techniques d'analyse de données pour obtenir un modèle de représentation (modèle boîte noire, de comportement) ou éventuellement boîte grise (qui intègre certaines lois physiques).

Il est possible de classer les modèles disponibles dans la littérature en deux catégories selon leurs objectifs [PES89]:

- **Les modèles de CAO**

Ils sont utilisés par les fabricants de batterie pour recréer le comportement de l'accumulateur en vue de son analyse. Ils décrivent l'accumulateur et son fonctionnement à l'échelle microscopique et les différents phénomènes électrochimiques y sont pris en compte de façon très fine. Leur mise en oeuvre nécessite la connaissance d'un grand nombre de paramètres physiques concernant les matériaux constituant la cellule et des moyens de calcul très importants.

Ils utilisent les premiers modèles d'électrode poreuse appliquée à la batterie plomb/acide en 1970.

- NEWMAN et TIEDEMAN [NEW81] ont affiné la théorie de l'électrode poreuse afin qu'elle soit applicable à un grand nombre de couples électrochimiques et validé leur développement en vérifiant expérimentalement la non uniformité de la distribution de courant au sein de la matière poreuse.
- GIDASPOW et BAKER [GID73], ont adapté le modèle de NEWMAN pour prendre en compte la variation de volume entre les produits réactifs.
- SIMONSON [SIM73] applique la théorie des électrodes poreuses à l'électrode de PbO_2 . Il prend en compte les effets de cristallisation du PbSO_4 sur la structure poreuse et met en évidence les phénomènes d'obturation des pores par le PbSO_4 lors des décharges à fort courant. Cependant, cette théorie n'est pas vérifiée par l'analyse microscopique.
- BOUET et POMPON [BOU81] utilisent un modèle original de l'électrode poreuse de PbO_2 afin d'en étudier les causes de dégradation. L'électrode est représentée par un réseau électrique : dans chaque maille figure la résistance de l'électrolyte, de matière active, de polarisation (transfert de charge) et un générateur de tension équivalent à la variation du potentiel d'équilibre en fonction de la concentration de l'électrolyte. Après une analyse très fine des phénomènes de transport, ils montrent que l'augmentation de la résistance intergranulaire de la matière active est la principale cause de perte de capacité.

D'autres méthodes utilisent une forte masse de calculs différentiels utilisant les éléments finis.

- MURIMITO et AL [MOR88] calculent la distribution de potentiel et de courant dans l'électrode par une méthode aux différences finies. Elle reste une méthode simple utilisant la conservation du courant et la loi d'OHM. Des relations empiriques sont introduites pour décrire la relation intensité-potentiel en chaque noeud en fonction de l'état de charge de l'électrode.
- GU et NGUYEN [GUN87] proposent un modèle plus particulièrement adapté aux batteries de démarrage. Il permet l'étude du comportement dynamique de la concentration de l'électrolyte et des changements de porosité en fonction de l'état de charge.
- SUNU et BURROWS [SUN82] affinent le modèle de MURIMITO et AL en remplaçant les interpolations empiriques des courbes intensité-potentiel par la formule de SHEPHERD. De plus, leur développement tient compte de l'effet thermique produit par les fortes densités de courant.

- **Les modèles de comportement**

Ces modèles ont pour but, non pas de caractériser l'état microscopique interne, mais de décrire avec le plus d'exactitude possible les variations des grandeurs macroscopiques externes au cours du fonctionnement. Ils utilisent la connaissance du fonctionnement interne pour établir des corrélations simples entre les grandeurs caractéristiques que sont la tension, l'intensité, la température et l'état de charge.

- SHEPHERD [SHE65] est un des précurseurs dans ce domaine, sa formule semi-empirique est utilisée et améliorée par de nombreux auteurs.

Comme application du modèle de SHEPHERD on relève notamment les travaux de :

- TER HORTS et AL [TER88] qui améliore la précision en calculant les paramètres sur un grand nombre de données expérimentales et introduisent un modèle de capacité. Ce dernier adapte la capacité de l'accumulateur en fonction du régime de charge.
- FACINELLI [FAC88] qui prend en compte la température dans le calcul de la tension d'équilibre.
- WILS [WIL88] qui tient compte de l'histoire de l'élément en donnant un poids plus important aux dernières valeurs du courant.
- MENGA et AL [MEN84, BUO87] se différencient des précédents par la caractérisation expérimentale de la résistance ohmique, la résistance de diffusion, le temps caractéristique des phénomènes transitoires, le potentiel d'équilibre et la capacité. Les équations semi-empiriques sont établies en tenant compte des variations de courant et de température. La notation est simplifiée par l'introduction d'un courant moyen pour le calcul des phénomènes de diffusion.

- ***Les modèles mixtes***

Ce type de modèle reproduit le comportement de l'accumulateur en faisant référence à des équations simplifiées utilisées dans les modèles de CAO. Ce sont des systèmes de plusieurs équations paramétriques à plusieurs inconnues. Ce type de modèle est plus précis que les modèles de comportement mais beaucoup plus difficile à mettre en oeuvre. Il nécessite une connaissance approfondie des caractéristiques de l'accumulateur en faisant référence à de nombreuses données physiques constructeurs (quantité de matières, dimension, structure des éléments). L'identification des paramètres non calculables nécessite un large plan d'expérience.

Un exemple est le modèle proposé par BISCAGLIA [BISC92] qui propose un modèle de décharge constitué de 5 équations et à 8 paramètres qu'il simplifie en un système de 2 équations et 10 paramètres à identifier. Ce modèle est performant pour reproduire le comportement de l'accumulateur en décharge à différents régimes mais ne tient pas compte de la charge ni du vieillissement. Il a été utilisé pour évaluer l'autonomie d'une batterie spécifique utilisée dans les applications solaires.

6.1.2.1 Présentation du modèle de SHEPHERD

Le modèle de SHEPHERD [SHE65]

Dans ce modèle, le courant de décharge et la résistance ohmique sont constants et la chute de potentiel due aux différentes surtensions est une fonction linéaire de la densité de courant. Ce modèle très

simple permet de reproduire avec une assez bonne précision les courbes de décharge d'un grand nombre de couples électrochimiques. Le calcul des paramètres peut se faire très simplement sur un petit nombre de points de mesures. Ce modèle ne prend cependant pas en compte la température, la variation linéaire du potentiel d'équilibre en fonction de l'état de charge.

Etablissement de l'équation de décharge

Les hypothèses de départ sont :

- L'anode et la cathode possèdent une matière active poreuse.
- La résistance de l'électrolyte est constante durant la décharge.
- La cellule est déchargée à courant et température constants.
- La polarisation est une fonction linéaire de la densité de courant dans la matière active.

La densité de courant i et la surtension η d'une électrode à concentration constante de l'électrolyte sont reliées par la relation de BUTLER-VOLMER :

$$i = I_o \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot \eta \cdot n \cdot F}{R \cdot T}\right) - I_o \cdot \exp\left(\frac{-(1 - \alpha) \cdot \eta \cdot n \cdot F}{R \cdot T}\right) \quad (0.1.)$$

i	: densité de courant apparent (A/cm ²)
I_o	: densité de courant d'échange (A/cm ²)
α	: coefficient de transfert ($0 \leq \alpha \leq 1$)
n	: nombre d'électrons transférés
η	: surtensions électrochimiques
F	: Constante de Faraday
T	: température (°K)
R	: constante des gaz parfait

Le développement des termes exponentiels en série (les puissances supérieures à 1 peuvent être négligées si η est suffisamment petit) donne :

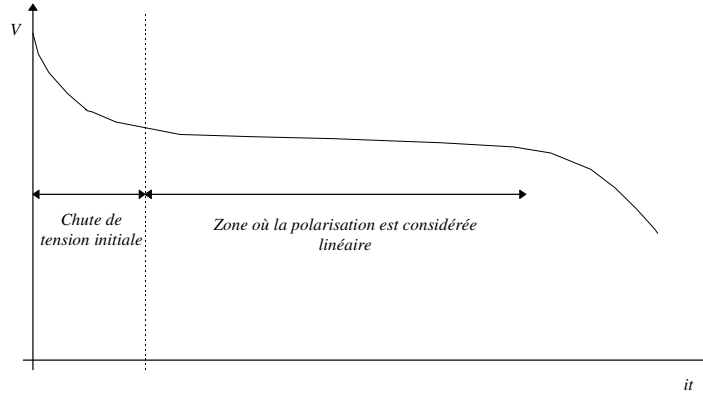
$$\eta = \left(\frac{R \cdot T}{n \cdot F \cdot I_o} \right) \cdot i \quad (0.2.)$$

La relation linéaire obtenue entre η et i est assez précise pour des valeurs de η allant jusqu'à 0,03V.

Dans le cas d'un générateur électrochimique, la surtension η varie linéairement en fonction de i , pour des valeurs de η allant de 0,02 à 0,04 V, ce qui englobe toute la plage de variation de tension que l'on rencontre lors des opérations de décharge.

En considérant la caractéristique de décharge tension aux bornes de l'accumulateur par rapport à la quantité d'électricité déchargée à l'instant t dans le cas d'une décharge à courant constant i .

Figure 6-3 « Décharge d'un accumulateur - modèle de SHEPHERD »



Si l'on suppose que la polarisation est linéaire après la chute de tension initiale, alors le potentiel E_c de la cathode s'écrit :

$$E_c = E_{oc} - K_c \cdot i_m \quad (0.3.)$$

E_{oc} : potentiel constant

K_c : coefficient de polarisation de la cathode par unité de densité de courant,

i_m : densité de courant en A/m^2

Dans le cas d'une électrode poreuse, la densité de courant i_m est définie comme étant inversement proportionnelle à la quantité de matière active non encore déchargée, et égale au courant i au début de la décharge, d'où :

$$i_m = \left(\frac{Q_c}{Q_c - it} \right) \cdot i \quad (0.4.)$$

t : temps en heures

Q_c : quantité de matière active de la cathode en Ah/cm^2

i : densité de courant en décharge A/cm^2 .

Les tensions d'anode et de cathode deviennent respectivement

$$E_a = E_{oa} - K_a \cdot \left(\frac{Q_a}{Q_a - it} \right) i \quad (0.5.)$$

$$E_c = E_{oc} - K_c \cdot \left(\frac{Q_c}{Q_c - it} \right) i \quad (0.6.)$$

K_a, K_c : coefficient de polarisation en $\Omega \cdot cm^2$

Si Q_a est approximativement égale à Q_c (cas général), la tension aux bornes de l'élément devient :

$$U = U_0 - K \frac{Q}{Q - it} i \quad (0.7.)$$

En introduisant la chute de tension ohmique nous obtenons :

$$U = U_0 - K \frac{Q}{Q - it} i - Ni \quad (0.8.)$$

Une amélioration possible est la prise en compte de la chute de tension au début de la décharge par l'adjonction d'un terme correctif. La forme choisie est une fonction exponentielle de la quantité de courant (Ah). Les termes A et C sont des constantes empiriques à identifier. L'équation devient alors :

$$U = U_0 - K \frac{Q}{Q - it} i - Ni - A \exp(-C.it) \quad (0.9.)$$

• **La variante de MC. DERMOTT et FOX**

Il utilise la forme et les hypothèses du modèle de SHEPHERD mais remplace certaines variables par des paramètres identifiés pour un fonctionnement précis. Les courants de charge et décharge n'apparaissent pas dans les équations, il est donc impossible de modéliser un réseau de courbes à différents régimes avec les mêmes paramètres comme le modèle de SHEPHERD.

En décharge
$$V = A - \frac{B}{C - q} + D \cdot \exp(-E \cdot q) \quad (0.10.)$$

En charge
$$V = A + \frac{B}{C - q} - D \cdot \exp(-E \cdot q) \quad (0.11.)$$

V représente la tension en Volt aux bornes de l'élément lorsque la quantité d'électricité déchargée est égale à q. A,B,C,D et E sont 5 paramètres réels ajustables.

Le fait de travailler en identification permet de corriger les hypothèses simplificatrices utilisées et recréer ainsi de manière fidèle la chute de tension en fin de capacité qui est bien marquée pour une batterie au plomb. Il donne de très bons résultats lorsque l'on travaille dans les mêmes conditions de courant de décharge et de température, mais nécessite une identification pour les différents régimes de fonctionnement.

Il est intéressant comme première approche de la batterie mais ne fait pas intervenir la température et des paramètres de vieillissement.

Tableau 6-1 « Modèles mathématiques relevés dans la bibliographie pour la modélisation de la décharge des accumulateurs »

Auteurs	Modèle	Paramètres
PEUKERT	$I^n \cdot t = c$	I : courant de décharge t : temps total de décharge n, c : constantes associées à l'accumulateur
BILLERBECK	$U = U_G + U_T - I_d R$	$U_G = f(PDD)$: polynôme d'ordre 5 PDD : Profondeur De Décharge $U_T = 0,00072 (T_c - 32,2)$ T_c : température en fin de décharge en °C I_d : courant de décharge R : résistance interne
SHEPHERD	$U = E_o - K \frac{Q}{Q - It} I - NI$	E_o : F.E.M. K : coefficient de polarisation Q : quantité totale de matière active (capacité) N : résistance ohmique I : courant E_o, K, Q et N sont des paramètres ajustables
MC. DERMOT et FOX	$U = A + \frac{B}{C - X} + D \cdot \exp(-EX)$	X : quantité d'électricité déchargée A,B,C,D et E sont des paramètres ajustables

Modèle thermodynamique	$U = E^{\circ} + \frac{RT}{F} \ln\left(\frac{1+X}{X}\right) + K \frac{RT}{F} (2X - 1) - rI$	E° : différence des potentiels normaux X : fraction molaire de XX et XX K : constante empirique rI : chute ohmique
Modèle cinétique	$U = E^{\circ} + \frac{RT}{F} \ln\left(\frac{1+X}{X}\right) + K \frac{RT}{F} (2X - 1) - I \cdot R_o \exp(X - 1)$	Même paramètre que le modèle thermodynamique. La modification de $r=R_o \exp(X-1)$ rend compte de la variation de conductivité de la matière active entre la charge et la décharge.
Modèle chrono-potentiométrique	$U = E^{\circ} - rI + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{1 - (X + f)^{1/2}}{(X + f)^{1/2}}\right)$	$X = \frac{t}{\tau}$ avec τ temps que dure la décharge totale f : coefficient empirique

• Performances des modèles

La plupart de ces modèles nécessitent un travail d'identification de certains paramètres du modèle pour ajuster celui-ci aux caractéristiques de l'accumulateur. Ils sont adaptés à des régimes de fonctionnement et un environnement connu. Ils donnent de bons résultats pour le domaine de fonctionnement où ils ont été prévus (précision d'environ 1 à 5%).

• Amélioration des modèles

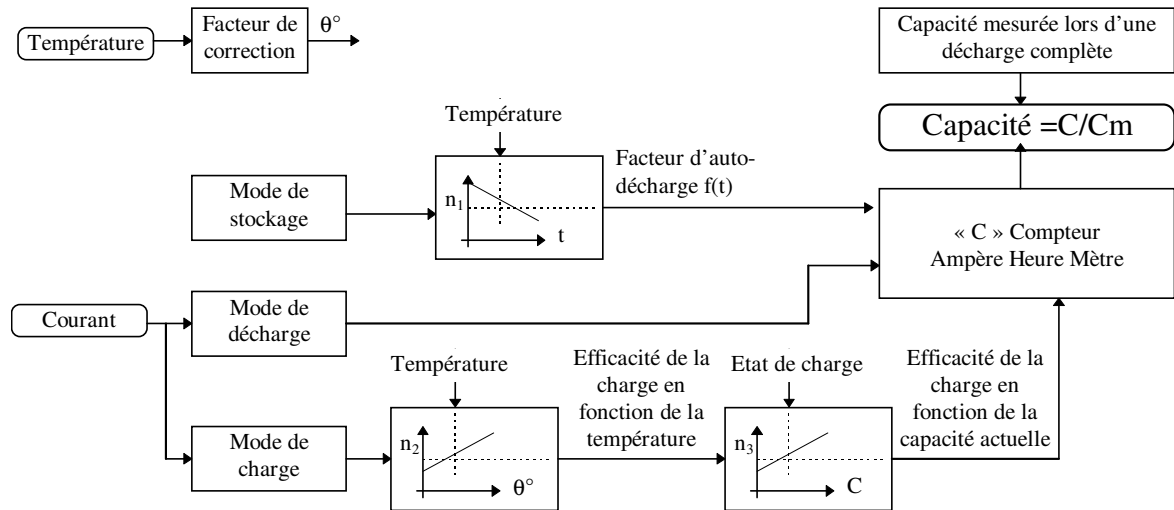
L'amélioration proposée par de nombreux auteurs passe par la prise en compte d'autres grandeurs d'influences. Ce sont principalement la température et la densité de courant. La prise en compte de mesures antérieures des performances et l'introduction de facteurs de correction permet une amélioration sensible des prévisions de capacité.

Exemple: le MTA11200 de chez MICROCHIP [MIC94].

Le circuit utilise la méthode du compteur ampère-heure-mètre. La capacité totale est automatiquement mesurée lors des décharges complètes et les résultats sont donnés en pourcentage de celle-ci. Associé à une EEPROM¹ externe il convient à un grand nombre d'accumulateurs. L'utilisateur peut paramétrer les corrections à apporter en fonction de la température et du niveau de charge. Les mesures et informations d'états sont accessibles par une liaison série

Figure 6-4 « Calcul de la capacité disponible avec le MTA 11200 »

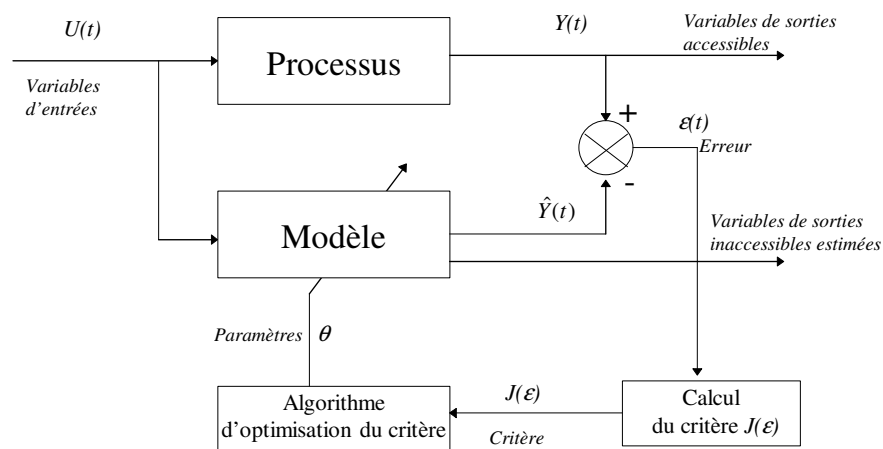
¹EEPROM : Mémoire à lecture seule effaçable électriquement



L'utilisation des modèles pose également le problème de la dérive des caractéristiques de l'accumulateur conséquence des phénomènes d'usure. Il est donc nécessaire d'utiliser ces modèles avec prudence en restant dans des conditions de fonctionnement où leurs hypothèses simplificatrices sont vérifiées et en apportant un travail d'analyse sur les résultats obtenus pour s'assurer de leur pertinence.

Pour prendre en compte la dérive des paramètres du modèle, des méthodes à base de modèles auto-adaptatifs peuvent être mises en oeuvre. Ces modèles utilisent un système d'identification en continu des paramètres du modèle faisant le plus souvent référence à des grandeurs telles que la résistance interne et la FEM. Ils ont l'avantage de fournir des résultats corrigés en fonction des utilisations passées. Ils permettent également un suivi de l'évolution de ces paramètres au cours du temps. La méthode la plus rencontrée est celle du modèle [RIC91].

Figure 6-5 Les modèles auto-adaptatif, la méthode du modèle»



6.2 Définition d'une stratégie utilisant la logique floue

- *Choix d'une stratégie de gestion de la batterie*

Sur notre module de gestion de l'énergie, les tests sur les grandeurs tension, courant et température de l'accumulateur sont déjà inclus dans le cahier des charges. Il en est de même pour la limitation du courant de charge et la compensation de la tension de charge en fonction de la température.

Notre objectif est l'amélioration de la gestion de l'autonomie en construisant les observateurs « *jauge de charge* » et « *jauge d'usure* ». Le premier, fondé sur une méthode d'intégration du courant (ampèremétrie), est représentatif de la quantité d'électricité stockée et sera utilisé pour la gestion de l'autonomie. Le second sera représentatif de l'état d'usure de l'accumulateur et principalement du cyclage.

Ces modèles seront continus échantillonnés avec une période d'échantillonnage égale à celle du noyau logiciel de gestion de l'actionneur (100ms).

- *Pourquoi la logique floue ?*

Simplifier la description du comportement

Les relations qui lient les différentes variables du système sont difficiles à expliciter, mais il est cependant possible de décrire le comportement global de l'accumulateur. Nous espérons que cette description sera suffisante pour représenter l'état de l'accumulateur en fonction de ces différents paramètres.

L'utilisation d'une description linguistique[ZIM91]

En principe, une grandeur peut prendre une infinité de valeurs, mais la logique floue permet un classement en sous-ensembles flous identifiés par un qualificatif linguistique. La description du système et des interactions des variables peut donc se faire de manière verbale à l'aide d'opérateurs logiques et de qualificatifs.

Notre espoir est donc à partir d'une description simplifiée de créer un modèle de comportement constitué d'équations du type :

Si la température **est** élevée **et** que le courant de charge **est** trop fort **et** que la charge **est** totale
alors le rendement de charge **est** très mauvais

Une mise en oeuvre à moindre frais de calcul

Les méthodes floues simplifiées ne nécessitent qu'un noyau d'inférence capable de traiter les équations logiques, en utilisant des calculs algébriques élémentaires (interpolation, produit) pour le classement des entrées et la création des sorties. Elles laissent donc espérer une mise en oeuvre peu gourmande en temps machine.

Figure 6-6 « comparatifs des méthodes à notre disposition »

Méthodes	Avantages	Désavantages
Table d'interpolation des caractéristiques	Simple à programmer	Nécessité de beaucoup de mémoire pour des surfaces complexes Nécessite un grand plan d'expérience ou la connaissance de ces surfaces
Modèle mathématique	Précis	Nécessité d'un processeur performant pour calculer le modèle en temps réel Nécessite l'identification de la forme et des paramètres des équations. Nous pouvons donc soit utiliser les modèles simplifiés, soit utiliser des modèles lourds ce qui n'est pas notre objectif.
Les réseaux de neurones [KOS92]	Simplicité	Nécessite un large plan d'expérience pour éduquer le réseau. Ce plan n'est pas à notre disposition.
<u>Logique floue</u>	Intuitive robuste pour les systèmes non linéaires	Pas très précise mais nous désirons obtenir un indicateur.

La réutilisation du noyau flou

La présence d'un noyau flou peut être intéressante pour la mise en oeuvre d'autres fonctions de l'actionneur et principalement :

- les régulations [LEE90],
- la création de fonctions de décision [KAU87, SIB92] : par exemple, la construction à partir de plusieurs critères (niveau de charge, densité de courant, temps) de la nécessité d'effectuer une charge rapide.

La disponibilité de moyens techniques

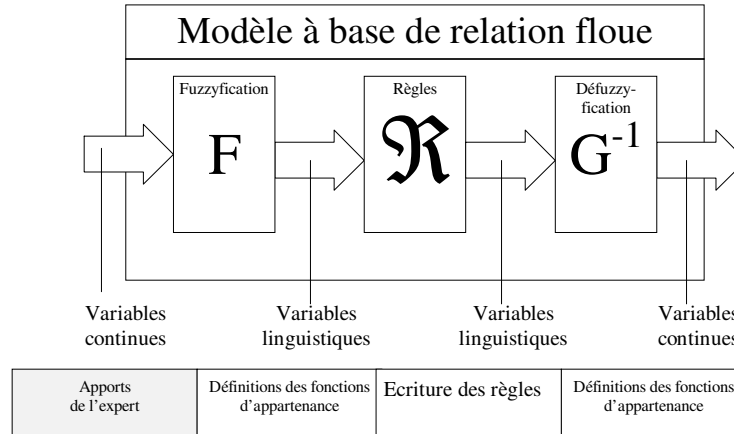
Des outils pour la mise en oeuvre d'applications utilisant la logique floue sont distribués par MOTOROLA. Un noyau d'inférence ainsi qu'un éditeur sont disponibles dans le domaine public pour le processeur utilisé dans notre application (68332).

6.3 Création du modèle flou

La logique floue est l'extension naturelle de la théorie des ensembles binaires : la transition d'appartenance à non-appartenance est graduelle [KAU73]. La fonction d'appartenance μ d'une variable à un ensemble peut prendre ses valeurs sur $[0,1]$ et non plus 0 et 1. Chacune de ces fonctions est associée à une étiquette linguistique. L'ensemble des fonctions d'appartenances constitue l'univers des discours. Le travail de transformation d'une variable continue en sa probabilité d'appartenance à une classe est réalisée par l'opération de fuzzyfication **F**. Les règles du système $\mathfrak{R}$ définissent les relations logiques entre les ensembles des variables d'entrées et les ensembles des variables de sortie à l'aide d'opérateur et des étiquettes linguistiques. La transformation des sorties en valeurs numériques est obtenue par une fonction $\mathbf{G}^{-1}$ de

défuzzification. Notre travail nécessite donc de définir chacune de ces étapes en précisant les méthodes et hypothèses utilisées [BOU95].

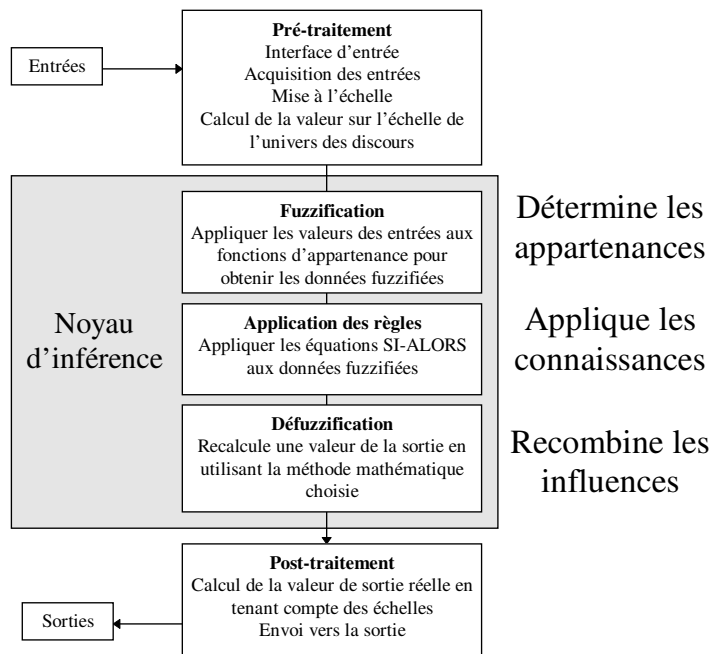
Figure 6-7 « Structure générale d'un système flou »



Le travail à apporter par l'expert consiste à définir les caractéristiques et la classification de ces entrées/sorties en utilisant des fonctions d'appartenances représentatives des points de fonctionnement qu'il désire décrire et la transcription sous forme de règle de sa connaissance [DUB80].

Puis la mise en oeuvre du modèle sur l'application suivra le schéma présenté sur la figure « *Synoptique de la mise en oeuvre d'un noyau d'inférence* ».

Figure 6-8 « Synoptique de la mise en oeuvre d'un noyau d'inférence »



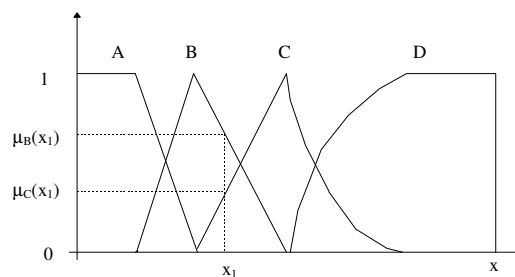
6.3.1.1 Définition du noyau d'inférence

Remarque : les hypothèses et choix simplificateurs que nous allons faire sont restrictifs par rapport à toutes les capacités qu'offre la logique floue, mais elles prennent en considération les contraintes de programmation et permettent une description plus claire des règles.

- **La fuzzyfication des entrées**

Chacun des univers des discours peut comporter autant de termes que l'on souhaite pourvu qu'il y en ait deux au maximum qui puissent être activés en même temps. La valeur maximum du degré d'appartenance est fixée à 1. L'ensemble des fonctions doit également respecter $\sum \mu(x)=1$ en tout point de l'univers des discours.

Figure 6-9 « Exemple de fonctions d'appartenance »



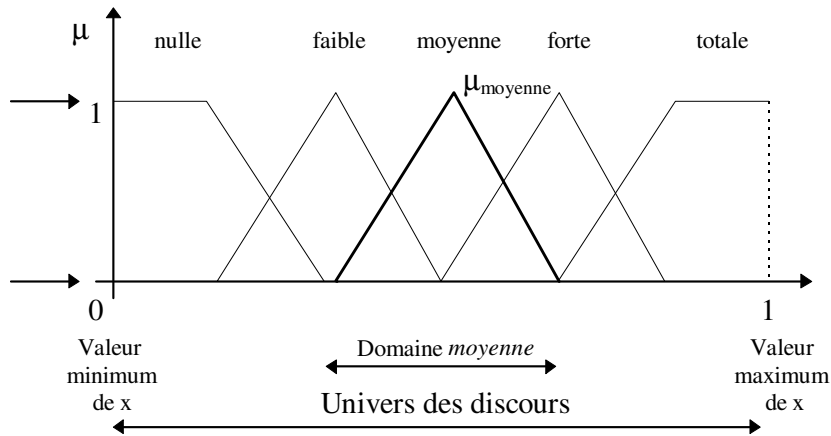
$$\mu_C(x_1) = 1 - \mu_B(x_1) \quad (0.12.)$$

Les fonctions d'appartenance les plus usitées sont de forme :

- *Singleton* : Ils produisent des transitions brusques sur les entrées. Ils sont plus particulièrement adaptés au classement des sorties.
- *Triangulaire* : sa simplicité pour les calculs en fait la forme la plus couramment employée dans les applications dans la mesure où aucune particularité n'est requise.
- *Trapézoïdale* : elles permettent la création d'une bande morte.
- *Gaussienne* : elles offrent des transitions plus douces entre les règles mais nécessitent plus de calculs.

Nous retiendrons les formes triangulaires et trapézoïdales pour leur simplicité de codage et de manipulation. Le nombre des fonctions d'appartenance sera limité autant que possible à 5 pour décrire le domaine d'une variable. Dans ce cas elles seront associées aux termes : *nulle - faible - moyenne - forte - totale*

Figure 6-10 « Forme générale de notre univers des discours »



- **La description des règles**

L'écriture des règles se fait sous le format : **si** (prémisse i) **alors** (conséquence i)

Le nombre de cas possibles s'exprime par la formule

$$N_{total} = \prod_{i=1}^n N_i \quad (0.13.)$$

avec N_i : Nombre de règles de l'entrée N

n : Nombre total d'entrées

Chacun de ces cas ne nécessite pas une description particulière. L'expert ne doit entrer que les équations suffisantes à la description du comportement de son système en ne précisant que les cas nécessitant une description plus fine.

Exemple :

(1) **Si** (A est forte) **alors** B est faible Constitue une règle précisant globalement le comportement de B en fonction de A

(2) **Si** (A est forte) **et** (C est faible) **alors** (B est très faible) Apporte une précision sur le cas A est fort et C est faible.

Ce type de raisonnement permet d'apporter une variation du résultat de la règle (1) pour le cas (2) mais ne permet pas de définir un comportement totalement différent pour la variable B dans ce cas. Pour cela il faut exclure la particularité (2) de (1) et exprimer les règles de la manière suivante :

(1) **Si** (A est forte) **et** (C n'est pas faible) **alors** B est faible

(2) **Si** (A est forte) **et** (C est faible) **alors** B est très faible

L'opérateur peut être simplement obtenu par la mise en oeuvre de l'opérateur **NON** :

(1) **Si** (A est forte) **et non**(C est faible) **alors** B est faible

Pour l'affectation des conséquences, on distingue deux types de règles :

Les règles de type MANDAMI [MAM74]

Elles utilisent une prémisse symbolique et une conclusion symbolique.

Exemple : **Si** *a est faible* **et** *b est total* **alors** *x est fort*

Les règles de type SUGENO [SUG83]

Elles utilisent une prémisse symbolique, mais la conclusion est une procédure donnant directement une valeur de la variable modélisée.

Exemple : **Si** *a est faible* **et** *b est total* **alors** $x=x_3$

Notre choix étant une description linguistique par un expert, nous utiliserons des règles du type MANDAMI.

Les opérateurs

Les opérateurs retenus sont les opérateurs élémentaires **ET** et **OU** obtenus avec la méthode du minimum et maximum.

Fonction ET : $\mu_{A+B} = \min(\mu_A, \mu_B) = \mu_A \wedge \mu_B$ (0.14.)

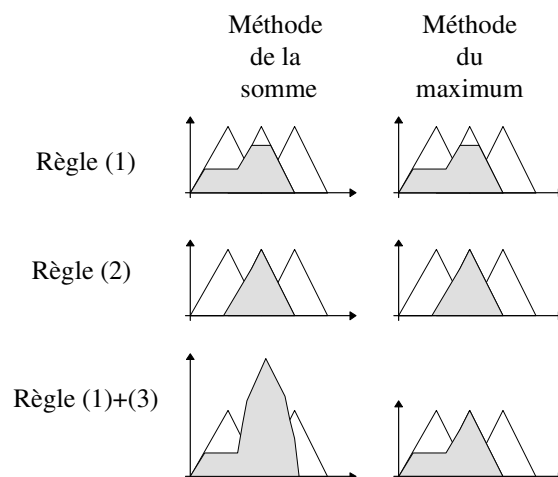
Fonction OU : $\mu_{A+B} = \max(\mu_A, \mu_B) = \mu_A \vee \mu_B$ (0.15.)

L'accumulation des résultats

Le résultat d'une règle est un vecteur représentant le degré d'appartenance à chaque fonction de son espace des discours. Le résultat cumulé des règles peut être obtenu par :

- *l'accumulation du poids des différentes règles* : cette méthode pose le problème de la saturation des sommes si le nombre de règles est important.
- *La conservation de la valeur maximum rencontrée.*

Figure 6-11 « Le calcul du résultat des règles »



La méthode retenue est celle du maximum pour sa simplicité de mise en oeuvre.

• *La défuzzification*

Son but est de transformer le classement de la sortie en une sortie numérique. Elle utilise le vecteur résultant du noyau d'inférence pour reconstruire cette valeur numérique. Les méthodes utilisées sont :

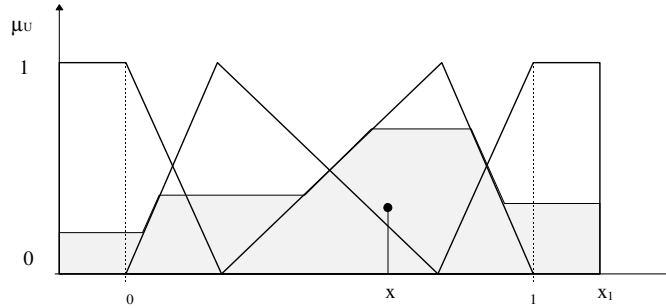
La méthode du maximum [MAM74]

Le centre de la classe retenue est celle présentant la plus forte valeur de la fonction d'appartenance. Cette façon de procéder est très rapide mais annule l'influence des termes les plus faibles. De plus la sortie ne pourra prendre qu'un nombre fini de valeurs, égal au nombre de classe floues de cette variable.

La méthode du centre de gravité (CoG)

La valeur de sortie est égale au centre de gravité de l'enveloppe fournie par l'union des classes du vecteur de sortie. Dans ce cas, tous les termes calculés ont une influence et la valeur numérique de sortie peut prendre une infinité de valeurs.

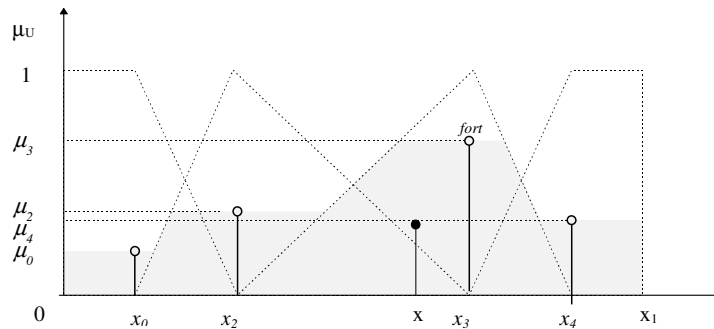
Figure 6-12 « Défuzzification par la méthode du centre de gravité »



La sortie réelle est calculée par :
$$x = \frac{\int \mu_i(x_i) \cdot x_i}{\int \mu_i(x_i)} \quad \text{avec } x_0 \leq x_i \leq x_1 \quad (0.16.)$$

Une simplification de cette méthode consiste à ne retenir que les valeurs x_i associées aux maximums des fonctions d'appartenance μ_i . Dans ce cas elle est similaire à la méthode des singletons. C'est cette dernière méthode qui est retenue

Figure 6-13 « Simplification de la méthode du centre de gravité »

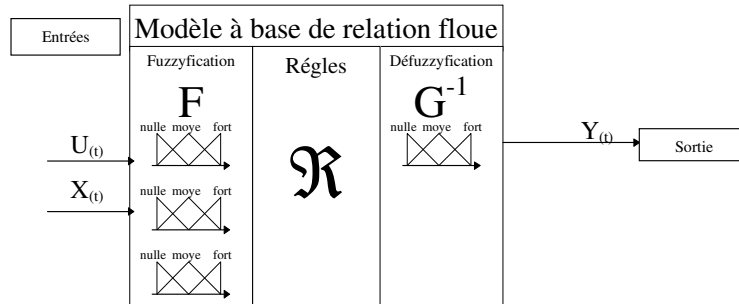


$$x = \frac{\sum \mu_i \cdot x_i}{\sum \mu_i} \quad \text{avec } 1 \leq i \leq n \quad (0.17.)$$

6.3.1.2 Modéliser un accumulateur

Dans notre cas, la connaissance de l'expert se limite à évaluer la variation d'état de l'accumulateur en fonction de l'état actuel et des conditions de fonctionnement. Aussi nous limiterons nous à une structure de modèle multi-entrées, mono-sortie.

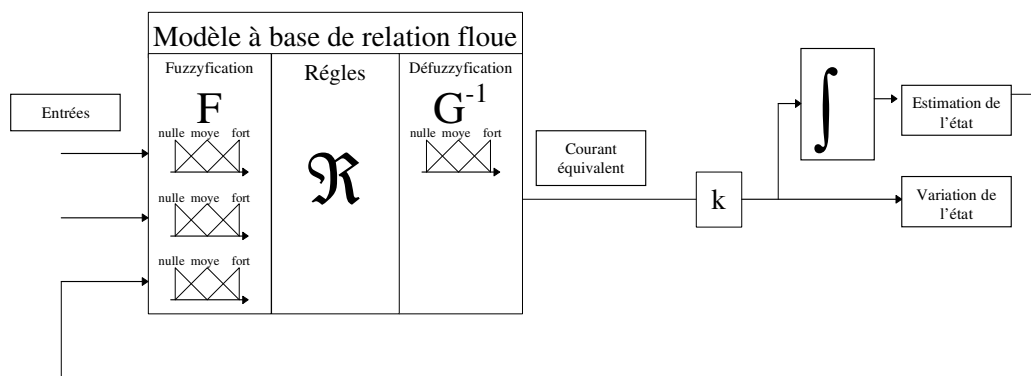
Figure 6-14 « Structure générale d'un modèle flou »



Le comportement des variables de l'accumulateur que nous souhaitons modéliser (capacité stockée et usure) sont des fonctions d'eux même et de paramètres immédiats (courant, température). Leurs variations ne sont sensibles qu'à long terme par rapport à la fréquence de calcul de notre modèle (quelques heures pour la capacité stockée Q_s et plusieurs jours pour l'*usure*). La description linguistique de tels phénomènes semble difficile à effectuer par l'expert. Par contre il est plus aisé de calculer la contribution d'un courant équivalent (donné dans les conditions de références) et de reconstruire les variables d'état représentant l'usure et la capacité stockée en faisant intervenir le temps.

La variation de l'état est directement obtenue par multiplication du courant équivalent par un gain k prenant en compte la période d'échantillonnage. La variable représentant l'*usure* et Q_s est reconstruite à l'aide d'un intégrateur pur. Le travail de l'expert est donc simplifié, car il n'a plus qu'à exprimer la contribution équivalente du courant en fonction des conditions d'utilisation et de la sortie de cette intégrateur.

Figure 6-15 « Principe de notre modèle d'accumulateur »



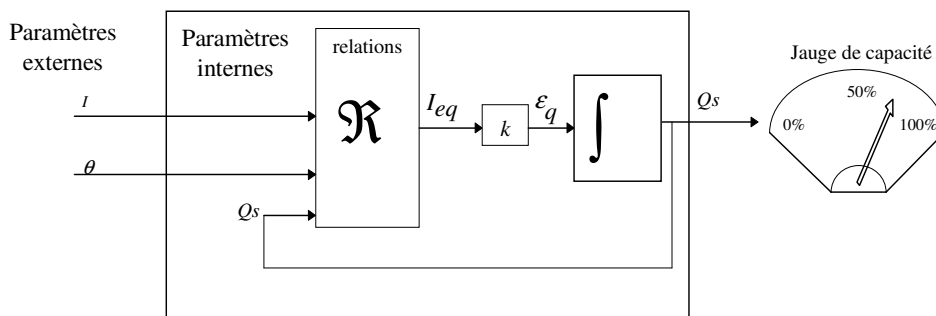
Une fois le comportement programmé, la mise en oeuvre de ce modèle nécessitera une phase d'adaptation aux caractéristiques de la batterie. Pour cela nous nous proposons d'utiliser des courbes de mesures effectuées sur un accumulateur ainsi que les quelques caractéristiques du constructeurs à notre disposition.

6.3.2 Le modèle de capacité

Dans un premier temps, nous ne tiendrons pas compte de l'usure de l'accumulateur. Celle-ci pourra être effectuée lors du calcul de l'autonomie par un facteur de correction de *performance*.

Le modèle de capacité est calculé en sommant les variations d'état ε_q en fonction de la charge stockée Q_s et des paramètres d'entrées courant I et température θ . La variable ε_q est représentée la contribution à l'état de charge d'un courant équivalent calculé dans les conditions nominales de référence. L'introduction d'un gain k lors de l'intégration nous permettra de tenir compte de la fréquence d'échantillonnage et de présenter une jauge de capacité dans l'intervalle $[0,1]$.

Figure 6-16 « Principe du modèle de capacité »



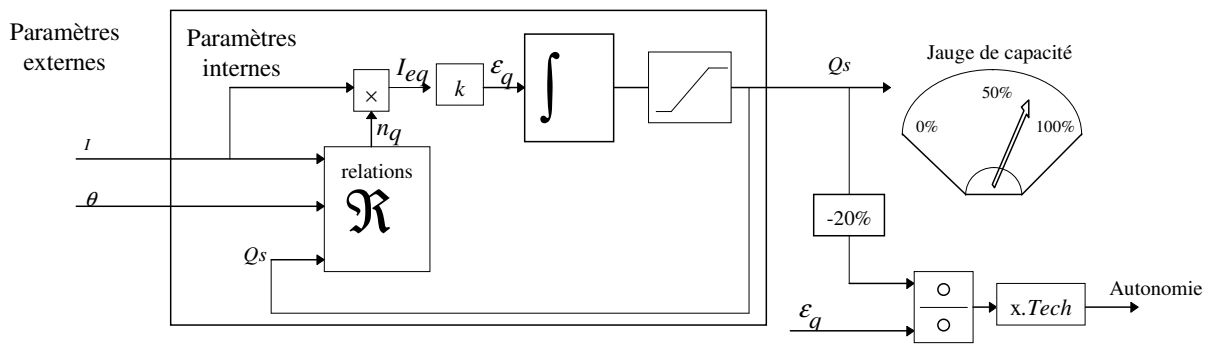
Il nous faut calculer la contribution du courant fourni à l'accumulateur pour obtenir la capacité stockée. Cette information *courant* nous renseigne sur la densité du courant et sur la quantité d'énergie fournie à l'accumulateur sur la période d'échantillonnage.

La contribution du courant, si elle est entièrement réalisée par des règles floues, risque d'apporter des imprécisions et nécessite une description fine. De plus, elle ajoute une dimension à la description des règles. C'est pourquoi nous proposons de calculer la contribution du courant à partir de la valeur mesurée en la corrigeant par un facteur de correction n_q .

Une fois la capacité stockée obtenue, il sera possible d'indiquer l'autonomie de l'accumulateur en décharge en diminuant la capacité stockée de son seuil de réserve de 20% et en le divisant par la variation ε_q instantanée de Q_s (si il est non nul et suffisamment grand pour donner une valeur d'autonomie significative).

Pour éviter une divergence de l'intégrateur, sa valeur sera limitée à l'intervalle $[0,1]$.

Figure 6-17 « Structure retenue du modèle de capacité »



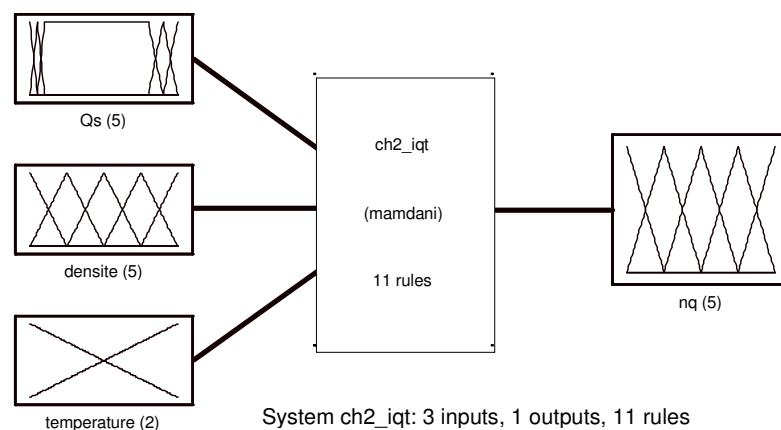
- **Correction des erreurs d'intégration**

Pour corriger les dérives dues aux erreurs d'intégration au cours des cycles de charge et décharge. Il est nécessaire de définir des situations de réinitialisation de la grandeur Q_s . Dans notre application, l'accumulateur est placé en tampon, son état de *repos* est la pleine charge. Aussi lorsque l'accumulateur est en charge et qu'il ne consomme plus de courant depuis un laps de temps de l'ordre de la demi-heure, il peut être considéré comme chargé et Q_s fixé à 100%. A l'inverse lorsque la tension aux bornes de l'accumulateur est inférieure ou égale à la tension d'arrêt de protection contre les décharges profondes, il peut être considéré comme totalement déchargé et Q_s fixé à 20%.

6.3.2.1 Le modèle de charge

Le calcul du facteur de correction nq est effectué à l'aide de la connaissance des trois entrées : densité de courant, état de charge Q_s et température.

Figure 6-18 « Le modèle facteur de correction de décharge »



- **Définition des fonctions d'appartenance**

La densité de courant : Elle représente le taux de charge K_{ch} . Elle varie de 0 à $0,1 \times C_n$. La densité maximum est fixée par le chargeur de manière à effectuer la charge dans les conditions optimum. L'intervalle de variation a été divisé en cinq fonctions triangulaires égales.

La quantité d'électricité stockée : Elle varie de 0 à 1 pour 0 à 100%. Son influence est importante sur le facteur nq en début et fin de charge. Pour décrire correctement son action, nous avons donc adapté la répartition des cinq fonctions d'appartenance aux particularités de la fonction. Nous avons introduit un palier pour la valeur moyenne et utilisé les quatre fonctions restantes pour le début et la fin de la caractéristique.

La température : Les conditions de température en ambiante en fonctionnement normal correspondent à -20°C / $+40^\circ\text{C}$. Nous devons seulement corriger le comportement du facteur de correction nq en fonction de la température. Nous avons simplifié sa description à deux fonctions triangulaires.

Le rendement de charge : Il variera de 0 à 100% principalement en fonction de l'état de charge.

Figure 6-19 « Efficacité de la charge en fonction du courant, de la température et de l'énergie stockée »

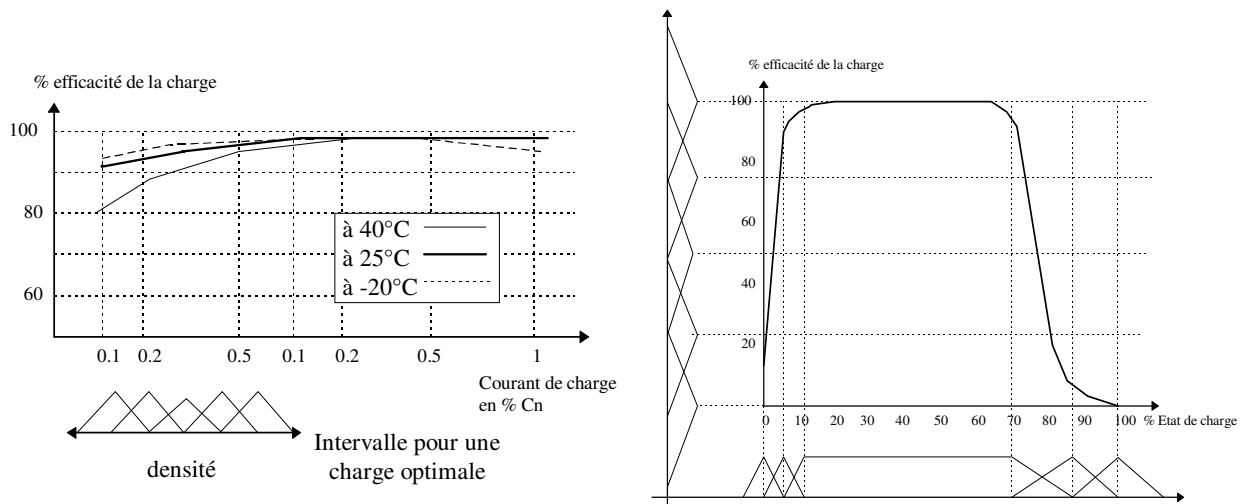
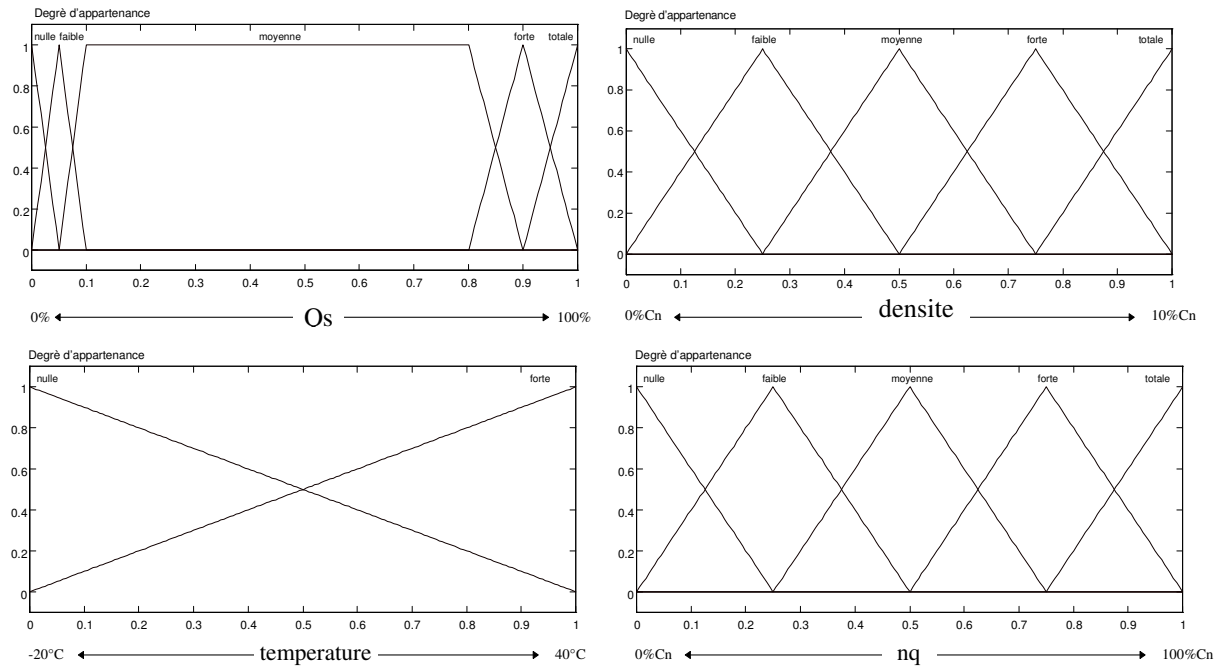


Figure 6-20 « Les fonctions d'appartenance du modèle de charge »

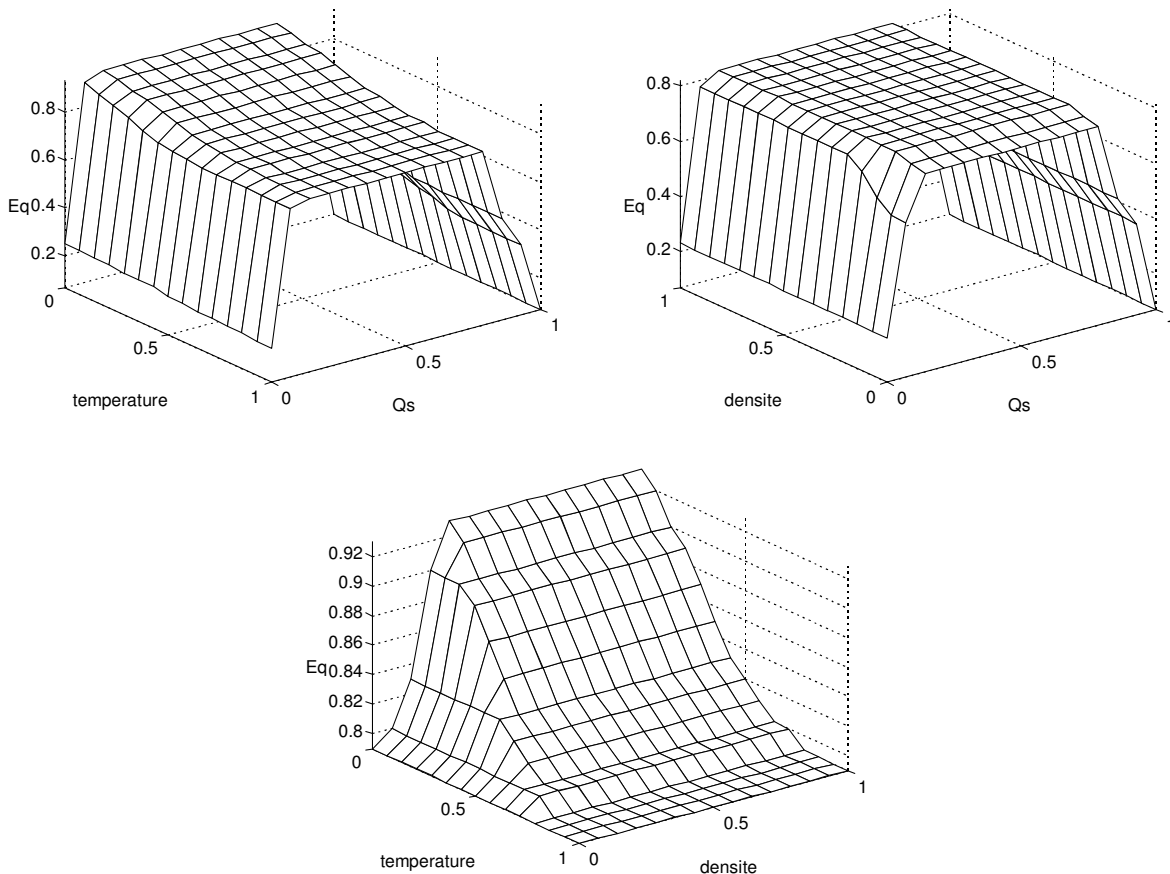


• Définition des règles

Dans un premier temps, nous avons défini le facteur nq en fonction de la variable la plus influente Qs . Par la suite nous avons apporté les modifications de tendance du facteur nq en fonction de la température et de la densité de courant. Ces corrections portent sur les fonctionnements en température *forte* et à densité *faible*. Après différents essais et simulations, nous sommes arrivés à une description comportant 11 des règles.

Figure 6-21 « Les règles du modèle de charge »

1. If (Qs is nulle) then (nq is faible)
2. If (Qs is nulle) and (temperature is forte) then (nq is nulle)
3. If (Qs is forte) then (nq is moyenne)
4. If (Qs is forte) and (temperature is forte) then (nq is faible)
5. If (Qs is totale) then (nq is nulle)
6. If (Qs is moyenne) then (nq is totale)
7. If (Qs is moyenne) and (densite is nulle) then (nq is forte)
8. If (Qs is moyenne) and (temperature is forte) then (nq is forte)
9. If (Qs is faible) and (densite is nulle) then (nq is moyenne)
10. If (Qs is faible) and (temperature is forte) then (nq is forte)
11. If (Qs is faible) and (densite is nulle) then (nq is moyenne)



• Adaptation du modèle

Nous utiliserons les performances mesurées sur l'accumulateur de test. Cette mesure s'est effectuée en trois phases :

- 1 - Une charge complète de l'accumulateur pour être dans les conditions de 100% de charge
- 2 - Une décharge dans les conditions initiales de température et intensité (Figure 6-23)
- 3 - Une recharge qui fournira la quantité de courant nécessaire pour recharger l'accumulateur. C'est cette mesure qui va nous servir d'étalon (Figure 6-22).

Les enregistrements des mesures sont effectués toutes les 0,1s et sont moyennés sur 8s pour limiter le nombre de points des échantillons pour nos simulations.

Les caractéristiques de l'accumulateur de test

Il est constitué de 2 batteries de 12V 65 Ah FULMEN couplées en série de manière à obtenir un ensemble de 24V. Ces éléments ne sont pas neufs mais déjà rodés.

Figure 6-22 « La charge étalon »

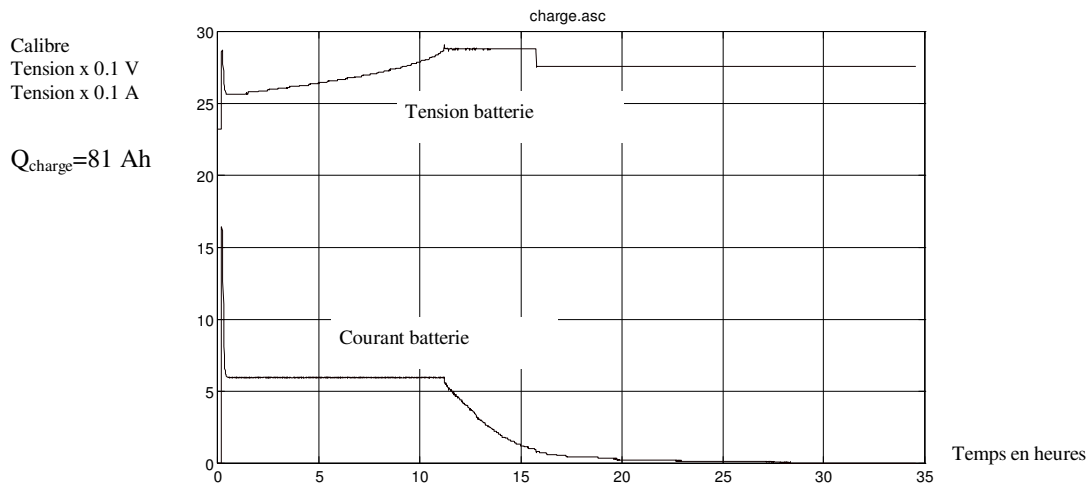
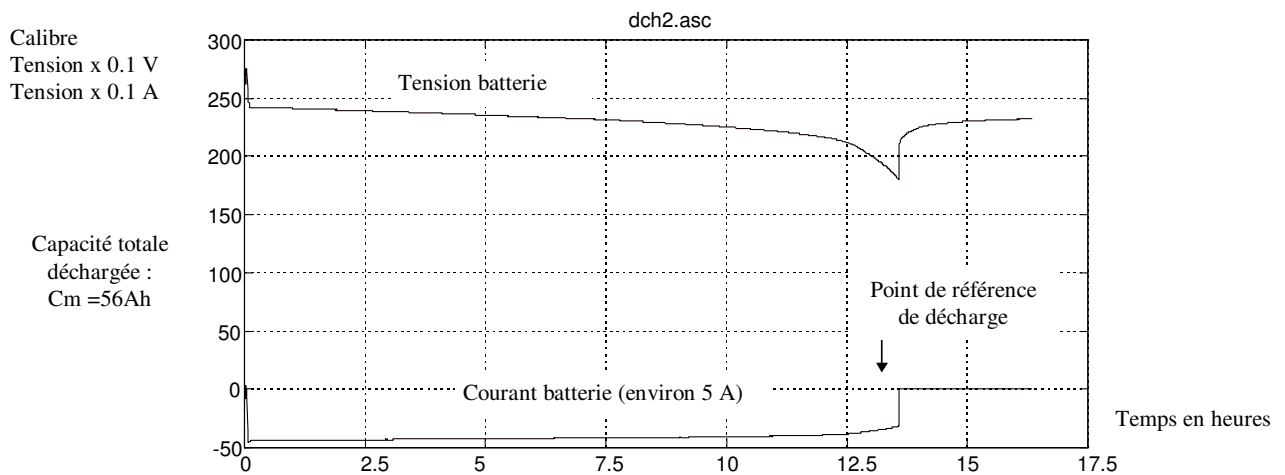


Figure 6-23 « La décharge étalon »



Calcul du gain d'adaptation k au point de fonctionnement nominal

Le rendement global en courant de notre accumulateur est 69%, celui d'un bon accumulateur est d'environ 80%. Cela provient du fait que l'accumulateur est en fin de son cycle de vie et qu'il ne fait pas partie des accumulateurs haut de gamme.

Les courbes et caractéristiques constructeurs à notre disposition nous font espérer un rendement variant entre 60 et 90% lorsque l'état de charge est *moyen*. Ces intervalles de variation se retrouvent sur notre modèle flou.

Le gain k_{ch} va donc devoir prendre en compte la période d'échantillonnage ramenée à 8s pour nos tests numériques. La valeur théorique de k_{ch} est :

$$k_{ch} = \frac{1}{T_{ech}} \times \frac{1}{C_n} \quad (0.18.)$$

Avec T_{ech} période d'échantillonnage et C_n capacité nominale de l'accumulateur.

La valeur théorique sur notre accumulateur est :

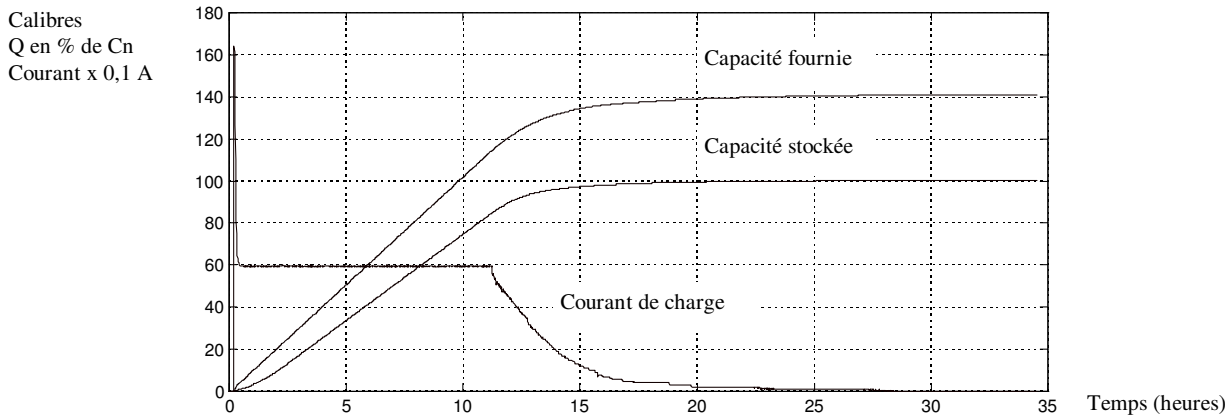
$$k_{ch} = \frac{8}{3600} \times \frac{1}{58} = 3.8314 \times 10^{-5} \quad (0.19.)$$

La valeur de k_{ch} est approchée obtenue par itération avec le critère $Q_s=1$ lorsque I tend vers 0 est :

$$k_{ch} = \frac{8}{3600} \times \frac{1}{64} = 3.4722 \times 10^{-5} \quad (0.20.)$$

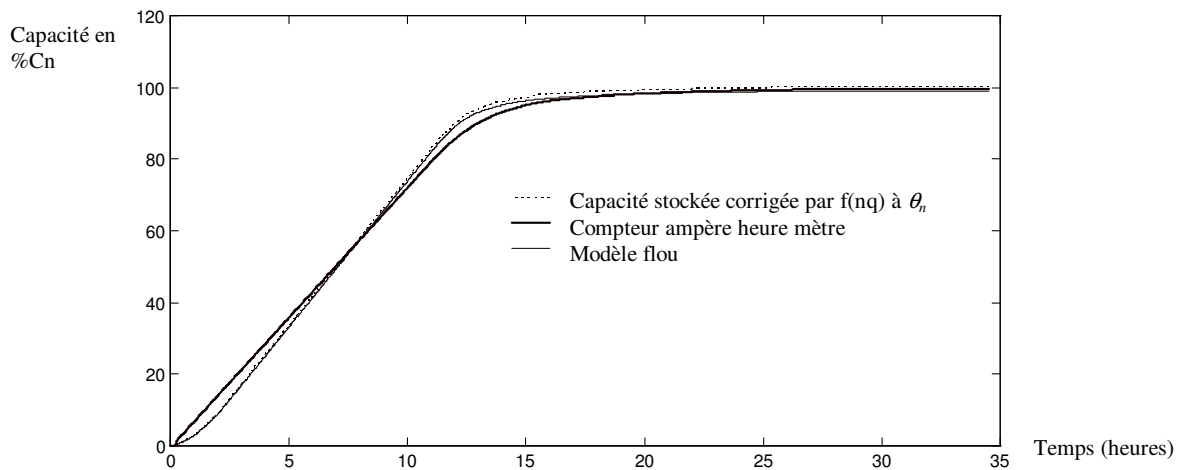
• Résultats

Figure 6-24 « Evolution du modèle de charge »



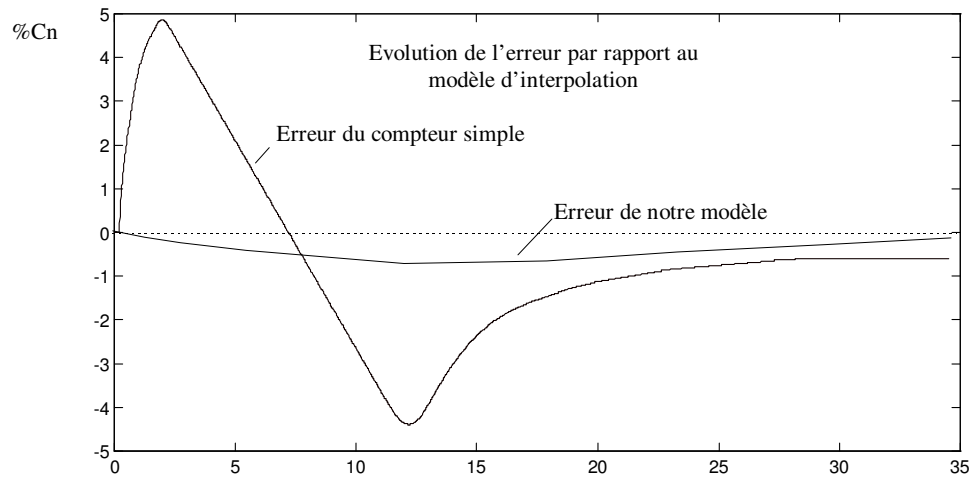
Le comportement obtenu de l'accumulateur en charge semble satisfaire nos besoins d'estimation de la capacité à la recharge. Pour comparaison, les courbes suivantes montrent la comparaison des résultats d'un compteur ampère heure classique normalisé par la valeur mesurée lors de la charge (81Ah) , de notre modèle et de la courbe théorique obtenue par interpolation de la caractéristique.

Figure 6-25 « Comparaison des modèles de charge »



L'erreur maximum entre le compteur classique et la caractéristique théorique est de 4,8. Notre modèle flou donne un meilleur résultat avec des erreurs de l'ordre de 1%.

Figure 6-26 « L'erreur du modèle de charge »

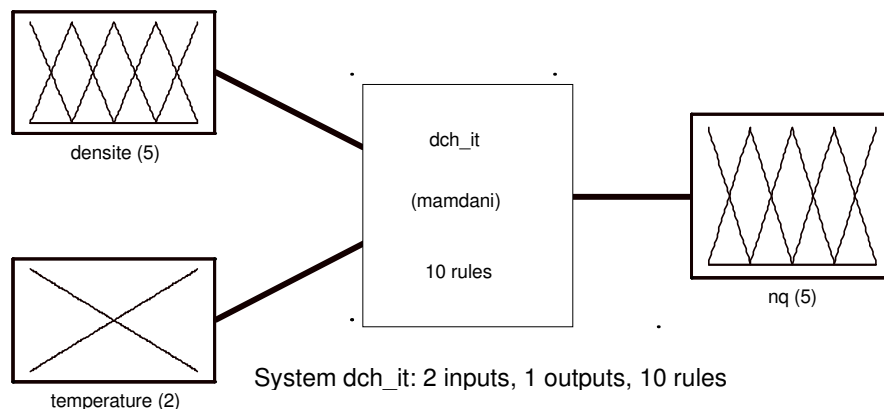


L'erreur de notre modèle est présentée autour du point de fonctionnement utilisé pour son adaptation. Dans d'autres conditions, cette erreur sera plus importante. Mais en comparaison au compteur simple, notre modèle effectue un meilleur suivi de la caractéristique théorique, principalement en début et fin de charge où l'influence de l'état de charge est important.

6.3.2.2 Le modèle de décharge

Le facteur de correction de décharge correspond à l'efficacité de restitution du courant par l'accumulateur. Pour déterminer la contribution du courant à soustraire de l'intégrateur, il sera nécessaire de diviser le courant par ce facteur de correction.

Figure 6-27 « Le modèle du facteur de correction de décharge »



• Définition des fonctions d'appartenance

La densité de courant : Elle représente le taux de décharge K_{dech} . Elle varie de 0 à $2 \times C_n$. L'intervalle de variation a été divisé en cinq fonctions triangulaires égales.

La température : Les conditions de température sont similaires à celle de la charge et nous utiliserons la même description.

Le facteur de correction de décharge : Il varie de 50 à 120% d'après les caractéristiques constructeurs.

Figure 6-28 « Efficacité de la décharge en fonction du courant de décharge »

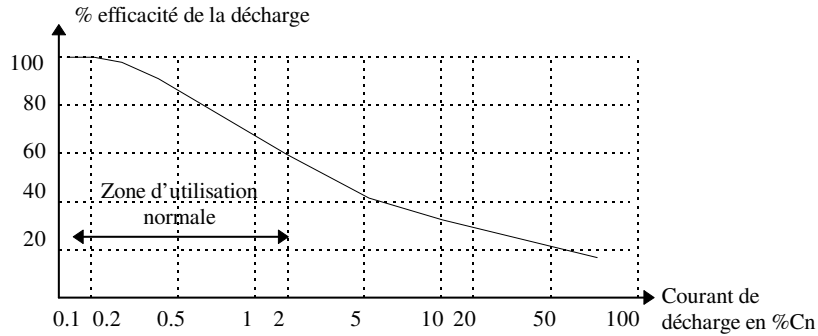


Figure 6-29 « Efficacité de la décharge en fonction de la température »

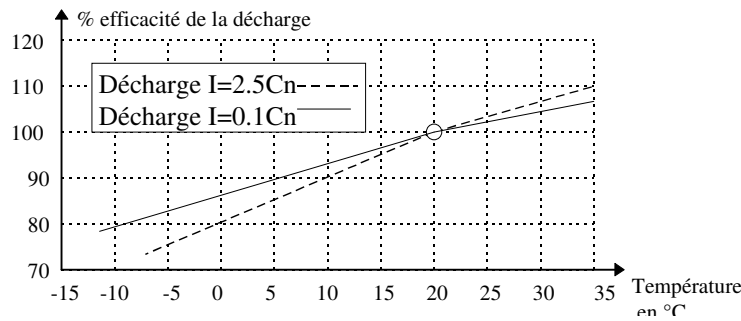
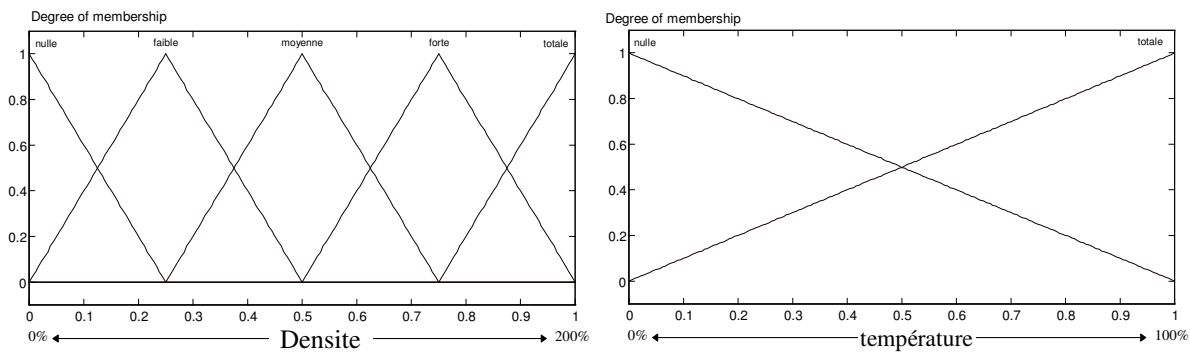
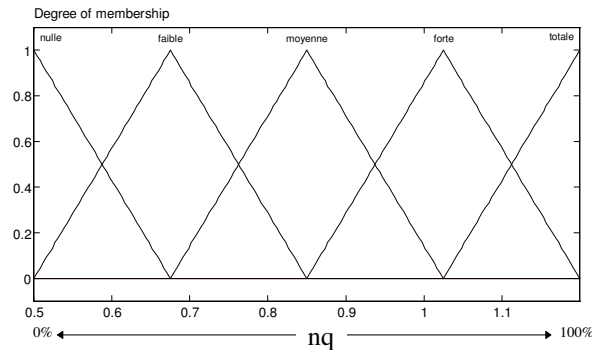


Figure 6-30 « Les fonctions d'appartenance du modèle de décharge »

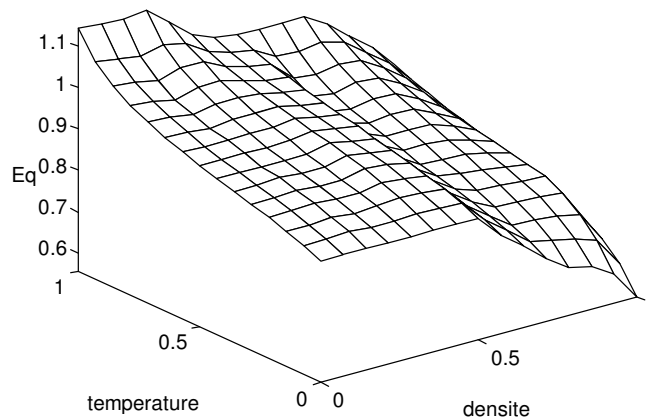




• Définition des règles

Après divers essais, le modèle que nous retenons comporte une dizaine de règles.

- (1) If (densite is nulle) and (temperature is totale) then (nq is totale)
- (2) If (densite is nulle) and (temperature is nulle) then (nq is moyenne)
- (3) If (densite is faible) and (temperature is totale) then (nq is totale)
- (4) If (densite is faible) and (temperature is nulle) then (nq is moyenne)
- (5) If (densite is moyenne) and (temperature is totale) then (nq is forte)
- (6) If (densite is moyenne) and (temperature is nulle) then (nq is moyenne)
- (7) If (densite is forte) and (temperature is totale) then (nq is forte)
- (8) If (densite is forte) and (temperature is nulle) then (nq is faible)
- (9) If (densite is totale) and (temperature is totale) then (nq is moyenne)
- (10) If (densite is totale) and (temperature is nulle) then (nq is nulle)



Adaptation du modèle

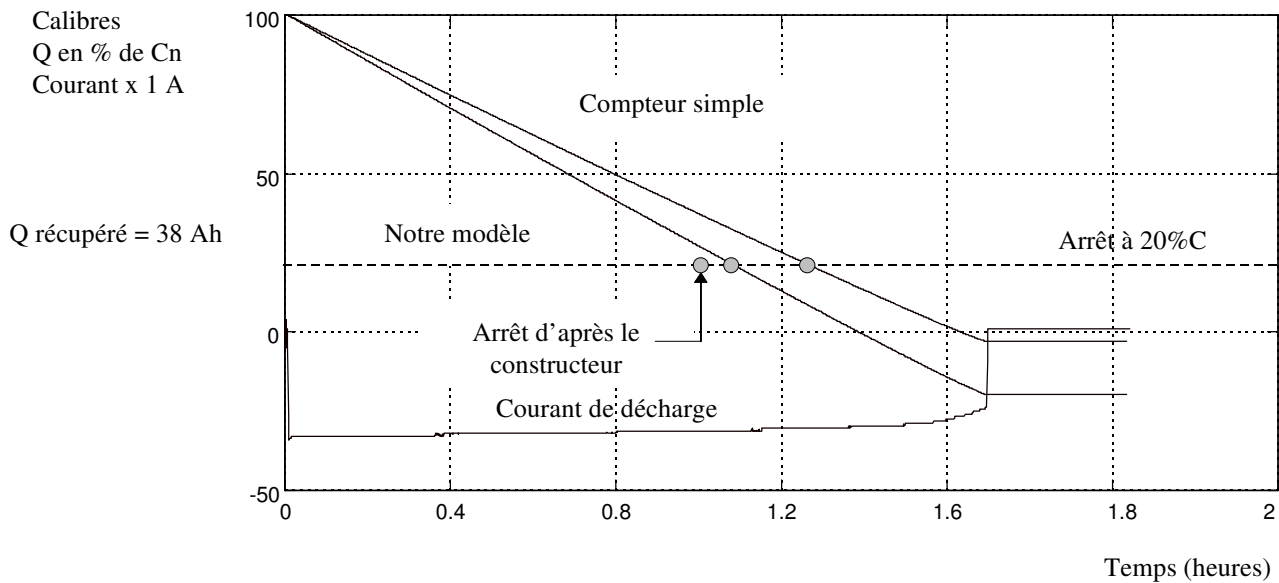
Comme le modèle de charge, la valeur de k_{dch} va être déterminée de manière à obtenir une décharge à 100% pour $C_m=58$ Ah déchargé. La valeur théorique est celle qui est retenue du fait de ses bons résultats en simulation (moins de 2% d'erreur)..

$$k_{dch} = \frac{8}{3600} \times \frac{1}{58} = 3.8314 \times 10^{-5} \quad (0.21.)$$

• Résultats

- *Test sur une décharge à fort courant* : notre modèle prend en compte le mauvais rendement de décharge conséquence d'une densité de décharge élevée, ce qui lui permet d'indiquer une décharge complète avec une faible erreur. Le compteur simple qui n'est pas corrigé indique la décharge beaucoup trop tard alors que l'accumulateur est en décharge complète.

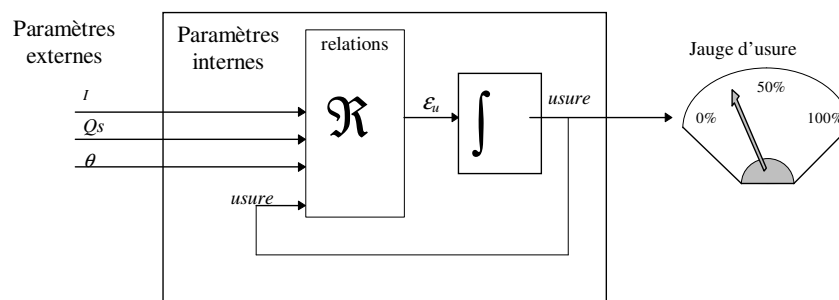
Figure 6-31 « Comparaison des modèles de décharge »



6.3.3 Le modèle d'usure

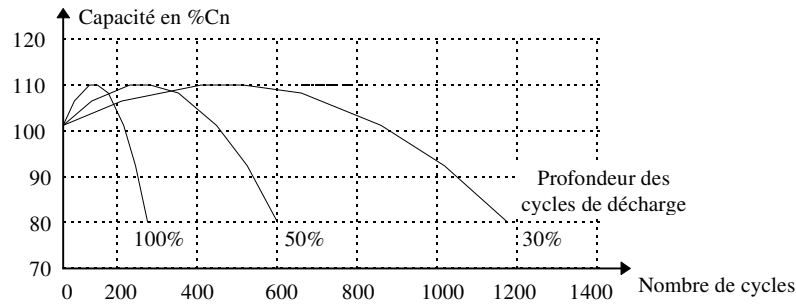
L'usure est liée au nombre d'ampère-heure qui ont traversé l'accumulateur et aux conditions dans lesquelles ils y sont entrés ou sortis. C'est un effet cumulatif qui tient compte du passé. La contribution apportée par une quantité de courant dépend également de l'état d'usure. L'idée est d'exprimer la variation de l'usure à partir du courant, de l'état de charge et de la température. L'état d'usure est calculé à l'aide d'un intégrateur. Le modèle peut se représenter sous la forme suivante

Figure 6-32 « Forme générale du modèle d'usure »



Parmi les informations fournies par le constructeur, se trouve la caractéristique de cyclage qui nous renseigne sur l'évolution des performances de l'accumulateur en fonction du nombre de cycle de charge-décharge et de la profondeur de décharge des cycles. Elles se présentent sous forme de ces courbes ou de tableaux. Elles sont données pour des valeurs nominales du courant de charge et de décharge ($C_n/10$) à la température nominale θ_n .

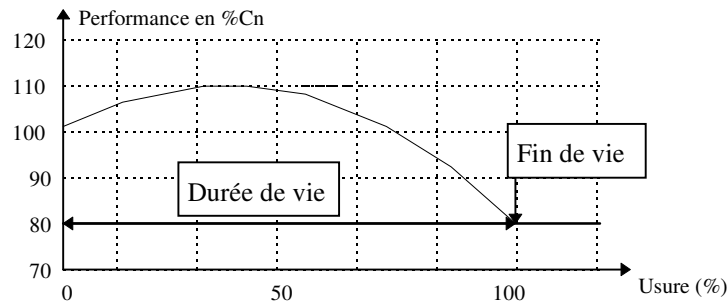
Figure 6-33 « Durée de vie en cyclage »



Cette caractéristique montre une amélioration des performances de l'accumulateur dans le premier tiers de sa vie. Ce phénomène résulte de l'anticipation par les constructeurs du phénomène de déshydratation et correspond à une augmentation de la densité d'acide de l'électrolyte.

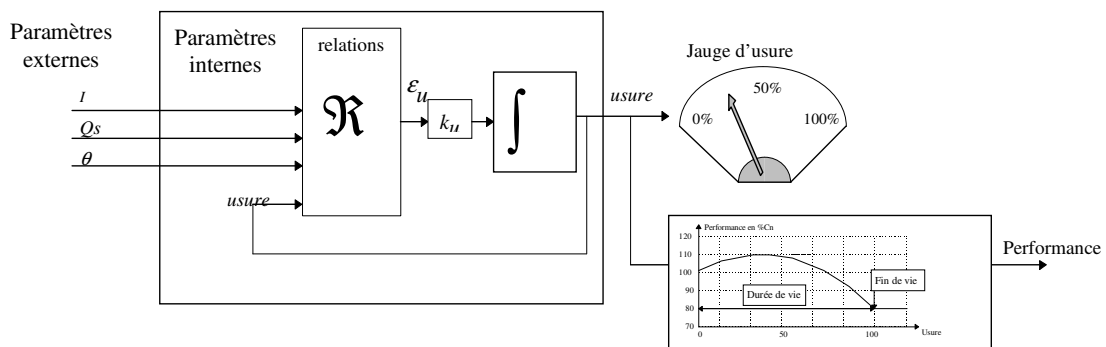
Nous allons donc normaliser cette courbe en fonction de l'usure. Elle pourra nous servir à corriger les évaluations de la capacité et de l'autonomie.

Figure 6-34 « Durée de vie en cyclage »



Il nous faut ensuite calculer la contribution à l'usure en prenant compte des conditions d'utilisations et de les cumuler avec un intégrateur de gain k_u prenant en compte la période d'échantillonnage et calculé de manière à obtenir une usure égale à 100% lorsque le nombre de cycles de charge-décharge est atteint.

Figure 6-35 « Structure du modèle d'usure »



Sur notre chargeur, la charge de l'accumulateur est effectuée dans les conditions optimales par notre chargeur. Nous admettons que le comportement lors de la charge (effectuée à une faible densité de courant) est similaire au cas correspondant en décharge. Nous décrirons alors l'usure comme étant directement liées

aux profondeurs et conditions de décharge. L'influence de la température sera, dans un premier temps, négligée.

Nous ne tiendrons pas compte du fait que l'usure d'autant plus rapidement que l'accumulateur est usé. Ce qui peut se justifier par le fait que la fin de vie est définie pour une perte de seulement 20% des performances nominale de l'accumulateur, aussi l'usure a elle un effet *accélérateur* limité sur cette période.

- **L'influence de l'état de charge**

Nous pouvons évaluer son importance en calculant le nombre d'ampère-heure qui ont transité dans l'accumulateur pour les différentes profondeurs de cycle. Dans notre exemple nous obtenons :

Profondeur de décharge	Nombre de cycle	Total en Ah
30% de Cn	1200	$2 \cdot 0.3 \cdot 1200 \cdot Cn = 720 Cn$
50% de Cn	600	$2 \cdot 0.5 \cdot 600 \cdot Cn = 600 Cn$
100 % de Cn	240	$1 \cdot 240 \cdot Cn = 240 Cn$

Il faut également tenir compte du qu'une décharge à 50% s'effectue dans un premier temps de 0 à 30%. Si on considère la durée de vie pour un fonctionnement à décharge faible (ici 30%) comme référence soit : 720 Cn, le ratio de contribution équivalente apporté par le supplément de décharge peut se calculer par :

$$ratio = \frac{\text{Ah équivalents déchargés}}{\text{Ah réel déchargés}} \quad (0.22.)$$

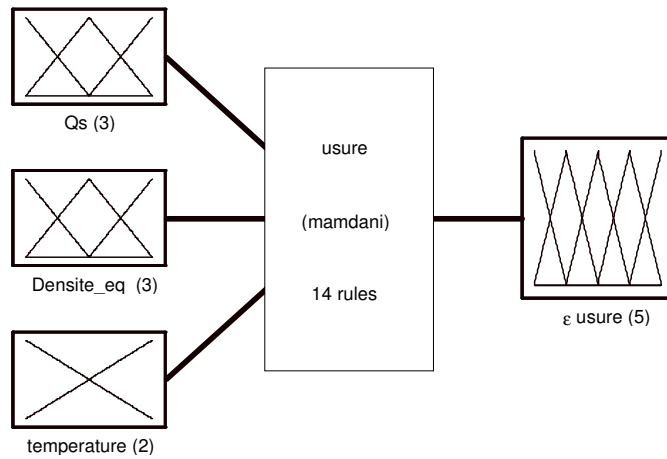
Profondeur de décharge	Nombre de cycle	Contribution à 30%	Ratio 50%	Contribution équivalente des 20% suivants	Ratio 100%
30% de Cn	1200	$0.3 \cdot 1200 \cdot 2 \cdot Cn = 720 Cn$			
50% de Cn	600	$600 \cdot 0.3 \cdot 2 \cdot Cn = 360 Cn$	$\frac{720 - 360}{600 \cdot 0.2 \cdot 2} = 1.5$	$1.5 \cdot 600 \cdot 0.2 \cdot 2 \cdot Cn = 360 Cn$	
100 % de Cn	300	$300 \cdot 0.3 \cdot Cn \cdot 2 = 180 Cn$	1.5	$300 \cdot 0.2 \cdot 1.5 \cdot 2 \cdot Cn = 180 Cn$	$\frac{720 - 180 - 180}{300 \cdot 0.5} = 2.4$

- **L'influence de la densité de courant et de la température**

Nous posons l'hypothèse que l'usure est proportionnelle à la valeur de la densité de courant. La température a tendance à aggraver les phénomènes d'usure si elle est élevée ou trop froide lorsque le niveau de charge est faible. Nous exprimerons les règles par rapport aux conditions nominales de fonctionnement de l'accumulateur. La valeur du courant d'entrée sera donc celle du courant équivalent de charge ou de décharge.

- **Mise en oeuvre du modèle**

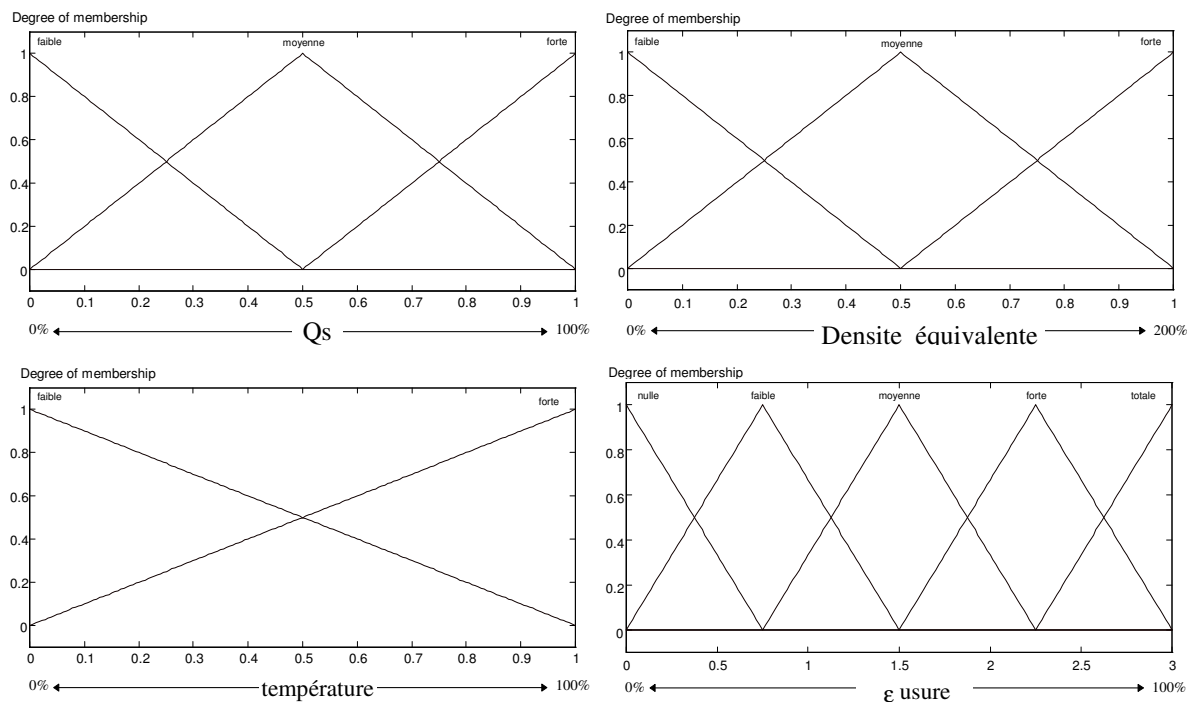
Figure 6-36 « Le modèle de la variation d'usure »



System usure: 3 inputs, 1 outputs, 14 rules

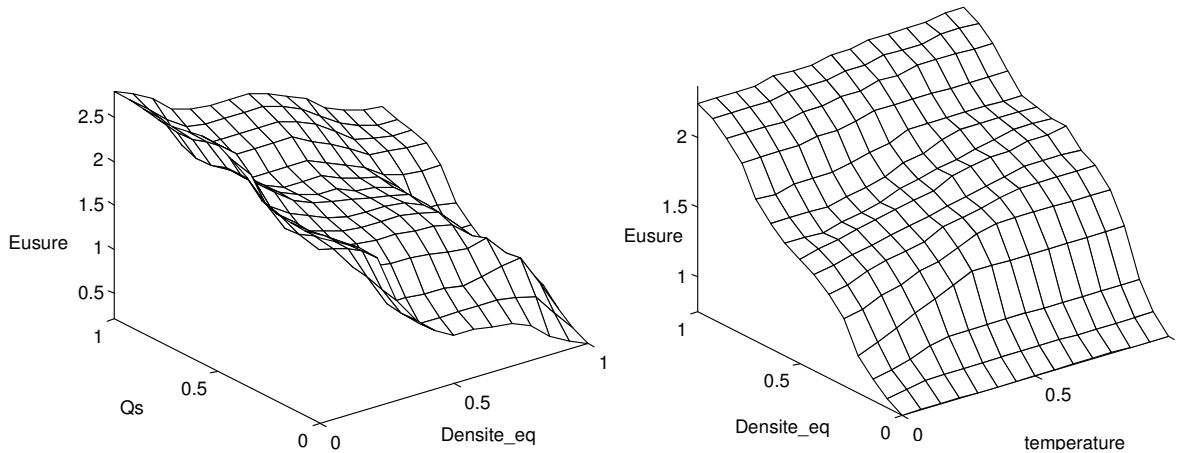
L'échelle d'usure choisie varie entre 0 et 3. Cet intervalle a été choisi pour permettre une description permettant de représenter le ratio calculé précédemment.

Figure 6-37 « Les fonctions d'appartenance du modèle d'usure »



1. If (Qs is faible) and (densite_eq is forte) then (Eusure is totale) (1)
2. If (Qs is faible) and (densite_eq is moyenne) then (Eusure is totale) (1)
3. If (Qs is faible) and (densite_eq is faible) then (Eusure is forte) (1)
4. If (Qs is faible) and (densite_eq is faible) and (temperature is faible) then (Eusure is totale) (1)
5. If (Qs is faible) and (densite_eq is faible) and (temperature is forte) then (Eusure is totale) (1)
6. If (Qs is moyenne) and (densite_eq is moyenne) then (Eusure is moyenne) (1)
7. If (Qs is moyenne) and (densite_eq is faible) then (Eusure is faible) (1)
8. If (Qs is moyenne) and (densite_eq is forte) then (Eusure is forte) (1)
9. If (Qs is moyenne) and (densite_eq is forte) and (temperature is forte) then (Eusure is totale) (1)
10. If (Qs is moyenne) and (densite_eq is moyenne) and (temperature is forte) then (Eusure is forte) (1)

11. If (Qs is forte) and (densite_eq is faible) then (Eusure is nulle) (1)
12. If (Qs is forte) and (densite_eq is moyenne) then (Eusure is faible) (1)
13. If (Qs is forte) and (densite_eq is forte) then (Eusure is moyenne) (1)
14. If (Qs is forte) and (densite_eq is forte) and (temperature is forte) then (Eusure is forte) (1)



• Adaptation du gain

Le gain d'adaptation k_u est calculé pour que l'usure atteigne 100% pour 1200 cycles . Il est déterminé par la contribution du courant en pourcentage de C_n (pour nous 58 Ah) sur la période d'échantillonnage.

$$k_u = \frac{8}{3600} \times \frac{1}{58} \times \frac{1}{1200} \quad (0.23.)$$

• Initialisation du modèle d'usure

Elle s'effectue lors de la mise en service de l'accumulateur où l'usure est fixée à 0.

• Résultats

Pour évaluer le comportement de notre modèle d'usure, nous nous proposons d'effectuer une suite de cycle de charge et décharge à courant constant dans les conditions nominales. Le calcul de la capacité est effectué par les modèles de charge et de décharge. Les conditions de fonctionnement étant constantes et les variations de la performance n'étant pas prise en compte, nous n'avons effectué la simulation que d'un seul cycle. Le nombre total de cycle est obtenu en cumulant le résultat obtenu par la simulation. Nous pouvons alors représenter la variation de l'usure par un ensemble de droites.

Figure 6-38 « Usure d'un cycle de charge simulé, Courant de charge de 0.1%Cn durant 10h »

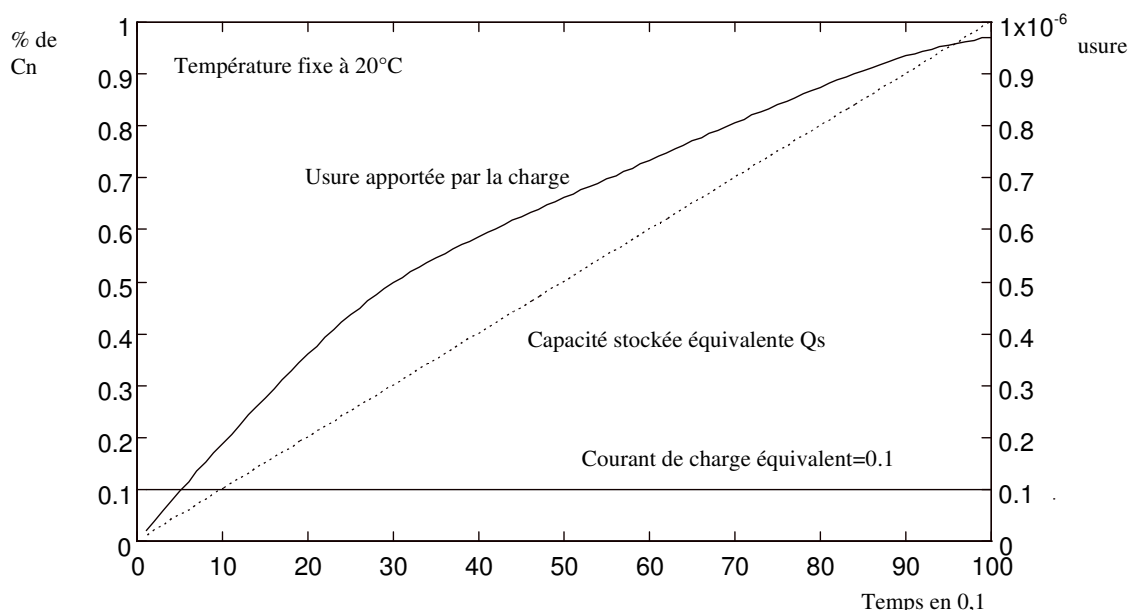


Figure 6-39 « Usure d'un cycle de décharge profonde »

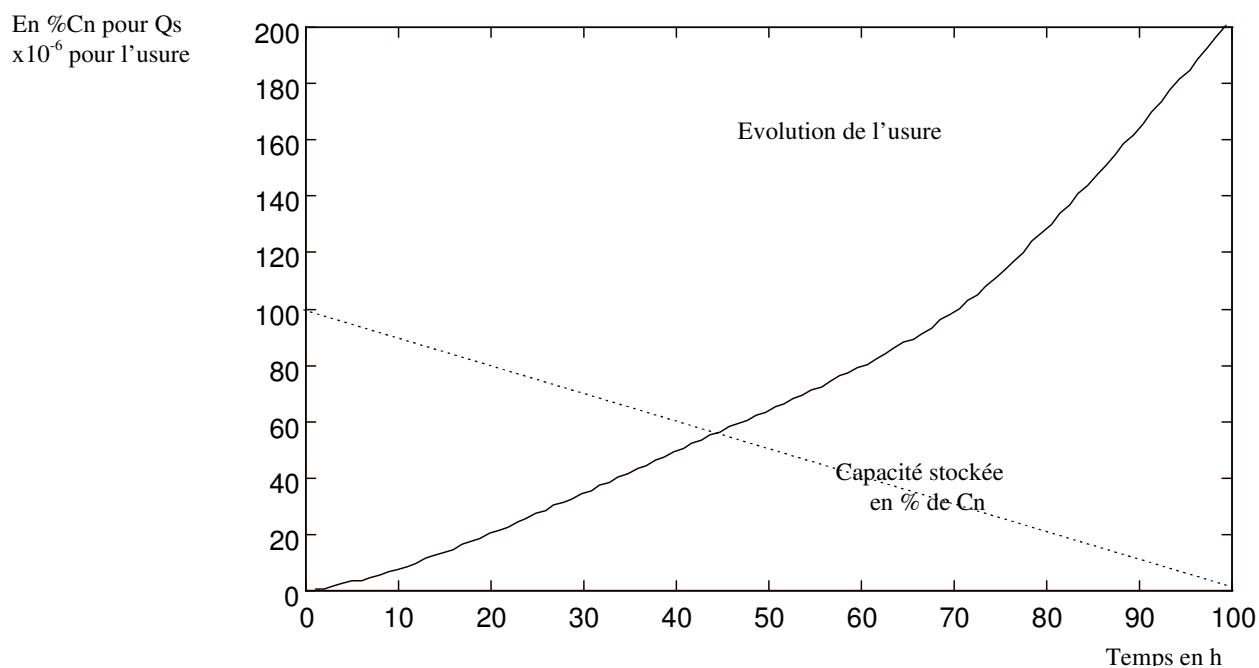


Tableau 6-2 « Nombre de cycle obtenu avant l'usure totale en fonction de la profondeur de décharge »

Profondeur de décharge	Nombre de cycle théorique	Nombre de cycle calculé
30% de Cn	1200	1160
50% de Cn	600	565
100 % de Cn	240	221

6.3.4 Le modèle global

Notre objectif est d'assembler les différents modèles pour obtenir le modèle de comportement global de l'accumulateur. Pour cela, il faut faire intervenir l'usure dans le modèle de capacité stockée en prenant en compte les variations de la performance de l'accumulateur.

- **Influence de l'usure**

L'introduction de l'usure dans le modèle de capacité peut s'effectuer de deux manières :

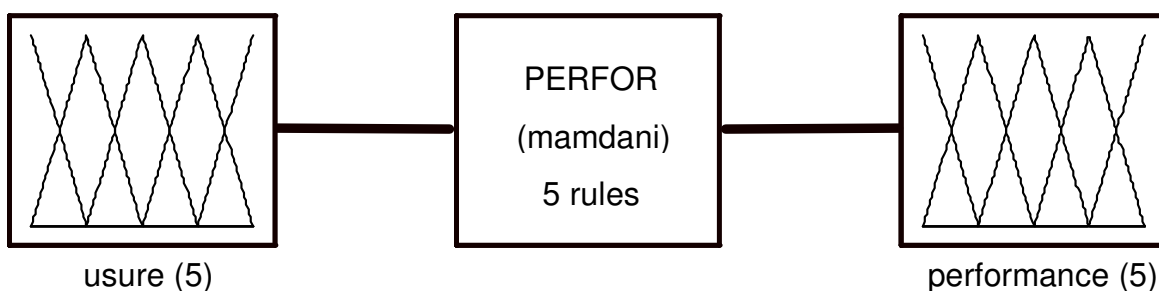
- *En introduisant l'usure dans les règles floues*, ce mode de représentation est adapté à la description d'une dégradation des rendements de charge et décharge. Il apporte une modification du comportement de la jauge de capacité en modifiant la dynamique de ses variations.. Ce comportement peut être déroutant pour l'utilisateur qui pour le même régime de décharge observe un comportement différent de sa jauge.
- *En utilisant la caractéristique de performance pour définir la valeur maximum de la jauge*, ce qui correspond à la modification de la capacité de stockage de l'accumulateur.

Dans notre cas, le phénomène de vieillissement que nous avons représenté correspond à l'usure introduite par les phénomènes de cyclage. Ils sont équivalents à la diminution de la quantité de matériaux utilisables pour les transformations électrochimiques. Leurs influences sont donc sensibles sur la capacité maximum stockable de l'accumulateur.

- **Influence de la performance sur la capacité stockée**

Dans un souci d'homogénéité de la représentation des connaissances, nous avons retenu un codage en logique floue pour la caractéristique donnant la performance en fonction de l'usure.

Figure 6-40 « Le modèle de performance »

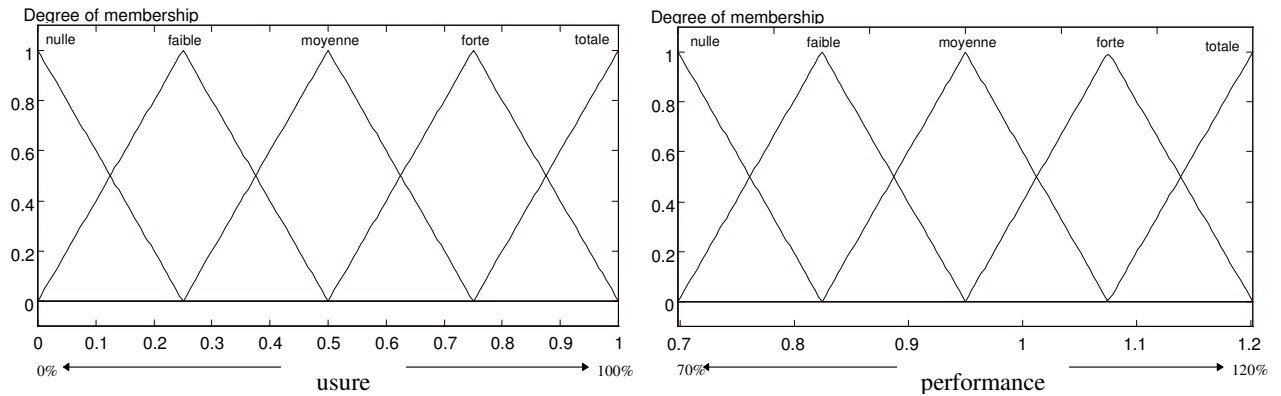


System PERFOR: 1 inputs, 1 outputs, 5 rules

Figure 6-41 « Les règles du modèle de performance »

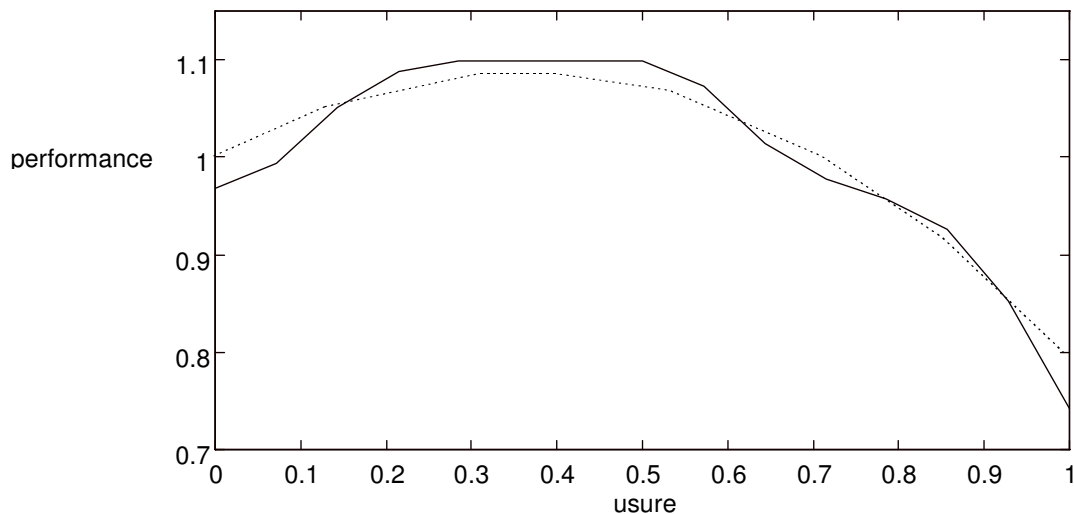
1. If (usure is nulle) then (performance is moyenne) (1)
2. If (usure is faible) then (performance is forte) (1)
3. If (usure is moyenne) then (performance is forte) (1)

4. If (usure is forte) then (performance is moyenne) (1)
5. If (usure is totale) then (performance is nulle) (1)



Le codage de la caractéristique que nous avons effectué nous permet d'approcher la caractéristique théorique mais en aucun cas de la décrire finement. Ceci est principalement dû au fait que nous avons retenu un découpage en 5 fonctions d'appartenances de manière à rester compatible avec le codage déjà effectué sur les autres grandeurs. Le résultat est néanmoins satisfaisant, car l'erreur maximum est de 2.2% sur la valeur de la capacité stockable et l'erreur moyenne est proche de 0.05%.

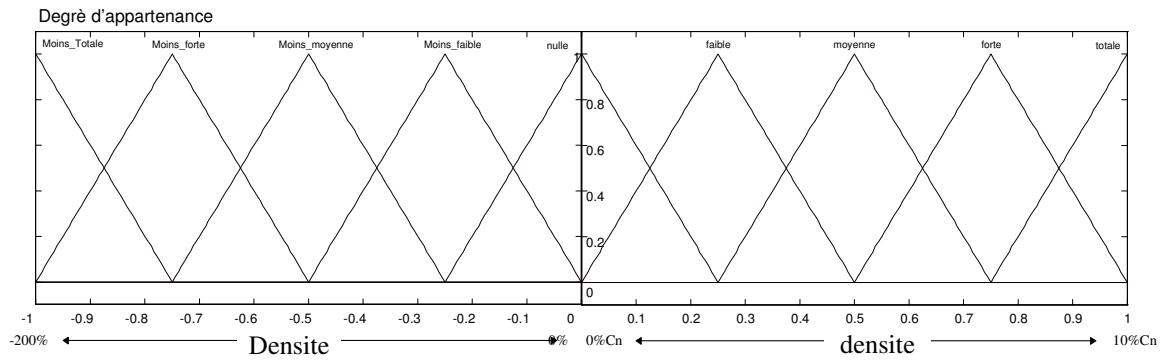
Figure 6-42 « Comparaison de la performance codée en flou par rapport à la performance théorique »



• Structure du modèle global

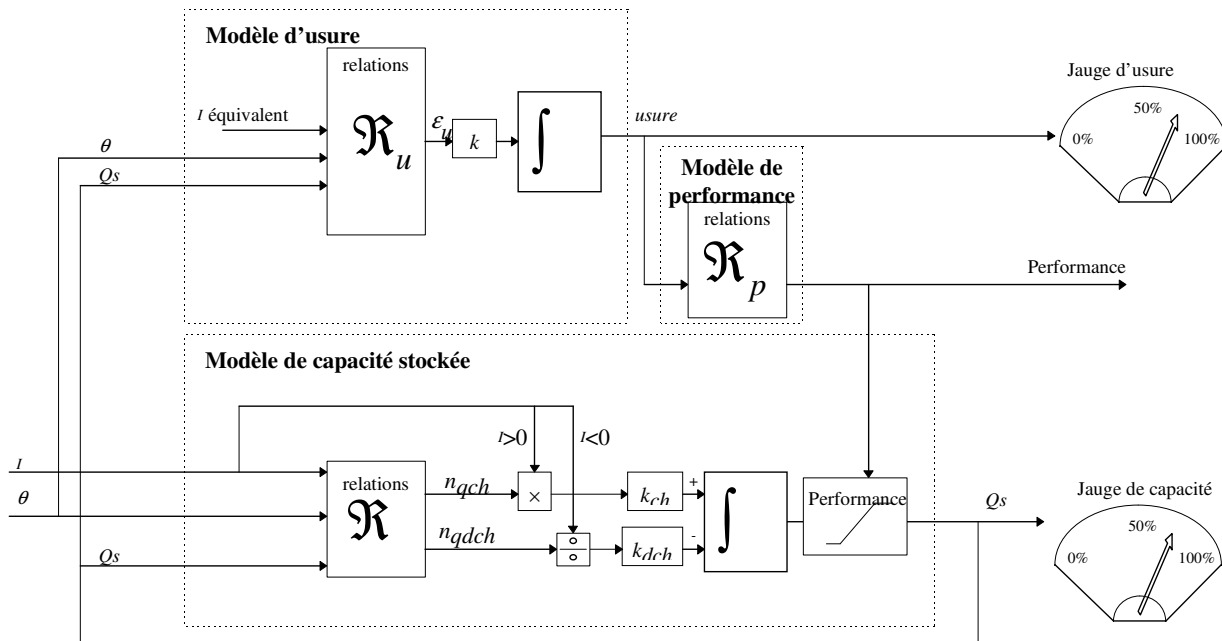
Si nous assemblons les modèles actuels, nous obtenons une structure qui nécessite un double traitement du courant de charge qui doit être traité pour la charge et la décharge. Pour simplifier ce modèle et éviter les conflits aux niveaux de l'écriture des règles, nous proposons d'appliquer une notation signée au courant. Le courant de charge est positif, négatif en décharge. Cette notation nous permet de simplifier le codage des fonctions d'appartenance de la variable densité.

Figure 6-43 « Nouvelle notation pour le codage de la densité de courant »



La valeur du courant équivalent est obtenue en multipliant la valeur absolue du courant multiplié par le rendement non nul de charge ou de décharge.

Figure 6-44 « Notre modèle global d'accumulateur »

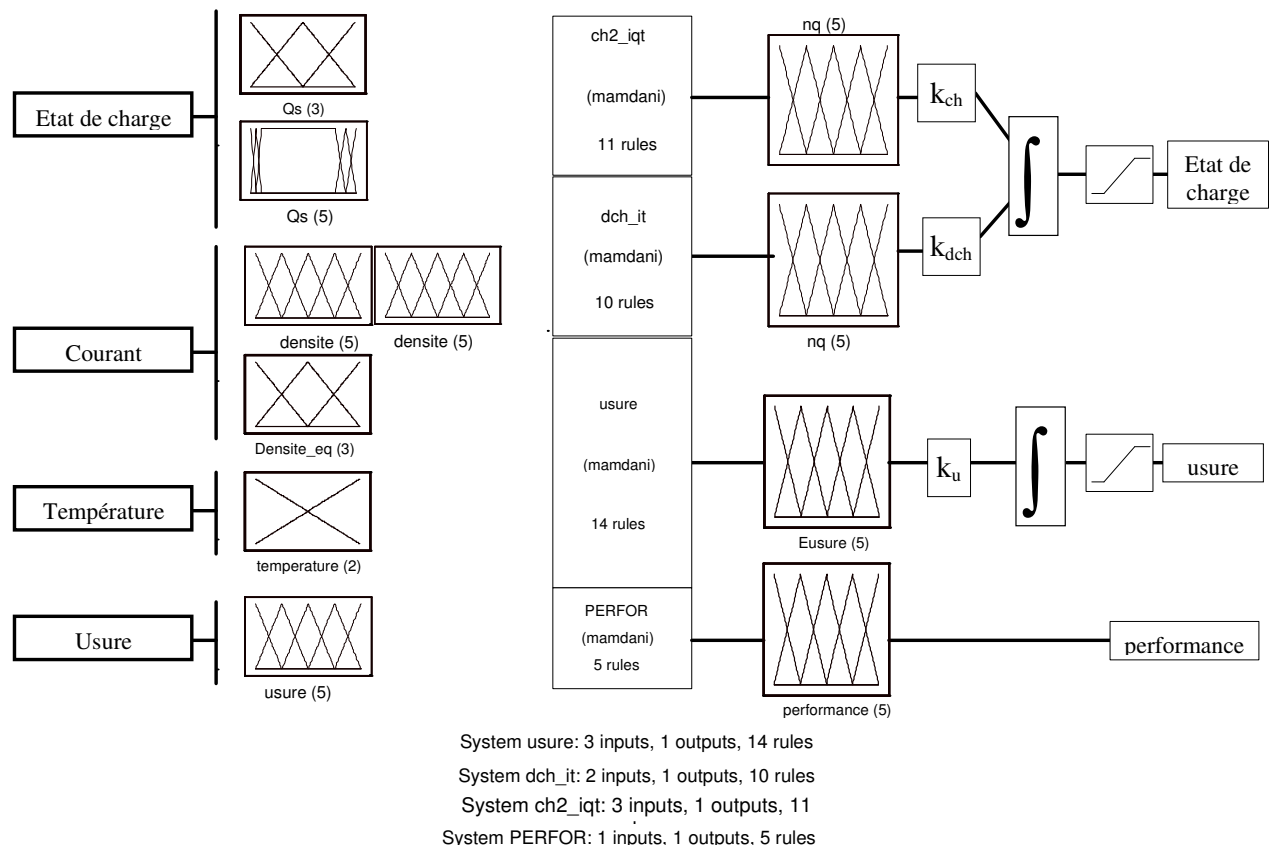


• Codage du modèle

Le codage de notre modèle est relativement simple car :

- Il ne nécessite que le codage de 40 règles pour fournir à l'utilisateur 3 informations utiles (état de charge, usure et performance).
- Nous utilisons seulement 5 familles de fonctions d'appartenances pour le codage des entrées et des sorties et seul les intervalles de variations des grandeurs d'entrées sorties sont nécessaires pour effectuer les calculs.
- Une représentation sur 8 bits est suffisante pour effectuer les calculs du noyau d'inférence qui ne fournit que des rendements.
- Les autres calculs font appel à une multiplication, une division arithmétique 32 bits et un accumulateur 64 bits, ce qui ne pose pas de problème pour le processeur de notre application.

Figure 6-45 « Le codage du modèle global »



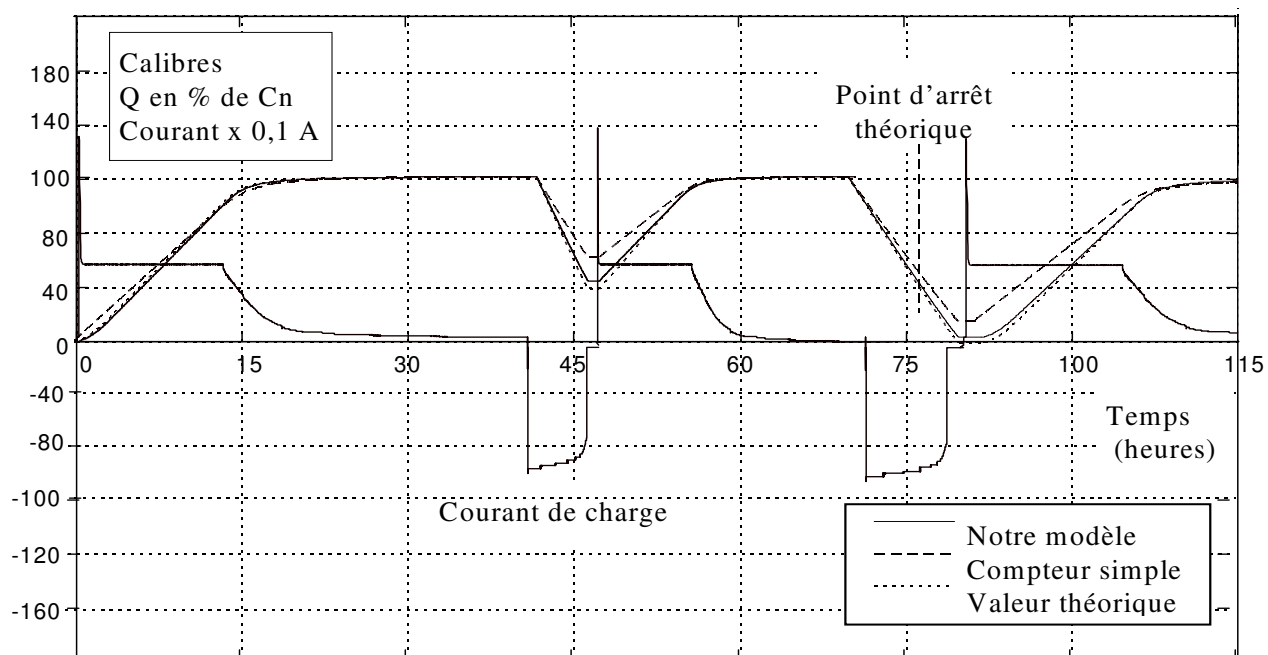
• Résultats

Si nous comparons en simulation notre modèle à la valeur théorique, nous observons qu'elle reste proche dans une fourchette inférieure à 4% pour notre exemple contrairement au compteur simple qui accuse une erreur de 17% après la première décharge à fort régime. Ce type d'écart se retrouve lors de la décharge profonde en fin de notre simulation.

L'écart entre notre modèle et le compteur simple serait accentué si il n'y avait pas les cycles de recharge complète de l'accumulateur qui permettent aux modèles de « se rattraper ».

Notre méthode de compensation du compteur ampère-heure-mètre apporte donc une amélioration très appréciables lorsque les conditions de décharge et l'usure ne sont pas constantes.

Figure 6-46 « Essais du modèle global »



Bibliographie du chapitre

[BAM96] BAMARD J.N. and UMIST BOWLER P.

Vectors give the green light on battery condition

Batteries International July 1996 -p.65-69

[BIS92] BISCAGLIA S.

Modélisation de la phase de décharge des accumulateurs plomb, application à la mesure de l'état de charge

Thèse de doctorat, ENSM Paris, 92ENMP0309, Electrotechnique, 1992

[BOU91] BOUNAGA A.

Etude des caractéristiques de décharge et évaluation de l'état de charge sous polarisation continue, méthode de l'impédance - Accumulateur NiCd

Thèse de doctorat, PARIS 12, 91PA120012, 1992

[BOU95] BOUCHON-MEUNIER B.

La logique floue et ses applications

Paris, Addison-Wesley France, 1995

[BUO87] BUONAROTA A., MENGHA P., SCARIONI V.

An electrical model for the discharge and recharge of lead-acid batteries developed for industrial applications

L'Energia Elettrica - N°7-8, 1987

[DUB80] DUBOIS D. et Prade H.

Fuzzy sets and systems : Theory and applications

Accademic Press, Orlando,FL,1980

[FAC88] FACINELLI W.A.

Modelling and simulation of lead-acid batteries for photovoltaic systems

18th IECEC p. 1582-1588, 1988

[GID73] GIDASPOW and D. BAKER B.S.

A model for discharge of storage batteries

J. Electrochemical Society : Electrochemical science and technology Vol 120, N°8, 1973, p. 1005-1010

[GIG88] GIGLIOLI G. PELACHCHI P., RAUGI M., ZINI G.

A state of charge observer for lead-acid batteries

L'Energia elettrica - N°1, 1988

[GOP79] GOPIKANTH M.L., SATHYANARAYANA S.

Impedance parameters and the state of charge II Lead-Acid Battery

Journal of applied electrochemistry N°9, 1979, p 369-379

[GUN87] GU NGHYEN T., WHITE R.E.

A mathematical model of lead acid-cell

J. Electrochemical Society Vol 134, N°12, 1987, p. 2953-2960

[HIG87] HIGGINSON T., PETERS K.

State of charge measurements for lead-acid cells

Power sources PSII, 1987

[JCG94] J.C.G.

L'accumulateur intelligent sur la voie de la standardisation

Electronique internationale 26 Mai 1994 - p. 31

[KAU73] KAUFMANN

Introduction à la théorie des sous-ensembles flous

Volume 1, Masson, 1973

[KAU87] KAUFMANN

Nouvelles logiques pour l'intelligence artificielle

Hemès, Paris, 1987

[KOS92] KOSKO B.

Neural Networks and fuzzy systems

Prentice Hall, Englewood Cliffs,NJ,1992

[LEE90] LEE C.C.

Fuzzy logic in control systems : fuzzy logic controller Part I and II

IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetics, Vol 20, pp 404-435,1990

[MAM74] MAMDAMI E.H.

Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant

Proceeding IEEE, Vol. 121, n°12, 1974, p.1585-1588

[MAR92] MARKLE G.J.

AC Impedance Testing for Valve Regulated Cells

Proceeding Intelec, 1992

[MEN84] MENGHA P. BUCCIANITI R. THIONE L.

An electrical model of the lead acid battery

EVS 7 Versailles 26-29 June 1984

[MIC94] MICROCHIP

MTA 11200 Intelligent Battery Management I.C.

Microchip Technology 1994 - Preliminary -DS40104c

[MOR88] MORIMOTO Y. OHYA Y., ABE K. YOSHIDA T.

Computer simulation of the discharge reaction in lead-acid batteries

J. Electrochemical Society Vol 135, N°2, 1988, p. 293-298

[NEW81] NEWMAN J. and TIEDEMANN W.

Porous-electrode theory with battery applications

AIChE Journal Vol. 21, N°1, 1981, p25-38

[PES89] PESCO A.M., BIAGETTI R.V., CHIAMBER R.S., VENKATRAM R.C.

*An adaptative battery reserve time prediction
algorithm*

Intelec 89 October 15-18, 1989, 6.1

[RIC91] RICHALET J.

Pratique de l'identification

Paris, Hermès, 1991

[RYB96] RYBALKA K.V. BEKETAeva LA.

*Application of the operationnal impedance method to
estimation of the state of charge of chemical power
sources : A Lead Acide Battery*

Russian journal of electrochemistry, issn 1023-1935, 1996, Vol 32
N°6 p. 632-636

[SHE65] SHEPHERD C.M.

*Design of primary and secondary cell - An equation
describing battery discharges*

J. of applied Electrochemistry Vol 112,N°7, 1965 ,p. 657-664

[SIB92] SIBIGTROH J.

Implementing fuzzy expert rules in hardware

AI EXPERT, April 1992

[SIM73] SIMONSSON D .

*A mathematical model for the pourous lead dioxide
electrode*

J. of applied Electrochemistry
Vol 3, 1973, p. 261-270

[SUG83] SUGENO M. NISHIDA M.

Multi dimensional fuzzy reasoning

Fuzzy sets and systems, Vol 9, n°2,1983, p . 313-325

[SUN82] SUNU W.G., BURROWS B.

*Mathematical model for design of battery electrodes II
Curent Density Distribution*

J. Electrochemical Society Vol 129, N°4, 1982, p. 688-695

[TER88] TER HORST

Battery modelling for photovoltaic applications

Photovoltaic Energy Conference Florence May 1988

[WIL88] WILS R.H.

*Parameter estimation and modelling of battery state in
a PV powered house*

Solar 88, P .183-188, 1988

**[ZIM78] ZIMMERMAN A., MARTINELLI M.R.,
DADCOCK C.C.**

A state of charge monitor for sealed lead-acid cells

Aerospace report N°ATR- 78(8114)-2, 1978

[ZIM91] ZIMMERMAN H.J.

Fuzzy sets theory and its applications

Kluwer Academic Publisher, Boston, MA (2nd),1991

6. MODÉLISATION DU COMPORTEMENT DE L'ACCUMULATEUR À L'AIDE DE LA LOGIQUE FLOUE.....	217
6.1 L'ÉVALUATION DES ACCUMULATEURS.....	217
6.1.1 Les méthodes rencontrées	218
6.1.2 Les modèles connus d'accumulateurs	220
6.2 DÉFINITION D'UNE STRATÉGIE UTILISANT LA LOGIQUE FLOUE	228
6.3 CRÉATION DU MODÈLE FLOU	229
6.3.2 Le modèle de capacité	236
6.3.3 Le modèle d'usure	246
6.3.4 Le modèle global.....	252
252	