



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

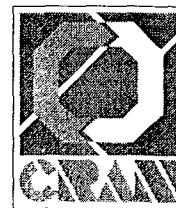
LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



Université de NANCY I

Centre de Recherche en Automatique de Nancy

CRAN ESSTIN

Unité associée au CNRS : URA D821

THESE

présentée pour l'obtention du

DOCTORAT

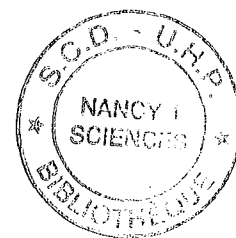
DE L'UNIVERSITE DE NANCY I

Spécialité Automatique

Par

GOUNANT Serge

Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Sciences et Technique de l'Ingénieur de Nancy



Création et réalisation

d'un module de gestion optimisée

de l'énergie électrique

Application ferroviaire embarquée.



ARNATRONIC



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les membres du jury qui me font l'honneur de participer à l'examen de ce travail :

Monsieur le Professeur HUMBERT, de l'université Henri Poincaré de NANCY, pour m'avoir accueilli dans son équipe de recherches, pour m'avoir encouragé tout au long de ma thèse.

Monsieur le Professeur GOELDEL, de l'université de Reims-Champagne Ardenne, et Monsieur le Professeur BRAUN, de l'université Louis PASTEUR de Strasbourg, de s'être intéressés à ce travail, d'avoir accepté de le juger et d'y avoir porté leurs remarques avisées.

Monsieur Dominique JAMET, responsable des travaux avancés chez ALSTHOM, pour l'honneur qu'il me fait en participant à ce jury.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon responsable de thèse Jean Marie ORY, Maître de Conférence à l'ESSTIN, sans qui rien n'aurait été possible.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur François JACQUES, Directeur de la société ARNATRONIC, qui m'a donné toute sa confiance pour la réalisation de ce projet, y compris dans les moments difficiles.

Je remercie également le Professeur LAPIQUE, du LSCG de NANCY, pour l'examen approfondi et ses remarques judicieuses concernant le travail sur l'accumulateur, lesquelles m'ont été d'un précieux apport.

Je n'oublie pas tous les camarades du CRAN ESSTIN pour leur amitié et en particulier leur responsable Monsieur le Professeur Michel ROBERT.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble du personnel de la société Arnatronic, pour le soutien et la sympathie qu'ils m'ont témoignés tout au long de mon parcours.

Je dédie ce mémoire à ma femme et à mes parents .

SOMMAIRE

INTRODUCTION	5
1. DÉVELOPPEMENTS RÉCENTS EN ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.....	9
1.1 L'ALIMENTATION ÉLECTRIQUE	11
1.1.1 Les alimentations linéaires.....	11
1.1.2 Les alimentations synchrones du secteur, les redresseurs	12
1.1.3 Les alimentations à découpage	14
1.1.4 L'évolution des convertisseurs d'énergie.....	16
1.2 LES COMPOSANTS DE PUISSANCE	20
1.2.1 La technologie bipolaire	21
1.2.2 La technologie effet de champ.....	25
1.2.3 Les composants mixtes à commande MOS.....	26
1.2.4 Les composants FET-Bipolaires	28
1.2.5 L'amélioration des composants actifs.....	30
1.2.6 Les composants passifs.....	31
1.3 L'INTELLIGENCE EN ÉNERGIE ÉLECTRIQUE	33
1.3.1 Optimiser le pilotage des circuits.....	33
1.3.2 Consommer intelligemment l'énergie.....	35
1.3.3 Les modules intelligents de contrôle et de protections.....	39
Bibliographie du chapitre.....	47
2. L'ACTIONNEUR INTELLIGENT	49
2.1 LA NOTION D'ACTIONNEUR INTELLIGENT	50
2.2 LE CYCLE DE VIE DE L'ACTIONNEUR INTELLIGENT.....	52
2.3 L'INTÉGRATION D'UN AI AU SEIN D'UN SAPID.....	53
2.4 ARCHITECTURE MATÉRIELLE DE L'AI.....	56

2.5 LES MODÈLES DE L'ACTIONNEUR INTELLIGENT.....	57
2.5.1 Les modèles informels ALBUS et CIAME.....	58
2.5.2 Les modèles formels.....	59
2.6 LA SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT	64
2.6.1 Définitions	64
2.6.2 L'amélioration de la sûreté de fonctionnement.....	65
2.7 LA GESTION DE L'INFORMATION	68
2.7.1 La gestion du temps.....	69
2.7.2 La gestion des pannes.....	69
2.7.3 La base de données.....	70
2.7.4 La base de connaissances.....	73
2.8 LES PERSPECTIVES DES CI ET AI	74
Bibliographie du chapitre	76
 3. UN PROCESSEUR À HAUTE SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT DÉDIÉ À LA GESTION DE	
L'ÉNERGIE.....	79
3.1 SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT ET PROCESSEURS	81
3.1.1 Eviter les fautes	82
3.1.2 Détecter les fautes	86
3.1.3 Réagir en cas de détection d'erreur	98
3.1.4 Valider la sûreté de fonctionnement.....	100
3.2 LES TENDANCES DES MICROPROCESSEURS	101
3.2.1 Caractéristiques générales	101
3.2.2 Les moyens de tests.....	105
3.2.3 Les moyens de développements	108
3.3 CAHIER DES CHARGES	109
3.4 LES CHOIX.....	110
3.4.1 Le processeur.....	110
3.4.2 Description du 68332	115
3.4.3 Les périphériques	124
3.4.4 La forme physique	125
3.4.5 Les outils logiciels.....	125
3.4.6 Architecture d'une application.....	126
3.5 LA CARTE MICRO POWER	127
3.5.1 Caractéristiques générales	127
3.5.2 Présentation physique	128
3.5.3 Le squelette logiciel.....	130
3.6 L'ENVIRONNEMENT DE DÉVELOPPEMENT	130

3.6.1 L'environnement logiciel.....	131
3.6.2 L'environnement matériel	133
Bibliographie du chapitre	134
4. LA GESTION DE L'ÉNERGIE AU SEIN D'UNE VOITURE FERROVIAIRE.....	137
4.1 PRÉSENTATION DU PROBLÈME	139
4.1.1 Architecture de l'automatisme	141
4.1.2 La gestion de l'énergie.....	143
4.1.3 Les différents aspects du problème.....	146
4.2 DESCRIPTION DU CHARGEUR DE BATTERIE	147
4.2.1 La gestion de la batterie.....	149
Bibliographie du chapitre.....	152
5. LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE : L'ACCUMULATEUR ÉLECTROCHIMIQUE.....	153
5.1 LES DIFFÉRENTS ACCUMULATEURS ÉLECTROCHIMIQUES.....	155
5.2 PRINCIPES PHYSIQUES	161
5.2.1 Rappel sur la théorie des piles électrochimiques	161
5.2.2 Les accumulateurs.....	173
5.3 L'ACCUMULATEUR AU PLOMB	176
5.3.1 Principe.....	176
5.3.2 Théorie de l'accumulateur au plomb	176
5.3.3 Constitution.....	181
5.4 LES CARACTÉRISTIQUES DE LA BATTERIE PLOMB	184
5.4.1 La F.E.M.....	185
5.4.2 L'impédance interne.....	188
5.4.3 La température.....	193
5.4.4 La densité de courant.....	195
5.4.5 L'état de charge	200
5.4.6 Les comportements de la batterie plomb.....	205
5.5 LES PHÉNOMÈNES DE VIEILLISSEMENT.....	205
5.5.1 L'altération des électrodes.....	205
5.5.2 La déshydratation des éléments	206
5.5.3 La stratification de l'électrolyte	209
5.5.4 L'effet mémoire	209
5.5.5 La caractéristique de cyclage.....	210
5.5.6 Le couplage d'élément	211

Bibliographie du chapitre	212
6. MODÉLISATION DU COMPORTEMENT DE L'ACCUMULATEUR À L'AIDE DE LA LOGIQUE	
FLOUE	215
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 LE FLOU	228
6.3 CRÉATION DU MODÈLE FLOU.....	230
6.3.2 Le modèle de capacité.....	236
6.3.3 Le modèle d'usure	246
6.3.4 Le modèle global.....	252
Bibliographie du chapitre	257
7. APPLICATION À UN CHARGEUR DE BATTERIE INTELLIGENT	259
7.1 LES RÉGULATIONS.....	261
7.1.1 La commande du redresseur pont mixte PD3.....	263
7.1.2 L'élaboration de la consigne.....	268
7.1.3 La régulation de tension.....	269
7.1.4 La régulation de courant.....	271
7.1.5 Mise en place des régulations	273
7.2 LA CRÉATION DES INTERFACES	274
7.2.1 L'amélioration de la mesure de température de la batterie	275
7.2.2 Autres exemples	277
7.3 DESCRIPTION DU LOGICIEL.....	280
7.4 PRÉSENTATION DU CHARGEUR	281
7.4.1 Le modèle externe.....	281
7.4.2 La base de données.....	283
7.4.3 Présentation matérielle.....	284
7.4.4 Tests avant mise en exploitation.....	285
CONCLUSION	286
ANNEXES.....	293

Introduction

Introduction



Arnatronic est une société qui développe des applications sur mesure en électronique de puissance. Elle est confrontée au fait de devoir répondre rapidement à des demandes en convertisseurs d'énergie spécifiques. Les technologies analogiques utilisées jusqu'alors nécessitaient de fastidieux re-designs. Anatronc a donc émis la volonté de mettre en oeuvre une conception modulaire et programmable pour réduire les coûts de développements.

Notre laboratoire CRAN ESSTIN s'est proposé de se pencher sur ce problème. Cette collaboration s'est concrétisée par la signature d'une convention CIFRE de l'Association Nationale pour la Recherche Technique entre notre laboratoire et la société Arnatronic.

Le CRAN ESSTIN possède une longue expérience en *capteurs intelligents*. Aussi est-ce tout naturellement que, pour répondre à l'attente d'Arnatronic, nous nous sommes inscrits dans le cadre du concept *actionneur intelligent* appliqué aux convertisseurs d'énergie.

Afin de nous situer dans le contexte industriel actuel, nous avons cherché dans un premier temps à dresser un état de l'art dans le domaine de l'électronique de puissance « intelligente ».

Suite à une étude du concept théorique de l'*actionneur intelligent*, nous avons pu définir le profil idéal du macro-composant qui servira de support à l'intelligence. Il s'agit d'une carte microprocesseur à haute sûreté de fonctionnement adaptée au pilotage des circuits de puissance.

Afin de réduire le temps et le coût de développement, nous avons créé l'environnement logiciel spécifique adapté à cette carte.

L'obtention d'un marché important dans le domaine ferroviaire nous a permis de réaliser une première application. Il s'agit d'un convertisseur d'énergie qui assure une alimentation électrique fiable des voitures à l'aide de batteries tampon.

La taille et le coût de ces équipements justifient une gestion optimisée de ces accumulateurs. En particulier, la connaissance de leur état de charge constitue un paramètre essentiel de l'installation.

Pour cela, une étude des mécanismes électrochimiques nous permettra de proposer un modèle de comportement pour lequel nous mettrons en œuvre une approche en logique floue.

Chapitre 1

Développements récents en énergie électrique

1. Développements récents en énergie électrique.

Dans ce chapitre nous allons aborder trois points de la gestion de l'énergie. Le premier est la conversion d'énergie avec ses types d'alimentations et le second les évolutions de ses composants. Le troisième montre les différentes manières de concevoir l'*intelligence* dans le domaine de l'énergie [RGE92b].

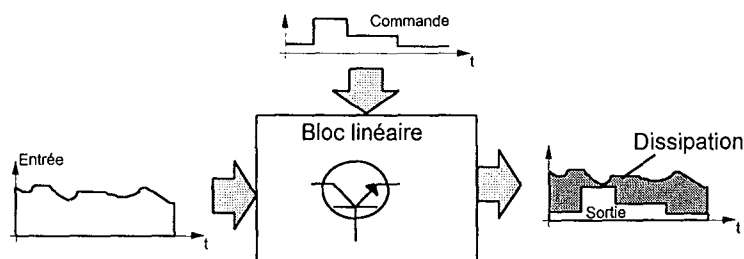
1.1 L'alimentation électrique

Actuellement le parc d'alimentations industrielles est constitué d'un grand nombre d'installations sur mesure conduit à une très grande diversité des équipements [ELE93]. Celles-ci peuvent se classer en trois familles selon leur mode de fonctionnement : linéaires, à découpage synchrone sur le secteur, à découpage à fréquences élevées [SEG85] [NAU91].

1.1.1 Les alimentations linéaires

Elles permettent à partir d'une tension continue non régulée d'obtenir des tensions et des courants très stables, précis et peu bruités [ARN93]. Elles sont fondées sur le principe de la consommation du surplus d'énergie par des composants agissants comme des résistances séries ou parallèles. La puissance excédentaire de la source non régulée est transformée en chaleur [GIR93b].

Figure 1-1 « Les alimentations linéaires »



- **Les avantages**

Ces alimentations offrent une grande dynamique et autorisent la reproduction très fidèle du signal de commande avec un très faibles bruits sur les grandeurs de sorties.

• Les inconvénients

Elles fonctionnent à partir de sources continues et sont souvent couplées à un ensemble du type redresseur pour leur connexion au réseau EDF. La transformation en chaleur de l'énergie pose des problèmes de dissipation et de rendement. Ce type d'installation impose un grand volume (radiateur de refroidissement des semi-conducteurs), d'où un coût important. Elles sont généralement utilisées pour des petites puissances ou lorsqu'un critère de faible bruit est requis.

• Les applications

- Instrumentation sensible au bruit.
- Régulation à deux étages, le premier, grossier par thyristor, le second, fin, par ballast linéaire.

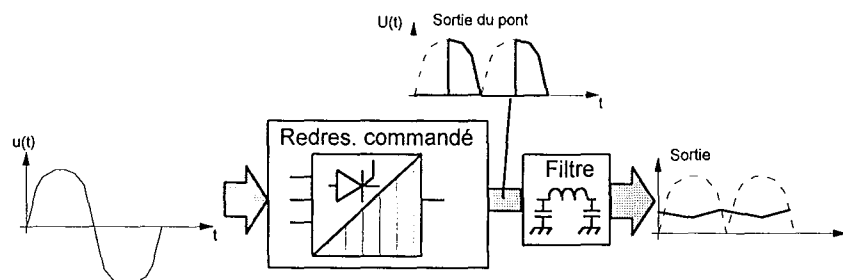
Exemple d'application de forte puissance

La société ARNATRONIC a équipé le laboratoire de recherche de la SOLLAC¹ le LEDEPP² de deux alimentations de forte puissance. La technologie linéaire est justifiée par le fait que l'installation est unique et qu'elle offre un moyen simple et propre pour produire des formes d'onde (en éliminant les facteurs d'influences que pourraient apporter des composantes résiduelles alternatives sur le signal de sortie). La première est un générateur de courant de 2000A sous 40V fournissant de l'énergie variant au cours du temps selon une loi de commande programmable. La seconde est une source bipolaire de $\pm 800A$ sous 40V. Elles sont destinées à une installation pilote pour le traitement de surface des tôles (dégraissage, zingage).

1.1.2 Les alimentations synchrones du secteur, les redresseurs

Ce type de montage est le plus répandu car le plus simple. Il utilise les caractéristiques du réseau de distribution (généralement du type EDF). Son fonctionnement est fondé sur l'utilisation de redresseurs commandés (Thyristor, GTO³) [MAS73]. Ces commutateurs permettent la création de structures simples permettant de contrôler le flux d'énergie les traversant.

Figure 1-2 « Les alimentations synchrones avec le secteur »



¹ SOLLAC : Société Lorraine de Laminage Continu

² LEDEPP : Laboratoire d'Etude et de Développement en Produit Plat

³ G.T.O. : Gate Turn Off thyristor, thyristor à extinction commandée

- **Les avantages**

Ces montages utilisent des composants robustes, simples de mise en oeuvre. Ils permettent de piloter de très fortes puissances avec un coût relativement faible. Ils sont bien adaptés aux réseaux polyphasés (tri et hexa).

- **Les inconvénients**

Pour atténuer les harmoniques engendrées par ce type de montage sur le réseau d'alimentation, il est nécessaire d'utiliser des filtres conséquents à efficacité souvent limitée. Les temps de réponse de ces montages sont directement liés à la fréquence du réseau de distribution et l'utilisation des filtres diminue la dynamique (La technologie des commutateurs limite les fréquences de travail possibles à quelques kilo-Hertz).

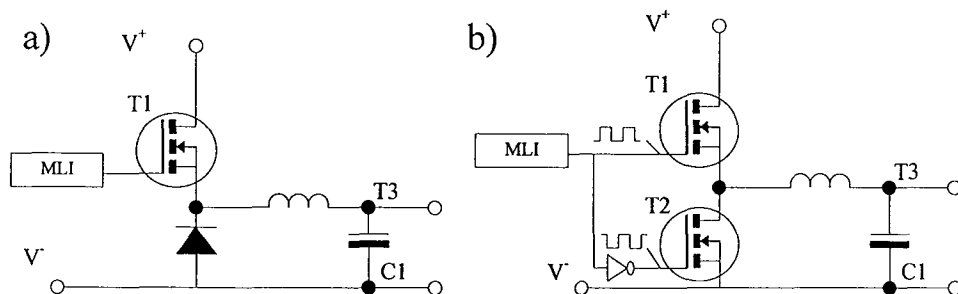
- **Les applications**

Elles sont encore très nombreuses dans le domaine industriel mais tendent à disparaître du marché grand public en raison de l'application des normes européennes sur la pollution des réseaux. Il semble que le pont redresseur à diode reste incontournable pour la transformation des tensions alternatives en continu.

Remarque : L'utilisation des transistors MOSFET¹ en redressement synchrone.

L'idée est de remplacer dans le circuit de commutation (figure a) la diode par un transistor saturé dont la tension de seuil (environ 0.1 V) et la résistance à l'état passant (qui peut descendre à 5mili-ohms) sont faibles pour réduire les pertes par conduction. La commande de ce transistor est réalisée de manière à recréer la zone de conduction des diodes (figure b). Cette technique permet une amélioration sensible du rendement de conversion des redresseurs pour les faibles puissances (de 10 à 300W).

Figure 1-3 « Le redressement synchrone à transistor MOSFET d'un montage commandé en MLI² »



Mais cette modification du montage pose les problèmes suivants :

- Le coût de la commande qui doit rester faible (énergie de commande faible).

¹MOSFET : Métal Oxyde Silicium Field Effect Transistor.

²MLI : Modulation en Largeur d'Impulsion

- Il faut interdire la conduction simultanée des transistors T_1 et T_2 en introduisant un temps morts entre les deux commandes.
- La conduction de la diode de substrat de T_2 durant le temps mort crée des pertes (qui peut amener une diminution du rendement de 1 à 2 pour-cent). Il est possible de palier à ce défaut en utilisant une diode schottky en parallèle avec T_2 pour la conduction durant le temps mort.

- **Les avantages**

Applicables à des fréquences élevées (quelques centaines de kilo Hertz), pertes par conduction faibles.

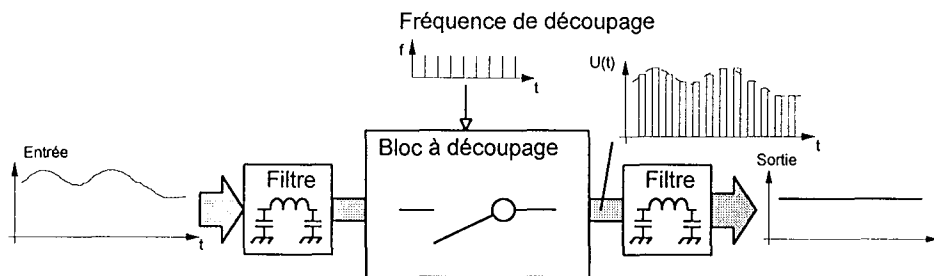
- **Les inconvénients**

Le coût de la commande et les pertes de commutations augmentent en fonction de la fréquence de travail. La commande peut nécessiter un circuit spécifique pour éviter les conductions simultanées et la création des temps morts. L'utilisation de la diode de substrat du transistor possédant de mauvaises caractéristiques pour limiter les surtensions, la tension Grille/Source doit être limitée (environ 20V maximum) pour ne pas détruire le composant.

1.1.3 Les alimentations à découpage

Les circuits à découpage sont fondés sur l'utilisation de commutateurs *commandés à l'allumage et à l'extinction*, régulant le flux d'énergie dans le récepteur [GIR93a] [FER94]. La transformation de l'énergie s'effectue à l'aide de capacités et d'inductances. Cette technique fait intervenir des pointes de courant et de tension et nécessite l'utilisation de filtres.

Figure 1-4 « Les alimentations à découpage »



- **Les avantages**

La fréquence de travail du découpage peut être très élevée (de 1kHz à 1MHz) ce qui diminue très fortement la taille des filtres et transformateurs, et permet donc un rapport puissance/poids élevé. Les pertes thermiques étant essentiellement dues aux imperfections des composants, ces alimentations peuvent

atteindre de très bons rendements (95%). Elles ont un temps de réponse bref et sont très bien adaptées aux techniques numériques.

• Les inconvénients

La génération de pointes de courant et de tension pose le problème des perturbations électromagnétiques que la mise en place de filtres, même d'ordre élevé, ne permet pas d'éliminer totalement. La persistance de bruit en mode commun et différentiel sur les sorties interdit les applications de traitement du signal. La mise au point de ce type d'alimentation (certaines utilisant les phénomènes de résonance) reste complexe.

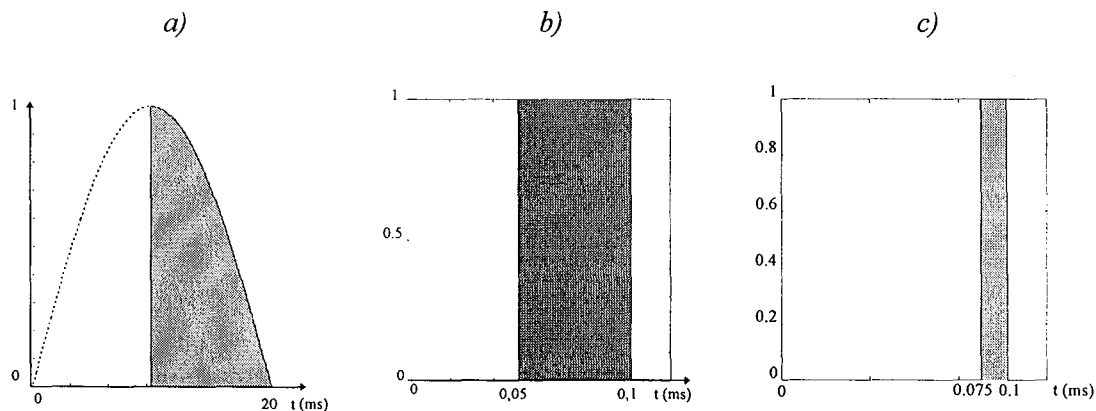
• Les applications

Les alimentations à découpage se sont imposées comme solution pour la plupart des alimentations de faibles puissances industrielles et grand public. Un des domaines les plus importants en moyenne et forte puissance est le pilotage des moteurs.

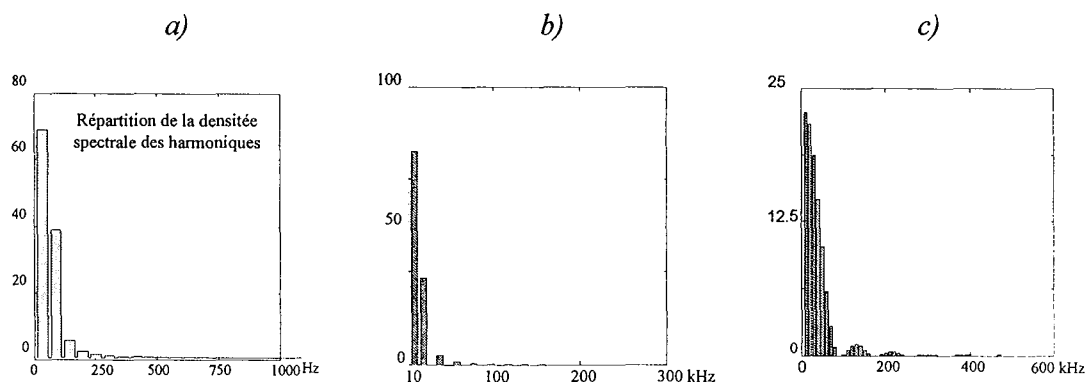
Remarque : Comparaison des spectres d'une alimentation à thyristor à celle d'un découpage à 10 kHz.

Figure 1-5 « Comparaison des spectres d'une alimentation à thyristor et d'une alimentation à découpage »

Signaux



Répartition de la densité spectrale des harmoniques (en %)



Lorsque nous comparons la répartition de la puissance des harmoniques générées par un montage redresseur à thyristors sur le secteur et un découpage à 10 kHz, nous observons que l'alimentation à découpage possède un spectre à large bande. Le signal *a* représente une demi arche de la tension secteur découpée par un redresseur et le signal *b* le découpage à 10 kHz d'une tension continue tous deux avec un rapport cyclique de $\frac{1}{2}$. La répartition des harmoniques du redresseur s'étale de 50 à 500 Hz alors que le cas *b* possède un spectre beaucoup plus étendu de 10 à 300 kHz et provoque une pollution large bande de l'environnement.

Le cas *c* illustre l'influence du rapport cyclique du signal découpé sur l'allure du spectre.

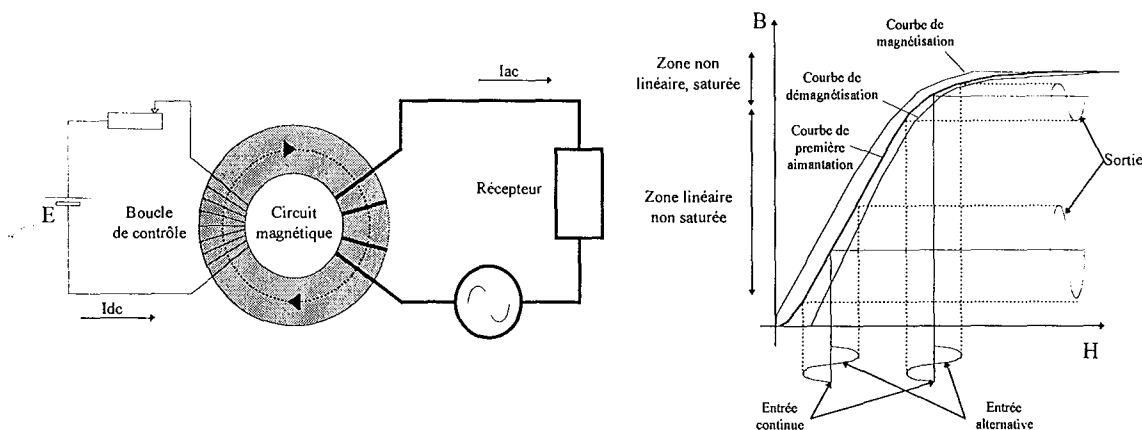
1.1.4 L'évolution des convertisseurs d'énergie

Les évolutions des technologies ont permis d'adapter les anciens principes de la conversion d'énergie qui datent du début de l'électronique avec l'utilisation des tubes et des premiers semi-conducteurs [MES95]. Un exemple est l'adaptation des amplificateurs magnétiques aux techniques à découpage :

L'amplificateur magnétique [BAR62]

Il utilise la non-linéarité des matériaux magnétiques pour adapter l'impédance d'une inductance en série avec le circuit à piloter. La commande s'effectue à l'aide d'un courant continu qui porte ou non à saturation le noyau de l'inductance de puissance [NOS65, MAL60]. En déplaçant le point de fonctionnement du champ magnétique moyen, on obtient une variation de l'impédance visible par le circuit de puissance. L'utilisation d'un enroulement possédant un grand nombre de spires pour la commande permet de saturer l'élément magnétique avec très peu de courant.

Figure 1-6 « Principe de l'amplificateur magnétique »



$$H = \frac{4\pi NI}{l} \quad (0.1.)$$

$$B = \mu_0 \times \mu_r(H) \times H \quad (0.2.)$$

H : Intensité du champ magnétique en A/m

B : Densité de flux magnétique Vs/m²

μ_0 : Perméabilité absolue (1,257 10⁻⁶)

$\mu_r(H)$: Perméabilité relative du matériau

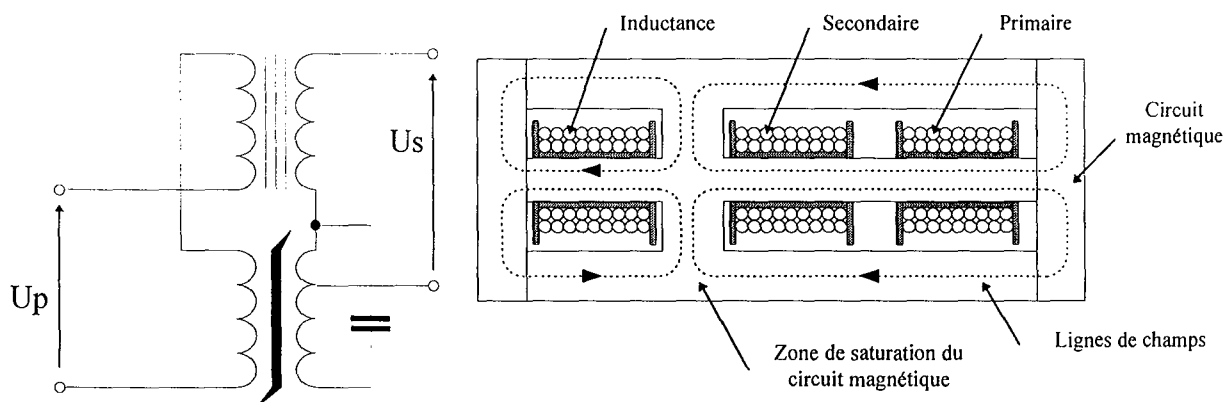
Application au transformateur ferro-résonant [BRI82]

Le transformateur ferro-résonant est le résultat de l'assemblage d'un transformateur et d'un filtre à inductance saturable. Ce type de filtre consomme de l'énergie réactive et l'association d'un ensemble de capacité permet de compenser celle-ci et d'obtenir un circuit oscillant résonant à la fréquence désirée (50 ou 60 Hz) donnant un signal sinusoïdal. Ce type de montage offre les avantages suivant :

- stabilisation de l'amplitude,
- onde quasi-sinusoïdale,
- protection contre les coupures par effet de volant,
- protection contre les surtensions transitoires du réseau.

Ce type de transformateur est composé d'un circuit magnétique assurant le transfert de l'énergie entre primaire et secondaire. Le circuit magnétique possède un tronçon commun au transformateur et à l'inductance saturable où interviennent les phénomènes de saturation.

Figure 1-7 « Principe d'un transformateur ferro-résonant »

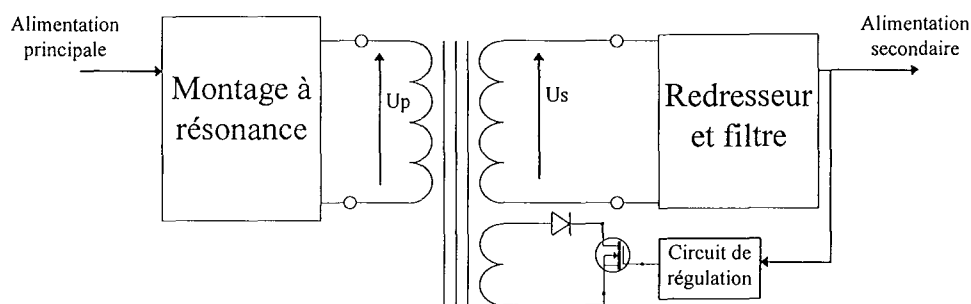


Alimentation à découpage, application de la RCEM (Régulation par Contrôle Magnétique) [BON92]

Sous le nom de RCEM on retrouve l'utilisation de la saturation des éléments magnétiques et plus particulièrement du transformateur dans les techniques à découpage. Cette méthode permet d'utiliser des techniques résonantes à fréquence quasi fixe pour le primaire car la régulation s'effectue au secondaire. Elle peut être réalisée par :

- une inductance variable en série avec le secondaire (fonctionnement de l'amplificateur magnétique). Certains circuits intégrés de gestion d'alimentation sont conçus pour ce type de régulation par exemple l'UC1838 UNITRODE [UNI94]
- une inductance saturable couplée au circuit magnétique (équivalent au transformateur ferro-résonant),
- un court-circuit partiel d'un enroulement du secondaire qui conduit à une saturation contrôlée du transformateur. Cette technique permet l'utilisation de transformateur classique multi-enroulements. Elle fait l'objet de brevet depuis 1990 [AGD95].

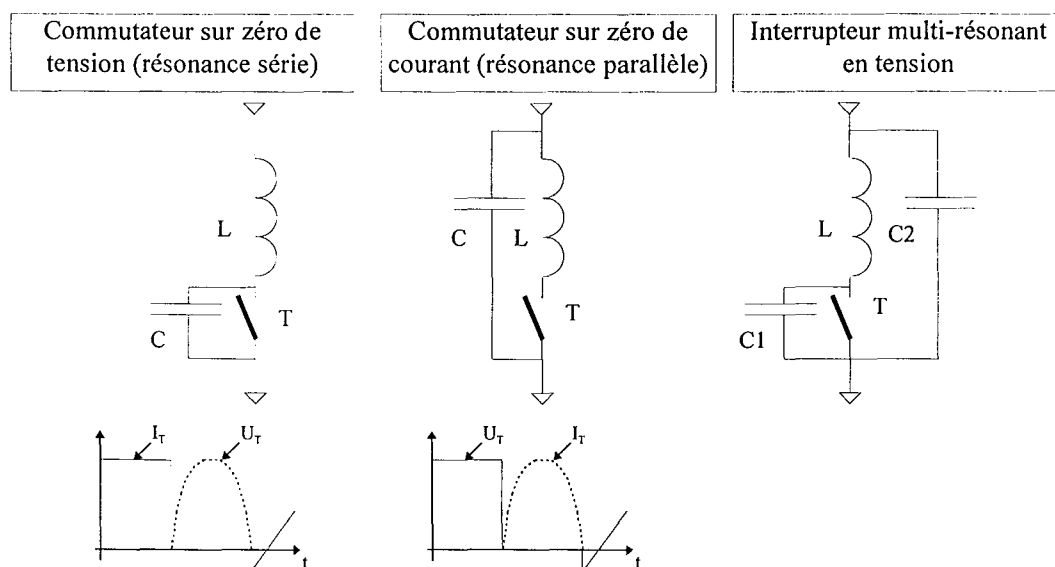
Figure 1-8 « Principe du contrôle magnétique par cour-circuit partiel d'un enroulement »



• La commutation douce, résonance [DON91a]

L'amélioration des performances des convertisseurs passe par l'utilisation de fréquences de commutations élevées et par la réduction des pertes et des perturbations émises. L'idée est d'utiliser les zones à courant nul ou tension nulle pour actionner les commutateurs de puissances [FER94, VHE88]. Ces conditions sont obtenues à l'aide d'éléments actifs et réactifs associés de manière à favoriser les phénomènes oscillatoires.

Figure 1-9 « Exemples d'interrupteurs utilisés en commutation douce »



La commande peut également s'effectuer en respectant le régime d'oscillation du circuit de charge (résonance [DIV86, LIU84]) ou en n'utilisant qu'une partie du phénomène (quasi-résonance [DON91b, BEN91]). Pour favoriser les phénomènes oscillatoires, la charge est associée à des composants actifs et réactifs. La variation de la charge entraîne une variation de la fréquence de résonance du circuit et la commande des interrupteurs est réalisée de manière synchrone par la régulation en utilisant un circuit à verrouillage de phase.

- ***L'amélioration des lois de commandes***

Les contraintes de normes et de compétitivité ont conduit à l'utilisation de lois de commandes évoluées, faisant intervenir de multiples régulations et limitations (cas des alimentations à résonance ou à haut facteur de puissance). Lorsque ces lois doivent être adaptées à un consommateur (moteur [DEH92]) pour prendre en compte les phénomènes transitoires ou non linéaires, les changements de modes, obligent l'utilisateur à intégrer des algorithmes de commande nécessitant beaucoup de calculs difficilement réalisables en analogique. Leurs réalisations nécessitent alors des techniques numériques élaborées [BAT96] aujourd'hui possibles grâce à la performance des processeurs.

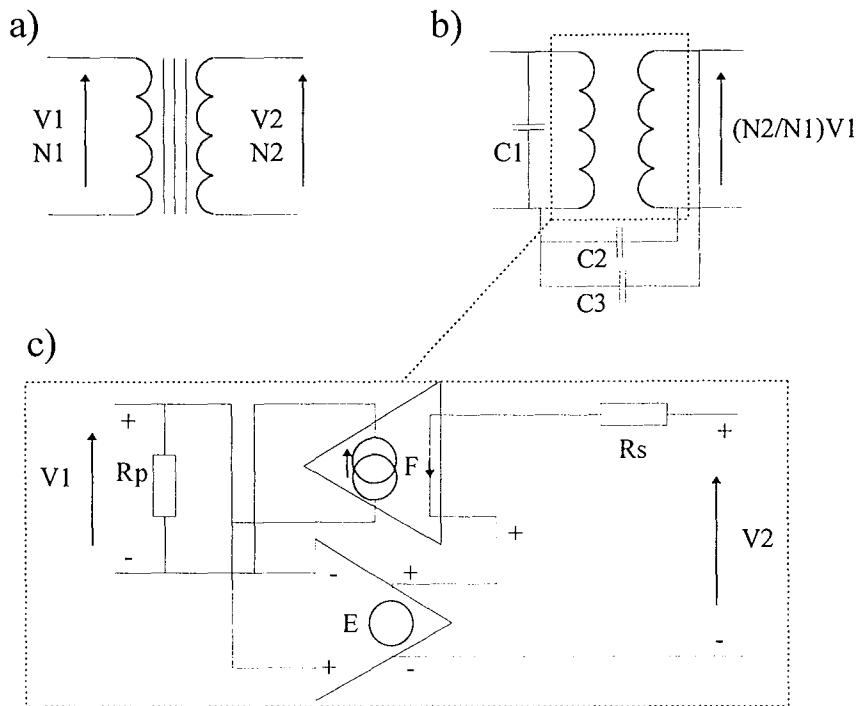
- ***La modélisation [RGE95a]***

La mise au point des convertisseurs fait de plus en plus appel à des techniques de simulation [FER94] [JOU86] . Celles-ci sont rendues possibles par l'évolution des outils et des logiciels de calculs, ainsi que de la mise à disposition par les constructeurs des modèles mathématiques de leurs composants (SPICE) [CAP89] [TAT87]. Ces modèles sont construits à l'aide de composants électriques simples et idéaux (inductance, capacité, résistance, générateur de tension et générateur de courant). Ils sont associés de manière à reproduire le comportement des composants [MID76].

Exemple: Modèle simplifié du transformateur idéal [INT96]

Pour obtenir le modèle idéal du transformateur d'alimentation à découpage (*figure a*), nous allons reproduire le comportement électrique de celui-ci à l'aide des éléments de bases. Nous commencerons par définir les capacités parasites entre les enroulements primaires et secondaires (*figure b*). Les résistances des enroulements seront représentées par une résistance équivalente ramenée au secondaire R_s et les pertes fer par une résistance parallèle équivalente R_p ramenée au primaire. Cette dernière sera non linéaire en fonction de la fréquence (reproduction des caractéristiques magnétiques du noyau). Le transfert de tension du primaire vers le secondaire s'effectue par un générateur de tension E prenant sa consigne au primaire et assurant le rapport de transformation N_2/N_1 . Le transfert du courant entre le secondaire et le primaire est assuré par un générateur de courant F (*figure c*). Le résultat de ce modèle est traduit dans un fichier texte normalisé.

Figure 1-10 « Modèle simplifié d'un transformateur d'alimentation à découpage »



• La législation

Pour faciliter les échanges au sein de la Communauté Européenne, il est nécessaire d'unifier les normes. La parution et la mise en application de ces nouveaux textes [Ptx94] ont permis de prendre en compte les interactions entre un équipement et son environnement (influence et susceptibilité) aussi bien du point de vue électrique qu'électromagnétique [SEE95]. Ces normes relativement précises obligent à intégrer très tôt cet aspect normatif lors du développement [RAG93].

Pour plus d'information, se reporter à l'annexe A.

1.2 Les composants de puissance

Depuis les années 80, l'électronique de puissance s'est développée autour de la diode, du transistor bipolaire, et de thyristor pour les fortes puissances. Puis les progrès techniques ont permis la réalisation de transistor à effet de champ de puissance (MOSFET¹) et de composant associant les technologies *effet de champ* et *bipolaire* [PET91] : les IGBT² (transistors à grille isolée) et les GTO³ (thyristor bloquable par la gâchette). Après les succès de ces composants, les chercheurs ont imaginé de nouvelles structures mixtes bipolaires-MOS. Mais aucune pour l'instant n'a détrôné le MOSFET en basse tension et l'IGBT en haute

¹ MOSFET : Métal Oxyde Silicium Field Effect Transistor.

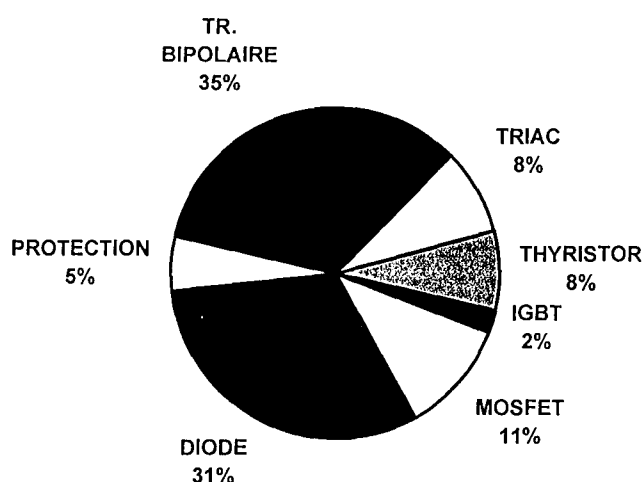
² IGBT : Isolated Grid Bipolar Transistor (transistor bipolaire à grille isolées).

³ GTO : Gate Turn Off thyristor, thyristor à extinction commandée

tension. Mais les derniers nés [ARN92] comme le MCT (Mos Controlled Thyristor) les SIT et SITH (Static Induction Transistor et Thyristor) semblent prometteurs.

Aujourd'hui, sur le marché des semi-conducteurs de puissance, seul les Japonais sont en mesure de fournir l'ensemble des composants. L'offre des européens est beaucoup plus limitée et souvent centrée sur des produits de grande série. Cependant des sociétés comme ABB, SIEMENS et GEC-PLESSEY tentent de réagir pour rattraper ce retard. En revanche, en France, la situation est critique [DEL93]. EDF, des industriels et les pouvoirs publics ont créé, il y a 4 ans, le GIRCEP (Groupement Industriel pour la Recherche sur les Composants Electroniques) destiné seulement à l'expertise et l'évaluation des composants étrangers.

Figure 1-11 « Le marché mondial des semi-conducteurs de puissance (environ 40 milliards de francs) »

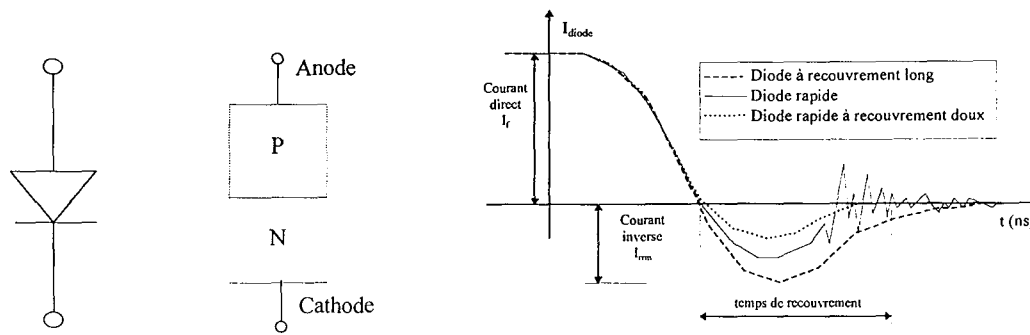


1.2.1 La technologie bipolaire

- *La diode*

Elle a bénéficié des améliorations technologiques apportées aux commutateurs de puissances [MAS73]. Malgré cela, peu de changement, il n'existe toujours pas de diode rapide type Schottky pour des tensions élevées. La nouvelle tendance de ces composants est le *Soft* et *Ultra-Soft recovery* (recouvrement doux) qui permet d'obtenir des commutations plus douces lors du recouvrement inverse tout en diminuant les oscillations. Le recouvrement inverse est le phénomène lié au temps d'élimination des charges stockées dans la jonction lors de la transition de l'état passant à l'état bloqué, ce qui provoque un courant inverse important. [MAL80]

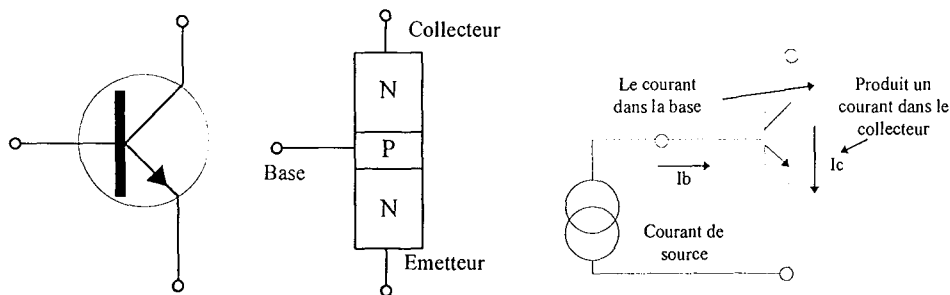
Figure 1-12 « La diode » d'après International Rectifier [KHE92]



• Le transistor bipolaire et le darlington

C'est encore aujourd'hui un des plus importants composants de puissance malgré l'avancée des composants MOSFET. Son faible coût et sa rusticité lui permettent de conserver des secteurs tels que les produits de commutation grand public (télévision, automobile ...) [Lix89].

Figure 1-13 « Le transistor bipolaire »



Le montage darlington possède deux transistors en cascade, ce qui lui permet de diminuer le courant de commande (I_b), mais ceci au détriment de la chute de tension à ses bornes (collecteur-émetteur).

Du fait de sa linéarité, le domaine d'application privilégié du transistor bipolaire reste les applications analogiques (du type amplificateur ou ballast) [THO78]. Un des problèmes pour les fortes puissances est l'utilisation de gros transistors difficiles à approvisionner ou l'assemblage d'une multiplicité de petits boîtiers avec tous les impératifs que cela comporte (temps de montage, encombrement, mécanique d'assemblage).

Avantages : possède une zone linéaire, une surface de silicium plus faible que celle des transistors à effet de champ, faible coût, rustique.

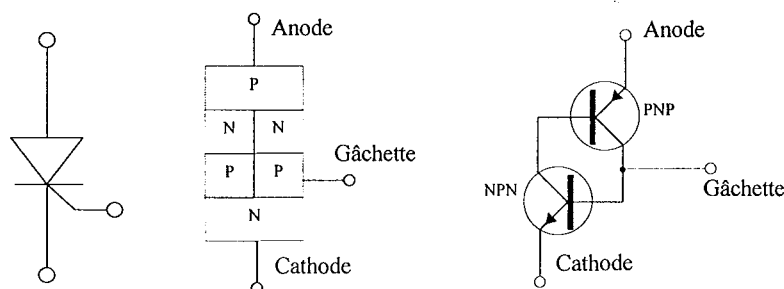
Inconvénients : Puissance nécessaire à sa commande (coût de la commande de base), faible de vitesse de commutation, problème de saturation, tension inverse faible.

• Le thyristor et le triac

Le thyristor est un des premiers semi-conducteurs de puissance apparu sur le marché. Il peut être considéré comme un ensemble de deux transistors bipolaires [MAG72]. Il est simple et robuste. Son

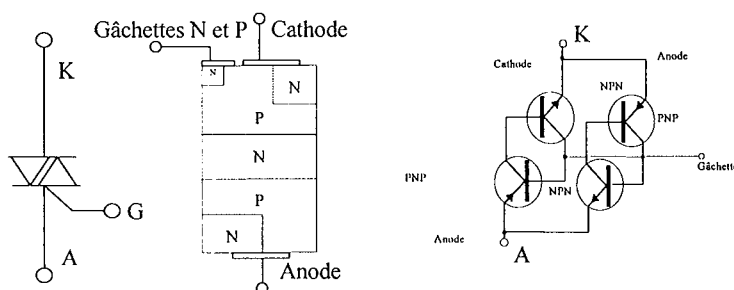
avantage qui s'avère également son défaut est son effet mémoire à l'état passant : une fois amorcé, il ne peut être bloqué [GEN64].. Cet effet mémoire disparaît lorsque le courant d'anode s'annule de manière naturelle ou à l'aide d'un circuit externe d'extinction [LIL87]. Il est habituellement utilisé dans les redresseurs ou gradateurs de puissance .

Figure 1-14 « Le thyristor »



Le triac est grossièrement l'équivalent de deux thyristors en tête bêche (équivalent du thyristor en alternatif) [GEN65]. La gâchette correspond au regroupement des gâchettes d'anode et de cathode. Il est très utilisé dans les appareils domestiques.

Figure 1-15 « Le triac »



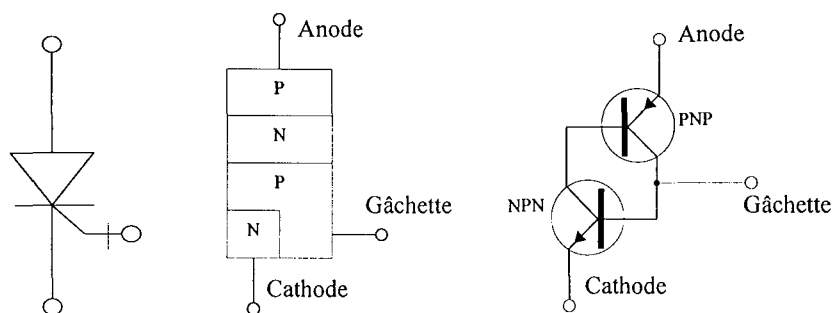
Avantages : Une faible surface de silicium, robustesse (très fortes surcharges de courant possibles), une commande simple, il supporte des tensions inverses importantes à l'état bloqué.

Inconvénient : Pas de possibilité de blocage (nécessité d'un circuit externe), un dv/dt appliqué à la capacité parasite du thyristor peut créer un courant $i=Cdv/dt$ suffisant pour l'amorcer.

• Le GTO (Gate Turn Off)

Le GTO est un thyristor bloquable, une forte impulsion en énergie permet de dépolariser une jonction qui annule l'effet mémoire et bloque le thyristor. Durant cette phase, il se produit un phénomène de focalisation du courant (passage du courant à couper dans une très petite zone de silicium de la cathode). Ce phénomène induit la plupart des limitations du GTO (limitation du pouvoir de coupure, après une commutation il faut un temps mort avant une autre commutation : minimum *on-time* et *off-time*, pertes à l'ouverture importantes). Il reste un composant très coûteux principalement réservé à la commutation de très forte puissance [NAU91]. Il n'est pratiquement utilisé qu'en traction ferroviaire (application au moteur asynchrone du TGV Atlantique).

Figure 1-16 « Le G.T.O. »



Avantages : possibilité de blocage, supporte des tensions inverses importantes à l'état bloqué, pilotage de très forte puissance.

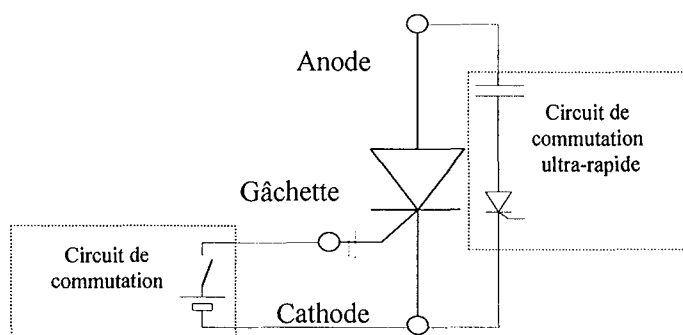
Désavantages : prix , coût de la commande, existence de temps morts, fréquence de travail (10 kHz maximum).

• Le ZTO (Zero Turn Off time thyristor)

C'est un composant similaire au GTO qui utilise le principe de commutation forcée associée à l'assistance de la gâchette [ELE87]. Le silicium a été adapté à la méthode de commutation du composant qui utilise un circuit extérieur simplifié d'aide à l'extinction. Ce dernier dévie le maximum de charges du composant avant sa commutation à l'aide d'un thyristor rapide et d'une capacité. Il ne reste ensuite qu'à extraire les charges stockées dans le composant (pas de phénomène de focalisation).

Il est utilisé dans les alimentations à résonance de forte puissance et fonctionnant à plusieurs dizaines de kilo-Hertz.

Figure 1-17 « Le Z.T.O. »



Avantages : pas de temps mort, haut pouvoir de coupure, commande plus économique que le GTO, forte tenue au dV/dt et dI/dt (1000 A/ μ s et 2000V/ μ s).

Inconvénient : nécessité d'un petit circuit d'aide à la commutation.

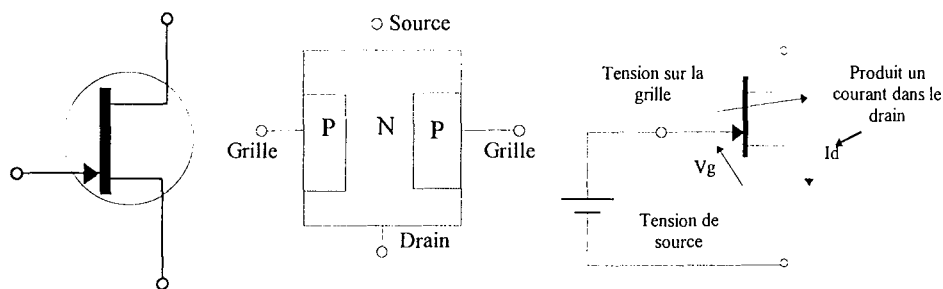
1.2.2 La technologie effet de champ

La technologie FET est sensée pallier le problème de commutation du bipolaire avec un faible courant de commande, une bonne saturation et vitesse de commutation. L'introduction de la technologie MOS¹ a permis de simplifier sa commande et de développer de nouveaux composants de puissance.

- **Le transistor JFET²** [DAV64]

Ce transistor n'a jamais eu de vocation de puissance mais plutôt de signal.

Figure 1-18 « Le transistor JFET canal N »



Avantages : Rapidité, faible énergie de commande, existence d'une zone linéaire (résistive)

Inconvénients : Forte dispersion des caractéristiques $I_D(V_G)$, réservé aux faibles puissances.

- **Les transistors MOSFET³**

Le transistor MOSFET commence à concurrencer sérieusement le bipolaire, surtout sur les applications de commutations. C'est un transistor FET sans ses inconvénients : il est rapide, possède de bonnes caractéristiques de saturation (la chute de tension à l'état passant et seulement due à la résistance faible résistance interne), est piloté par des tensions bien définies [SEG85]. Il permet de commander de fort courant en basse tension. Des versions haute tension permettent de commander quelques dizaines d'ampères dans de très petits boîtiers (TOP3). Ces caractéristiques en font un composant de choix pour les systèmes de commutation [OEH69].

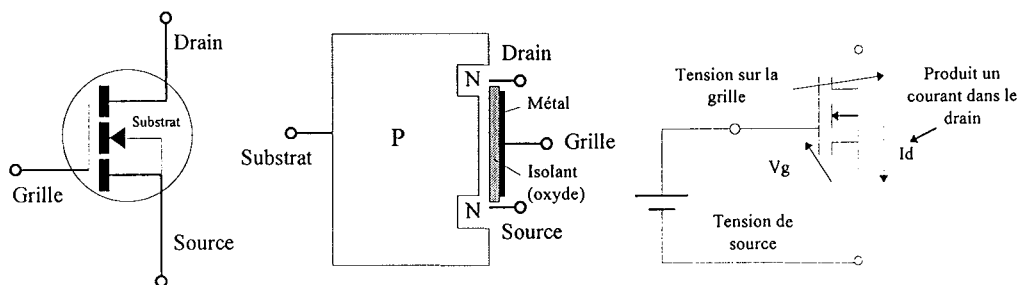
Principe : Le transistor MOSFET est un FET où la grille, composée d'une plaque métallique, a été isolée par un oxyde ce qui permet sa commande à l'aide d'une tension positive (transistor à enrichissement de porteur) et avoir un courant de grille quasiment nul. [INT93].

¹ MOS : Metal Oxide Semiconductor, technique permettant d'isoler les grilles Métalliques des transistors à effet de champ et le Silicium par un Oxyde.

² JFET : Junction Field Effect Transistor (transistor à effet de champ).

³ MOSFET : Métal Oxyde Silicium Field Effect Transistor

Figure 1-19 « Le transistor MOSFET »



Avantages : simplicité et commande économique, bonne vitesse de commutation autorisant le travail à des fréquences élevées (10 à 200 kHz), résistance interne faible.

Inconvénients : Valeur de la capacité de grille importante (jusqu'à 10 nF), limitation des puissances commandées (incompatibilité du couple fort courant et forte tension), coût dû à une grande surface de silicium pour diminuer la résistance à l'état passant R_{on} ($R_{on}=k \cdot \text{Tension nominale}^{2.6}$), l'association de plusieurs transistors en parallèles reste délicate du fait de leur rapidité de commutation, non adapté aux applications linéaires.

1.2.3 Les composants mixtes à commande MOS¹

• L'IGBT²

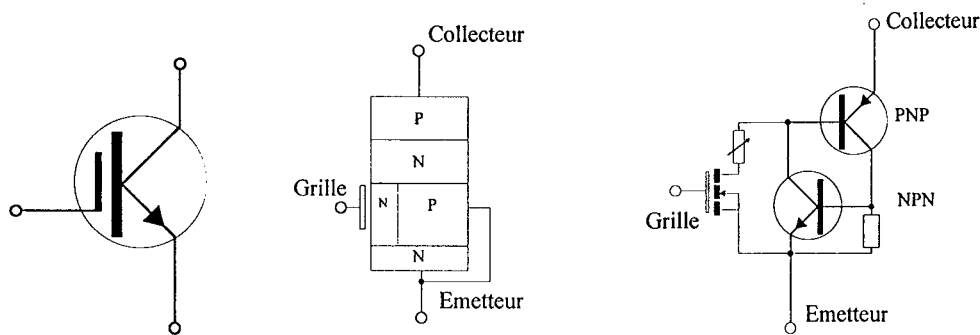
A la base, c'est un transistor bipolaire à grille isolée. Il est le résultat de l'association de la technologie MOS pour la commande et bipolaire pour la puissance. La percée commerciale de l'IGBT a été relativement faible du fait de la méfiance des utilisateurs au niveau du problème que peut poser sa commande. En effet le principal problème de l'IGBT est de pouvoir rester verrouillé à l'état passant lorsqu'il est quelque peu malmené (résultat du thyristor formé par le transistor parasite NPN bien que celui-ci soit court-circuité à la fabrication). De plus il possédait à l'origine des caractéristiques techniques en retrait de ce que laissait espérer le transistor darlington de puissance.

La commande d'un IGBT s'effectue par une impulsion positive et son arrêt par une impulsion négative.

¹ MOS: Métal Oxyde Silicium, technologie utilisée pour la fabrication de la partie active du semi-conducteur

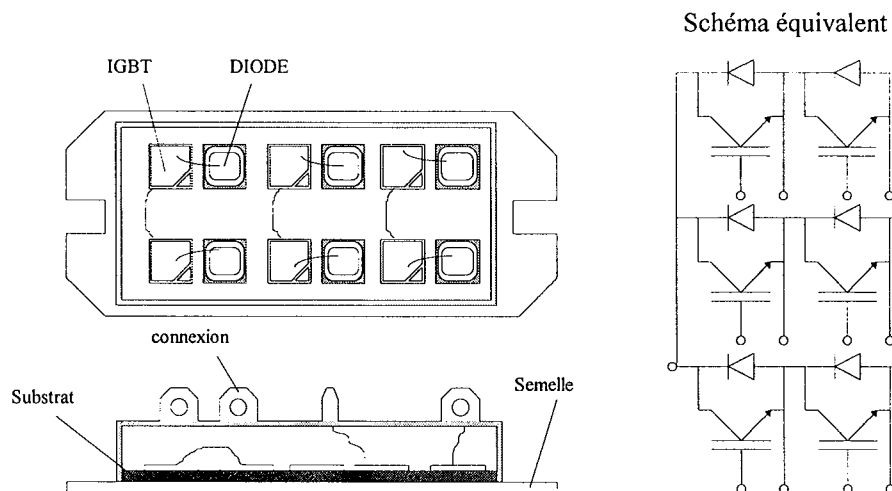
² IGBT : Isolated Grid Bipolar Transistor (transistor bipolaire à grille isolées).

Figure 1-20 « L'IGBT »



L'IGBT a nettement amélioré ses caractéristiques depuis quelques années et les besoins de commutateur de puissance en découpage ont permis de développer des IGBT de 600A/1200V et 800A/600V (TOSHIBA) utilisant des technologies à $1\mu\text{m}$ permettant d'obtenir des $V_{ce}=2,1\text{V}$ et des temps de commutations de 150 ns autorisant des fonctionnements à des fréquences de 20 KHz. Il équipe aujourd'hui des convertisseurs de 4kW à 300kW, mais surtout leur résistance au LATCH UP¹ a été accrue [ALM93]. Ces améliorations font que l'IGBT est bien installé sur le marché du commutateur de puissance, avec pour secteur privilégié le variateur de vitesse ou de fréquence pour les moteurs électriques [LOR91]. Mais la plus grosse partie du marché de l'IGBT ne se situe cependant pas au niveau des composants discrets, mais au niveau des modules. Ceux-ci résultent d'un assemblage d'IGBT, de diodes et de technologies hybrides, de manière à offrir un ensemble compact possédant déjà l'architecture du montage ainsi que certaines fonctions de contrôles ou de commandes. Ces modules sont généralement classés comme *SMART* ou intelligent [SCH92].

Figure 1-21 « Exemple de module contenant une structure de circuit pré câblé »



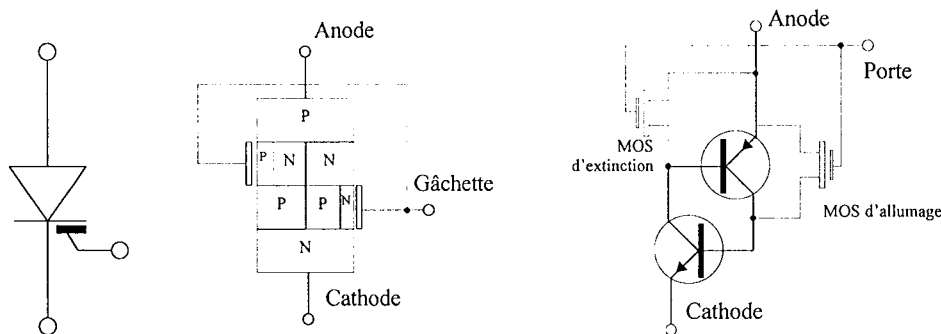
Ses plus gros avantages sont un coût raisonnable et une commande économique.

¹ LATCH UP : phénomène qui provoque la mémorisation de l'état passant de l'IGBT (effet indésirable)

- **Le MCT (Mos Controlled Thyristor)**

Le MCT est un composant semblable au thyristor auquel ont été ajoutés deux transistors MOS, un pour assurer l'amorçage et l'autre pour le blocage. C'est au MOSFET à l'IGBT et au darlington de puissance qu'il est intéressant de le comparer [LOK93]. Sa structure physique où cohabitent MOS et bipolaire le rapproche fortement de l'IGBT [HAR93]. L'intensité commutée est de 2 à 3 fois plus importante que pour un MOS ou un IGBT. Sa forte densité de courant (100A par cm^2), lui permet d'obtenir un rapport puissance commuté/surface de silicium très élevé [BAU91], cela est dû à sa structure Thyristor qui permet d'obtenir une chute de tension de $1,4\text{V}$ au plus pour un courant de 75 A . Le MCT possède une commande de porte semblable à celle d'un IGBT ou d'un FET, c'est à dire qu'il s'effectue par une tension. Il faut cependant une crête de courant (2A) pour la charge du condensateur d'entrée dont la capacité est d'environ 10nF .

Figure 1-22 « Le MCT »



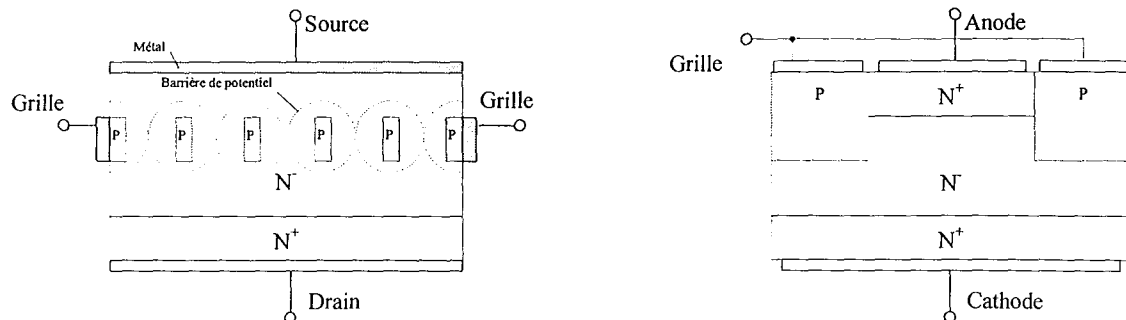
1.2.4 Les composants FET-Bipolaires

- **Le SIT (Transistor à Induction Statique)**

La structure de base correspond à un barreau de silicium dopé négativement coupé transversalement par un ensemble de barreaux positifs (figure a). Ceux-ci créent à leur entourage une barrière de potentiel bloquante pour le passage des charges entre le drain et la source (état bloqué au repos). Si un courant de polarisation est absorbé par la grille alors la barrière de potentiel autour des zones P diminue et le courant peut circuler entre le drain et la source en utilisant les canaux de conduction sans traverser de jonction PN. Ce fonctionnement ressemble fortement au transistor à effet de champ malgré les transistors parasites (N^-PN^-). Cette structure pose un problème lors de l'extraction des charges des barreaux P enfouis dans le barreau N : les charges doivent traverser de grande longueur de silicium et rencontrent beaucoup de résistance. La mauvaise élimination de ces charges conduit à leurs recombinaisons avec le canal de conductivité (problème de dépolarisation). Ce phénomène devient peut à prépondérant et conduit à une diminution du gain en courant. Pour palier à ce problème on utilise une structure permettant un meilleur accès au zone P (figure b). Cet arrangement du silicium augmente l'effet transistor en reliant les zones (N^-PN^+). Sur cette structure, si on augmente la valeur du courant de grille, le phénomène bipolaire prend le pas

sur l'effet de champs, la conductivité du transistor reste modulée par le courant de grille (la résistance à l'état passant diminue mais les temps de commutations augmentent). Cette structure est nommée Bipolar mode Statique Induction Transistor (BSIT) .

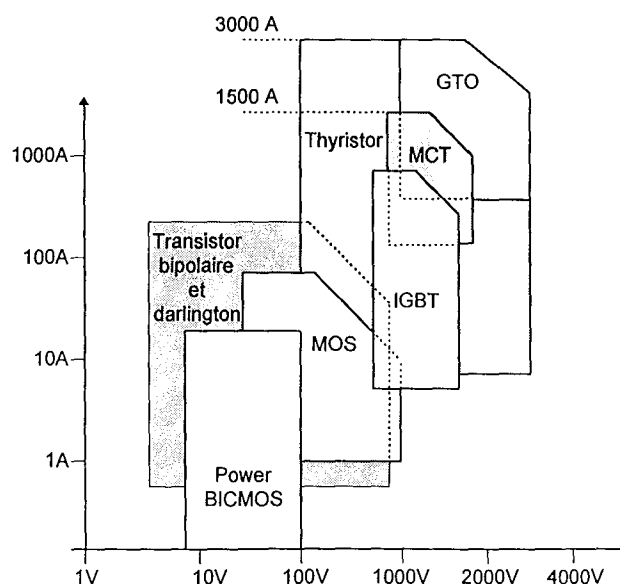
Figure 1-23 « Le Transistor à Induction Statique (SIT) »



Avantages : Pas de phénomène de latch-up, pas de jonction à traverser (résistance à l'état passant très faibles). L'utilisation du phénomène effet de champs le rends très supérieur au transistor bipolaire conventionnel.

Chacun de ces différents composants permettent de couvrir une partie des besoins des montages de puissances. La figure ci-dessous présente leurs utilisations en fonction de la puissance à commander. Les composants BICMOS correspondent aux circuits utilisant deux transistors montés en *push-pull* pour leur étage de sortie.

Figure 1--24 « Champ d'application des différents semi-conducteurs de puissance »

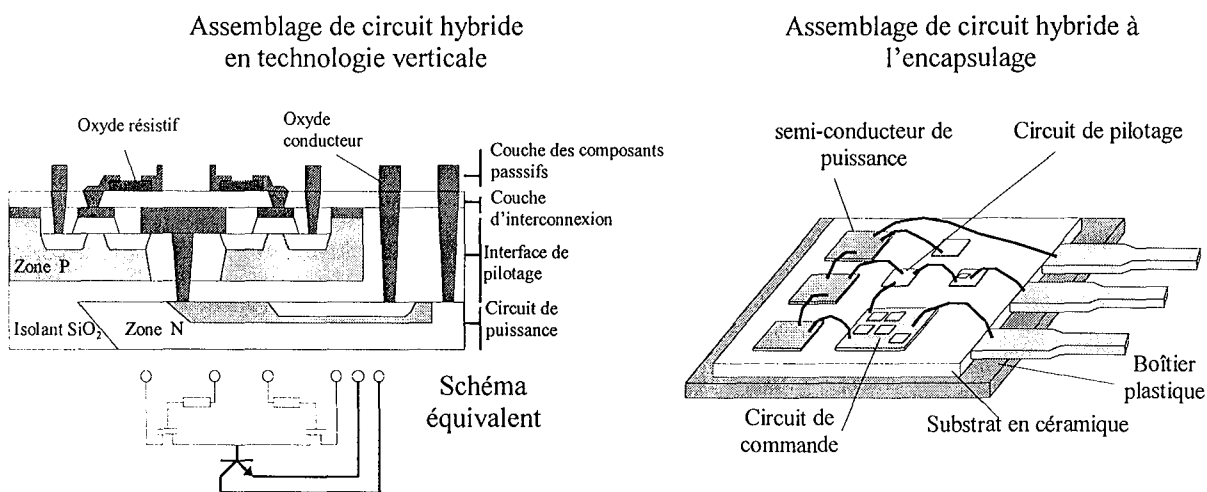


1.2.5 L'amélioration des composants actifs

L'amélioration des composants de puissance passe par l'optimisation des caractéristiques électriques et thermiques (amélioration des substrats avec utilisation de nouvelles céramiques et oxydes [SCH96]) et par l'intégration de nouvelles fonctions de service. Cette dernière tendance s'est généralisée sur les commutateurs de puissance qui intègrent désormais des mécanismes de protection (surintensité), de mesure (miroir de courant, température) et de commande (circuit de pilotage, composants permettant la mise en oeuvre simplifiée d'une régulation). Le résultat de ces recherches sur l'intégration et les matériaux est tout un ensemble de composants de puissance *intelligents* ou en anglais « *smart* » [MUR95]. Certains, construits sur la base de technologies *verticales*, sont constitués d'un empilement de tranches de silicium réalisant chacune une fonction, isolées entre elles par des couches de silice ou d'alumine. Les tranches peuvent être de technologies différentes (MOS¹, bipolaires). Ce type de structures a fait l'objet de recherches au sein d'un projet européen ESPRIT en 1987 [LAN87]. Les techniques hybrides (assemblage de pastilles fixées et câblées sur un même substrat de céramique dans un même boîtier) sont également utilisées dans le domaine de la puissance [EME95].

Un exemple de collaboration Recherche-Industrie dans le domaine de la puissance intégrée intelligente est l'association du LAAS², laboratoire du CNRS¹, avec l'industriel Motorola [ANG96].

Figure 1-25 « La technologie hybride verticale et encapsulée »



• Un exemple d'intégration : Le « SMART » IGBT

Le *smart IGBT* est un composant intégrant à la fois les fonctions de puissance et au moins une fonction de traitement de l'information destinée à son pilotage [BAR92]. Il utilise une technologie

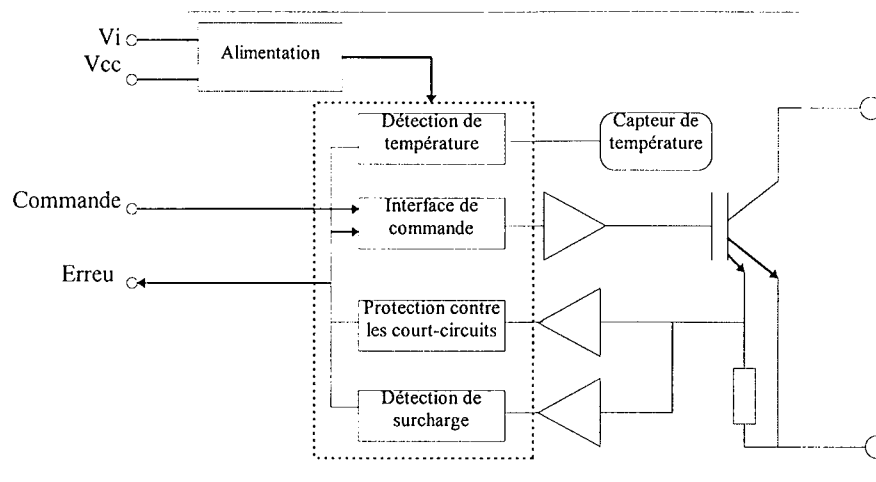
¹ MOS : Metal Oxide Semiconductor

² LAAS : Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes

monolithique pour les plus simples et hybride pour les montages précâblés en monobloc [SEM95]. Cette dernière évolution est très importante, car elle consacre la prédominance du fabricant de semi-conducteurs dans la conception des circuits. Si elle facilite le travail de l'équipementier, elle lui diminue sa valeur ajoutée et sa liberté d'innovation et de compétitivité.

La société MITSUBISHI propose une gamme d'IGBT intelligents [MIT94a-b]. Ces composants monolithiques possèdent les fonctions de conditionnement de la commande, de surveillance du courant et de la température. Les protections sur l'intensité sont réalisées en utilisant un miroir de courant inclus dans la structure de l'IGBT. Un retour d'état est envoyé au montage de contrôle sous la forme d'un signal logique.

Figure 1-26 « Smart IGBT MITSUBISHI »



Avantages : Les avantages des ensembles SMARTPOWER sont : la réduction du nombre de composants, la simplification du travail du concepteur, la simplicité de la mise en oeuvre des protections et des commandes.

Inconvénients : Leurs inconvénients sont un coût et un délai encore élevés, un manque de souplesse en cas de modification ou de dépannage, l'impossibilité d'intégrer certaines fonctions ou certains composants autre que ceux proposés par le constructeur [GAB91].

1.2.6 Les composants passifs

• Les transformateurs piézo-électriques [ELE95a]

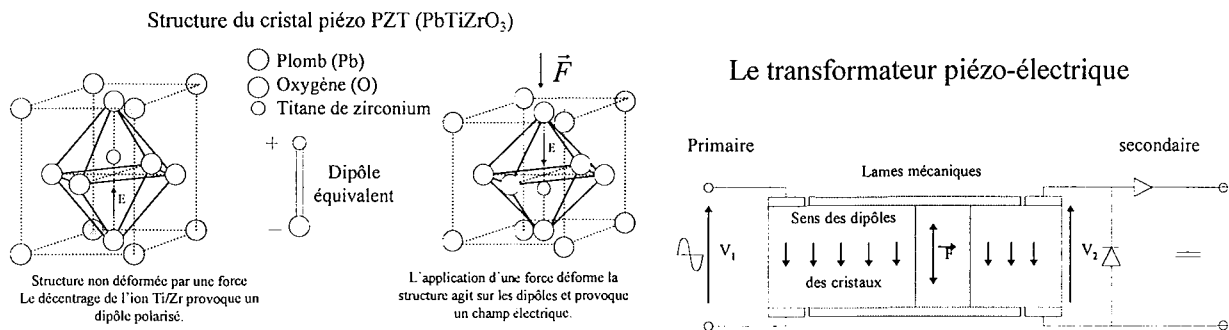
Ce sont des transformateurs haute tension (>1000V) de faible puissance (HITACHI : 1W , DAISHINKU : 4 W sous 1000V). Ils sont fondés sur le phénomène de la piézo-électricité. Le primaire et le secondaire sont constitués de cristaux. Le transfert de l'énergie s'effectue de manière mécanique. Le

¹ CNRS : Centre National de Recherche Scientifique

primaire est alimenté par un circuit résonant à quelques centaines de kilo-Hertz qui provoque des oscillations mécaniques [PHI90].

Principe : Une tension V_1 est appliquée au primaire. La déformation du cristal primaire provoque l'application d'une compression ou extension sur le secondaire par l'intermédiaire des lames mécaniques. Le secondaire étant soumis à une force F , les dipôles se modifient, le cristal se polarise et une tension V_2 apparaît entre ses extrémités.

Figure 1-27 « Principe du transformateur piézo-électrique »



Avantages : utilisation de vibrations mécaniques non rayonnantes, forme d'onde sinusoïdale, produit simplement de la haute tension, facilite l'isolation entre primaire et secondaire, rendement de 95%, taille très faible.

Inconvénients : réservé aux applications de faible puissance.

• Les condensateurs

Les plus grandes évolutions des condensateurs ont eu lieu il y a environ une dizaine d'années. De nos jours leurs améliorations se portent principalement sur certaines caractéristiques techniques comme l'inductance et la résistance série de manière à répondre aux exigences des nouvelles applications (découpage, haute fréquence). Nous noterons cependant l'apparition de technologies permettant une très nette amélioration du rapport capacité/volume.

Les condensateurs de forte valeur [ELE95b, REE95]

Les évolutions des électrolytes polymères organiques solides associées au carbone permettent de réaliser des super-condensateurs présentant des capacités volumiques, pouvant atteindre 100F/litre. Ce qui autorise une énergie spécifique de 105Wh/kg (100 fois supérieure aux accumulateurs chimiques classiques). Des développements dans le cadre des programmes européens *Joule* et *Apas* sur le véhicule électrique ont abouti à des prototypes de super-condensateurs industriels (par *Alcatel Alsthom* et *Saft*) dont un de 1800F sous 3V dans un volume de 0,6 litre (3F/cm^3) pour les applications d'électronique de puissance. L'utilisation principale de ces condensateurs est le remplacement des batteries dans les systèmes de

sauvegarde de données informatiques et leur mise en parallèle avec les batteries des véhicules électriques, augmentant ainsi leur nervosité et la durée de vie des accumulateurs.

1.3 L'intelligence en énergie électrique

L'utilisation intelligente de l'énergie peut être abordée sur plusieurs thèmes. Elle peut résider dans le silicium des commutateurs de puissance mais également dans la commande des circuits, la manière de consommer et de contrôler l'énergie.

1.3.1 Optimiser le pilotage des circuits

L'évolution la plus remarquable en matière de pilotage est celle qui touche la commande des moteurs.

1.3.1.1 Le pilotage des moteurs triphasés

L'utilisation de la commande vectorielle est désormais un standard pour la réalisation des pilotages de hautes performances des moteurs alternatifs. La méthode la plus employée est la représentation dans un espace vectoriel diphasé tournant des vecteurs de flux associés au rotor et au stator [VAS90]. La transformation la plus utilisée est la *transformation de PARK*.

La description du moteur est réalisée en transformant les composantes des vecteurs du couple moteur et du couple résistant de la charge. Elle est basée sur les équations fondamentales de l'électromagnétisme :

$$\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B}.l \quad (0.3.)$$

Avec

$\vec{F}$: force dans le conducteur (vecteur)

$\vec{I}$: courant dans le conducteur (vecteur orienté dans le sens de la conduction)

$\vec{B}$: vecteur d'induction magnétique

l : longueur du conducteur

$\times$: produit vectoriel

Le couple est donné par :

$$\vec{T} = k. \vec{I} \times \vec{B} \quad (0.4.)$$

La stratégie consiste à réguler $\vec{I}$ et $\vec{B}$ dans l'espace des vecteurs. Par exemple la régulation de l'angle entre $\left| \vec{I} \right|$ et $\left| \vec{B} \right|$.

Ce type de calcul fait intervenir un modèle du rotor, du stator et de la charge qu'il est nécessaire de calculer ou d'identifier [MAT85]. Ces modèles ne sont pas linéaires et évoluent au cours du temps [LEV92] et du fonctionnement aussi est-il nécessaire de mettre en oeuvre des algorithmes permettant d'estimer ces paramètres en continu. [LOE85].

1.3.1.2 L'utilisation de l'intelligence artificielle (IA) et de la logique floue

Les récents développements d'algorithmes de commande pour les moteurs asynchrones font appel à des techniques d'intelligence artificielle comme les réseaux de neurones [FOR96] et la logique floue [COL94, RAS96, BIR96] ainsi qu'à des algorithmes génétiques [STR96]. Aujourd'hui, des régulateurs digitaux intelligents à base de DSP¹ permettent la mise en oeuvre des régulateurs flous, neuro-flous [KOS92] et autoadaptatifs pour un pilotage performant des moteurs à courant alternatif ou continu. Ces commandes, calculées à partir des grandeurs électriques, permettent la régulation de vitesse sans capteur de vitesse.

Les régulateurs à logique floue conventionnels requièrent des informations issues d'un expert pour l'écriture des règles. Pour effectuer cette tâche, la création de procédures automatiques basées sur l'intelligence artificielle [KLI87] est possible mais nécessite la mise en oeuvre de techniques de régulations autoadaptatives [MAN74]. Ces techniques utilisent la surveillance de certaines variables caractéristiques pour adapter le comportement du régulateur [DAU92]. Les régulateurs vectoriels utilisent l'orientation du flux rotorique qui est estimé à l'aide du courant et de la tension rotorique avec une méthode logique floue. De nouvelles techniques sont à l'étude pour définir d'autres procédures automatiques pour les moteurs à induction.

• *Mise en pratique*

Il existe deux applications industrielles connues utilisant une commande à base d'intelligence artificielle : les modules de contrôle vectoriel de *Hitachi* et *Yaskawa*.

Hitachi a récemment développé le modèle J300 qui utilise des IGBT. Il permet de piloter des moteurs de 5,5 à 55kW. Il n'utilise pas de capteur de flux mais des courants statoriques. Pendant la phase automatique d'adaptation, les caractéristiques du moteur et de la charge sont calculées (exemple : l'inductance du stator).

¹ DSP : Digital Signal Processor, Processeur numérique de signal

1.3.2 Consommer intelligemment l'énergie

Pour un transfert optimal de l'énergie d'une source vers un récepteur, il faut que ce récepteur absorbe une énergie électrique possédant les mêmes caractéristiques que celles fournies par la source. Toute déviation à cette règle se traduit par la consommation de puissance non-active (réactive) et des pertes supplémentaires lors du transport de l'énergie.

Les nouvelles normes contre les perturbations d'origine électrique obligent à améliorer les caractéristiques des consommateurs pour les conformer à celle du réseau. Leur mise en application pose le problème des charges non linéaires utilisant des dispositifs à découpage. Ces équipements introduisent des formes de courant non sinusoïdales à différentes fréquences, quelquefois asymétriques, ainsi que la consommation de puissance non-active [IEE84, HAR88].

Dans un réseau, le courant de ligne $\vec{i}_L$ est composé de :

$$\vec{i}_L = \vec{i}_{ps} + \vec{i}_q + \vec{i}_h + \vec{i}_{II} \quad (0.5.)$$

Avec

$\vec{i}_{ps}$: vecteur tournant en phase avec le vecteur tension (partie active)

$\vec{i}_q$: vecteur tournant en quadrature avec le vecteur tension (partie réactive)

$\vec{i}_h$: vecteur résultant des composantes harmoniques des courants (harmoniques pairs)

$\vec{i}_{II}$: vecteur représentant les composantes asymétriques (harmoniques impairs).

Le courant de charge $\vec{i}_L$ peut être décomposé en une partie réelle en phase avec la tension (active) et imaginaire en quadrature avec la tension (réactive)

$$\vec{i}_L = \vec{i}_{Re} + \vec{i}_{Im} \quad \text{où} \quad \vec{i}_{Re} = \vec{i}_{ps} + \vec{i}_h + \vec{i}_{II} \quad \text{et} \quad \vec{i}_{Im} = \vec{i}_q \quad (0.6.)$$

La partie réelle contient les composantes actives du fondamental et des harmoniques.

La désensibilisation de ce type de circuit nécessite la mise en oeuvre de dispositifs capables de compenser les défauts du récepteur en permettant de recréer :

- amélioration de la forme d'onde en recréant un courant de forme sinusoïdal (élimination des composantes harmoniques) tout en fournissant l'énergie active au consommateur.
- en phase avec la tension de manière à éliminer la consommation de puissance réactive.

A chaque vecteur courant est associée une composante de la puissance : active, fondamentale réactive, harmonique et asymétrique. La composante réactive $\vec{i}_f$ du vecteur courant est donnée par :

$$\vec{i}_f = \vec{i}_L - \vec{i}_{ps} \quad (0.7.)$$

$$\vec{i}_f = \vec{i}_q + \vec{i}_h + \vec{i}_l \quad (0.8.)$$

La partie réelle $\vec{i}_p$ du courant est celle qui transporte l'énergie vers la charge et qui est transformée en travail. Elle contient $\vec{i}_{ps}$ et les composantes actives de $\vec{i}_h$ et $\vec{i}_l$. La compensation de la puissance non-active consiste à éliminer la composante réactive $\vec{i}_q$ et filtrer (symétrisation) les composantes $\vec{i}_h + \vec{i}_l$.

Les solutions possibles sont le filtrage actif qui analyse le courant de la ligne et compense ses défauts et le conditionnement de la consommation par un pré-régulateur.

1.3.2.1 Le filtrage actif

Les principes de compensation reposent sur l'utilisation de signaux d'entrées contenant l'information sur la composante réactive de la puissance (mesure des tensions et de la forme des courants) [NAK83]. Cette composante sert de consigne au circuit d'électronique de puissance chargé de compenser les courants [VAN95]. Les méthodes basées sur la puissance instantanée sont les plus utilisées, mais d'autres méthodes sont développées :

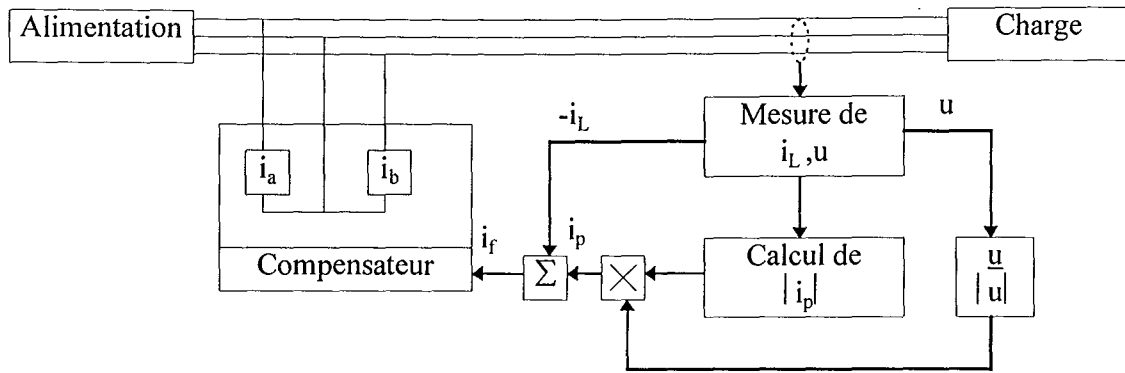
- les calculs de l'admittance [ENS88],
- analyse des composantes de Fourier des courants de charge [GYU88][QUE96],
- utilisation des estimations spectrales de PRONY [NAK88].

L'avantage des méthodes utilisant la puissance instantanée est de ne pas demander beaucoup de calculs. Mais elles ne sont pas robustes en présence d'harmoniques car la puissance mesurée contient la puissance des harmoniques. Il faut donc filtrer les signaux pour ne retenir que les composantes fondamentales. Cette méthode est généralement bruitée et peu précise. Les autres algorithmes sont complexes et demandent davantage de calcul.

• Description de la méthode vectorielle

Cette méthode utilise la mesure des composantes indésirables de la puissance au niveau de la charge dans un espace vectoriel (utilisation de la transformée de PARK). Cette composante est soustraite de la puissance mesurée et asservie à la forme d'onde de la tension pour fournir un courant sinusoïdal. Le résultat est utilisé comme consigne du compensateur électronique qui opère en boucle ouverte [BLA92].

Figure 1-28 « Schéma de principe de la régulation du filtre actif »



L'algorithme de régulation nécessite la connaissance de la valeur du courant actuel dans la charge. Le module de la composante active i_p nécessaire au récepteur est obtenu en calculant la puissance consommée $p(t)$ et en n'en extrayant la partie active.

La puissance réelle $p(t)$ est constituée d'une puissance active fondamentale et de la puissance active des harmoniques et sous-harmoniques. Une valeur moyenne sur un intervalle de temps de l'amplitude du vecteur doit être calculée pour s'affranchir des composantes harmoniques. On élimine le bruit de mesure dû aux harmoniques en moyennant le signal $i_p(t)$ sur un nombre entier de périodes du signal. Cette période peut être différente de celle du secteur (exemple : variateur de moteur asynchrone). Dans la régulation, les modules des vecteurs sont estimés par une moyenne glissante calculée à chaque échantillon.

$$|i_p|(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |i_p|(t_j) \quad (0.9.)$$

$$\text{où } t_j = t \text{ pour } j=N$$

La composante active du courant en phase avec la tension est obtenue en multipliant le courant par le vecteur tension unitaire, la valeur instantanée peut donc être calculée à tout instant par :

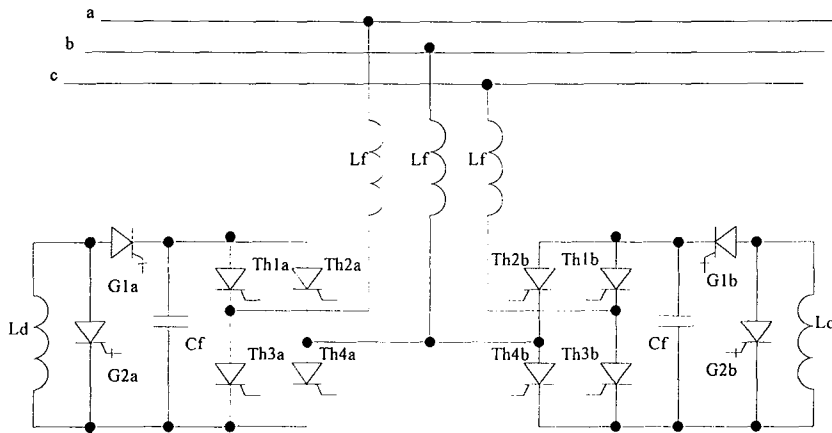
$$i_p(t) = |i_p| \cdot u / |u| \quad \text{où } u / |u| \text{ vecteur unitaire tension.} \quad (0.10.)$$

La composante réactive est ensuite calculée en soustrayant la valeur de la composante active au courant de ligne $\vec{i}_L$.

Cette méthode de calcul permet une élimination très efficace des harmoniques (courant sinusoïdal) et une diminution très importante de la puissance non-active (réduction des déphasages). Le temps de réponse de ce type de régulation est relativement faible (quelques périodes) car il utilise une fenêtre d'observation temporelle d'une période.

Les courants injectés dans le réseau sont construits par le compensateur. C'est un circuit à découpage en largeur d'impulsion modulée travaillant en différentiel entre deux phases. Il découpe à l'aide de GTO la tension par l'intermédiaire du filtre L_f et C_f sur l'inductance L_d qui constitue la source de courant. Le pont redresseur à thyristor sert à inverser le courant de compensation.

Figure 1-29 « Exemple de filtre actif »

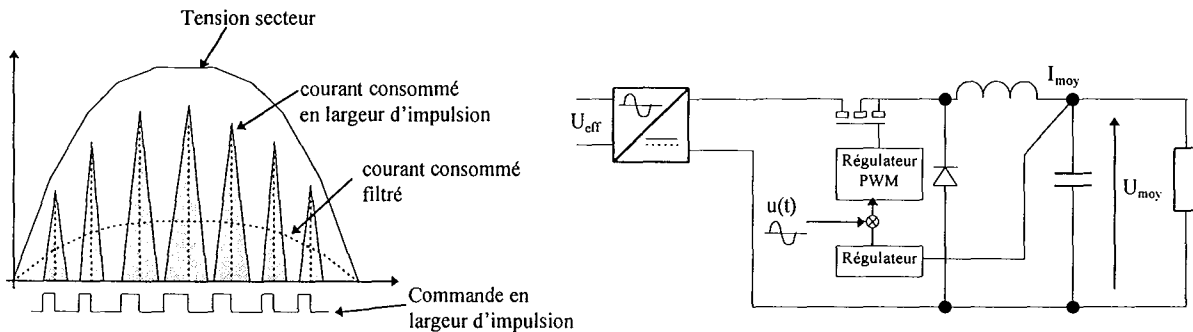


1.3.2.2 Les alimentations à haut facteur de puissance

• Les alimentations à haut facteur de puissance [DIX89]

Une autre technique consiste à conditionner la consommation de la charge de manière à obtenir un haut facteur de puissance (comportement résistif). Cette contrainte est réalisée par un prérégulateur à découpage asservi à la puissance moyenne consommée par le récepteur et à la forme d'onde de la tension d'entrée.

Figure 1-30 « Principe d'un prérégulateur à haut facteur de puissance »



La puissance fournie par un réseau monophasé suit la loi :

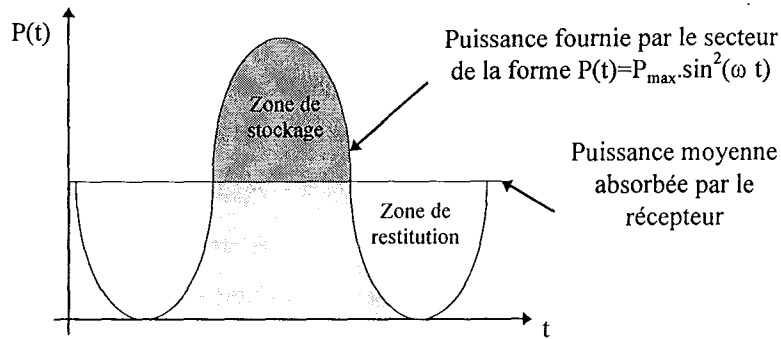
$$P(t) = u(t) \cdot i(t) = P_{max} \cdot \sin^2(\omega t) \quad (0.11.)$$

Alors que la charge consomme une puissance moyenne :

$$P_{moy}(t) = U_{moy} \cdot I_{moy}(t) \quad (0.12.)$$

Durant les zones excédentaires en puissance, le prérégulateur assure le stockage de l'énergie de manière à la restituer durant les zones déficitaires (action de la capacité de stockage).

Figure 1-31 « Fourniture et consommation de l'énergie »



La boucle de régulation travaille de manière à obtenir une tension U_{moy} quasi constante en sortie du prérégulateur. La consigne est multipliée par la forme d'onde du secteur $u(t) = U_{crete} \sin(\omega t)$ pour obtenir la consigne du circuit de découpage en PWM. La consommation en courant devient alors

$$i(t) = k \cdot u(t) = k \cdot V_{crete} \cdot \sin(\omega t) \quad (0.13.)$$

1.3.3 Les modules intelligents de contrôle et de protections

• *Le module de protection d'Alsthom série OPN 5000 et 6000*

Les modules OPN sont des équipements de protection programmables. Ils utilisent les possibilités du numérique pour mettre en oeuvre des protections évoluées sur les grandeurs électriques. Ils sont très souples d'utilisation (locale ou distante par réseau de communication OPN_BUS) et offrent une grande palette de services (métrologie, gestion d'alarmes). La gamme OPN s'est déclinée en plusieurs produits adaptés aux équipements tels que les moteurs, les transformateurs et les lignes de distribution.

Les modules OPN utilisent deux méthodes principales de protection. La première est fondée sur l'estimation à l'aide d'un modèle d'une variable cachée du système (protection thermique), la seconde est la surveillance du comportement des variables accessibles (grandeurs électriques).

L'unité de protection thermique (d'après la norme CEI-255-8)

C'est un module logiciel permettant d'estimer l'échauffement d'un récepteur électrique à partir de sa consommation en courant. Il est basé sur l'utilisation d'un modèle mathématique pour créer l'image thermique du consommateur. Il a pour objet d'offrir une protection thermique générale, paramétrable au plus juste, pour une charge connue (transformateur, moteur [GHI96]).

Les hypothèses utilisées sont [ALS91] :

- Les courants sont ramenés à un courant thermique équivalent I_e

$$I_e = \sqrt{I_1^2 + 3I_2^2} \quad (0.14.)$$

I_1 : courant direct dans l'installation

I_2 : courant homopolaire (de déséquilibre)

- Les échauffements sont proportionnels aux carrés des intensités.
- Le courant de déclenchement du relais est appelé $I\theta$ (analogie avec les anciennes protections thermiques électromécaniques).
- L'échauffement est la différence de température par rapport à une température constante de référence qui est généralement la température ambiante moyenne.
- Les équations de principe sont données dans le cas d'un fonctionnement normal.
- Le modèle thermique est décrit par des équations mathématiques du premier ordre.

Lors de l'échauffement par rapport à un état initial de référence (à froid), si le courant équivalent dans la charge est supérieur au courant autorisé $I\theta$, le temps de déclenchement de la protection fixé par la norme est donné par l'équation :

$$t = Te. \ln \left(\frac{K^2}{K^2 - 1} \right) \text{ avec } K = Ie/I\theta \quad (0.15.)$$

L'équation d'échauffement de la machine en régime normal ($Ie < 2.I\theta$) est donc

$$\theta = K^2 \left(1 - e^{-\frac{t}{Te1}} \right) \text{ avec } Te1 \text{ constante de temps en régime de surcharge.} \quad (0.16.)$$

Lors d'un échauffement par rapport à un état initial non nul θ_i (à chaud), le temps de déclenchement est donné par la formule suivante :

$$t = Te. \ln \left(\frac{K^2 - A^2}{K^2 - 1} \right) \text{ avec } A = Ie/I\theta \text{ et } A < 1, \text{ état initial de la machine équivalent à } \theta_i. \quad (0.17.)$$

L'équation de l'échauffement en régime normal devient :

$$\theta = K^2 \left(1 - e^{-\frac{t}{Te1}} \right) + \theta_i. e^{-\frac{t}{Te1}} \quad (0.18.)$$

Lors de la phase de refroidissement du récepteur (courant nul), l'équation de refroidissement est donnée par

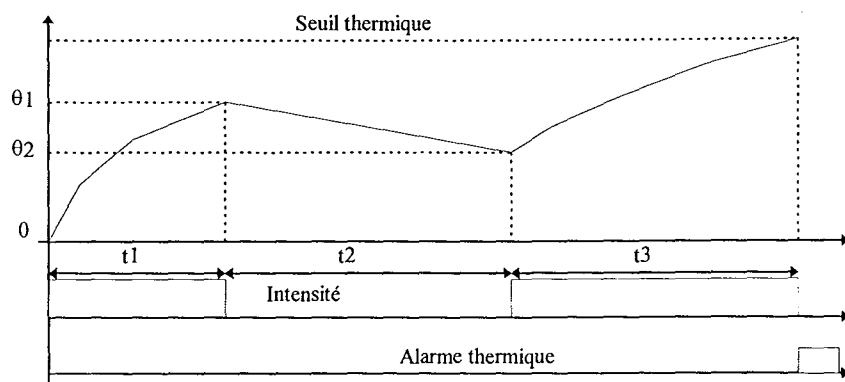
$$\theta = \theta_i e^{-\frac{t}{Tr}} \text{ avec } Tr \text{ constante de temps de refroidissement.} \quad (0.19.)$$

Le comportement thermique du moteur est alors représenté par la différence de l'échauffement apporté par les courants qui le traversent et son refroidissement.

Exemple de fonctionnement:

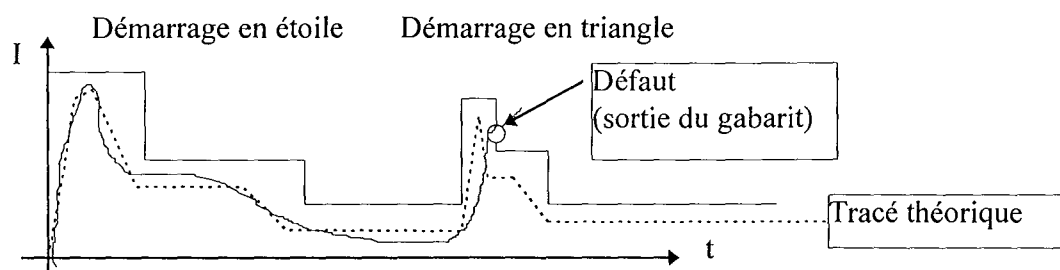
A partir d'un état à froid, le moteur est parcouru par un courant durant le temps t_1 puis s'arrête. Il se refroidit durant la période t_2 . Puis il est parcouru par un courant supérieur à son courant thermique de réglage $I\theta$. Il s'échauffe jusqu'à passer le seuil limite fixé par l'utilisateur. La protection déclenche au bout d'un temps t_3 .

Figure 1-32 « Exemple de protection par image thermique »



Les protections par contrôle des caractéristiques des courants

La vérification des grandeurs électriques, par exemple le courant consommé par le moteur, permet la détection d'un grand nombre d'anomalies. La méthode la plus courante est la surveillance de caractéristiques du signal au cours du temps. Le comportement de $I(t)$ doit suivre certaines règles qui peuvent être décrites sous formes de critères. Ils sont le plus souvent composés d'une contrainte en amplitude et d'une contrainte en temps. Le séquençement de ces contraintes forme une enveloppe que ne doit pas dépasser le signal. Si, durant les différentes phases de fonctionnement du moteur, la grandeur quitte le gabarit, la protection appropriée est déclenchée.

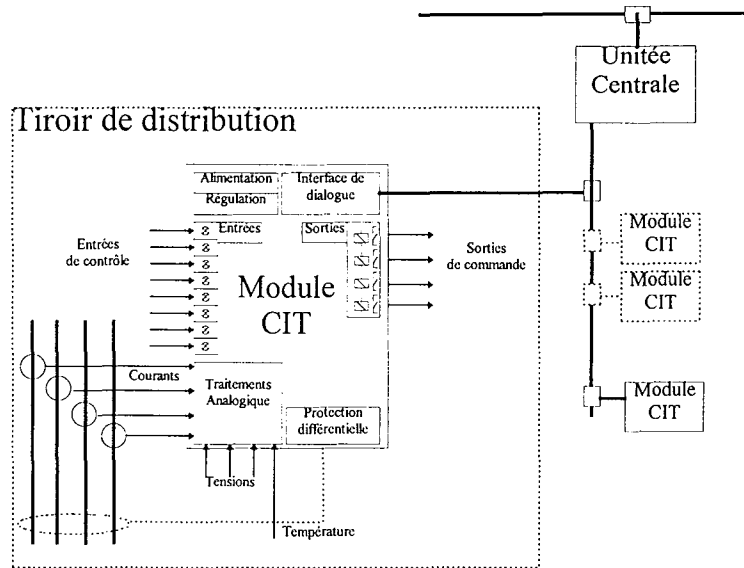
Figure 1-33 « Exemple du suivi de $I(t)$ lors d'un démarrage étoile triangle »

Il est également possible de faire référence à d'autres types de contraintes pour la détection des défaillances. Mais ces méthodes font appel à des comparaisons de modèles de références ou à des méthodes d'identification, ce qui complique considérablement leur mise en oeuvre et surtout leur paramétrage par l'utilisateur.

- **Le système de gestion technique centralisé CIT de la société HAZEMEYER.**

La société française HAZEMEYER possède une gamme de modules de *Contrôle Intelligent de Tableaux électriques CIT*. Cette gamme possède un module spécialisé pour les *départs moteurs*, le *CIT-ITH*. Ce module intègre tout un ensemble de modes de démarrage et de protections spécifiques aux moteurs dont la protection par image thermique. La réalisation et la programmation de ce module ont été effectuées sur la base de travaux sur l'actionneur intelligent [GOU92]. Il met en oeuvre un ensemble de techniques visant à améliorer la fiabilité des données et la sûreté du fonctionnement.

Figure 1-34 « Architecture CIT »



Le CIT-ITH intègre un logiciel résident de paramétrage et de supervision. L'utilisateur peut accéder à la base de données par le réseau CIT, une connexion MODBus¹ [MOD93], un simple terminal distant ou par la face avant de l'appareil. La modification des paramètres est surveillée par un programme de validation. Le CIT-ITH permet également un paramétrage simplifié à partir d'un minimum d'informations de l'utilisateur (plaque à bornes du moteur), une analyse des défaillances, des gestions d'alarmes et des archivages (courbes de courant de démarrage).

La société hollandaise HOLEC (actionnaire de la société HAZEMEYER), a développé un produit similaire : le module de gestion de moteur CLINK qui utilise un 68000 et un bus CAN² [CIA96].

• Le bloc intelligent à thyristors de Chauvin Arnoux [INS94]

Cette gamme d'organes de commutation est connue sous le nom de *THYRITOP* [CHA95]. Ce sont des relais et gradateurs statiques adaptés au pilotage des charges inductives et résistives. Leurs domaines privilégiés d'application sont : le chauffage industriel, le démarrage moteur et les commandes au primaire de transformateur. Il se présente sous la forme d'un bloc compact capable de commuter une charge et d'en assurer la régulation (de tension, courant, puissance). Il peut utiliser une commande par train d'impulsion ou par variation d'angle. Il est capable de mixer ces commandes pour assurer une mise sous tension et un arrêt progressif. Il possède 4 types de régulation ainsi qu'un ensemble de protection (courant, tension, température). Il offre plusieurs modes d'exploitation dont :

- le mode local, à l'aide de la face avant de l'appareil composé de voyants, de 4 touches et d'un afficheur numérique;
- le mode déporté, par l'intermédiaire d'une face-avant distante reliée par fibre optique;
- le mode distant, par l'intermédiaire d'une liaison série du type RS232 ou par fibre optique.

¹ MODBus : Protocole de communication de MODICON

² CAN : Car Network Area, Bus développé à l'origine pour les véhicules (voiture)

Bibliographie du chapitre

- [AGD95] AGDE Electronic
Le principe de la RCEM
Brochure d'information, Division alimentations, France, 1995
- [ALM93] ALMARIC C.
Les IGBT, guide de choix
Electronique N°32 - Nov 1993
- [ALS91] ALSTHOM
Manuel installateur Alsthom OPN 5000 protection moteur
ALSTHOM, France, 1991
- [ANG96] ANGEL M.
Capteur et puissance : Motorola et le Laas ouvrent leur laboratoire commun
Electronique internationale 1996
- [ARN92] ARNOULD J., LAFORE D.
Matériaux semi-conducteurs et dispositifs de l'électronique de puissance
L'Onde électrique, Juillet 1992 Vol.72 N°4
- [ARN93] ARNOULD J. MERLE P.
Dispositifs de l'électronique de puissance
HERMESS, Paris, Collection SEE, Volume 1 et 2, 1993
- [BAM96] BAMARD J.N. (AEG) et BOWLER P. (UMIST)
Vectors give the green light on battery
Batteries International - Juillet 1996
- [BAR62] BARRON K.
Fundamentals of magnetic amplifiers
HOWARD W. SAMS & Co, Indianapolis, 1962
- [BAR92] BARRET J.
Un composant de puissance intelligent pour la conversion d'énergie
L'onde Electrique, juillet 92, Vol. 72, N°4
- [BAT96] BATTARD C., BERGMANN C.,
University of Nantes
Modern Automatics Approaches for Simulation and Digital Control of Power Electronics Converters
PCIM 96 Nürnberg, May 1996, Conferences , Control and simulation
- [BAU91] BAUER
The Mos Controlled Thyristor and its limit
ABB Power Semiconductor symposium Sept. 1991 (à paru en 1992)
- [BEN91] BENSOAM M.
Alimentations à découpage pseudo-résonantes
Thèse de l'INP de Grenoble, 1991
- [BIR96] BIROU I., IMECS M., *Technical University of Cluj-Napoca, Romania*
Implementation of Fuzzy-Control for Induction Motor Drive Using MC 68000 Processor
PCIM 96 Nürnberg, May 1996, Conferences , Advances in Control techniques
- [BLA92] BLASJSZCZACK G.
Non-Active Power Compensation Using Time-Window Method
ETEP Vol. 2, N°5, Sept. 1992
- [BON92] BONNET J.P.
Contrôle magnétique pour convertisseurs à résonance
Électronique N°16, mars 1992 p. 49-60
- [BRI82] BRICHART
Les onduleurs autonomes
Dunod, paris 1982 2^{ème} édition
- [CAP89] CAPRON J.M.
Simulation de diode de puissance avec le logiciel SPICE
Journées SEE à Marseille, Juin 1989, p.11.1-11.4
- [CHA95] CHAUVIN ARNOUX
Relais et Gradateur de puissance
Notice Gamme Thyritop - 1995
- [CHE88] CHERON Y.
La commutation douce dans la conversion statiques de l'énergie électrique
Thèse d'état, INP Toulouse, 1988
- [COL94] Collectif d'auteur
La logique floue
ARAGO14/ MASSON. 1994
- [DAU92] DAUGHERITY W.C.
RATHAKRISHNAN B. and YEN J.
Performance evaluation of a self tuning fuzzy controller.
Proceeding IEEE, International Conférence on fuzzy systems, March 8/12/1992
- [DAV64] DAVIES R.L.
Control of electric field at the surface of p-n junctions
IEEE Transactions on Electron Devices, July 1964, p. 313-323
- [DEL93] DELLA MUSIN J.P.
Semi-conducteur de puissance : l'abandon français
Electronique international, hebdo - 25 novembre 1993 N°119

[DEH92] DEHMLOW M., HEUMANN K., SOMMER R.

Resonant Inverter System for Drive Applications
EPE Journal Vol2 N°4, dec. 1992 p.225-232

[DIV86] DIVAN D.M.

The Resonant DC-Link Inverter, a New Concept in Static Power Conversion

IEEE-IAS Conference Record, 1986, p.648-655

[DIX89] DIXON L.H.

Prérégulateur à haut facteur de puissance

Electronique de puissance 1989 N°35 p.42-50 N°36 p.32-43

[DON91a] De DONKER R., DIVAN D.M., LIPIO T.A.

High Power Soft Switching Inverters

IEEE-PESC 1991, Tutorial

[DON91b] De DONKER R., LYONS J.P.

The Auxiliary Quasi Resonant DC-Link Inverter

IEEE-Pesc 1991, Conference Record, p.248-253

[ELE87] Electronique de puissance

Le ZTO : un nouveau composant de puissance

Electronique de puissance - octobre 1987, p. 21-23

[ELE93] Electronique Internationale Hebdo

Alimentations : près d'un client sur deux veut du sur-mesure

Electronique internationale, hebdo - 2 décembre 1993 N° 120 p18

[ELE95a] Electronique International Hebdo

Miniaturisation rime avec kilovolts grâce à la piézo-électricité.

Electronique international Hebdo , N°183, 25 mai 1995

[ELE95b] Electronique International Hebdo

Alcatel Alsthom réalise un condensateur de 1800

FARADS

Electronique international Hebdo , N°186, 15 juin 1995

[EME95] EMERALD P., GREENLAND P.

Power multi-chip modules

PCIM Europe October 1995

[ENS88] ENSLIN

A new control for power electronic converters as fictitious power compensator.

Power Electron. Specialists Conf.

PESC 88

Kyoto/Japan 1988, Proc. p.1188-1196

[FER94] FERRIEUX J-P, FOREST F.

Alimentation à découpage, convertisseur à résonance, 2ème édition

Paris : MASSON, 1994.

[FOR96] FORRAI S., VIOREL A., Technical University of Cluj-Napoca, Romania

Current Waveform Optimization for Switched Reluctance Motors Based on Neural-Network

PCIM 96 Nürnberg, May 1996, Conferences , Electrical Machines design

[GAB91] GABRIEL C.

An intrinsic save SMARTPOWER IGBT

EPE 91, Madep proceedings p. 179-182

[GEN64] GENTRY, GUTZWILLER

Semiconductor Controlled Rectifiers... Principles and application of p-n-p-n Devices

Prentice Hall, 1964

[GEN65] GENTRY, SCACE and FLOWERS

Bidirectional Triode p-n-p-n switches

Proceeding IEEE, Vol. 53 N°4, April 1965

[GHI96] GHITA C., GHITA Z., University of Bucharest

Thermal Protection of Three-Phase Asynchronous Motors

PCIM 96 Nürnberg, May 1996, Conferences , Control and simulation

[GIR93a] GIRARD M.

Alimentation à découpage

Paris : EDISCIENCE international, 1993.

[GIR93b] GIRARD M.

Alimentation à linéaire

Paris : EDISCIENCE international, 1993.

[GYU88] GYU-HA, CHOE, MON-HO, PARK

A New Injection Method for AC Harmonics

Elimination by Active Power Filter

IEEE Trans. Ind. Electron. IE-35 (1988) n°1 p. 141-146

[HAR92] HARRIS

MCTV75P60E Mos Controlled Thyristor

Harris, 1992

[HAR88] HART P.M., BONWICK W.J.

Harmonic Modelling of Synchronous Machines

IEEE B-135 (1988) p. 52-88

[IEE84] IEEE Power Syst. Harmonics

Bibliography of Power Systems Harmonics

IEEE Trans. Power Appar. a. Syst. PAS-103 (1984) N°9 pp.460-2469

[INT93] INTERNATIONAL RECTIFIER

Gate Drive of power HEXFETs

Applications note 937B,1993

[INT96] INTUSOFT

New Magnetics Designer

Intusoft Newsletter, N°46, May 1996

[INS94] Instrumentation et système

Organe de commande parfait pour chauffages électriques

Instrumentation et systèmes, Juin 1994

[JOU86] JOUBERT Pierre

Circuits électroniques et systèmes : méthode modernes de calcul

Paris, Lavoisier, TEC&DOC, 1986

[KHE92] KHERSONSKY Y., ROBINSON M. GUTIERREZ D.

The HEXFRED Ultrafast Diode in power Switching circuits

International Rectifier, Application Notes N°989, 1992, p. 1-8

[KLI87] KLIR G.J. and FOLGER T.A.

Fuzzy sets, decision making and expert systems

Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 1987

[KOS92] KOSKO B.

Neural Networks and fuzzy systems

Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1992

[LAN87] LANE W.A., MATHEWSON C., CAHILL C.

La puissance intelligente en technologie verticale, l'utilisation de la SOI

IEE - Congrès Londres 4.mars 1987

[LOR91] LORENTZ L.

The IGBT - A semiconductor switch for drive system

EPE 91 Madep proceeding p. 197-202, 1991

[LEV92] LEVI E.

Method for Magnetizing Curve Identification in Vector Controlled Induction Machines

EPE Vol 2, N°5 Sept. 1992 p.309314

[LIL87] LILEN H.

Le thyristor

Paris : DUNOD, 1987

[LIU84] LIU K.H., LEE F.C.

Resonant switches - a unified approach to improve performances of switching converters

IEEE International Telecommunications energy conference, p. 344-351, 1984 proceedings

[LIx89] LI J.M.

Evaluation des possibilités fréquentielles des transistors de puissance haute tension

Thèse doctorat INPG 1989

[LOE85] LOESER F.

Identification and Compensation of the Rotor Temperature of AC drives by an observer

IEEE Trans. on Ind. Appl. IA-21 (1985) N°6 p. 1387-1393

[LOK93] LOKUTA P. F. (HARRIS)

Le MCT va se substituer à l'IGBT

ELECTRONIQUE N° 28 - MAI 1993

[MAT85] MATSUO T., LIPO T.]

Rotor Resistance Identification in the Field Oriented Control of a Squirrel Cage Induction Motor

IEEE. Trans. on Ind. Appl. IA-21 (1985) N°3 p. 624-632

[MAG72] MAGGETTO

Le thyristor en électrotechnique

Eyrolles, Paris, 1972

[MAL80] MALVINO A.P.

Principes d'électronique

Mc Graw-Hill, Paris, 1980

[MAL60] MALI P.

Magnetic Amplifier - Principles and applications

A RIDER Publication, New York N°261, 1960

[MAN74] MANDANI E.H.

Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant.

Proceedings Control and science, Vol 121, pp1585-1588, 1974

[MAS73] MASCARIN Raoul

Redresseurs industriels à semi-conducteurs

Paris : Eyrolles, 1973.

[MES95] MESURE

Les convertisseurs continu-continu

Fiche N°78

MESURES 678 - Octobre 1995

[MID76] MIDDLEBROOK R.D., CUK S.

A general approach to modelling switching converter power stages

IEEE Power Electronic Specialists Conference, 1976, p.18-34

[MIT94a] MITSUBISHI ELECTRIC EUROPE

Intelligent Power Modules IPM 3rd Generation

Brochure 1994

[MIT94b] MITSUBISHI ELECTRIC EUROPE

Information mistubishi sur les packs intelligents

EPE journal octobre 1992

[MUR91] MURARI B.

SMARTPOWER technology evolves to higher level complexity

PCIM Europe, Janvier 1991, p. 27-31

[NAU91] NAUDET C., PINARD M.

Electronique de puissance, Etudes expérimentales, Essais de systèmes

Paris : DUNOD, 1991.

[NAK88] NAKAJIMA, TAMURA, MASADA
Compensation of Non-stationary Harmonics Using Active Power Filter with Prony's Spectral Estimation
 Power Electron. Specialists Conf.
 PESC 88, Kyoto/Japan 1988, Proc. p.1160-1165

[NAK83] NAKAJIMA, TAMURA, MASADA
Active Power Filter
 HIEE-IPEC Int. Power Electron. Conf.
 Tokyo/Japan 1983, Proc. p. 981-986

[NOS65] NOSBOM L.
Amplificateur magnétique et thyatron au silicium dans l'industrie
 Edition RADIO, Paris, 1965

[OEH69] OEHMICHEN J.P.
Transistor à effet de champ
 Edition RADIO, Paris, 1969

[PHI90] Philips
Manuel d'applications céramiques piézo-électriques PXE
 Philips, magnetic product, 1990

[PET91] PETER J.-M.
Les Semi-conducteurs de puissance en 1991. Leurs évolution et ses conséquences
 Sgs Thomson Microelectronics
 Extrait d'un exposé d'une journée d'étude SEE, Salon Componic 91
 Paris/Villepeinte

[PTx94] Le Progrès Technique
NORMES - 3 - 94
 Edité par l'ANRT - ISSN 0397-8060

[QUE96] QUEIDAT M. SARDANAC D.
New PWM Multifunction Structure (Charger-Active Filter-Inverser)
 PCIM 96 Nürnberg, May 1996, Conferences, Active filters

[RAG93] RAGOT Bernadette
RD et qualité - 2 - 93
 Edité par l'ANRT ISSN 0397-8060

[RAS96] RASKIN C.
Fuzzy Logic and high performance motion
 PCIM 96 Nürnberg, May 1996, Conferences, Advances in Control techniques

[REE95] REE
Condensateurs électrochimiques
 Revue SEE, Hors série Octobre 1995, p.47

[RGE92a] RGE
La modélisation des composants de puissances et des convertisseurs
 RGE 6/92, p.1 à 50

[RGE92b] RGE
Electronique de puissance

L'évolution des convertisseurs industriels de grande puissance
 RGE 11/92, p.108 à 116

[STR96] STRONACH f., DRURY W.
Artificial Intelligence in Drives
 PCIM Europe (Power Conversion/Intelligent Motion) Juin 1996
 p.152-155

[SEE95] Revue SEE
Numéro spécial sur la CEM
 SEE, N°5 Novembre 1995

[SEG85] SEGUIER Guy
L'électronique de puissance, les fonctions de base et leurs principales applications, 5ème édition
 Paris : DUNOD, 1985.

[SEM95] SEMIKRON
IGBT, SKiiP module
 Brochure 1995

[SCH92] SCHAEFFER C.
Analyse des comportements électriques et thermiques des interrupteurs de puissance IGBT à technologie hybride
 Thèse de l'INP de Grenoble, 1992

[SCH96] SCHULZ-HARDER J. MAIER P.
DCB substrate with reduced ceramic thickness in power semiconductor modules
 PCIM Europe - Janvier 1996

[TAT87] TATAKIS E.
High Frequency Transformer Model for DC-DC Converters
 EPE'87 Conference Proceedings, Vol.1, September 1987, p. 413-418

[THO78] THOMSON
Le transistor de puissance dans son environnement
 THOMSON, Fiche d'application 1978

[THO83] THOMSON
Le transistor de puissance dans la conversion d'énergie
 THOMSON, Fiche d'application 1983

[UNI94] UNITRODE
UC1838 Magnetic amplifier controller
 Unitrode, Application book, Integrated circuit, 1992

[VAS90] VAS P.
Vector Control of AC Machines
 Oxford : Clarendon Press, 1990

[VAN95] VAN WYK, BOSHOFF, MARSHALL
Adaptive Elimination of Aperiodic Distortion in Power System
 Proceeding of IEEE-Ind. Appl. Soc. (IAS) Annu. Meeting, Toronto/Canada 1985, proc. p. 312-317

Chapitre

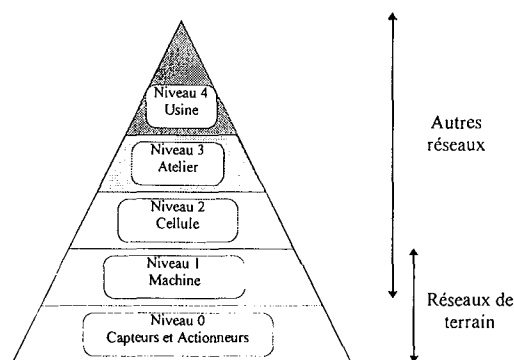
2

L'actionneur intelligent

2. L'actionneur intelligent

C'est avec l'apparition des premiers réseaux informatiques dans les usines et leur application à l'automatisme qu'est né le concept d'usine intégrée. Il est représenté par l'architecture CIM (Computer Integrated Manufacturing).

Figure 2-1 « La Pyramide CIM (Computer Integrated Manufacturing) » [FOR92]



Sur le terrain, les constructeurs de matériel ont développé des moyens de communication adaptés à leurs besoins. Ce fut l'apparition de réseaux propriétaires comme HART (Highway Addressable Remote Transducer [VAN93b]) et MODBUS [MOD93]. Ces réseaux sont conçus pour relier des composants d'automatismes (capteurs, actionneurs, régulateurs et automates). Mais l'utilisation de flux de données numériques transitant sur un seul bus a posé le problème de la fiabilité de leur distribution. Les réflexions sur l'amélioration de ces informations ont donné naissance aux nouveaux réseaux de terrain normalisés (FIP [NF C46-60x], PROFIBUS [VAN93a], BATIBUS, InterBUS-S [INT94], LONwork [ECH95], CAN [CIA96]) et au concept de capteurs et actionneurs intelligents.

Le réseau de terrain normalisé français, FIP (Flux Information Process NF C 46-605) privilégie la diffusion cyclique de variables. Il peut automatiquement prendre les informations d'un producteur et les distribuer aux consommateurs. Il est prévu pour répondre aux besoins de commande des procédés temps réel, comme les automatismes, en assurant la cohérence temporelle et spatiale des données [THO91]. Il a permis de réaliser les premières démonstrations industrielles qui ont validé les concepts de capteurs et d'actionneurs intelligents. La version WorldFIP fait l'objet, avec ses homologues allemands (PROFIBUS) et

danois (P-NET), d'une nouvelle norme européenne sur les réseaux de terrain [EN50170]. Cette norme prévoit l'interopérabilité des équipements connectables aux différents réseaux.

2.1 La notion d'actionneur intelligent

La notion d'actionneur « intelligent » n'était pratiquement pas utilisée avant 1988 mais fait l'objet de brevet français (depuis 1982). Les premières bases ont été jetées par la CIAME (Comité Industrie Administration pour la MEsure) et publiées dans les livres blancs : «*Capteurs Intelligents*» [CIA87] et «*Actionneurs Intelligents*» [CIA89]. Puis sont nés les projets INF(Interface Normalisée Fonctionnelle) du ministère de la recherche et un projet EURÊKA baptisé INCA (Interface Normalisée pour Capteurs et Actionneurs). Par ailleurs, un projet de recherche européen dans le cadre du projet ESPRITII a permis l'application de ces nouveaux concepts sur le réseau FIP [PET91] (projet DIAS *Distributed Intelligent Actuators and Sensors* [DIAS88]). La CIAME ayant disparu, l'APIST (Association pour la Promotion de l'Instrumentation Scientifique et Technique) a pris l'initiative de reprendre les activités de la CIAME en créant *le* CIAME (Comité Interprofessionnel pour l'Automatisation et la Mesure).

- *L'intelligence*

Intelligence : (*Larousse*) n.f. Aptitude à s'adapter à une situation, à choisir en fonction des circonstances; capacité de comprendre, de donner un sens à telle ou telle chose.

- *L'actionneur*

Actionneur : (*Larousse*) n.m. Dispositif permettant d'agir sur une machine, un système, pour modifier son fonctionnement ou son état.

« Un actionneur est un organe qui transforme un type d'énergie en un autre, sous le contrôle d'un signal de commande, en vue d'agir sur un processus physique, en modulant certaines variables qui caractérisent son état » [STA93].

Le CIAME : « L'actionneur est considéré en tant que constituant élémentaire assurant une fonction élémentaire, et non pas comme une machine comportant n actionneurs assurant N fonctions élémentaires d'action » [CIA89].

Nous proposons une synthèse des définitions de l'actionneur intelligent :

- ***L'actionneur intelligent***

La CIAME distingue trois catégories d'actionneurs intelligents [CIA89] :

Catégorie 1 : Les actionneurs à intelligence limitée.

Ce sont les plus répandus. Ils sont pourvus d'un embryon d'intelligence de bas niveau (par exemple : la fonction "arrêt en fin de course").

Catégorie 2 : L'actionneur à intelligence moyenne

Selon la CIAME : « Son intelligence lui permet de gérer différents modes de marche, normaux ou dégradés, d'exécuter des commandes automatiques complexes, de se coordonner avec d'autres actionneurs, d'intégrer des modèles de fonctionnement de façon à s'auto-adapter, de rendre compte de son état de façon synthétique, de déceler des dégradations lentes en prenant compte des mesures correctives et de gérer sa fiche de santé. Son aptitude à communiquer lui permet de signaler ses propres défauts et ceux de son environnement, de répondre à des séquences de tests et d'être configuré localement ou à distance. L'architecture matérielle et logicielle de l'actionneur intelligent est modulaire et évolutive de façon à ce que celui-ci puisse répondre aux besoins fonctionnels et économiques des différentes applications ».

Catégorie 3: L'actionneur est devenu intelligent, autonome et interactif.

L'intelligence locale de chaque actionneur lui permet de gérer ses modes de marche et de commandes complexes. Il est capable d'assurer à lui seul la totalité de son comportement. Il peut recevoir des consignes d'une unité centrale ou recevoir des informations utiles lors de ses propres prises de décisions. Il peut envoyer des informations vers d'autres unités ou capteurs/actionneurs. Il peut être utilisé seul ou avec d'autres. Son intelligence locale lui permet de coopérer avec d'autres actionneurs de toutes catégories d'intelligence. Son comportement permet de décharger l'automatisme (en général un Automate Programmable Industriel de haut niveau). En plus de son autonomie, il est interactif et permet, dans certains cas d'association avec d'autres capteurs, de se passer de système de commande central. Sa modularité lui permet d'être évolutif.

- ***En résumé :***

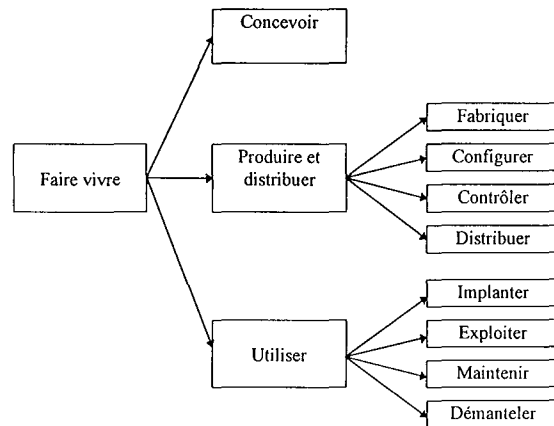
Le qualificatif *intelligent* regroupe les notions de [BRA89]:

- souplesse de configuration,
- amélioration des performances,
- capacité d'auto-surveillance, d'auto-diagnostic et de gestion d'historique,
- traduit le fait que le capteur ou l'actionneur est capable de traiter l'information et de la valider,
- communication.

2.2 Le cycle de vie de l'actionneur intelligent

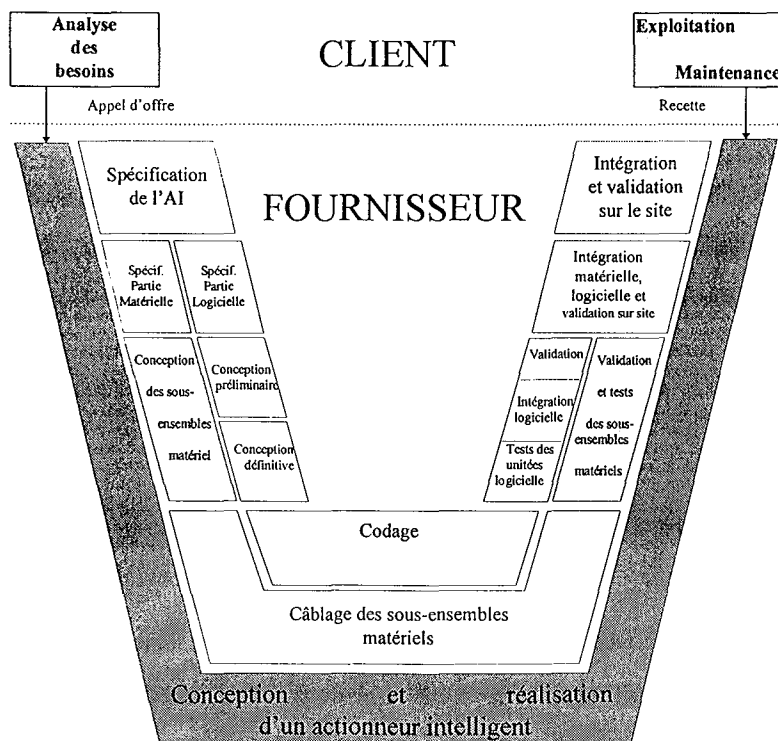
Les étapes jalonnant la création d'un actionneur intelligent sont regroupées sous la notion de *faire vivre* l'actionneur. L'enchaînement de ces étapes représente le *cycle de vie* de l'actionneur.

Figure 2-2 « Cycle de vie de l'actionneur [STA94] »



Pour l'actionneur intelligent, ces étapes font l'objet de descriptions fonctionnelles [STA94] sous la forme de planches SADT [IGL89]. Ces étapes s'inscrivent dans une démarche globale permettant d'arriver à un produit opérationnel à partir des besoins initiaux. Cette démarche est décrite dans la norme AFNOR PR Z68-901 qui propose un cycle de vie en *V*. La représentation ci-dessous présente ce cycle adapté à la création d'un actionneur intelligent [ROB92].

Figure 2-3 « Représentation du cycle de vie en *V* pour un AI [ROB92] »



L'objectif de l'étude du cycle de vie de l'actionneur est d'identifier les différents besoins et services à fournir pour les différentes phases de ce cycle. Le résultat est l'obtention d'un actionneur qui reste *intelligent* de sa naissance à sa mort.

- **Application à l'actionneur**

Le suivi de l'actionneur intelligent

Il est obtenu par l'utilisation de moyens d'identifications. Ils permettent la reconnaissance de l'actionneur par les différents intervenants au cours des étapes du cycle de vie.

Exemples:

- Un code barre permettra le suivi de l'appareil lors de sa fabrication (code optique).
- Une référence marquée sur une plaque signalétique permettra une identification visuelle (signature visuelle).
- Le stockage de données informatiques qui permettent son identification au sein du processus (signature électronique).

Ces identifications prennent généralement la forme d'une référence pour le constructeur (contenant le type, modèle, date de fabrication) et d'un *Code d'identification* quelquefois paramétrable pour l'utilisateur.

Les services supplémentaires

L'actionneur intelligent peut posséder des modes de fonctionnement valides durant une ou plusieurs étapes du cycle de vie avec pour objectif de faciliter les actions de certains intervenants (agent de maintenance, monteur).

Exemple:

- Existence d'un mode de vérification intégré à l'actionneur permettant le contrôle et le réglage de ses fonctions à l'aide d'un simple terminal.
- Mise en oeuvre d'un mode de supervision locale du comportement de l'actionneur pour la maintenance sur site.

2.3 L'intégration d'un AI au sein d'un SAPID

La mise en oeuvre d'un Actionneur Intelligent au sein d'un Système Automatisé de Production à Intelligence Distribuée nécessite sa mise en place :

- physique

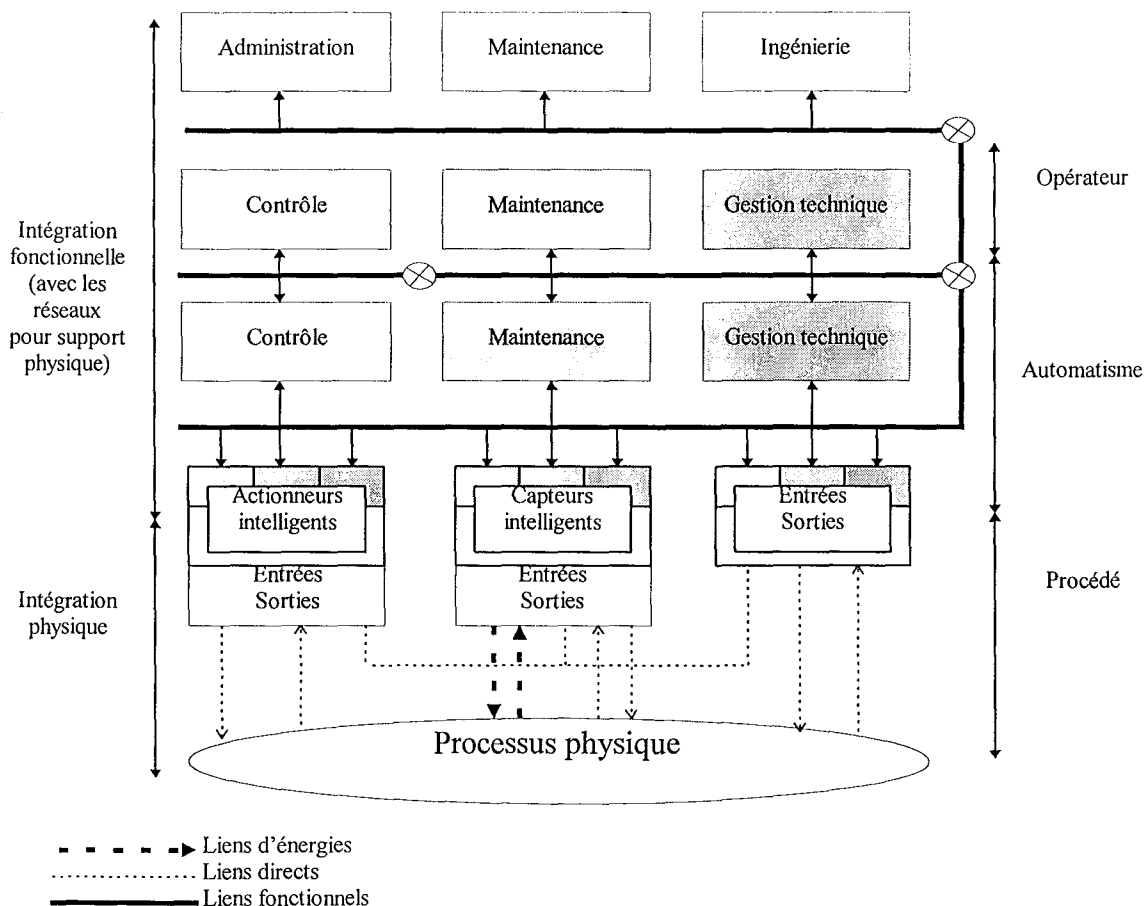
Elle est constituée de l'ensemble des connexions à effectuer sur le terrain lors de la mise en place de l'actionneur. Ses liaisons peuvent avoir une fonction énergétique (mécaniques, hydrauliques, sources d'énergies), de communication évoluée (réseaux de terrain, liaisons informatiques) ou d'information avec des composants externes à l'actionneur (capteurs et éléments d'automatismes locaux). Ces dernières liaisons permettent un transport direct et rapide des informations de sécurité (liaisons réflexes).

- fonctionnelle

L'actionneur doit savoir communiquer avec le reste de l'installation. Il doit émettre et recevoir des messages compréhensibles aux différents services du SAPID.

La figure suivante représente l'implantation d'un actionneur dans le concept CMMS (*Control, Maintenance and technical Management System*) proposé par le projet DIAS [DIAS88].

Figure 2-4 « Intégration d'un actionneur intelligent au sein d'une architecture CMMS », adaptée de [DIAS88]

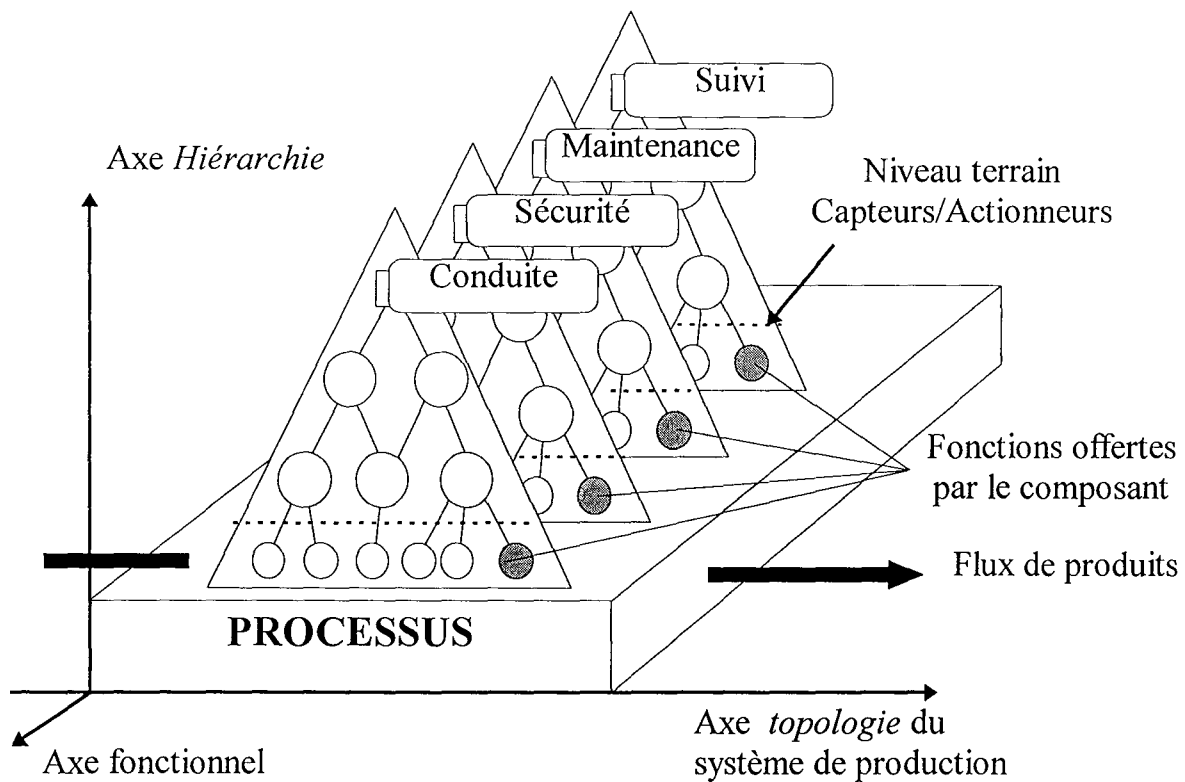


• Les services d'un AI

Les services que peut fournir un actionneur intelligent sont d'apporter, tout au long de son cycle de vie, des données et services crédibles et intègres aux différents intervenants. Ces caractéristiques sont d'autant plus importantes en phase d'exploitation, où l'actionneur doit répondre aux requêtes des différentes catégories de fonctions du Système Automatisé de Production. Les quatre fonctions principales d'un SAP d'après [DEL90] sont :

- la *conduite* destinée à contrôler le processus de production,
- la *sécurité* (ou sûreté) destinée à protéger des défaillances qui pourraient mettre en danger les opérateurs, le processus et son bon déroulement, l'environnement,
- la *maintenance* pour assurer la disponibilité du processus,
- le *suivi*, destiné à recueillir et à synthétiser les informations relatives à l'état du processus physique et des produits.

Figure 2-5 « Les différents niveaux d'un système d'automatisation [DEL90] »



• Applications à l'actionneur

Permettre des liens directs sous forme d'entrées/sorties

La connexion avec les composants de l'automatisme doit pouvoir s'effectuer de la manière la plus simple. L'idéal est l'utilisation d'entrées/sorties compatibles avec les standards industriels des automatismes câblés (sortie sur contacts isolés, entrée analogique 0..10V ou 4..20mA)

Posséder un ou plusieurs liens de communication normalisés

L'actionneur intelligent n'est qu'un composant d'un processus et doit communiquer avec les autres équipements par le biais d'une liaison s'appuyant sur des normes et standards matériels (RS485, RS232...) et logiciels (protocole ModBUS ...).

Offrir des services ciblés en fonction de l'intervenant

L'actionneur intelligent a la possibilité d'offrir des services spécialisés à un opérateur qui prennent la forme de requête ou mode de fonctionnement spécifiques réservés à un utilisateur identifié.

Exemples:

- Présence d'une fonction de supervision locale pour l'agent de maintenance qui est invisible pour l'agent de conduite.
- Mode permettant d'ajuster des paramètres en fonctionnement réservé au technicien chargé des réglages.

Assurer la tracabilité de l'équipement

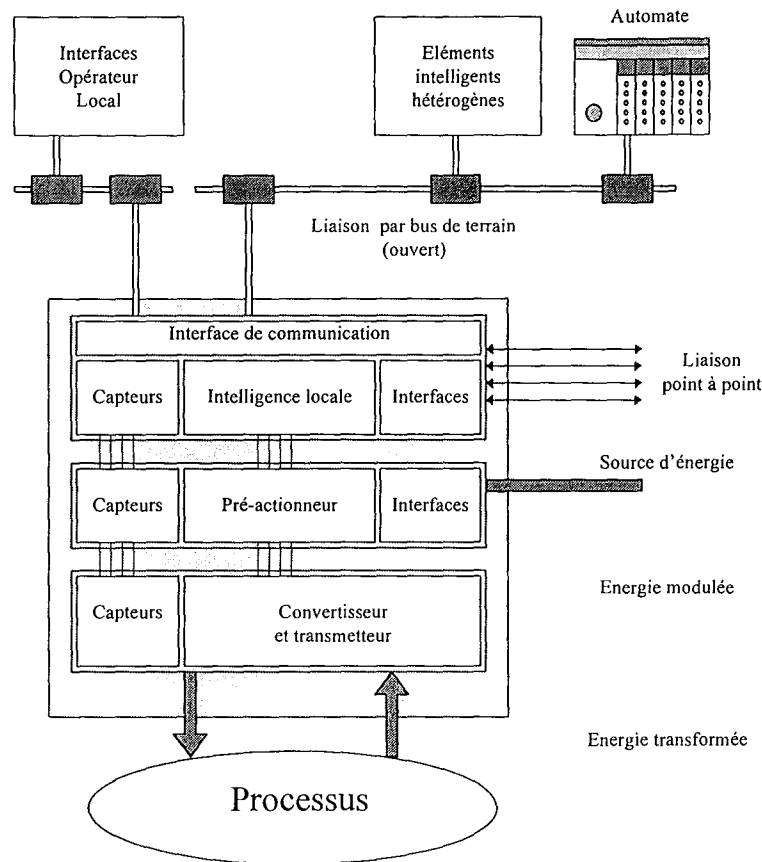
En plus de son identification, l'actionneur mémorise, si possible, des données relatives aux différentes étapes de son cycle de vie (passage aux contrôles de fabrication, date de révision). Ces informations ont pour objet de créer une trace, un historique de la vie de l'actionneur qui enrichira la base de données de l'actionneur.

2.4 Architecture matérielle de l'AI

L'architecture proposée par [STA94] possède les interfaces nécessaires pour la bonne réalisation de sa fonction et couvrir les besoins d'intégration. Autour du support de l'intelligence (une unité de traitement à base de microprocesseur [BEA93] [CPE90]) nous retrouvons :

- un mécanisme de pré-actionnement qui met en forme les commandes issues de l'intelligence locale,
- un mécanisme d'actionnement qui module ou convertit l'énergie,
- un ensemble de capteurs internes,
- un ensemble d'interfaces avec l'environnement permettant la connexion du réseau de communication, des interfaces opérateurs, des sources d'énergies et des liaisons point à point.

Figure 2-6 « Architecture matérielle globale de l'AI [STA94] »



2.5 Les modèles de l'actionneur intelligent

Il existe deux types de modèles de l'actionneur intelligent :

- Les modèles informels

Ils représentent les généralités sur les actionneurs intelligents et sont adaptés à la représentation de certaines caractéristiques de leur comportement.

- Les modèles formels

Ils sont le résultat de l'analyse des spécifications des actionneurs intelligents et s'appuient sur une méthode de modélisation. Ils sont plus précis et représentent l'actionneur sous différentes approches qui sont généralement l'étude de son fonctionnement, de sa gestion de l'information et de son comportement. Ils n'intègrent pas l'aspect technologique car ils se veulent généraux. L'ensemble de ces modèles constitue une description complète et compréhensible des spécifications permettant la réalisation de documents comme les cahiers des charges [AFNOR X-50-151]. Ils permettent, lorsqu'ils sont couplés à des outils informatiques, d'effectuer des simulations avant de commencer les phases de conception.

Nous nous intéresserons plus particulièrement à l'approche fonctionnelle. Parmi les méthodes d'analyse utilisables nous pouvons citer SA_RT [HAT91], MERISE [COL79], Réseau de Pétri et Grafcet [BLA79]. Mais nous détaillerons les trois méthodes de décomposition qui s'imposent dans le domaine des capteurs et actionneurs intelligents.

2.5.1 Les modèles informels ALBUS et CIAME

• Le modèle ALBUS [ALB]

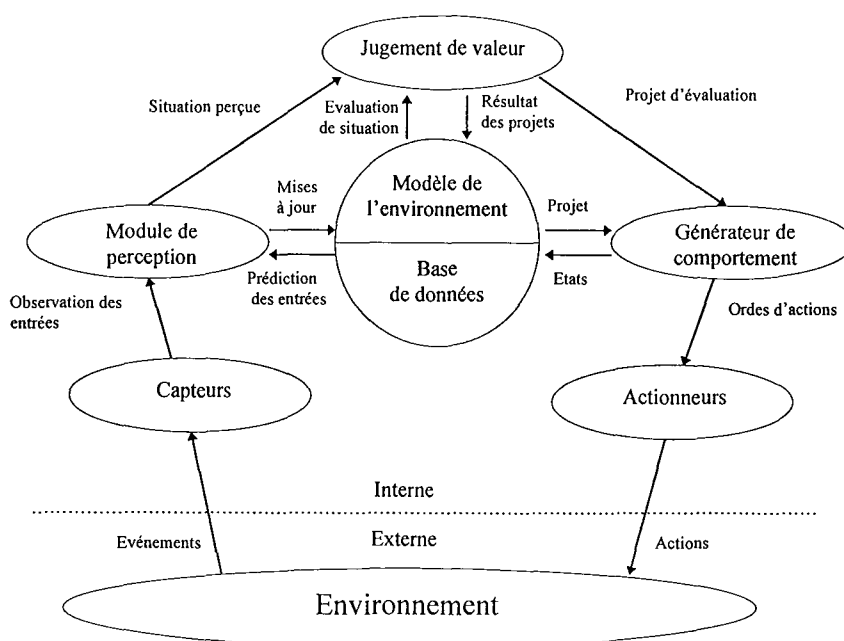
C'est un modèle de description qui caractérise les interactions d'un système avec l'environnement par l'intermédiaire [ROB92]:

- de composants de perception, les capteurs qui surveillent l'état interne du système et appréhendent le monde extérieur,
- de composant d'actionnement, les actionneurs qui doivent agir de façon coordonnée afin d'atteindre les buts assignés au système,

Ses modules d'interfaces sont associés à 4 modules supportant l'intelligence :

- un module de perception,
- un module Modèle de l'environnement,
- un module Jugement de Valeur,
- un module générateur de comportement.

Figure 2-7 « Représentation d'un modèle ALBUS [ROB92] »

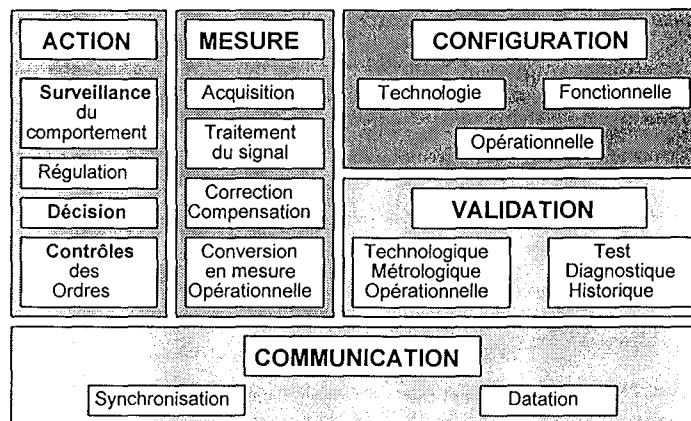


Ce modèle précise la position de l'intelligence de l'actionneur dans le concept *système intelligent*, mais il n'est utilisable que pour décrire le fonctionnement d'un système dans sa phase *exploitation*. La principale application de ce modèle est la représentation virtuelle des capteurs et actionneurs [ROB93].

- **Le modèle CIAME**

Le modèle CIAME se fonde sur la décomposition des fonctionnalités internes d'un actionneur intelligent. C'est principalement un modèle de spécification. Il est orienté vers la description du composant Actionneur Intelligent et précise son rôle et ses fonctionnalités [CIA91a].

Figure 2-8 « Représentation du modèle CIAME »



2.5.2 Les modèles formels

Les deux modèles les plus intéressants pour un concepteur d'actionneur sont le modèle interne, qui décrit les activités au sein de l'actionneur, et le modèle externe qui représente la vision synthétique de l'actionneur offerte aux utilisateurs. Ces modèles sont le résultat de méthodes de décomposition fonctionnelle.

2.5.2.1 Les méthodes de décomposition fonctionnelle

Les méthodes de décomposition par bloc sont les plus utilisées pour traiter les problèmes de descriptions fonctionnelles. Elles permettent de décomposer les fonctions de manière structurée, descendante et hiérarchique. Elles sont basées sur des méthodes de représentation graphique, ce qui a l'avantage d'offrir un support visuel aux différents intervenants et de laisser une trace écrite compréhensible pour tous. La décomposition fonctionnelle en bloc permet également, avec l'utilisation de certains outils informatiques, d'aboutir directement à des modèles fonctionnels de simulation.

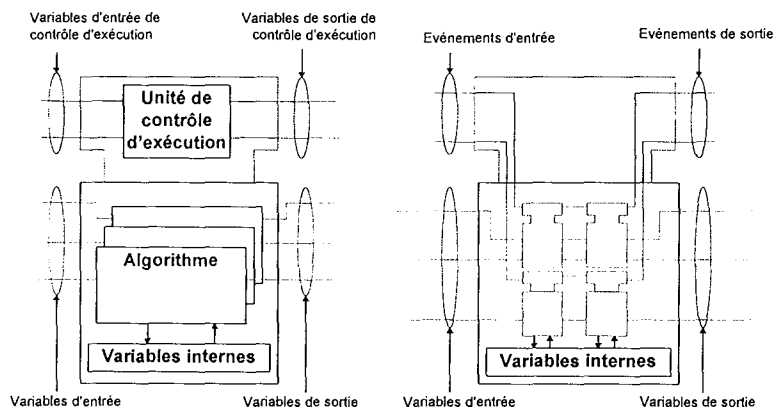
- **La décomposition en bloc fonctionnel**

Des modèles génériques pour la décomposition par bloc sont en cours de description par le groupe de travail 6 de l'IEC TC 65. Les spécifications pour l'automatisme industriel (IEC SC 65 B WG7) et le

contrôle de processus (IEC SC 65 C WG7) y seront ajoutés par la suite. Ces travaux mettront à jour une partie du standard CEI 1131 sur les programmations normalisées des systèmes de contrôle.

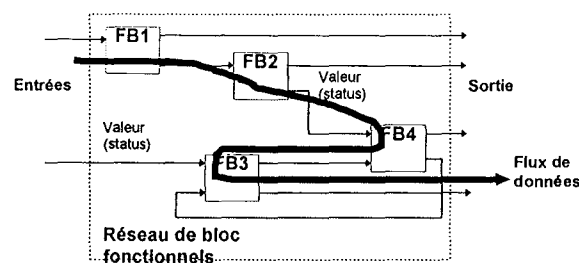
Dans cette méthode, un bloc de base est constitué des fonctions à réaliser, avec leurs entrées et leurs sorties, et d'une unité de contrôle d'exécution dont le rôle est de recevoir des données conditionnant la réalisation de ses fonctions et de fournir les informations éventuelles conditionnant d'autres fonctions. Une fonction évoluée est obtenue par composition des blocs de base interconnectés entre eux par les flux de variables.

Figure 2-9 « Fonction bloc de base et composée [CEI 1131] »



Le modèle global est obtenu connectant les différents blocs fonctionnels, ce qui constitue un réseau de fonctions. Le fonctionnement du modèle est obtenu en fournissant des combinaisons d'entrées. Chaque bloc fonctionnel effectue alors sa (ou ses) action(s) et fournit les informations en sortie.

Figure 2-10 « Fonctionnement du modèle »



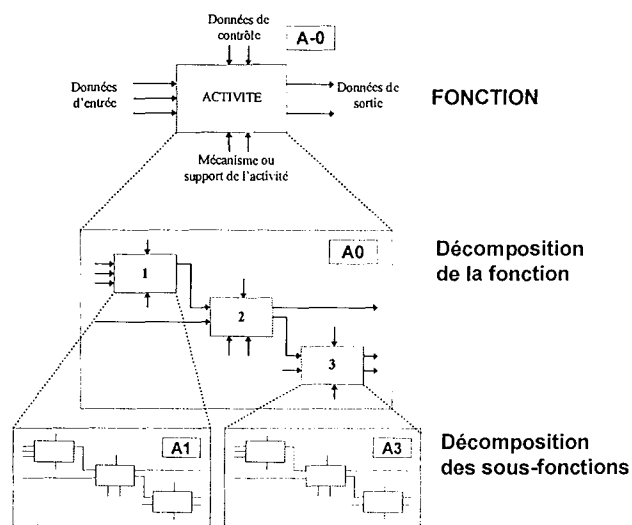
Cette méthode est utilisée par le CENELEC NOAH (Network Orientated Application Harmonisation) qui travaille sur l'harmonisation des spécifications pour les applications à fonctions distribuées pour différents bus de terrain (Profibus, FIP, P-NET) incluant le standard européen EN 50170. L'objectif de ce groupe de travail contient également la spécification d'un système commun d'interface pour les bus de l'EN 50170.

- **L'approche SADT (Structured Analysis and Design Technique) [IGL89]**

SADT est également une méthode de description qui utilise la notion de bloc fonctionnel. Elle a été développée à la fin des années 70 par Douglas ROSS sous le nom de IDEF_0 [IDE79]. Elle permet de décomposer un problème sous plusieurs points de vue pour en exprimer les différentes contraintes et spécifications.

La méthode utilise un langage graphique. Il se représente sous forme de boîtes (décomposition d'un sujet) connectées par des flèches (les interfaces ou les contraintes).

Figure 2-11 « La méthode de décomposition SADT [IGL89] »



Son utilisation nécessite une grande rigueur dans les documents et permet d'aboutir à un dossier compréhensible par tous, pouvant servir de spécifications pour la création d'un cahier des charges. Il faut noter que cette méthode n'intègre pas de représentation en fonction de la variable temps. L'utilisation de logiciels spécifiques comme ORCHIS, GRILLE et SPEX permettent d'obtenir directement des modèles fonctionnels de simulation à partir des spécifications SADT [PAN91].

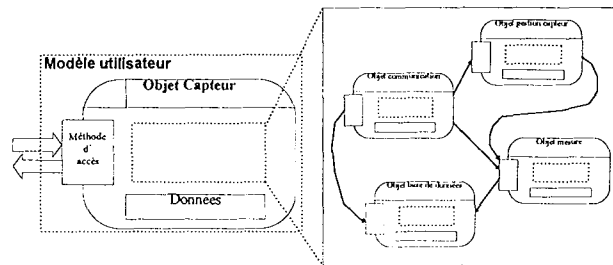
Cette méthode est l'une des plus utilisées au niveau national pour la description des capteurs et Actionneurs Intelligents.

- **L'approche objet [AFC91, GOU92b]**

L'approche objet a l'avantage d'utiliser un concept permettant la création d'ensembles fonctionnels possédant leurs variables et leurs méthodes [ROO91], ce qui peut naturellement s'appliquer aux capteurs et actionneurs intelligents. Cette approche permet de modéliser le composant et de le faire vivre au sein du modèle de l'installation en le reliant par des flux de données (analogie avec les réseaux). Elle est parfaitement adaptée à la description des modèles externes virtuels des capteurs et actionneurs intelligents dans le contexte de VMD (Virtual Machine Design).

L'objet permet également de modéliser les fonctions à l'intérieur de l'actionneur. La banalisation des langages objets [MAS91] dans les outils de développement devrait autoriser la création d'un modèle générique d'actionneur où il suffira d'adapter les objets spécifiques (comme la fonction MESURER) et les interfaces pour créer l'application.

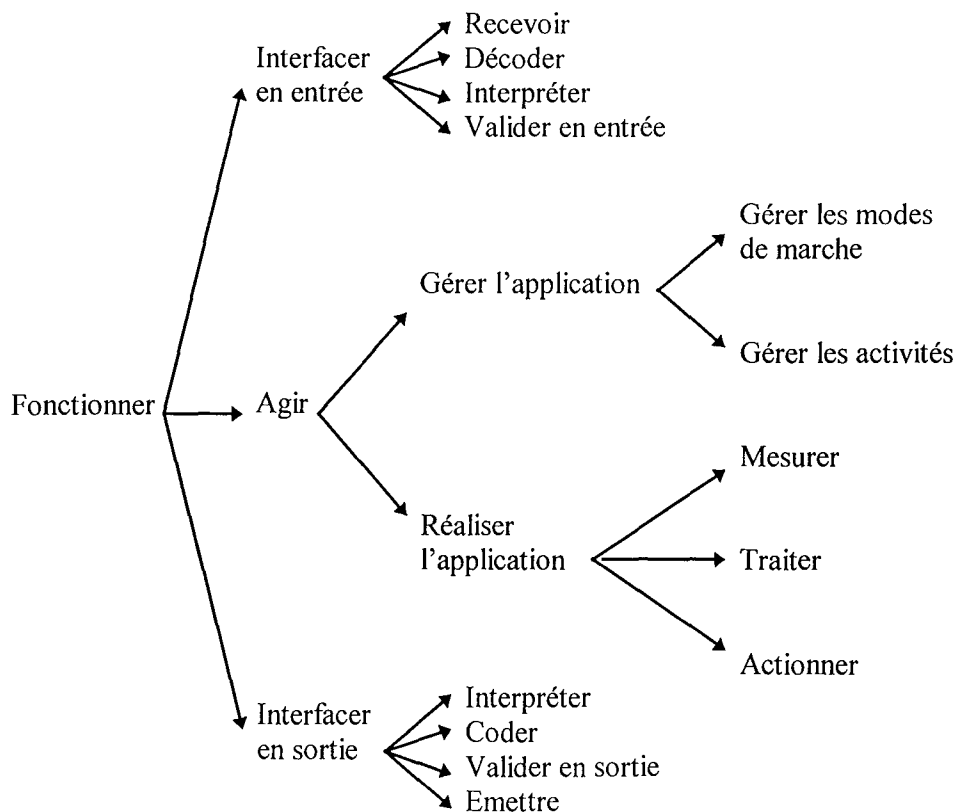
Figure 2-12 « Exemple de décomposition objet [COM91] »



2.5.2.2 Le modèle interne d'un AI

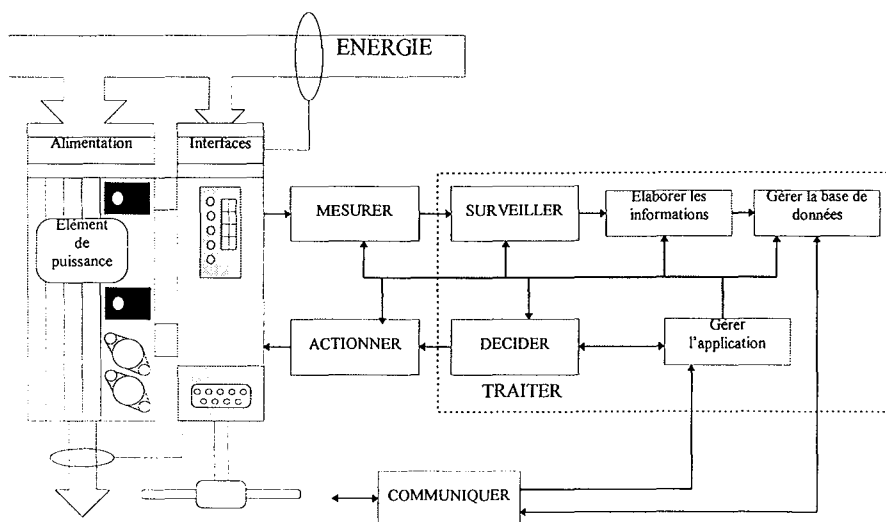
Il est le résultat des descriptions fonctionnelles et représente de manière hiérarchique ce que fait l'actionneur [CIA91b]. Ce modèle est issu de méthode de décomposition par bloc, il est constitué de plusieurs niveaux faisant l'objet de description SADT.

Figure 2-13 « Les différents niveaux du modèle fonctionnel interne d'un AI » d'après [STA94].



La fonction propre de l'actionneur est représentée par la fonction *réaliser l'application* qui contient une boucle fermée (référence à la boucle Mesure Décision Action du SAP). Cette boucle peut être visualisée sur la structure fonctionnelle de l'actionneur.

Figure 2-14 « Structure fonctionnelle d'un actionneur intelligent [STA94] »

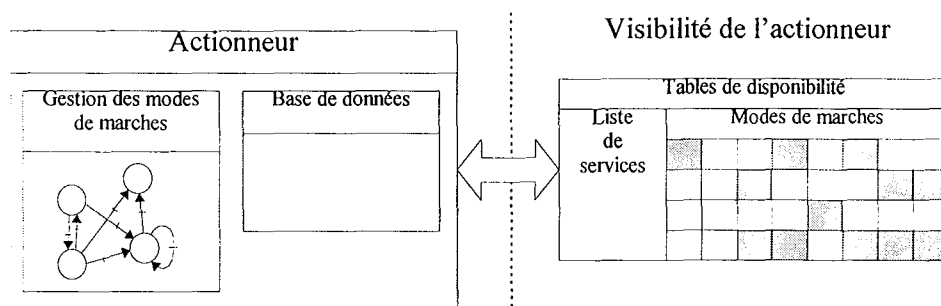


2.5.2.3 Le modèle externe

C'est le modèle vu du monde extérieur, par l'automatisme, les utilisateurs [STA94]. L'actionneur est considéré comme un fournisseur de services. Il fournit des informations ou des actions en réponse à des requêtes externes. L'actionneur étant *intelligent*, il effectue un contrôle de la validité de celles-ci. L'ensemble des réponses à ces requêtes forme une liste de services offerts par l'actionneur.

La disponibilité de ces services dépend du mode d'utilisation de l'actionneur. Le projet INCA prévoit 8 modes : *Hors service*, *Initialisation*, *Configuration*, *Manuel*, *Automatique*, *Gel*, *Repli*, *Maintenance*. Il est donc possible de représenter le modèle externe sous la forme d'un tableau résumant la liste des services offerts et leurs disponibilités en fonction du mode d'utilisation de l'actionneur.

Figure 2-15 « Le modèle externe d'un AI »



La description du modèle sera complétée par la représentation des modes d'utilisations et des transitions possibles (sous forme de graphes ou de tableaux).

L'étude des modes de marche et de la disponibilité des services peut s'effectuer à l'aide d'une méthode telle que le GEMMA (Guide d'Etude des Modes de Marche et d'Arrêt) [ADE79].

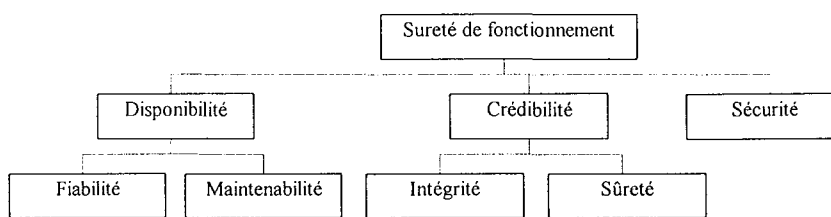
2.6 La sûreté de fonctionnement

L'étude de la sûreté de fonctionnement de l'AI est un point essentiel pour l'obtention d'un actionneur de qualité. Il lui est demandé d'être robuste à certaines pannes et tolérant aux fautes qu'elles soient d'origines matérielles, logicielles ou humaines [MAP95].

Pour fiabiliser ses informations et ses actions au sein des procédés il faut :

- améliorer la disponibilité de l'actionneur
- augmenter sa crédibilité
- assurer la sécurité.

Figure 2-16 «Les critères de la sûreté de fonctionnement», suivant projet de norme CEI 1069-5 »



2.6.1 Définitions

- **Sûreté de fonctionnement**

Mesure dans laquelle il est possible de se fier au système pour qu'il exécute exclusivement et correctement la tâche qui lui est attribuée dans les conditions de fonctionnement et d'environnement définies, à un instant donné ou sur une durée définie.

- **Disponibilité**

Aptitude à se trouver en état d'exécuter la tâche qui lui est attribuée dans les conditions de fonctionnement et d'environnement définies, à un instant donné ou sur une durée définie, en supposant que les procédures et moyens de maintenance ont été utilisés.

- **Sécurité**

Aptitude à assurer la protection des hommes, de son environnement et de lui-même.

- **Crédibilité**

Assurance fournie par le système de sa capacité à reconnaître et signaler son état (correct ou incorrect) et à résister à des entrées non-autorisées ou incorrectes.

- **Fiabilité**

Aptitude à exécuter la tâche qui est attribuée au système dans des conditions de fonctionnement et d'environnement définies, à un instant donné ou sur une durée définie.

- **Maintenabilité**

Aptitude à être maintenu ou remis (dans un laps de temps déterminé) dans un état, dans lequel le système peut exécuter la tâche qui lui est attribuée, en utilisant des procédures et des moyens définis.

- **Intégrité**

Assurance fournie par le système de sa capacité à exécuter correctement les tâches (y compris les états de maintien ou repli) qui lui sont attribuées et à informer d'un quelconque de ses états pouvant conduire à une situation contraire.

- **Sûreté**

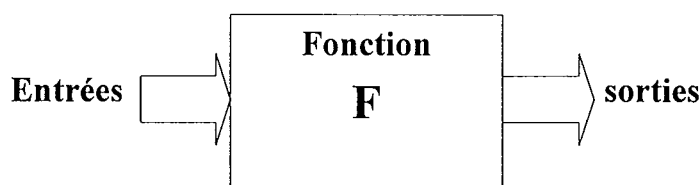
Assurance fournie par le système de sa capacité à refuser toute entrée non autorisée ou incorrecte et à pouvoir éventuellement en informer.

2.6.2 L'amélioration de la sûreté de fonctionnement

Ce paragraphe résume les points importants qui permettent à un concepteur d'améliorer la sûreté de fonctionnement de son développement.

Une fonction peut se représenter sous la forme générale d'un bloc avec ses entrées et ses sorties.

Figure 2-17 « Représentation d'une fonction »



Pour qu'une fonction ait une bonne sûreté de fonctionnement il faut en vérifier les différentes composantes (crédibilité, disponibilité et sécurité).

- **Amélioration de la crédibilité**

Elle est obtenue par la mise en oeuvre d'algorithmes de validation des données et des actions.

La sûreté

Elle est obtenue en contrôlant les entrées de manière à filtrer celles jugées correctes. Cette validation s'effectue habituellement en boucle ouverte. Elle est basée sur la connaissance des variables et de leurs comportements. Elle peut être obtenue par [RAG90]:

- vérification des caractéristiques (temporelles, valeurs, variations) par rapport à un modèle de comportement,
- recoupement des informations en utilisant des données corrélées ou redondantes.

L'intégrité

Elle est améliorée par la mise en oeuvre de:

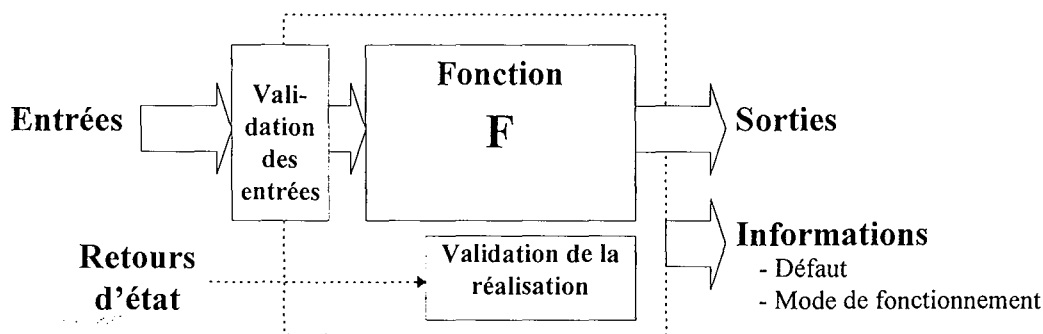
- Mécanismes de surveillance (contrôle de la fonction et de son bon déroulement)

Ils sont le plus souvent basés sur un retour d'informations influencées par l'action (utilisation de la boucle fermée). Cette évaluation des conséquences doit permettre de valider le bon déroulement ou l'exécution partielle de l'action.

- Fourniture d'informations d'états

Elles permettent d'informer l'environnement de l'exécution partielle ou totale de l'action, de la présence éventuelle de défaillance ou d'une dégradation pour permettre au système de réagir en conséquence (exemple: mode de fonctionnement, indication de pannes ou de dérives).

Figure 2-18 « Une fonction plus crédible »



• Amélioration de la disponibilité

Pour qu'une fonction soit plus disponible et qu'elle remplisse sa fonction le plus longtemps possible, qu'elle prenne en compte les modifications de sa capacité à jouer son rôle, elle est généralement dotée de différents modes de fonctionnement. Ceux-ci lui permettent de remplir sa fonction au mieux en cas de défaillance (mode dégradé) ou de prendre une position sécuritaire pour le système (repli).

La maintenabilité [CEI706-2]

Pour qu'une fonction soit rapidement remise en état il faut savoir où et comment intervenir. La mise en oeuvre d'un système de diagnostic permettra de cibler les actions de maintenance et augmenter ainsi la maintenabilité de la fonction. Ces actions de *remise en état* seront simplifiées si les fonctions de l'actionneur possèdent des requêtes d'initialisation ou de reconstruction.

La fiabilité

Contrôler la fiabilité, c'est s'assurer que la fonction joue son rôle. Cette surveillance peut être réalisée de l'intérieur ou de l'extérieur par des fonctions spécialisées d'un niveau supérieur, avec pour

objectif l'obtention d'une fonction d'autocontrôle globale de l'actionneur. Mais ces opérations ne permettent que de quantifier la fiabilité et en aucun cas de l'améliorer.

Mais elle peut surtout être améliorée dès la conception en essayant de s'assurer que la fonction ne dérive pas de ce que l'on attend d'elle (action de prévention). Cette vérification peut s'effectuer à trois niveaux:

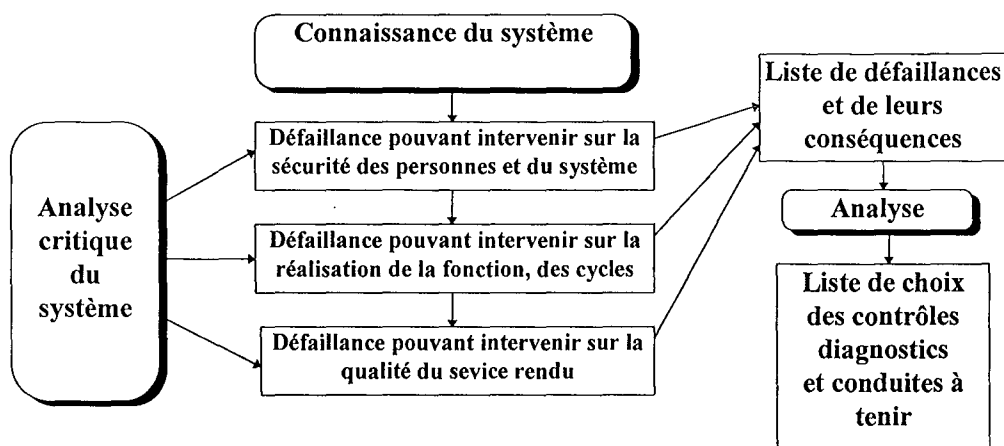
- S'assurer qu'elle n'endommage pas les personnes, son environnement et elle-même. Ces trois points sont similaires à ceux regroupés sous la notion de *sécurité*.
- Qu'elle s'exécute correctement, que ses cycles se déroulent conformément aux schémas établis (la fonction ne s'arrête pas et est en état de fonctionner).
- Qu'elle a la capacité de garder une bonne qualité de service, de résultat.

L'ensemble de ces contrôles peut être réalisé à l'aide d'outils comme les méthodes d'analyse.

• Utilisation d'une méthode d'analyse

Les méthodes d'analyse offrent une démarche structurée pour l'étude des points précédemment cités. Dans notre cas, nous désirons réaliser une liste des causes conduisant à une défaillance de la sécurité, du déroulement de la fonction ou de la qualité du résultat à partir de notre connaissance du système de manière à mettre en oeuvre des mécanismes nous permettant de détecter, d'empêcher ou traiter l'anomalie.

Figure 2-19 « Schéma général de l'analyse d'une fonction »



L'analyse des défaillances d'un système peut s'effectuer en utilisant de nombreuses méthodes.

Parmi celles-ci les plus usitées sont l'AMDEC[CEI 812] (norme X60-150 - CEI 812 de 1985) et les graphes de Markov.

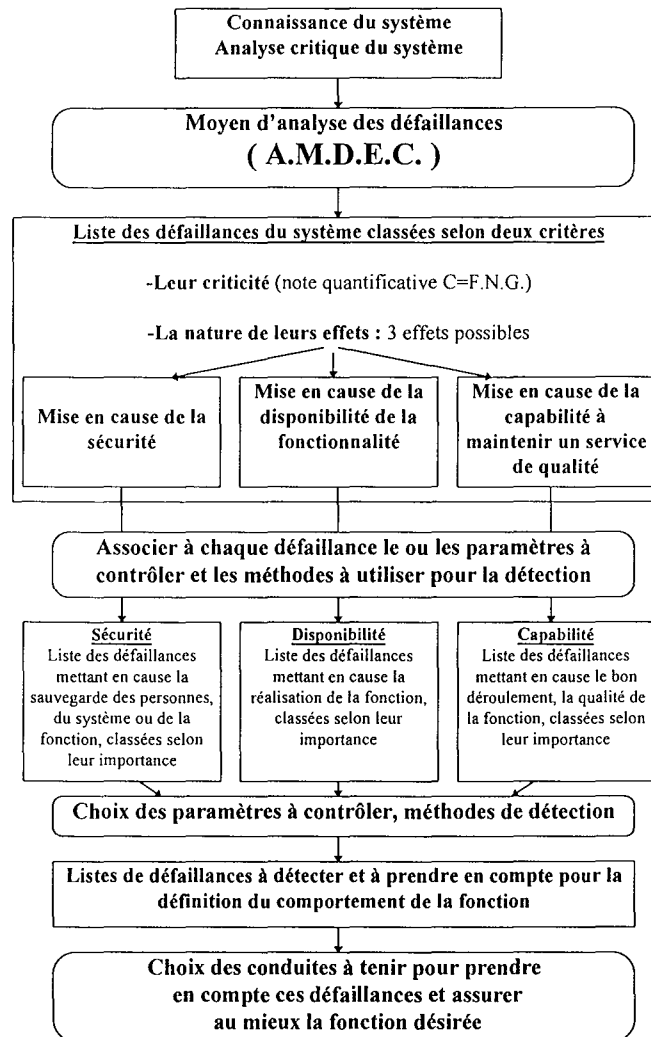
Pour effectuer les choix et utiliser une méthode générale permettant d'étudier tout les aspects et points de vue d'un problème de conception, nous retiendrons l'AMDEC[CEI 812]. Cette méthode permet de réaliser une notation des défaillances et faciliter les choix. Même lorsque cette méthode est simplifiée, elle

met rapidement en évidence les points critiques de la conception et prépare l'analyse des défaillances (mise en oeuvre de diagnostics).

Cette analyse s'effectue en 3 étapes:

- l'étude des défaillances et de leur incidences,
- choisir les points à prévenir, observer ou remédier,
- étude des solutions à mettre en oeuvre et conduite à tenir.

Figure 2-20 « Schéma détaillé de l'analyse d'une fonction »



2.7 La gestion de l'information

En plus de la notion de sûreté de fonctionnement, l'actionneur intelligent utilise sa capacité de traitement locale pour la gestion d'informations telles que la gestion du temps, des événements *pannes* et de sa base de données.

2.7.1 La gestion du temps

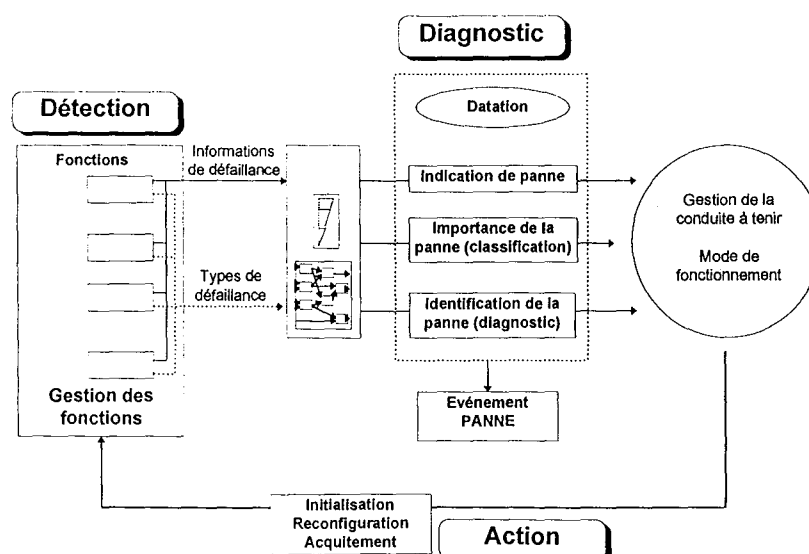
La datation des informations et des événements est une chose importante pour la cohérence des données, c'est pourquoi il est important de posséder localement un système de gestion du temps. Ce système permet également la gestion des fonctions faisant référence au temps.

Les informations temps se présentent généralement sous la forme d'un horodatage : Jours/Mois/Année, et Heures/Minutes/Secondes. Mais certains événements plus rapides pour qui l'identification du temps est importante, nécessitent une finesse supplémentaire, qu'il est possible d'apporter en utilisant une base de temps rapide (horloge rapide).

2.7.2 La gestion des pannes

La gestion des défauts est basée sur l'utilisation d'une boucle fermée [RAG90]. Cette boucle de réaction aux pannes peut être schématisée par la boucle DDA (Détection Décision Action). Son principe est basé sur l'indication des pannes au système de gestion de l'actionneur qui réagit en conséquence. Ces pannes sont *Détectées* [BRU90, ZWI95] localement par les fonctions composant l'actionneur. Celles-ci indiquent leur état de panne ainsi qu'une classification de la défaillance. Ces informations sont synthétisées par un système de *Diagnostic* qui effectue la construction de l'événement *Panne* constitué de : son indication sous forme logique, sa datation, la quantification de son influence sur les capacités du système, l'identification et localisation de la source de la panne (qui peut être obtenue à l'aide d'un arbre de détection de panne [CEI 1025]). Cet événement est ensuite transmis au système de gestion de l'actionneur qui analyse les conséquences et décide de la conduite à tenir (initialisation, reconfiguration, acquittement ou changement de mode de marche) et agit en conséquence [ROT94].

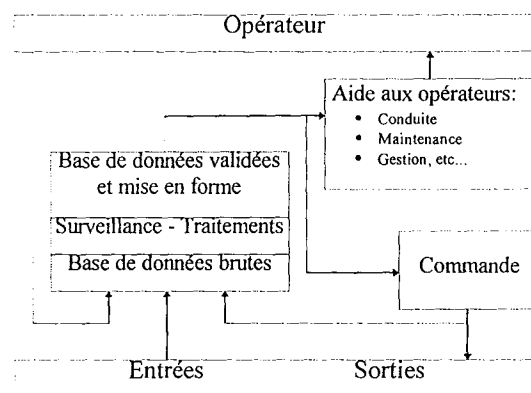
Figure 2-21 « La boucle Détection Décision Action »



2.7.3 La base de données

La base de données est constituée de l'ensemble des informations issues de l'actionneur et de ses traitements visant à assurer son bon fonctionnement et de créer une trace des éléments nécessaires pour suivre ses évolutions tout au long de son cycle de vie. Elle est à la base de la plupart des services offerts. Elle se présente généralement sous une forme brute. Elle correspond à l'ensemble des mesures, variables internes, mémorisations. Ces données possèdent des formats propres au fonctionnement de l'actionneur et ne sont généralement pas exprimées de manières claires (utilisation de nombres adimensionnels, formats hexadécimaux à virgule fixe). Cette base brute, bien que contenant toutes les informations de l'actionneur nécessite un traitement visant à fournir des données fiables et compréhensibles (utilisation des unités, formats de nombre normalisés, algorithmes de contrôle). Ces nouvelles informations constituent une base de données validée et mise en forme. Elle est visible par les opérateurs, globalement ou partiellement, de manière à représenter l'actionneur de manière synthétique pour les différents intervenants.

Figure 2-22 «Représentation de la gestion de la base de données » adaptée de [STA94].



2.7.3.1 Description de la base de données

La base de données est constituée de l'ensemble des données de l'actionneur, quelque soient leurs types. Il est possible de la décomposer en 3 parties [STA94] :

-La base de données statique

Elle est composée de l'ensemble des données fixées une fois pour toutes par le constructeur. Parmi elles nous trouvons :

- Identification du constructeur
- Identification de l'actionneur
- Identification du matériel
- Les versions et leurs dates
- Les descriptions des configurations fixes

Elle peut éventuellement accueillir des données spéciales faisant références au client (nom, date de livraison)

-La base de données semi-statique

Elle est constituée des données nécessitant une adaptation ou modification mais qui ne nécessite pas de remises à jour de manière dynamique. Parmi les données nous retrouvons :

- Les paramètres de configuration et de mise au point, réglage de l'actionneur (type et paramètres de régulation...).
- Les informations relatives à l'installation (Situation du matériel, calibre de composants extérieurs ...)

- La base de données dynamique

C'est l'ensemble des données en perpétuel changement. Elle contient les variables nécessaires à l'exploitation de l'actionneur dans le contexte du SAP (consignes, mode de fonctionnement, historiques spécifiques aux divers intervenants).

2.7.3.2 Son contenu

Pour présenter de manière ergonomique la base de données Nous proposons d'introduire la notion de *fiche*. Une *fiche* est définie comme un regroupement thématique de variables exprimées de façon compréhensible. Elles constituent une manière de tri. Elles ont pour objet de permettre aux opérateurs et concepteurs de situer de manière intuitive les données. Une fiche représente généralement des zones physiques de la mémoire de l'actionneur. Elle peut également prendre la forme de page de données pour leur accès par le réseau.

Il est possible de différencier 4 familles de fiches :

- ***Les fiches d'identification***

Elles contiennent des informations statiques ou semi-statiques permettant de faire le suivi de l'équipement. Elles sont spécifiques à chaque intervenant (existence d'une fiche constructeur et fiche utilisateur).

- ***Les fiches paramètres***

Elles contiennent des données semi-statiques pour l'utilisateur et statique pour le constructeur. Elles définissent la configuration et le paramétrage de l'actionneur.

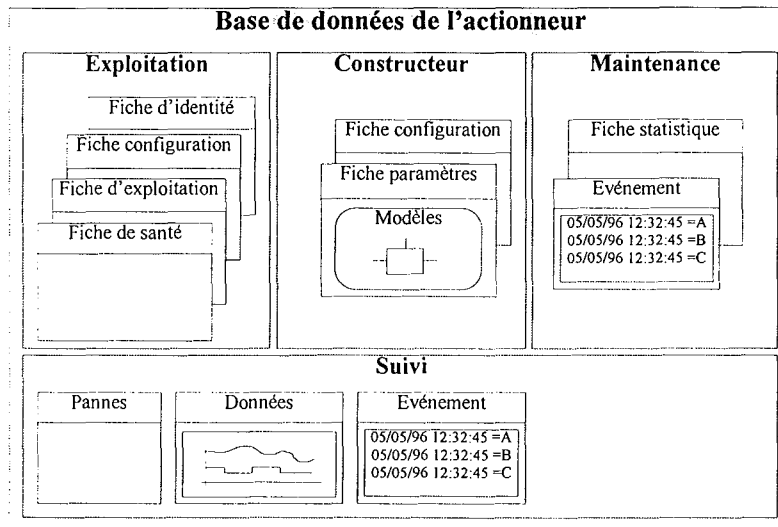
- ***Les fiches d'exploitations ou de conduite***

Elles regroupent les données nécessaires au pilotage et à l'exploitation de l'actionneur. Elles peuvent être spécifiques pour les différents intervenants (opérateur de conduite, de maintenance).

- ***Les fiches de données***

Elles regroupent les autres données qui sont plus du domaine de l'information. Elles permettent par exemple le stockage des statistiques (nombre d'heures de marche ...) et des historiques. Nous classerons la *fiche de santé* dans cette famille. Cette dernière contient des indicateurs ainsi que l'archivage des données relatives à l'évaluation des performances de l'actionneur.

Figure 2-23 « Présentation de la base de données »



Remarques : Le cas des fiches historiques

Elles ont pour principale fonction l'archivage de données permettant de suivre l'évolution dans le temps de variables assurant ainsi la traçabilité de l'actionneur. Elles représentent un ensemble de données datées.

Nous classerons ces stockages de données en 4 familles :

-l'archivage à cours terme

Il est généralement constitué d'une zone de stockage limitée représentant le passé proche d'une variable continue échantillonnée (figure a).

-l'archivage à moyen terme

Il offre une vision plus grossière de la variable et fait souvent appel à des méthodes de compression de données (figure b).

-l'archivage à long terme

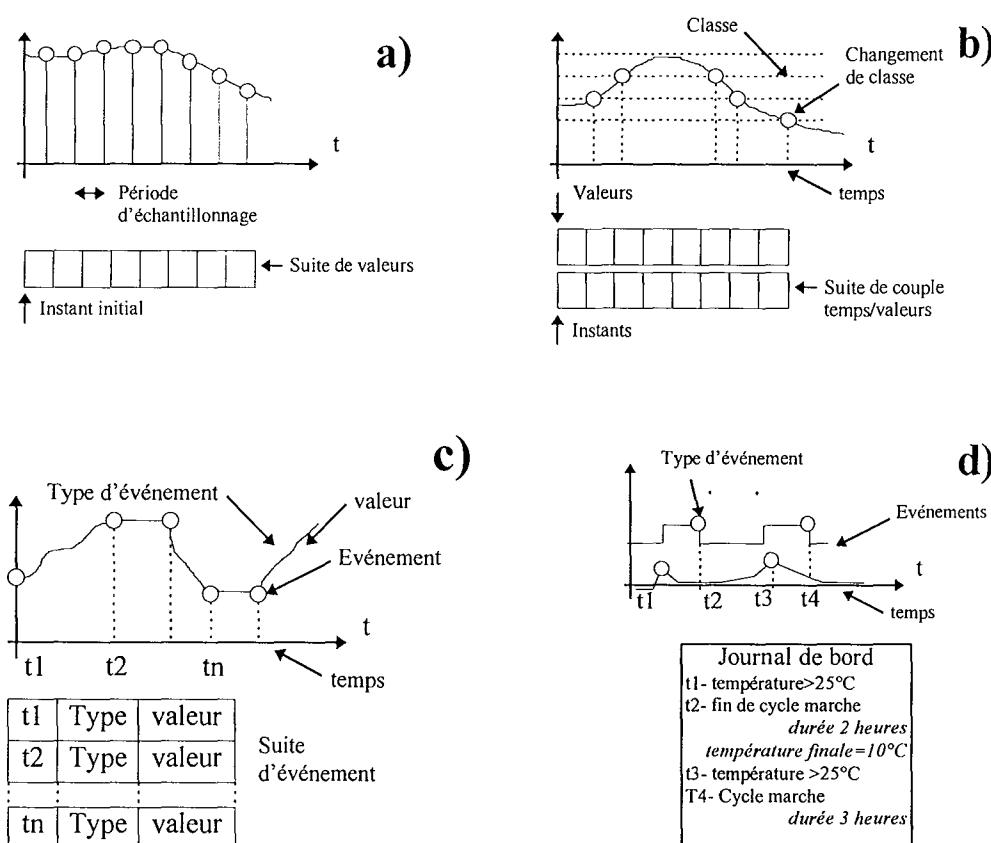
Il est réservé au stockage des paramètres d'évolution lente ou d'événements peu fréquents. Il permet de suivre le comportement d'une variable sur une grande période. Il se présente sous la forme d'une liste d'événements caractéristiques pour la variable. Ces événements sont repérés par une datation et contiennent leurs caractéristiques générales (ex: à 10h montée de la tension de 10 V à 21V en 2h). Ce type d'archivage correspond à une méthode de

compression plus évoluée que la précédente, mais elle n'offre qu'une vision globale du comportement de la variable. Le résultat est une liste d'événements classés par ordre chronologique (figure c).

-l'archivage au fil de l'eau

Certains événements ne se produisent qu'occasionnellement et ne nécessitent pas d'archivage spécifique (exemple des pannes). Il est alors possible de créer un journal de bord mémorisant des événements pouvant être de nature hétérogène. Chacun d'eux contenant les informations qui les caractérisent ainsi qu'une datation. Le résultat est l'obtention d'une liste d'événements remarquables classés dans leur ordre d'apparition (figure d).

Figure 2-24 « Les méthodes d'archivages »



2.7.4 La base de connaissances

Elle a pour objectif de compléter les fonctionnalités de l'actionneur intelligent sans pour autant remettre en cause ses fonctionnalités initiales. Elle constitue un moyen d'adaptation de l'actionneur à un environnement spécifique.

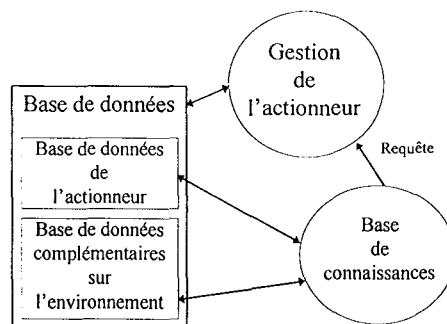
Nous la considérerons comme une entité utilisant les capacités de calculs locaux pour offrir des services habituellement réalisés à un niveau supérieur et éventuellement de prendre en compte ses résultats pour adapter son comportement. Elle peut contenir des méthodes et des paramètres pour le calcul de nouvelles variables, la surveillance de l'environnement, le diagnostic du processus.

Exemple : Le module de protection moteur par image thermique de la société HAZEMEYER [GOU92a] est un module intelligent de gestion de départ moteur (tiroir contenant les éléments électromécaniques nécessaires au pilotage d'un moteur). Ce module intelligent intègre en standard les fonctions de mesures de puissances, courants et tensions.

L'intégration d'une base de connaissance sur le moteur (modèles et méthodes de calculs) a permis d'intégrer les fonctions de surveillance thermique du moteur à partir des données déjà disponibles localement (courants, tensions, puissances) et prévenir ainsi les défaillances du moteur.

Nous représenterons la base de connaissances comme une entité consommatrice d'informations apportant un complément à la base de données de l'actionneur. Elle peut dans certains cas jouer un rôle actif en effectuant des requêtes au système de gestion de l'actionneur avec pour objectif la préservation, l'amélioration ou la maintenance des performances de son environnement. Elle est alors considérée comme un opérateur.

Figure 2-25 « La base de connaissances »



2.8 Les perspectives des CI et AI

Les capteurs et actionneurs intelligents ont connu une très forte progression dans les industries nécessitant des équipements déportés répandus sur de grande surface (platte forme chimiques) [INS94a-c-f] où leur utilisation a permis au concepteur d'apprécier les services rendus (retour d'informations, validations) [FRA94] et l'économie due à la simplification de l'équipement déporté [INS94e]. Les premiers capteurs et actionneurs ont donc été les vannes et transmetteurs de température.

La répartition des actionneurs et capteurs intelligents dans l'industrie est de [URS96]:

- 70% des applications concernent l'industrie de process
- 20% la métrologie appliquée à l'environnement, l'agro-alimentaire et aux centrales thermiques
- 10% les autres domaines (automobile, électroménager, domotique ...)

• ***La normalisation***

La récente normalisation des bus de terrains [EN50170] va permettre de stabiliser les bases de communications et offrir une référence aux différents constructeurs. Mais il reste encore beaucoup de chemin à parcourir pour obtenir des matériels interopérables. En effet il existe beaucoup de petits constructeurs utilisant leur standards [INS94d], et même si ces normes font l'objet d'investissement et d'association industrie/recherche de plus en plus importante, ce n'est que lorsque des descriptions précises seront editées que le marché s'y conformera [INS94b].

• ***Actionneur intelligent et applications ferroviaires embarquées***

De nos jours, l'application des réseaux terrains ne se cantonne plus aux systèmes automatisés fixes, ils sont également utilisés sur les systèmes embarqués. Un des grands marchés potentiels est le domaine ferroviaire (train, métro) ou les demandes en matière de systèmes de transport de l'information de tout type (voix, musique, informations texte ou d'automatismes) sont devenues générales chez tous les constructeurs. Nous noterons d'ailleurs l'existence de la norme IEC TC9 WG22 qui décrit l'architecture d'un système de communication pour les trains, qui se compose de deux niveaux, le niveau TRAIN et le niveau VOITURE (approche analogue à l'architecture CIM).

D'anciens réseaux ont déjà étrenné le sujet : MODBus et le système de gestion de compostage et d'information voyageur allemand IBIS (VÖV 04.05.4/VDV 300), plus récemment le système MICAS [GEM93] (DIN 43322) de l'allemand ABB déjà en oeuvre sur environ 500 voitures pour les trains S-Rhein-Ruhr (1982), et ceci sans parler des applications propriétaires. Mais, à l'heure actuelle, les nouveaux réseaux commencent à percer le marché (expérience FIP sur TGV). Cette tendance semble donc être bien installée, nous en prendrons pour preuve l'apparition de connecteurs ferroviaires pour les liaisons inter-voiture permettant l'intégration de câbles coaxiaux ou de fibres optiques.

Bibliographie du chapitre

[ADE79] ADEPA

Guide d'Etude des Modes de marche et d'Arrêt
1979

[AFC91] AFCET

Objectif Objet !
Paris, AFCET 1991

[ALB] Albus

Outline for a theory of intelligence
IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics 21(3): 473-509

[BEA93] BEAUDOIN F. Et FAVENNEC J.M.

Les capteurs intelligents : Le concept, les enjeux
Revue Générale de l'Electricité, N°3, p.1-8,1993

[BRU90] J. BRUNET, M. LABARRERE, D. JAUME, A. RAULT, M. VERGE

Détection et diagnostic de pannes. Approche et modélisation
Traité des nouvelles technologies, séries Diagnostic et Maintenance
Hermès 1990

[BLA79] BLANCHARD M.

Comprendre, maîtriser et appliquer le Grafset
1979, Cepadues

[BRA89] BRASCHE U. and SONNTAG Philipp

Intelligent Sensors
VDE Verlag, 1989, 128p

[COL79] COLLONGUES, HUGUES, LAROCHE

Merise: méthode de conception
Paris, BORDAS 1979

[CIA96] CIA

Le Bus CAN
CIA, Janvier 1996

[CIA87] CIAME

Livre blanc: Les capteurs intelligents - Réflexions des utilisateurs.
CIAME AFCET, 1987.

[CIA89] CIAME

Livre blanc: Les actionneurs intelligents
Kirk, 1989.

[CIA91a] CIAME G.T. Actionneurs

Les fonctionnalités des actionneurs intelligents
Mesucora 1991, Paris Nord-Villepinte

[CIA91b] CIAME G.T. Actionneurs

Fonctionnalités systèmes des constituants intelligents
Mesucora 1991, Paris Nord-Villepinte

[COM91] COMAR Cyrille

Conception et réutilisation : étude de cas HOOD
AFCET N°103 MAI 1991 p.17-20

[CPE90] CPE

Capteurs intelligents et instrumentation avancée pour contrôle de procédés
Rapport CPE (Centre de Prospective et d'Etude), Ministère de la recherche, Innovation 128 S.A. Paris, 1990

[DEL90] DELCUVELLERIE J.L.

L'impact FIP sur la conception des architectures
Revue Générale de l'Electricité, n°7, p. 57-64, 7 juillet 1990

[DIAS88] DIAS (Distributed Intelligent Actuators and Sensors)

Project Information, ESPRIT PROJECT 2172,1988

[ECH95] ECHELON

LONWORKS Réseau d'automatisme à intelligence répartie
Séminaire de présentation Echelon et ARROW 1995

[FOR92] FORGE B.

Avec FIP, dialoguer avec la base
Mesure N°645 1992, p.49-56

[FRA94] FRANCE INNOVATION 128

Capteurs Intelligents
TechTendance, 1994. 140p.

[GEM93] GEMMEKE K. and HANS G. (ABB)

Installation d'un réseau de communication embarquée fondé sur le système MICAS
ITTG septembre 1993. Actes proceeding Tome 1 p.195-204

[GOU92a] GOUNANT S.

Etude d'un départ moteur intelligent, le module I.T.H. (protection par image technique)
Mémoire de D.E.A.
CRAN ESSTIN Nancy, 1992

[GOU92b] GOUNANT S.

La représentation objet
Bibliographie de D.E.A. A.T.S. CRAN ESSTIN Nancy, 1992

[HAT91] HATLEY D.J. et PIRBHAI I.A.

Stratégie de spécification des systèmes Temps Réel
Paris, MASSON 1991

[IDE79]

Guide to understanding activity diagrams IDEF0
Septembre 1979 - Société SOFTECH -USA

[IGL89] IGL

SADT : un langage pour communiquer
Paris : Eyrolles, 1989.

[INS94a] INSTRUMENTATION

Capteurs-transmetteurs intelligents : Un avenir prometteur
Dossier comparatif, Instrumentation et systèmes - mars 1994 p.18-19

[INS94b] INSTRUMENTATION

Capteurs-transmetteurs intelligents et bus de terrain : La dernière ligne droite
Instrumentation et systèmes - mars 1994 p.30-32

[INS94c] INSTRUMENTATION

Les architectures distribuées : solution d'avenir
Instrumentation et systèmes - Avril 1995 p.26-29

[INS94d] INSTRUMENTATION

Capteurs intelligents : On est pas mieux servi que par soi-même
Mesures 667 - Septembre 1994 p.43-46

[INS94e] INSTRUMENTATION

L'intelligence c'est aussi la réduction des coûts !
Instrumentation et systèmes - Novembre 1995 p.15-18

[INS94f] INSTRUMENTATION

Vannes de régulation, capteurs/actionneurs : éléments clés de l'intelligence répartie
Instrumentation et systèmes - Mars 1995 p.30-33

[INT94] InterBUS-S

InterBus : le bus ouvert pour capteurs/actionneurs
Club InterBus-S - Bd de Beaubourg Emerainville - 77437 Marne la Vallée Cedex 2

[LAP95] LAPRIE J.C. 1995

Guide de la sûreté de fonctionnement
Laboratoire d'ingénierie de la sûreté de fonctionnement
CEPADUE, Paris, 1995

[MAS91] MASINI G. NAPOLI A. et COLNET D.

Les langages à objets
Paris, InterEdition 1991

[MOD93] MODICON

MODBus protocol reference Guide
PI-MBUS-300 Rev.E, mars 1993

[PAN91] PANETTO H.

Une contribution au génie automatique : le prototypage des machines et systèmes automatisés de production
Doctorat de l'université de Nancy I

[PET91] PETRIN J.F.

Expérimentation sur site industriel du concept ESPRIT DIAS
Thèse, NANCY I, 1991

[RAG90] J. RAGOT, M. DAROUACH, D.MAQUIN, G.BLOCH

Validation de données et diagnostic.
Paris, Hermès, Traité des nouvelles technologies, séries Diagnostic et Maintenance, 1990

[ROB92] ROBERT Michel

Contribution à l'évolution de l'Instrumentation industrielle: CAPTEURS INTELLIGENTS et DETECTION de DEFAUT
Rapport pour la présentation à diriger les recherches
CRAN - septembre 1992

[ROB93] ROBERT Michel, MARCHANDIAUX Michel, PORTE Michel

Capteurs Intelligents et méthodologie d'évaluation
Paris : Hermès, 1993.

[ROO91] ROOSEN J.P.

Introduction au monde des objets
AFCET N°103 MAI 1991 p.17-20

[ROT94] ROTH S, VERNET G.

Diagnostic de panne et surveillance de la qualité sur la ligne de production en continu, de tôle galvanisée à SOLLAC-Florange
Actes Colloques FIRTECH, 14-15 Avril 1994 Nancy, p.34-44

[STA94] STAROSWIECKI Marcel, BAYART Mireille

Actionneurs Intelligents
Paris : Hermès, 1994.

[THO91] THOMESSE, LORENTZ et BARDINET

Factory Instrumentation Protocol : Model, products and tools
Control Engineering Sept. 1991 p.65-67

[URS96] URSO P.

Les capteurs intelligents en attente d'un standard de communication
Technologies Internationales N°24, mai 1996

[VAN93a] VAN DEN PLAS E.

Microprocessor, Asics and Profibus Resulting in Profidrive
Journal A, Vol 34, n°1, p.24-27, 1993

[VAN93b] VAN DER BIJL W.

Digital Data Communication, Control and Maintenance
Journal A, Vol 34, n°1, p.19-23, 1993

[ZWI95] ZWINGELSTEIN G.

Diagnostic des défaillances : Théorie et pratique pour les systèmes industriels
Paris, HERMES ISBN 2866014634, 1995

Normes générales

[AFNOR X-50-151]

Guide pour l'élaboration d'un cahier des charges fonctionnels
AFNOR, 1984

[CEI 812]

*Techniques d'analyses de la fiabilité des systèmes -
Procédures d'analyse des modes de défaillance et de
leurs effets AMDE*
Première édition 1985

[CEI 706-2]

*Guide de maintenabilité de matériel - Partie 2 : Etude
de maintenabilité au niveau de la conception*
Première édition 1990

[CEI 1025]

Analyse par arbre de panne (AAP)
Première édition 1990

[EN 50170] General purpose Fieldbus communication -Nouvelle norme européenne pour les bus de terrain , elle reprend Profibus, WorldFIP et P-NET.

[NF C46-60x] AFNOR-UTE, norme NF

C46-602 Couche application 1990
C46-603 Couche liaison de données 1990 et additif 1991
C46-604 couche physique (CEI 1158-2) 1994
C46-605 Gestion de réseau 1989
C46-606 Couche application, service messagerie 1993

Chapitre

3

Un processeur à haute sûreté de fonctionnement dédié à la gestion d'énergie

3. Un processeur à haute sûreté de fonctionnement dédié à la gestion de l'énergie

Pour appliquer le concept *actionneur intelligent* à la gestion de l'énergie électrique, nous avons choisi de concevoir un support intégrant un microprocesseur adapté au pilotage des circuits de puissance. Ces derniers occupent une place en amont dans la chaîne de distribution de l'énergie et sont un maillon pour le bon fonctionnement d'un processus. Leur sûreté de fonctionnement doit donc être importante. Cette caractéristique est renforcée par le risque inhérent à la manipulation de fortes sources d'énergies où un défaut de pilotage peut induire une forte dégradation ou la destruction du circuit.

Le produit créé doit posséder un fort potentiel de pilotage temps réel et être capable de générer les séquences rapides, précises et cohérentes de signaux adaptées aux différentes topologies de circuits tout en conservant la puissance de calcul pour les lois de commande, la gestion des données et les communications.

3.1 Sûreté de fonctionnement et processeurs

La cause d'une altération de la sûreté de fonctionnement d'un dispositif quelconque est l'existence ou l'apparition d'une faute au sein de ce dispositif. Cette faute va provoquer une erreur qui créera une défaillance du système. Dans le cas d'un dispositif à microprocesseur qui possède un comportement pré-programmé, ces fautes se répartissent en deux classes [CHA91b] :

- *Les fautes systématiques* : Elles apparaissent lors de la phase d'élaboration du dispositif. Parmi ces fautes nous trouvons principalement les fautes de spécifications lors de l'établissement du cahier des charges, celles introduites lors de la conception matérielle et logicielle.
- *Les fautes aléatoires* : Elles surviennent en phase d'exploitation. Elles sont dues à des défaillances de composant, des agressions de l'environnement (parasites induits ou rayonnés, conditions climatiques, mécaniques...), des fautes d'exploitation (fausses manoeuvres, non-respect des consignes), des fraudes.

Ces causes offrent de très nombreuses et probables possibilités d'altération de la sûreté de fonctionnement de l'équipement.

En tirant les enseignements des composantes de la sûreté de fonctionnement (voir chapitre *Actionneur Intelligent*) et en partant du principe qu'il est impossible d'empêcher l'erreur, deux règles se sont imposées aux utilisateurs :

- *Concevoir physiquement le système pour limiter les risques d'erreurs* (sécurité par logique câblée, par validation, immunisation CEM [BAN95]).
- *Détecter au plus tôt une défaillance* et réagir de manière à en limiter les conséquences (ce qui se termine généralement par une réinitialisation du système).

Les techniques à appliquer pour renforcer le niveau de sûreté de fonctionnement de ces dispositifs à microprocesseur se répartissent donc en deux classes selon leurs modes d'action :

- *La prévention : les techniques d'évitement de fautes*

Elles sont destinées à minimiser l'apparition des fautes. De telles techniques existent pour chacune des étapes de la vie de l'équipement [EWI88].

- *La détection et la réaction : les techniques de contrôle de fautes.*

Elles s'appliquent lors de la conception du dispositif et sa mise en oeuvre. Elles sont destinées à rendre le fonctionnement sûr si la faute n'a pu être évitée. Le schéma de fonctionnement suit celui de la boucle DDA : Détection de l'apparition de l'erreur, Diagnostic de la conduite à tenir, réaliser une Action (adoption d'une position de repli sécuritaire ou continuation du fonctionnement en mode partiel ou dégradé en présence d'une ou plusieurs fautes (cas des dispositifs tolérants aux fautes) [OFT92].

La mise en oeuvre de ces méthodes en vue d'améliorer la sûreté de fonctionnement d'un équipement à base de microprocesseur est indispensable, mais n'est en aucun cas suffisante. Cette qualité doit être obligatoirement validée par des tests en fin de conception. L'objectif de ces tests est de vérifier que ces mécanismes ont été correctement utilisés et de permettre de juger de leur efficacité [BAR88].

3.1.1 Eviter les fautes

Ces techniques de prévention visent à interdire et détecter des fonctionnements non autorisés du système de manière à prévenir les apparitions des fautes [IEC1508]. Ces méthodes peuvent être matérielles et intervenir lors de la conception de l'équipement ou logicielles lors de l'écriture de l'application [CHA92a, HEL86].

3.1.1.1 Eviter les fautes par des techniques matérielles

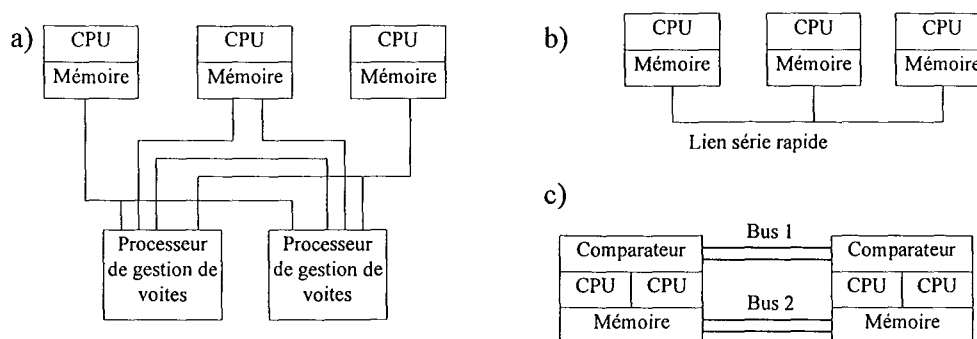
- **La redondance [KOB85a et b, KOB88]**

Elle est fondée sur la duplication de composants du système et sur la comparaison en continu ou sur rendez-vous de leurs fonctionnements. Ce type d'architecture permet d'obtenir des systèmes tolérants capables de fonctionner avec la présence d'une panne sur un des éléments. Le degré de redondance correspond au nombre de duplications de l'élément redondant. Une redondance d'ordre 2 permet d'améliorer le niveau de sécurité (détection des fautes par comparaison des résultats) de l'application alors qu'un ordre supérieur à 2 permet en plus d'augmenter la disponibilité (fonctionnement correct en présence de $n-2$).

Voici trois types d'architectures tolérantes aux pannes :

- **Solution a** : Elle consiste à faire fonctionner plusieurs processeurs qui effectuent en parallèle les mêmes opérations. Des points de rendez-vous permettent de comparer les résultats fournis par les différentes machines. Dans le cas où ces résultats ne sont pas identiques, on procède à un vote [WOB81]. Cette méthode nécessite le fonctionnement d'au moins trois machines identiques.
- **Solution b** : Elle met en regard deux ou plusieurs systèmes reliés en utilisant un lien de communication rapide en faisant en sorte que l'un soit le miroir de l'autre. Si la comparaison montre une différence, il se pose alors le problème de localiser le groupe en défaut. Cette solution a cependant l'avantage d'être peu coûteuse en matériel (qui peut être du matériel standard).
- **Solution c** : Elle consiste à faire fonctionner de façon synchronisée deux cartes (reliées entre elles par deux bus) intégrant chacune deux processeurs partageant une mémoire via un bus unique. Si les processeurs de l'un des deux groupes donnent des résultats différents, ce sont les processeurs de l'autre groupe qui assurent la continuité du fonctionnement.

Figure 3-1 « Trois types d'architectures redondantes »



Ces méthodes, si elles sont réalisées par une simple duplication à l'identique du même matériel et du logiciel, ne permettent que de détecter des erreurs matérielles (cas de composants défectueux). Mais une erreur systématique (erreur de programmation ou de conception) ou une erreur fugitive sur une donnée d'entrée (mesure) dupliquée au n systèmes générera la même réponse sur tous les systèmes et sera indécélable. Une solution couramment utilisée consiste à décaler dans le temps les différents équipements

pour détecter les erreurs parasites, mais pour que la redondance soit réellement efficace, les fonctions à sécuriser doivent être réalisées de manière différente (logiciel et matériel) pour éviter la duplication de l'erreur aux n systèmes.

Exemple : Un calcul doit être obtenu par des suites d'instructions différentes de manière à rendre détectable le débordement d'un accumulateur ou d'une variable.

Quelle que soit la solution retenue, il se pose le problème de la synchronisation (matérielle ou logicielle) des différents constituants réalisant en même temps les mêmes tâches ainsi que la comparaison des résultats.

La redondance, lorsqu'elle est correctement mise en oeuvre, permet d'obtenir des performances de détection d'erreurs très élevées (probabilité de détection proche de 1) et ceci quelque soit les erreurs. Cependant cette solution est extrêmement coûteuse.

- ***Les règles d'implantation des composants [BAN95, CHA90, WIL82, YAR79]***

Une des caractéristiques des systèmes à haute intégration est la très faible énergie mise en jeu pour constituer l'information utile. Ils sont très sensibles aux perturbations électromagnétiques (parasites conduits ou rayonnés, décharges électrostatiques) qu'elles soient d'origine externe ou interne (générées par le dispositif lui-même).

Des règles pratiques permettent de protéger efficacement un dispositif à microprocesseur contre ces perturbations. Elles portent essentiellement sur :

- le blindage,
- le découplage des alimentations,
- les protections à implanter pour limiter les couplages capacitifs et inductifs et perturbations radioélectriques (circuits de protection sur les entrées/sorties ...),
- le routage des masses et alimentations.

- ***La séparation des champs mémoires***

La restriction des accès aux mémoires et périphériques de manière câblée est un moyen efficace pour limiter les erreurs et préserver l'intégrité des données. Elle est réalisée par une logique de sélection des boîtiers adaptée aux types d'accès autorisés (lecture, écriture, taille des données). Sur certains processeurs ce décodage est simplifié par la présence de signaux de contrôle du bus différenciant les accès mémoires et périphériques (Exemple : le signal Input-Output/Memory sur les 8086 INTEL).

Une des sécurités minimum à implanter est la séparation du code exécutable et des données.

3.1.1.2 Eviter les fautes par des techniques logicielles

Les fautes à éviter à la conception sont principalement des fautes d'origine humaine introduite par le programmeur au moment de la conception des algorithmes et de leur transcription dans le langage choisi. L'affranchissement aux fautes passe par l'utilisation d'une méthode de programmation et de règles

d'écriture des programmes de manière à obtenir un programme clair, facilement vérifiable et capable de prévenir certaines erreurs de programmation.

- **Un programme modulaire [CHA91]**

Une solution est l'écriture de programme sous la forme de module de taille limitée ne correspondant qu'à une seule fonction. Ces modules ne possèdent qu'un point d'entrée avec sauvegarde du contexte d'appel et un point de sortie où il restitue le contexte. Chacune de ces fonctions peut être associée à une procédure d'initialisation.

- **Utilisation d'un protocole d'appel [CHA92a]**

Une des principales causes d'erreurs en informatique temps réel provient de la mauvaise gestion des accès à des ressources matérielles ou logicielles depuis plusieurs contextes (tâches). Les techniques à employer consistent à écrire des requêtes au superviseur qui alloue l'accès à ces données (utilisation de sémaphore).

Il est également possible de compléter le protocole d'appel des sous programmes de manière à utiliser un code d'erreur transmis dans un registre ou une variable et remis à jour lors de l'exécution de la tâche appelée. Ce mécanisme permet au programme appelant de contrôler que sa requête a été correctement effectuée. Pour des sections de programme stratégique pour la sécurité (exemple : gestion d'une sortie), il est possible d'utiliser un « code d'accès » transmis au sous-programme qui identifie que la procédure appelante est autorisée à l'exécuter.

- **Choisir les bons formats de données**

Un bon nombre d'erreurs sont commises lors de l'écriture des programmes et l'utilisation de variables avec un format non adapté à leurs utilisations.

- *Le format des variables*

Le choix d'un format adapté pour les données, le respecter de ce format et l'utilisation de procédures de transtypes éprouvées améliorent considérablement la sécurité lors des manipulations de données. Le typage *fort* de variable se retrouve sur les langages évolués ayant pour objectifs l'obtention d'un programme sûr (ADA).

- *Les compteurs et pointeurs modulo*

L'utilisation de variable modulo est une bonne méthode pour éviter les débordements de compteur ou de pointeur ou de variable (gestion de liste, de tableau).

Exemple : Le stockage dans le tampon de réception d'une liaison série peut être obtenu par l'Adresse de base en 16 bits à laquelle on additionne un octet représentant le nombre de caractère dans le tampon. Le pointeur obtenu ne pourra dépasser l'adresse : Adresse de base + 255.

- *Les drapeaux*

L'utilisation d'un bit pour la représentation des drapeaux offre l'avantage d'une information compacte mais en contrepartie les risques de tester une donnée erronée sont multipliés par les

manipulations des bits environnants par d'autres sections du programme. Il est conseillé d'utiliser une redondance d'information en préférant un code sur un octet utilisant des informations complémentaires moins sensibles à l'altération d'un bit (exemple : utilisation des valeurs \$5A et \$A5 ou \$00 et \$FF ce qui permet de passer d'un à l'autre par complémentarité).

- ***L'initialisation des variables***

Toute variable d'un programme si elle n'est pas initialisée peut prendre une valeur aléatoire. Ce type d'événement n'est pas acceptable lorsque l'on désire obtenir un système déterministe. Il est donc conseillé d'initialiser les zones mémoires et de prévoir une initialisation systématique des variables (tâche spécialisée).

- ***Contrôler la validité des paramètres***

Une valeur non prévue ou un nombre de paramètres différent de celui prévu par le concepteur peut affecter le bon comportement de l'application, donner des résultats indésirables ou erronés et, dans le meilleur des cas, à une faute détectable (division par 0). Il est donc important avant d'utiliser des paramètres de contrôler leur validité (intervalle de valeur, nombre de paramètre).

3.1.2 Détecter les fautes

Du fait de leurs origines très diverses, la détection des défauts n'est pas simple à réaliser et il est souvent plus facile de détecter les conséquences (ou erreurs). Les effets de ces erreurs sont nombreux, mais l'expérience montre que la plupart se traduisent par une altération de la séquence d'instruction exécutée par le microprocesseur [CHA92b, HEL86]. La détection des erreurs peut être réalisée par :

- *Des autotests [TAS78]* : C'est une procédure effectuée à l'initialisation et éventuellement à intervalles définis qui teste à un instant donné le bon fonctionnement d'une ressource du dispositif. Ce type de test ne permet pas de se prémunir efficacement contre les fautes fugitives mais restent très utiles pour contrôler le fonctionnement des mécanismes d'autosurveillance.
- *Des autosurveillances* : Ce sont des mécanismes matériels et/ou logiciels surveillant en permanence la mission du dispositif. Ils sont capables de détecter les erreurs dans un délai très court.

3.1.2.1 Détecter les erreurs par des méthodes matérielles

- ***L'utilisation du dynamisme [BAR87]***

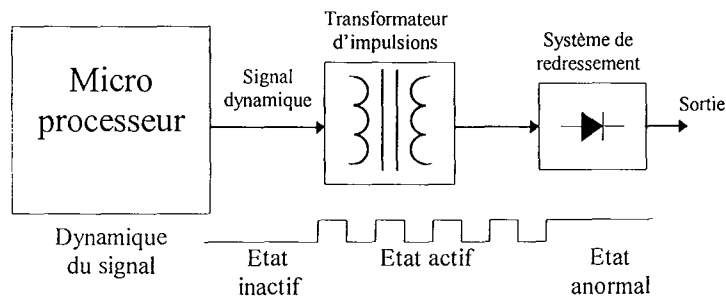
C'est sans doute une des méthodes les plus efficaces pour contrôler les erreurs au niveau des entrées/sorties. Elle est fondée sur l'utilisation de signaux de commandes porteurs d'informations dans leurs variations et non plus dans leurs états. L'utilisation de critère sur ces variations (fréquence, amplitude) permettent aux systèmes d'être plus sélectifs à leur signal de commande. Le dynamisme est une excellente méthode qui s'apparente au chien de garde mais qui n'est applicable que pour les entrées/sorties tout ou

rien. L'avantage de cette méthode est de rendre directement inactives les sorties du dispositif en cas de défaillance (l'état de repos doit être l'état de sécurité correspondant à la non transmission de l'information).

Le dynamisme nécessite du matériel supplémentaire pour transformer les commandes dynamiques en signaux de commandes. Une chaîne de commande est composée de :

- un transformateur à bande étroite (qui ne laisse passer que la bande de fréquences autorisées du signal de commande)
- un système de redressement.

Figure 3-2 « Principe du dynamisme »



Exemple : réalisation d'une porte ET sécuritaire [SAR91]

Cet exemple est utilisé dans les installations de sécurité câblées (SNCF). Elle utilise un oscillateur et un amplificateur accordé à la même fréquence. Les deux entrées sont les alimentations de l'oscillateur (Entrée A) et du circuit amplificateur (Entrée B). Ces deux éléments sont réalisés à l'aide de transistors, résistances et capacités. La sortie S est obtenue par redressement du signal généré par l'oscillateur et amplifié.

Figure 3-3 « Porte ET sécuritaire » d'après [SAR91]

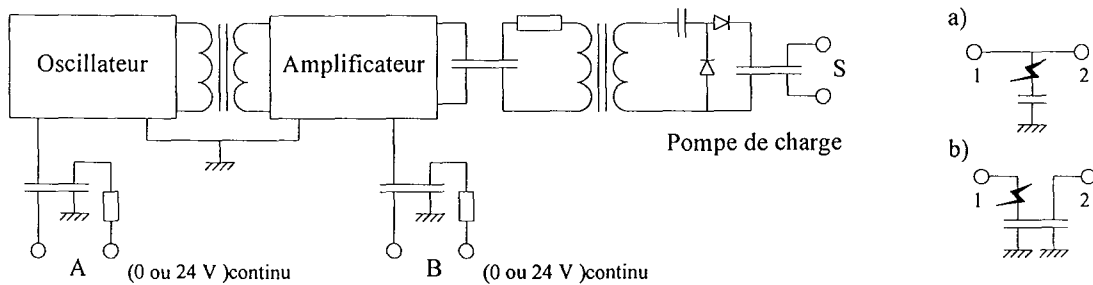


Tableau 3-1 « Fonctionnement de la porte ET sécuritaire »

Entrée A	Entrée B	Sortie	Commentaires
Non alimentée	Non alimentée	0	L'oscillateur et l'amplificateur ne fonctionnent pas, aucun signal n'est transmis à la sortie
Non alimentée	Alimentée	0	L'oscillateur ne fournit aucun signal à l'amplificateur qui ne transmet donc rien à la sortie
Alimentée	Alimentée	1	L'oscillateur fournit son signal à l'amplificateur qui le transmet à la sortie
Alimentée	Non alimentée	0	L'oscillateur fournit un signal à l'amplificateur qui ne transmet rien à la sortie

Remarque: l'utilisation de condensateurs quadripolaires

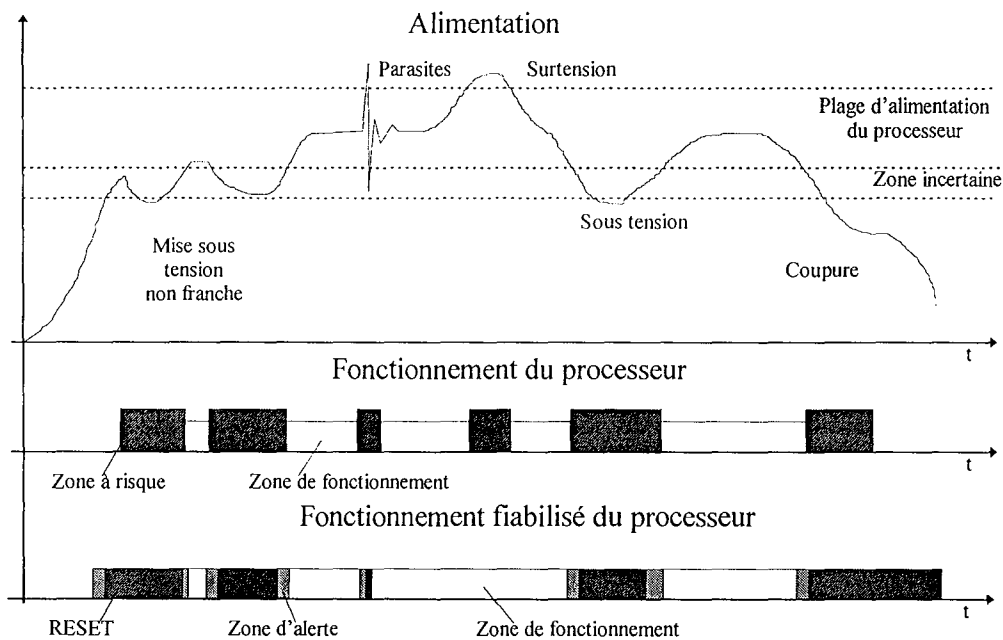
Ce type de condensateur est très utilisé dans les montages utilisant le dynamisme car elle permet de s'affranchir des effets de la perte de la fonction capacité (rupture d'une connexion).

- *Figure a* : Avec un condensateur bipolaire, lors de la rupture d'une connexion de la capacité, le potentiel à la borne 1 et 2 est le même et la capacité ne peut plus jouer son rôle de filtrage.
- *Figure b* : Avec un condensateur quadripolaire, la transmission du potentiel entre 1 et 2 s'effectue par la capacité. Lors de la rupture d'une connexion, le potentiel de 1 n'est plus transmis à 2.

• *Le contrôle de l'alimentation [ALL89] [MAX94]*

La fiabilisation d'un système à microprocesseur passe par une bonne qualité d'alimentation. Et même si cette alimentation est propre et stable il faut encore s'assurer du bon démarrage et du bon arrêt du système. La figure suivante ces différents cas.

Figure 3-4 « Les défauts de l'alimentation »



Ces différents phénomènes peuvent conduire à des comportements aléatoires (altération de données, exécution de programme hasardeuse) et avoir des effets néfastes (destruction d'une ressource). Ces risques sont d'autant plus importants du fait du mélange des technologies des circuits et de leurs différentes tolérances d'alimentation (processeur fonctionnant entre 3 et 5V, périphériques fonctionnant entre 4 et 5V, rétention des mémoires à partir 2V).

Les solutions à ces problèmes passent par l'utilisation d'un composant capable d'indiquer aux circuits la validité de la tension d'alimentation et les prévenir en cas de coupure imminente. Ces

fonctionnalités sont offertes par les circuits *contrôleurs d'alimentations et de RESET*. Les fonctions de ces composants sont :

-La surveillance de l'alimentation et la gestion de l'arrêt et de la mise sous tension.

Elle permet un démarrage et un arrêt propre en fournissant un signal mis en forme indiquant la validité de l'alimentation (situation dans une plage normale de fonctionnement). Ce signal est utilisé pour geler le système si l'alimentation n'est plus valide (gel du processeur, gel des accès aux périphériques et aux mémoires, gel des fonctions des périphériques). Cette fonction passe par l'utilisation du signal d'initialisation RESET.

- La fonction alarme.

Un signal d'alarme est généré pour prévenir du risque de coupure de l'alimentation par détection d'un seuil de tension légèrement supérieur à la tension d'arrêt. Ce signal peut déclencher une interruption et brancher une procédure de mise en position de repli sécuritaire (arrêt des entrées sorties, sauvegarde des données).

- Le contrôle de l'alimentation sauvegardée.

Pour offrir au système le temps nécessaire à la mise en position de repli, le circuit gère une alimentation sauvegardée qu'il commute sur une source auxiliaire avant la coupure de l'alimentation principale (batterie, condensateur de forte valeur).

Le circuit de contrôle de l'alimentation est le premier des mécanismes de surveillance minimum à implanter.

• ***Le chien de garde [CHA93]***

Les défauts détectés par le chien de garde seront ceux qui provoquent soit la disparition de l'émission par le logiciel d'une ou plusieurs informations matérielles, soit une variation de l'intervalle de temps séparant ces informations. Il est sans aucun doute le deuxième mécanisme de sécurité minimum à intégrer sur les dispositifs à microprocesseur.

Il existe deux types de chien de garde :

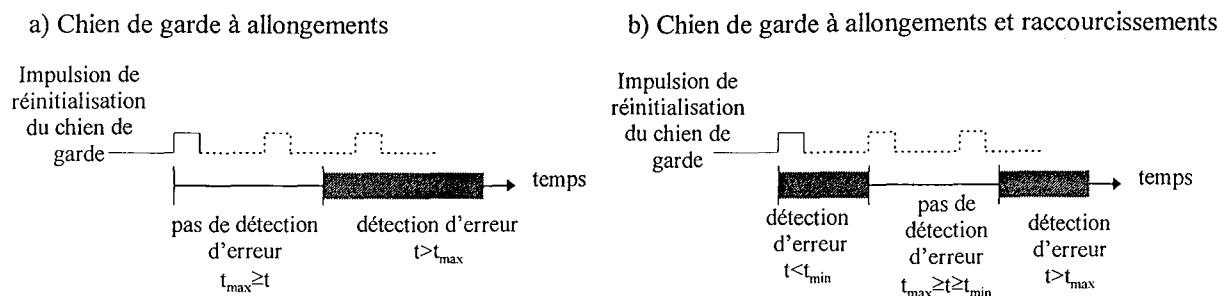
- Le chien de garde à allongement

Le contrôle est effectué à l'aide d'un monostable réarmable qui déclenche s'il n'a pas été réarmé depuis un temps inférieur au temps de référence. Ce type de dispositif ne détecte que l'allongement de la durée d'exécution des instructions.

-Le chien de garde à allongement et raccourcissement

Le contrôle est effectué à l'aide d'un circuit qui vérifie que le temps mesuré se situe dans un intervalle de temps. Il permet de détecter les allongements et raccourcissements de la durée d'exécution des instructions

Figure 3-5 « Les deux variantes de chien de garde »

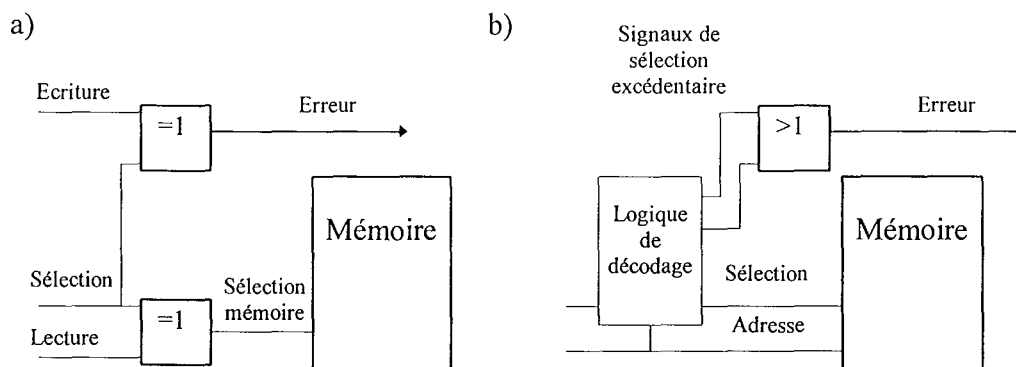


• Détecter les accès erronés aux périphériques

Les méthodes les plus simples consistent à détecter les tentatives de violations (écriture sur une donnée autorisée en lecture, situation de conflit due à une sélection multiple de boîtier, adressage d'une zone mémoire non existante). Les limitations d'accès les plus courantes sont :

- La restriction à la lecture d'un boîtier qui détecte les tentatives d'écriture sur un périphérique à lecture seule (Apparition d'une erreur si *sélection* et *écriture*, figure a)
- La limitation de la zone d'adressage d'un périphérique : Elle est réalisée par le contrôle des bits de poids forts de l'adresse lors de la sélection du boîtier et revient à décoder les champs d'adresse non utilisés. (Apparition d'une erreur si *sélection d'une adresse inexistante*, figure b).

Figure 3-6 « Détection des erreurs d'accès à un boîtier »



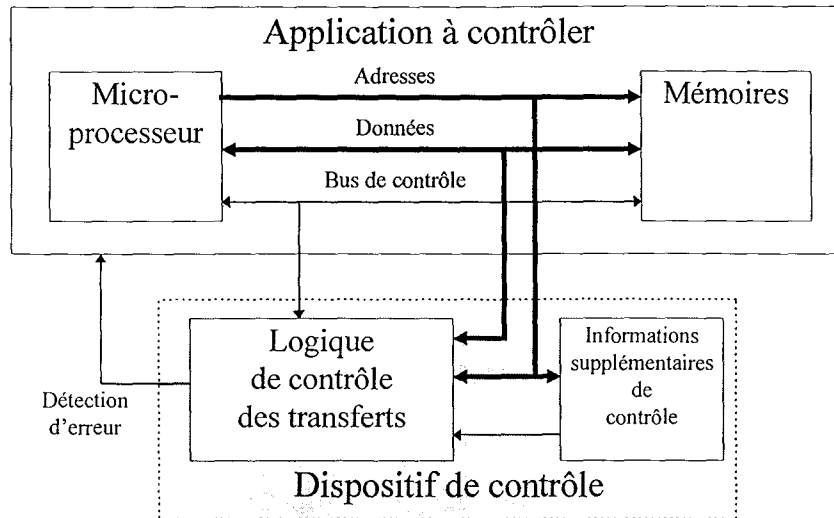
- L'utilisation d'un protocole d'échange entre les périphériques : Certains bus utilisent un protocole précis pour l'accès aux différents circuits. Ces protocoles matériels prévoient une réponse du périphérique qui acquiesce la requête présentée par le processeur. En cas de non-réponse, la logique provoque une indication d'erreur d'accès au périphérique.

Exemple : L'accès à une mémoire par le processeur 68000 est réalisé après que cette dernière réponde par un signal de reconnaissance autorisant l'accès (signal DTACK).

- **Le contrôle de la lecture et écriture des données**

Le contrôle des accès à la mémoire n'est pas une chose suffisante pour assurer que la donnée transférée est valide. Pour ce faire il faut surveiller et valider sa valeur durant son transfert. Ces fonctions sont réalisées par des circuits additionnels (ASIC ou circuit Logique Programmable [JEA93]). La structure du circuit est la suivante :

Figure 3-7 « Schéma d'un système de contrôle de transfert mémoire »



L'information complémentaire la plus simple est la parité, une duplication de la donnée codée ou non (redondance), un CRC ou un code de correction d'erreur (le plus utilisé est le code de HAMMING [HAM50, BAC82]).

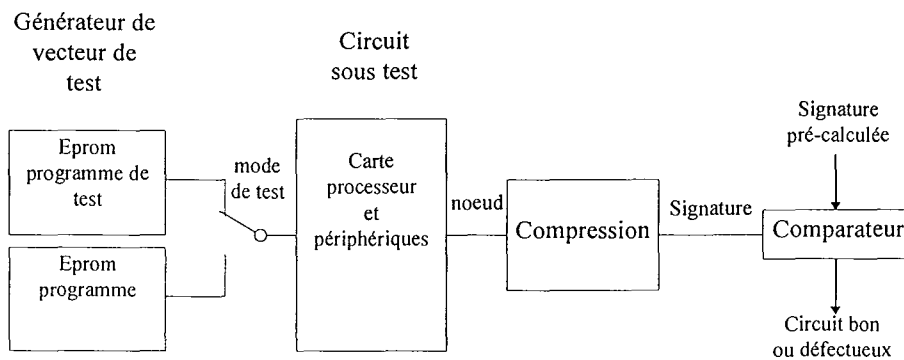
Une des applications de cette technique est la surveillance par analyse de signature.

- **Le contrôle précis d'une séquence d'instructions [KAC93]**

A l'origine, l'analyse de signature a été introduite par HEWLETT PACKARD en 1977 [FRO77,CHA92] pour le diagnostic des cartes numériques. La signature correspond à la compression par division polynomiale d'un flot d'informations circulant sur un noeud de tests. Le résultat est une information condensée représentative de l'ensemble de l'activité des signaux présents sur le noeud¹ testé. Ce flot est obtenu en réponse à un stimulus de référence (programme de test). La comparaison entre la signature observée et la signature théorique permet de localiser les éléments défectueux [IWA90]. La méthode la plus employée pour la génération de la signature est la division polynomiale [DAM91].

¹ noeud : Ensemble des signaux constituant le vecteur de test (données, adresses et signaux de contrôle).

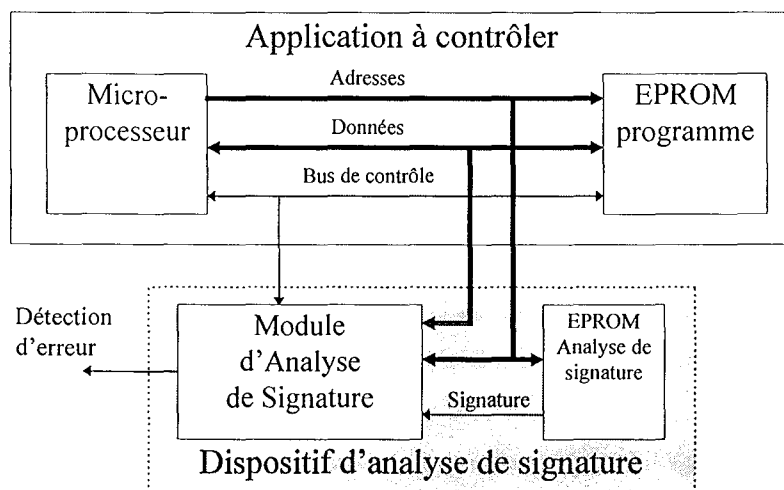
Figure 3-8 « Principe de l'analyse de signature »



Des extensions de cette méthode de test ont été créées pour permettre la vérification en fonctionnement des dispositifs à base de microprocesseurs. Nous prendrons pour exemple le Module d'Analyse de Signature de l'Institut National de Recherche et de Sécurité [KAC93].

Ce dispositif utilise un circuit programmable connecté au bus d'adresse et de donnée et une EPROM de référence contenant les signatures prè-calculées.

Figure 3-9 « Principe de l'analyse de signature par MAS » d'après [KAC93]



A chaque accès mémoire, le MAS teste la validité de l'accès (ce doit être une constante ou du code programme et non pas une variable) et détermine ainsi s'il doit le prendre en considération la valeur sur le bus d'adresse pour le calcul de la signature.

Les signatures de références sont composées d'un code d'instruction de deux bits et de la signature sur 6 bits. Le code d'instruction permet de différencier les traitements des constantes et des interruptions ou les traitements de réajustement (préchargement, initialisation) et de contrôle de signature. Le cas des interruptions nécessite un traitement spécial car c'est un événement qui se distingue par le fait qu'il est exécuté suite à un événement externe non synchronisé avec le déroulement du programme. Ce traitement nécessite la sauvegarde de la signature en cours et l'initialisation du calcul à effectuer pour cette

interruption. Pour simplifier ce traitement, il est possible de simplement stocker un code correspondant à la correction à appliquer à la signature en fin de l'interruption. Dans ce cas, le traitement de l'interruption n'est pas signé¹.

Exemple: fabrication d'une signature

Sur un système 68000 16 bits nous allons créer une signature 8 bits (l'adressage de la mémoire de signature s'effectue en ignorant le bit de poids faible A0). La signature est composée de :

- 2 bits de fonction

Code	Signification
00	remise à 0 signature
01	instruction
11	routine d'interruption (non signée), suspend le calcul
10	accès à des variables, suspend le calcul

- 6 bits de signature

La signature est une somme modulo 64 (6bits) de la somme successive des quartets du contenu des mémoires (15 24 a3 donne $\text{mod}(1+5+2+4+A+3)=19$).

Adresse	Code	Programme	Code	Somme	Commentaire	Signature
00001000	3000	debut move.w D0,D0	00	00	Remise à 0 de la signature	00
00001002	323c 1234	move.w #\$1234,D1	01	1E		5E
00001006	4ef9 0000 1006	toto jmp toto	01	01		4F
00003000	4240	irq1 clr.w D0	11		traitement en interruption, stoppe le calcul	C0
00003002	4c73	rte	11			C0

L'avantage de ces méthodes est une détection matérielle rapide (à chaque cycle) des défaillances avec un très fort taux de couverture de pannes. Elles nécessitent cependant une circuiterie additionnelle ainsi que des outils pour la création des signatures de références.

3.1.2.2 Détecter les fautes par des méthodes logicielles

Ces méthodes n'étant que logicielles, elles peuvent être rendues inefficaces en présence d'un dysfonctionnement touchant les ressources nécessaires à l'exécution de ces programmes (mémoire contenant le programme de test, bus, horloge ,microprocesseur) . Elles ne constituent donc qu'un appoint aux méthodes de détection matérielle.

- **Le test de l'unité centrale [TUV86]**

L'unité centrale est le premier élément à contrôler car il conditionne le bon fonctionnement de l'équipement. Ce test doit comporter au moins [TUV86,ABR79]:

¹signé : utilisé pour le calcul de la signature.

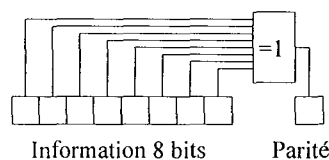
- *Un test des différents registres* pour vérifier l'aptitude d'écriture et de lecture des registres, leurs adressages, la diaphonie éventuelle entre différents bits d'un même registre ou entre les registres.
- *Un test des indicateurs d'état* : en contrôlant leurs mises à 1 et à 0.
- *Un test d'interrogation des indicateurs d'état* : par utilisation d'instructions conditionnelles.
- *Un test des capacités arithmétiques* : en vérifiant les différents types de calcul (opérations logiques, addition, multiplication ...).
- *Un test des instructions de branchement et d'accès à la mémoire avec les différents modes d'adressages possibles* (instructions de saut, de boucle et d'échange avec la mémoire).

• **Le test des mémoires mortes et non-volatiles**

Parmi les données les plus importantes stockées dans ces mémoires se trouve le programme du microprocesseur car une altération de la suite d'instructions conduit à la modification du comportement du système. Pour tester la fiabilité de ces données, les méthodes les plus classiques sont :

- *La création d'informations supplémentaires* caractérisant le contenu de la mémoire [CHA91, SAX90a, PEL80]. Les solutions les plus courantes sont :
 - *La parité* : La parité est calculée pour chaque information (mot de 8,16 ou 32 bits). Elle représente la parité du nombre de 1 ou de 0 utilisé pour la représentation binaire de la donnée. Le calcul peut simplement être effectué par un OU exclusif (XOR).

Figure 3-10 « Calcul de la parité »



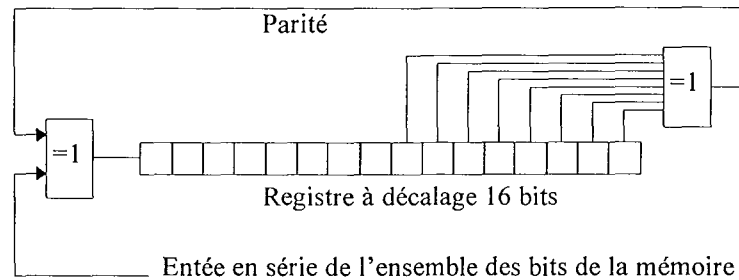
- *Les méthodes de sommation (checksum) :*
 - *La sommation en conservant la retenue* : L'information est constituée du résultat obtenu par la sommation de tout le contenu de la mémoire en conservant les retenues. La taille du résultat dépend alors du contenu de la mémoire.
 - *La sommation modulo* : L'information est constituée du résultat obtenu par la sommation de tout le contenu de la mémoire en ne conservant pas les retenues. Le résultat contient moins d'informations que la précédente mais elle est de la taille fixée par le programmeur.
- *Les méthodes de C.R.C (Cyclic Redundancy Check):*

Ce terme traduit le fait que l'on réinjecte dans le calcul l'information déjà traitée (de manière redondante). La plupart du temps, ce bouclage utilise les informations qui seraient perdues lors du calcul (retenue, résidus d'une rotation).

Exemples :

- Le CRC suivant est une information 16 bits utilisant le bouclage de la parité des 8 derniers bits du poids faible du registre à décalage contenant le CRC. Les informations sont entrées bit à bit de manière sérielle.

Figure 3-11 « Exemple de CRC 16 bits utilisant la parité »



- La division polynomiale : L'information est le reste de la division modulo 2 d'un polynôme constitué de l'ensemble du contenu mémoire divisé par un polynôme de référence. Le résultat est de la même taille que le polynôme diviseur.

Exemple : Si le polynôme de référence est $2^{12} + 2^5 + 2^0 = \$1021$ et le contenu mémoire est : « \$0123 \$4567 \$89AB », le CRC est le reste de la division $\$0123\ 4567\ 89AB / \1021 soit \$1002.

- La duplication des données [TUV86] : Le contenu de la mémoire est dupliqué dans deux endroits distincts (circuits mémoires différents) et leurs contenus peuvent être comparés en permanence. Les informations de la zone de contrôle peuvent être codées (complément à 2) de manière à augmenter la fiabilité du test.

• Le test de mémoires vives (RAM)

Elle sert de zone de stockage des variables et son altération conduit à la perte d'informations, ce qui peut conduire à un comportement aberrant du programme. Les autotests sont un moyen de vérifier cette ressource. Ils sont habituellement constitués d'une suite de lectures et écritures de valeurs de références. Le principal inconvénient de ces tests est que la plupart soient destructifs pour l'information contenue dans les mémoires.

Les erreurs les plus rencontrées sur ce type de mémoire sont des collages ou couplages entre les cellules, des défauts du décodeur et de la logique de lecture/écriture [MAR80]. Nous citerons deux tests, le premier retenu pour sa simplicité et le deuxième pour son efficacité [BAI80].

- Le test de l'échiquier : Des 1 et des 0 sont écrits et lus alternativement dans toutes les cellules de la mémoire RAM. Ainsi chaque cellule est vérifiée dans ces deux états et la non-influence sur les cellules voisines est vérifiée.

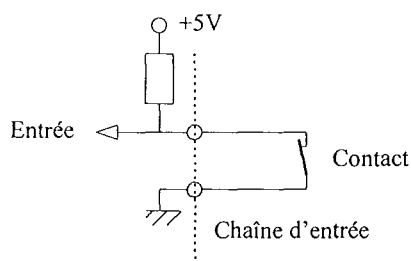
- *Le test du « 1 galopant » (Galpat)* : Il consiste à initialiser la mémoire à 0 puis pour chaque cellule à écrire la valeur 1, à contrôler que le contenu de toutes les autres cellules est nul et à vérifier après à chaque lecture que la cellule est toujours à 1. Ce test permet de contrôler le fonctionnement correct de tous les composants de la mémoire.

- **Tester les entrées/sorties et périphériques (ressources) [DEL93]**

Le test des périphériques n'est pas une chose facile car leur type et leur nombre est spécifique à l'équipement. De plus il reste difficile de tester une chaîne d'entrées ou de sorties sans l'utiliser (donc agir sur l'environnement). Des solutions sur mesure sont donc à appliquer selon les spécificités du circuit, les plus courantes sont :

- *le test des ressources matérielles n'ayant pas une action directe sur le monde extérieur* (compteur, registre),
- *l'utilisation des modes de tests du constructeur* des circuits périphériques (contrôle des connexions et des fonctionnalités des circuits de liaison série en utilisant le mode boucle),
- *la mise en oeuvre d'une position des tests/calibrages prévue par le concepteur* (acquisition de grandeurs tension ou fréquence de références),
- *une simple vérification des valeurs par défaut des entrées* possédant une position de repli connue (cet état doit permettre le contrôle de la chaîne d'entrée).

Figure 3-12 « Exemple d'entrée logique à position de sécurité égale à 1 »



Si la chaîne d'entrée est rompue ou que le contact n'est pas en position de repos, l'entrée est au potentiel +5V. Sinon elle est à 0 V.

- **Tester les mécanismes de surveillance [CHA92a]**

Parmi les tests les plus importants se trouvent ceux des mécanismes de sécurité. La méthode générale est de provoquer une faute détectable par le mécanisme à partir d'une situation de référence et d'appliquer un traitement spécifique lors de l'action de celui-ci.

Exemples :

- Ne pas actionner le Chien de garde pendant une durée supérieure au temps de détection.
- Tester une zone mémoire avec un mauvais CRC.
- Accéder à des adresses non disponibles ou tenter de violer l'accès à un périphérique (écriture d'une ROM)

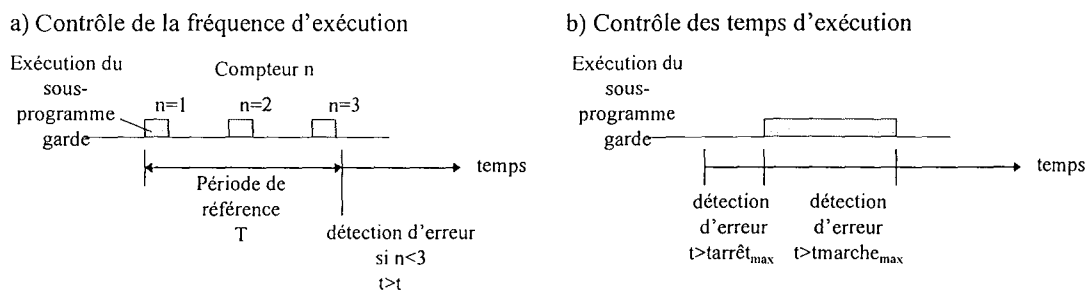
- **Surveiller le déroutement du programme [CHA92b]**

Même si un décodage judicieux des boîtiers mémoire a été réalisé, une altération d'un pointeur d'instruction ou une erreur de programmation peut adresser des zones mémoires non valides (erreur détectable par le décodage des boîtiers) ou une zone ne contenant pas de code programme. C'est pourquoi il est conseillé de remplir ces zones mémoires par des codes provoquant la détection d'une instruction illégale (si le processeur le permet) ou un branchement à une procédure spécifique pour le traitement de l'erreur.

- **Surveiller l'exécution des sous-programmes [CHA92b]**

La vérification de l'exécution régulière d'un sous-programme peut être réalisée par des compteurs (fréquences) ou drapeaux (temps d'exécution) contrôlés périodiquement à des valeurs de références. Les drapeaux sont très utiles pour la détection des boucles sans fin en exploitant la durée de leur état *en exécution*. Ce principe est similaire au chien de garde mais dans sa version logicielle (ne peut donc pas garantir la même sécurité que des chiens de garde matériels).

Figure 3-13 « Le contrôle de l'exécution des sous-programmes »



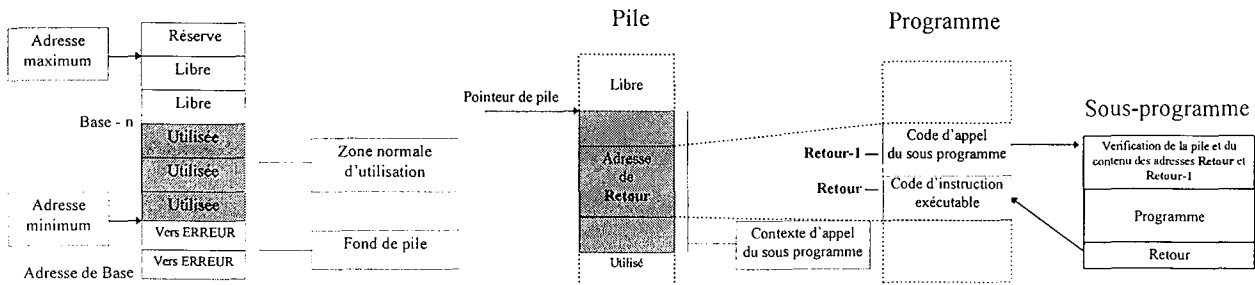
- **Contrôler les appels des sous-programmes et de la pile**

Pour détecter une exécution parasite d'un sous programme, une macro-instruction d'entrée est chargée un contrôle :

- *du pointeur de pile* : vérification que la valeur du pointeur se situe dans une plage autorisée, il ne doit être ni trop élevé (débordement de pile causé par des interruptions mal acquittées ou multiples, nombre d'appel à des sous-programmes trop important), ni trop faible (acquiescement d'interruption ou d'un retour de sous programme inattendu). Cette détection peut être réalisée par le remplissage du fond de la pile par un retour à un programme de gestion d'erreur ou par une trame générant une erreur spécifique du processeur (la mise en oeuvre de cette protection n'est pas toujours possible).
- *l'adresse de retour contenu sur la pile* : vérification que le contenu de l'adresse de retour contient du code programme,
- *vérification que le code précédent l'adresse de retour* est bien le code d'appel du sous-programme.

Ces vérifications peuvent être mise en oeuvre à l'aide d'une macro-instruction exécutée lors de l'entrée dans un sous programme

Figure 3-14 « La contrôle de la pile et de l'appel d'un sous programme »



3.1.3 Réagir en cas de détection d'erreur

Le schéma présenté dans ce paragraphe reprend les différents chemins possibles pour effectuer le traitement d'une l'erreur après sa détection, le but étant d'apporter un comportement défini à l'équipement en réaction à une faute.

- **Les sources d'événements**

Elles représentent les diverses origines d'indication d'erreur. Elles proviennent des mécanismes de détection logiciel et matériel.

- **Les sources internes au microprocesseur :**

- *Les erreurs matérielles critiques* qui sont des défaillances mettant en danger le bon fonctionnement du microprocesseur (erreur de bus, perte d'horloge).
- *Les erreurs dans le déroulement du programme* constituées des différentes erreurs qu'est capable de détecter le processeur durant sont fonctionnement (div par 0, détection d'un débordement d'un registre, instruction illégale).

- **Les sources matérielles externes au microprocesseur**

Elles sont le résultat du traitement des mécanismes de contrôle matériels externes (chien de garde, système d'analyse de signature, surveillance des accès mémoires). Elles sont transmises à l'application par le signal *RESET* pour les erreurs les plus critiques, les interruptions matérielles ou par le biais des entrées logiques associées à une fonction logicielle de surveillance.

- **Les sources logicielles**

Elles sont le résultat de traitements effectués par le programmeur.

- **Les différents traitements de l'événement**

- **Le traitement matériel**

Il correspond au travail effectué de manière automatique par le processeur et comprend généralement la sauvegarde d'informations sur le contexte (registres) et quelquefois sur la défaillance (drapeaux, données), puis le branchement à un programme de traitement. Si l'erreur détectée est de type à compromettre le branchement à une procédure (problème sur le bus, perte d'horloge), le système traite alors matériellement son comportement (position de repli, tentative de réinitialisation matérielle, nouvelle tentative d'accès à la ressource).

- *L'initialisation à chaud (signal RESET)* : cette solution matérielle est utilisée lorsque l'erreur à traiter est considérée comme irrécupérable ou lorsqu'il n'existe pas d'autre alternative possible par le matériel ou le logiciel.

- *L'utilisation des interruptions*

Les interruptions offrent un moyen simple et rapide pour programmer un comportement du type *réflexe* à un événement, surtout lorsqu'il existe des mécanismes de hiérarchisations et d'autovectorisation.

Exemple : Tâche de sauvegarde lors d'une pré-détection de coupure d'alimentation.

Remarque : Les microprocesseurs comportent généralement une entrée d'interruption prioritaire non masquable (NMI).

- *Le traitement logiciel*

Il correspond aux programmes de traitement associés aux événements où le concepteur a programmé le comportement à tenir en présence du type de défaut détecté. Ces traitements peuvent avoir un comportement autonome (programme de contrôle interne ou d'une entrée logique) ou être branchés par un traitement matériel (routine de réception d'interruption).

- ***Les comportements possibles***

Ils se classent en trois familles selon leurs conséquences sur le fonctionnement de l'équipement :

- *L'initialisation à chaud du système* qui est adaptée au traitement des erreurs critiques nécessitant une mise en repli. Elle peut être complète ou partielle en fonction des renseignements disponibles sur l'erreur.

- *L'initialisation d'une partie de l'application* qui Elle permet de tenter la remise en état de la partie en défaut (logicielle ou matérielle) et minimiser ainsi son influence sur le comportement de l'application.

- *Un traitement ponctuel de l'erreur* qui se traduit habituellement par de nouvelles tentatives d'accès à la ressource (réexécution du programme, du cycle bus, récupération de données) et l'adaptation du comportement de l'application (déclaration de ressource en défaut, changement de mode de marche).

3.1.4 Valider la sûreté de fonctionnement

Cette validation est généralement constituée d'un ensemble de tests les plus représentatifs des fautes probables du dispositif. Ils sont constitués par une suite de procédures d'essais qui peut être normalisée.

Les techniques d'injections de pannes apportent une méthode très simple pour évaluer l'intégrité d'un système : sur la base d'un nombre total de pannes injectées au cours d'une campagne d'essais, il suffit de calculer le pourcentage de cas où il est observé un comportement correct [MAH87].

Suivant la profondeur de l'évaluation de l'intégrité désirée, l'essayeur peut injecter des pannes à différents niveaux du système; celles-ci sont mémorisées de manière à limiter la complexité des manipulations et à provoquer des phénomènes réversibles (aucune réparation requise). Voici une liste de pannes les plus couramment pratiquées lors des essais, de la plus *grossière* à la plus *fine* :

- *Ouverture complète d'un connecteur.*
- *Ouverture d'une piste de connecteur* : la carte est placée sur un support allonge ou il est possible d'intervenir.
- *Retrait d'un circuit intégré* : généralement possible sur les versions prototypes.
- *Panne sur une broche de circuit intégré* : forçage de la broche à l'état logique 0 ou 1 à l'aide de l'outil SCORPION de l'EDF [EDF92] ou DEFOR de l'INRS [VIG93]. Ce dernier fonctionne en connectant les pattes du circuit intégré à tester 2 à 2 puis aux potentiels de l'alimentation. Ces manipulations simulent les fautes de *collage* ou de pontage entre deux signaux.
- *Panne dans l'exécution du logiciel* : données erronées injectées par émulation d'une PROM à l'aide de l'outil DEFI de l'INRS [GER86].
- *Les tests de Compatibilités Electro-Magnétiques* : Ils sont fondés sur l'injection de perturbations électromagnétiques conduites ou rayonnées sur l'équipement avec pour objectif de rechercher les fréquences susceptibles de provoquer des fautes. Ces tests sont prévus par la norme européenne pour le marquage CE (Voir annexe 1).

Ces méthodes ne permettent jamais l'évaluation complète du système mais en facilitent le développement en complétant les tests par des essais qui n'ont pas été pris en compte au niveau de la création du produit. Les informations fournies par ce type d'essais ne peuvent intervenir que lorsque le système est en partie réalisé, donc bien après la phase de conception préliminaire. Mais l'intégration des données correspondantes ne peut qu'améliorer et affiner les hypothèses prises lors de la conception.

3.2 Les tendances des microprocesseurs

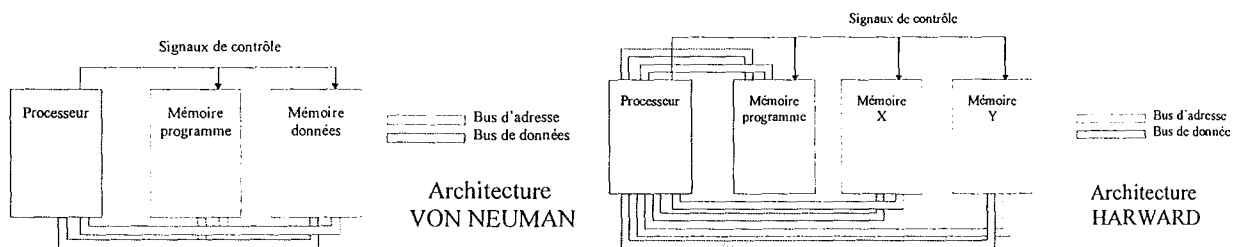
Depuis la définition de la machine séquentielle de Von NEUMANN¹ (1945) [MOR87], la puissance de calcul et les caractéristiques des microprocesseur ne cessent d'évoluer [LIG87]. La diversité des applications fait naître différentes architectures et un grand nombre de références de puces. Aussi, avant de choisir un processeur allons nous étudier les tendances des processeurs pour pouvoir les comparer.

3.2.1 Caractéristiques générales

- **Les architectures de bus [ZAK81,LEB80]**

- *L'architecture Von NEUMANN ou séquentielle*, où le programme et les données sont stockées dans un même espace mémoire, les flots d'instructions et de données se suivent séquentiellement sans jamais se superposer.
- *L'architecture HARWARD*, qui résulte de la séparation physique de la mémoire et des bus de données et de programme. Les opérations sur ces bus peuvent être réalisées indépendamment ou simultanément. Cette structure permet un temps très faible d'accès (parallélisme). Elle est utilisée dans le cas de calculs intensifs sur différents (traitement du signal, DSP²).

Figure 3-15 «Les architectures VON NEUMANN et HARWARD (DSP 56000 de Motorola) »



- **Les dispositifs d'accélération**

Pour améliorer les performances de ces architectures, les deux mécanismes d'accélération les plus utilisés sont *le pipeline*, qui permet au processeur d'anticiper la lecture et le décodage des instructions, et *l'antémémoire ou mémoire cache* (mémoire rapide accessible en 1 cycle horloge), utilisée pour le stockage des séquences de programme et des données auxquelles le processeurs accède de manière répétitive ou fréquente (boucles, calculs).

¹La définition d'une machine séquentielle a été donnée par J. Von NEUMANN, au laboratoire de Los Alamos aux Etats-Unis, vers 1945.

²DSP : Digital Signal Processor, processeur digital de signal

- **Le jeu d'instructions**

Plus les instructions sont nombreuses et complexes, plus leur décodage et leur exécution prennent du temps (complexité du micro-séquenceur), aussi existe-t-il deux tendances :

- Les processeurs CISC (*Complex Instructions Set Computer*) avec un grand nombre d'instructions dont certaines très évoluées (recherche de caractère, interpolation) nécessitent nombreux cycles horloge.
- Les processeurs RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) avec un jeu d'instructions élémentaires réduit. Cette architecture équipée d'un pipeline permet d'exécuter la plupart des instructions en 1 cycle horloge.

Exemples :

- Les 88000 MOTOROLA sont des processeurs RISC 32 bits. Ils sont construits selon l'architecture HARWARD équipée de pipelines. Leurs 51 instructions élémentaires, dont 12 dédiées au format à virgule flottante IEEE 754, sont pratiquement toutes exécutées en 1 cycle horloge.

- **Le principe des processeurs modulaires**

Pour répondre simplement aux besoins spécifiques des clients, les constructeurs ont développé un concept de microcontrôleur modulaire. La puce est constituée de l'unité centrale reliée à un bus interne sur lequel sont connectés des périphériques spécialisés. Cette solution permettent la réalisation de produits spécifiques en moins de 6 mois. Cette tendance est devenue générale chez toutes les nouvelles familles de microcontrôleurs et de DSP.

Parmi les modules offerts, nous retiendrons :

- l'intégration de mémoires de type RAM ou EPROM ou *flash* de taille de plus en plus importante (pouvant atteindre plusieurs dizaines de kilo octets),
- l'intégration de périphériques intelligents autonomes (comptage, communication).

Exemples :

- Les 68HC16 et 683xx MOTOROLA sont construits autour d'un bus interne qui relie le processeur à des périphériques intelligents (compteurs, convertisseur, communication). Un périphérique spécialisé assure le lien avec le bus externe.
- les DSP TMS320 en version microcontrôleur intègrent un grand nombre de périphériques (Contrôleur DMA, compteur 32 bits, liaison série, interface JTAG Boundary Scan, mémoire rapide, EPROM) et ne nécessitent qu'une mémoire externe.

- **Les modules d'intégration de périphériques**

Cette tendance correspond à la volonté de faciliter la connexion de périphériques extérieurs et d'accroître la souplesse et les possibilités d'entrées/sorties. Ces fonctionnalités sont réalisées par le Module d'Intégration Système (SIM). Il assure la génération des signaux de contrôle de bus et plus particulièrement

les signaux de sélection des boîtiers et la gestion de l'affectation des pattes du processeur non utilisées en signal d'entrées/sorties.

- ***Les DSP (Digital Signal Processor)***

Ils sont spécialisés dans le calcul sur des champs de données et permettent la manipulation de nombres à virgule fixe ou flottante. Ils utilisent l'architecture HARWARD avec pipeline et sont dotés d'instructions de calcul et de boucles câblées (multiplication, addition, accumulation). Leurs accumulateurs possèdent un nombre de bits supérieur à la taille des données pour effectuer des opérations avec le maximum de précision. Ces accumulateurs ont la particularité de saturer lors des calculs provoquant un dépassement de capacité. Ces processeurs nécessitent des mémoires rapides pour ne pas diminuer ses performances. Ils possèdent un jeu d'instruction spécialisé dans la manipulation des données flottantes ou fractionnaires.

Pour rendre leur utilisation facile, les constructeurs construisent leurs DSP avec le même principe que les microcontrôleurs à savoir l'intégration de périphérique, l'architecture modulaire et l'intégration des mémoires spécifiques.

Exemples :

- La famille 56000 MOTOROLA utilisent un format de données de 24 bits à virgule fixe et possèdent un accumulateur 56 bits.
- La famille TMS320 Texas-Intrument [TEX95b] offre des processeurs 16 ou 32 bits à virgule fixe ou flottante.

- ***L'intégration de fonction DSP***

Pour les applications qui associent les fonctions de gestion d'interface, de communication et de traitement du signal, les constructeurs ont conçu des solutions hybrides. Ce sont des gammes de processeurs VON NEUMANN intégrant certaines fonctionnalités des DSP (notamment un accumulateur étendu et des instructions câblées de multiplication et accumulation).

Exemples :

- Les 68HC16 de MOTOROLA sont du type CISC d'architecture modulaire. Les registres sont de 16 bits mais ils possèdent un accumulateur 36 bits et l'instruction Multiplication Accumulation (MAC).
- La famille Super-H de HITACHI offre des processeurs RISC 32 bits avec un accumulateur de 64 bits. Ils possèdent une multiplication 16x16 bits câblée ainsi que l'instruction MAC.

- ***Les associations de processeurs [COR96]***

Le besoin de puissance de calcul et de traitement du signal dans les systèmes de communication et multimédia ont donné naissance à de nouvelles références de boîtier intégrant un DSP et un processeur Von NEUMANN (généralement RISC).

Exemple :

- RISC+DSP : le SH-DSP HITACHI [ELE96]

Il est composé des noyaux SH-RISC 32bits et DSP 16 bits à virgule fixe partageant une mémoire rapide. Cadencé à 60 Mhz, il atteint des performances de 60 Mips en microcontrôleur et 120 Mips en DSP. Il utilise un flot d'instruction unique qui simplifie la gestion de la mémoire. cette architecture assimilable à une structure « monoprocesseur » permet de simplifier les problèmes de synchronisation que poserait l'emploi de deux processeurs indépendants. Sa structure de bus permet un accès comme un champ unique 32 bits ou deux champs X et Y 16 bits. La mémoire est divisée en pages adressées par l'adresse principale. Le reste de l'adresse est donné par l'offset principal pour le RISC ou l'offsetX et l'offsetY pour les champs XY du DSP.

Figure 3-16 « L'association RISC et DSP »

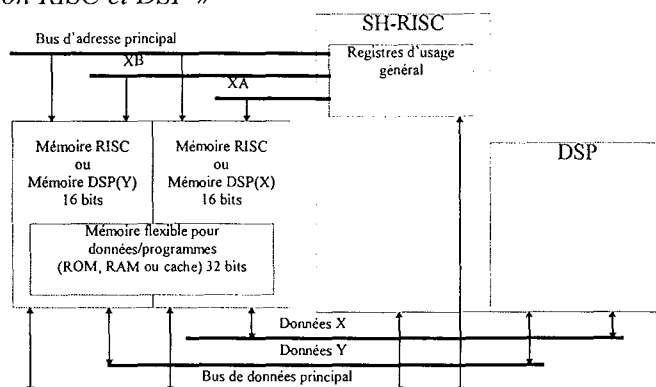


Tableau 3-1 « Les solutions DSP-Microcontrôleur »

Constructeur	Référence	Coeur DSP	Coeur CPU
Hitachi	SH-DSP	16 bits DSP	SH-RISC
National Semiconductor	32SF640		RISC superscalaire (3 instructions parallèles)
Motorola	68356	56002	68302
Philips	Custom	Real	8051 ou MIPS
Texas Instrument	TMS320C8x	ADSPx2 ou x4	32 bits RSIC
VLSI	Custom	Oak	ARM
Zilog	Z891265	16 bits DSP	Z-8

• Les processeurs flous

Ce type de processeur est orienté vers l'interprétation des règles des applications floues. Ils sont utilisés dans les applications de régulation rapides. Un ensemble d'outils logiciels spécifiques (simulateur, débogueur flou) permet à l'utilisateur de travailler directement sur l'aspect *fuzzy* de son application en faisant abstraction du processeur qui assure les transformations des entrées, l'évaluation des règles et le

calcul des sorties. Le « programme » de l'utilisateur a la forme d'une table de données décrivant les fonctions d'appartenance des entrées/sorties et les règles. Il existe deux tendances chez les constructeurs :

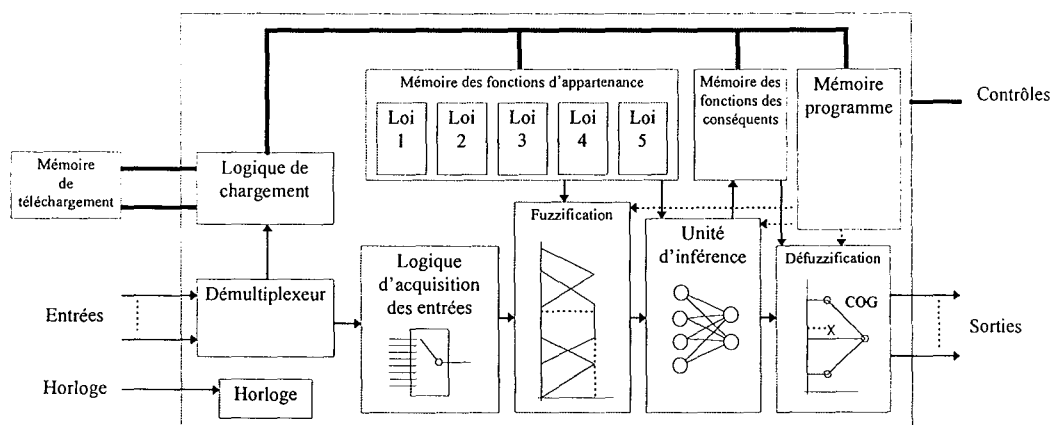
- La spécialisation d'un microcontrôleur de hautes performances qui a été spécialisé dans le traitement flou à l'aide d'un programme implanté dans son EPROM. Le processeur n'est pas prévu pour exécuter d'autres programmes utilisateurs.

Exemple : Le 81c99 SIEMENS utilise un noyau C166 équipé de convertisseurs analogiques/numériques 8 bits pour la conversion des entrées. Il permet d'évaluer 64 lois de 256 entrées et 64 sorties (soit 16384 liaisons possibles) et utilise la méthode du centre de gravité (CoG) pour calculer les sorties.

- Les processeurs dédiés, spécialement conçus et destinés aux traitements flous (architecture et format de données).

Exemple : Le WARP (Weight Associative Rule Processor) de THOMSON [THO94] utilise une architecture parallèle fonctionnant à 40 MHz. Il possède 6 zones mémoires internes qui sont téléchargées par une mémoire externe à l'initialisation. En fonctionnement il acquiert 16 entrées sur un bus de données 6 bits. Puis il assure leur « fuzzyfication » de manière parallèle à l'aide des 4 zones réservées au stockage contenant chacune 16 lois d'appartenances. Le résultat est transmis à une unité d'évaluation des règles placées dans la 5^{ème} zone mémoire pouvant stocker 256 règles dont chacune est constituée de 4 antécédents et une conséquence. Le résultat des 16 sorties est « défuzzyfié » sur 10 bits par la méthode du centre de gravité appliquée aux fonctions d'appartenance de la 6^{ème} zone. Les sorties sont retransmises à la mémoire externe.

Figure 3-17 « Diagramme bloc du WARP » d'après [THO94]



3.2.2 Les moyens de tests

Sur les systèmes à base de microprocesseur de haute intégration, la mise en oeuvre de moyens de test conventionnels (analyseur logique) est difficile voire rendue impossible par l'inaccessibilité des signaux

et le grand nombre d'états possibles. Pour faciliter le travail de l'utilisateur certains équipements intègrent des moyens de test matériel spécifiques au constructeur ou normalisés (utilisation de composants *Boundary Scan* permettant les tests via une interface normalisée *JTAG*¹),

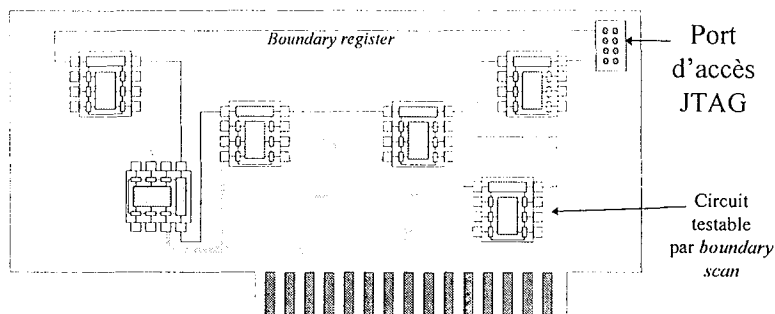
- **Les modes de tests des constructeurs**

Ils sont souvent réservés aux tests en usine. Ils ont pour objet de vérifier les bonnes interconnexions internes des signaux et la fonctionnalité des composants (registres, mémoires, périphériques) par la lecture de valeurs connues dans les registres et les mémoires ou en utilisant des logiques à base de registres série pour fixer et lire les états des bornes et permettre le contrôle de la réponse à une séquence de test.

- **La technique *BOUNDARY SCAN* [IEEE 1149.1]**

L'objectif de cette technique est de faciliter les tests après l'assemblage des composants sur une carte. Elle utilise le principe du registre à décalage. Un registre (*Boundary register*) est obtenu par la mise en série des différents composants possédant l'interface *Boundary Scan*. Il est piloté par une interface au standard *JTAG*.

Figure 3-18 « Carte intégrant le test par technique *Boundary Scan* »



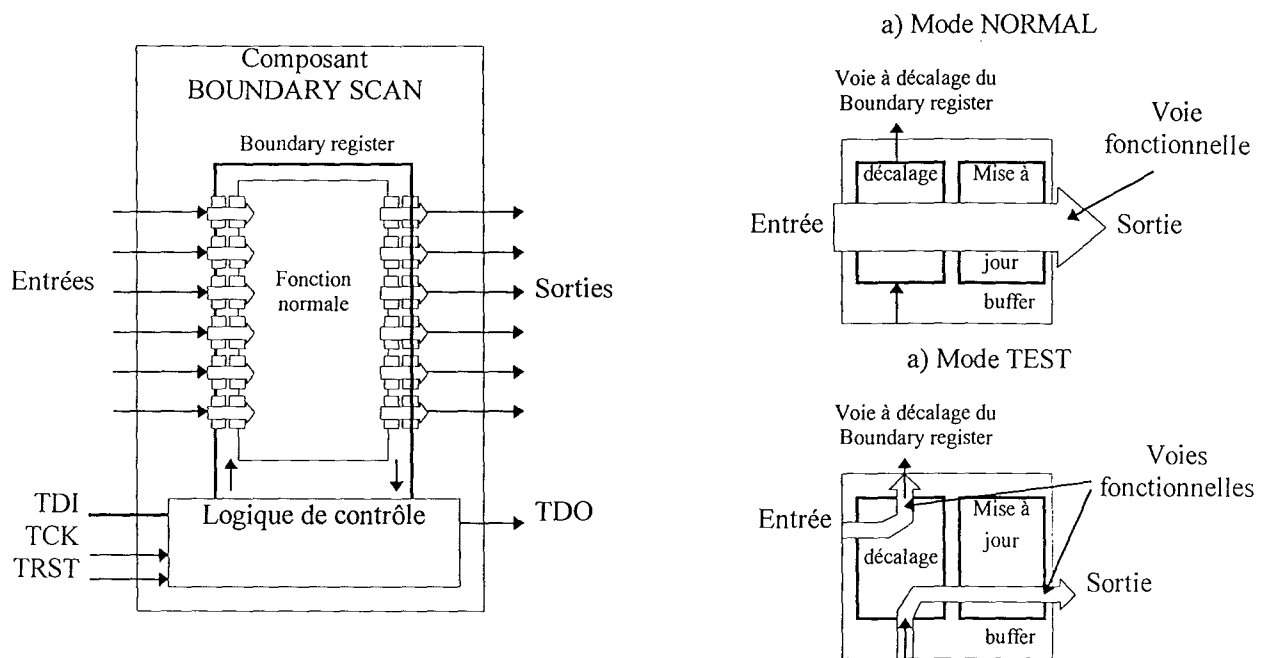
- Les composants *Boundary Scan*

C'est un composant équipé de registres intermédiaires (bascules) sur ses entrées/sorties et d'une logique spécialisée assurant leur gestion. Les registres intermédiaires sont reliés de manière sérielle et peuvent être lus ou écrits via la liaison *JTAG*. Ils possèdent deux modes de fonctionnement :

- Le *mode normal* (transparent) qui permet au composant de fonctionner. Il permet d'échantillonner les signaux fonctionnels et de lire les bascules pendant le fonctionnement du composant (*figure a*). Ces bascules peuvent également être écrites pour les prépositionner en vue de l'insertion d'un état dans le cycle de fonctionnement.
- Le *mode de test* qui permet la capture et le forçage des états des signaux fonctionnels (*figure b*).

¹ JTAG : Join Test Action Group

Figure 3-19 « Le principe du test logique Boundary SCAN » d'après IEEE-1149.1



- L'interface JTAG

Elle se présente sous la forme d'une liaison série 4 fils (Emission, réception, horloge et initialisation) et sert à injecter ou capturer des combinaisons binaires (vecteur de tests).

Cette technique a pour principale vocation de tester simplement la connectique ainsi que la fonctionnalité et signaux inaccessibles de certains composants (processeurs, périphériques). Mais elle autorise également la capture des états en cours de fonctionnement. Pour optimiser les tests, une carte peut être composée de plusieurs canaux.

Exemple de circuit intégrant l'interface JTAG :

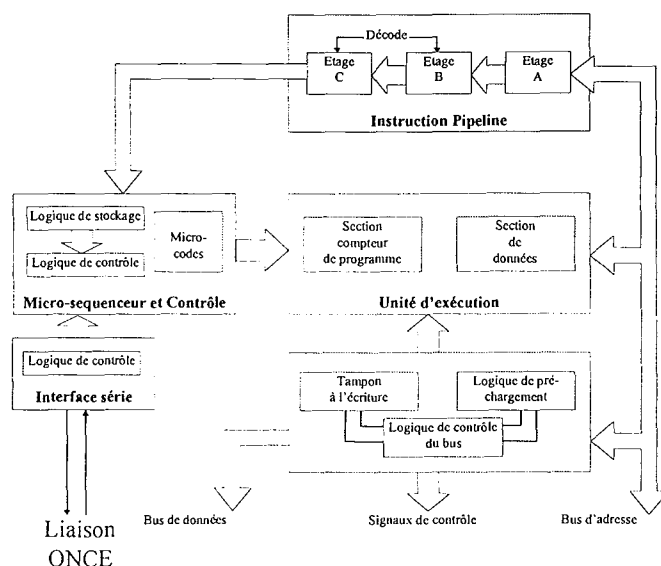
- Le verrou SN54F245 TEXAS INSTRUMENTS existe en version JTAG sous la référence SN54BCT8245

• La liaison ONCE (On Chip Emulation)

Le processeur possède une logique d'émulation intégrée permettant d'insérer des commandes dans le micro-séquenceur. Ces commandes élémentaires de lecture/écriture dans la mémoire ou les registres sont envoyés par une liaison série *ONCE*¹ spécialisée et sont insérées dans le flux d'exécution des instructions. Elles permettent au programmeur de posséder un lien direct et transparent avec le processeur; cette liaison est exploitée par les débogueurs d'arrière plan (*background debugger*).

¹ ONCE : ON Chip Emulation, émulation sur la puce

Figure 3-20 « Diagramme bloc du CPU32 »



Exemples :

- les développements à base de processeurs DSP56002 et de la famille 683xx de MOTOROLA sont équipés d'une prise standardisée de 10 contacts qui permettent le développement et la connexion d'un débogueur d'arrière plan.

3.2.3 Les moyens de développements

- **Les émulateurs ICE** (In Circuit Emulator)

Les émulateurs ICE sont des émulateurs faible coût qui prennent la forme de sondes intelligentes qui se connectent à la place du processeur sur l'application cible. Leurs fonctions et la simplicité du matériel (certains fonctionnent sur une liaison série RS232) permettent d'obtenir des coûts beaucoup moins importants que les émulateurs standards. Cette philosophie existe principalement chez INTEL.

- **Les logiciels de simulation**

Dans certains cas, le travail de test et de déverminage peut s'effectuer par des méthodes de simulation. Cette tendance s'est généralisée pour les gammes de petits processeurs qui n'intègrent pas de facilité pour le débogage (PIC 16 MICROCHIP, ST6 THOMSON) ou les applications qui nécessitent des simulations (applications à base de logique floue).

- **Les logiciels d'aide au développement**

Pour simplifier la mise en oeuvre de leurs produits, certains constructeurs proposent des plates-formes logicielles intégrant un grand nombre de fonctions d'aide au développement. Elles vont de l'aide hypertexte contenant toutes les informations sur le processeur cible au logiciel d'aide à la configuration générateur de code. L'objectif étant de simplifier le travail de prise en main et de configuration en offrant une assistance permanente.

Exemple :

-ApBUILDER d'INTEL pour la famille 196 et 386 travaille sous l'environnement WINDOWS. Il sert de plate-forme de développement et contient une documentation hypertexte des différents produits ainsi qu'un système expert d'aide à la configuration capable de générer le code source C ou assembleur pour la configuration des périphériques.

3.3 Cahier des charges

Les points ci-dessous sont ceux qui ont été pris en compte pour la création de la carte industrielle Micro-Power.

- **Le microprocesseur** doit permettre :

- une gestion de type multitâche ou d'interruptions fréquentes provenant de sources multiples,
- des calculs soutenus,
- des développements en langages évolués avec des outils de développement standards,
- la détection des erreurs (matérielles et logicielles),
- le pilotage en temps réel des commutateurs de puissance.

- **Les mémoires**

La carte doit posséder un volume suffisant de mémoire pour satisfaire aux besoins des applications en matière de programme et de données. Les données pourront être fixes, volatiles ou sauvegardées.

- **La gestion du temps**

La carte doit être capable de gérer des bases de temps rapides ainsi que l'horodatage des événements.

- **La sécurité**

La carte est munie de dispositifs portant les noms de *gestion du RESET* et *Chien de Garde*. Les fonctions requises sont:

- démarrage fiable à la mise sous tension,
- redémarrage à chaud sur commande manuelle,
- mise en position de repli lors d'une légère baisse de la tension d'alimentation annonçant une coupure,
- redémarrage en cas d'erreur du programme.

- **Les communications**

Nous les choisissons de type asynchrone pour la facilité de mise en oeuvre et de test. Elles sont destinées au pilotage des réseaux de terrains (exemple : liaison RS485 pour protocole ModBUS). Elles doivent pouvoir soutenir des débits de données rapides. Une liaison secondaire sera réservée au dialogue

avec l'opérateur. L'extension à l'aide de circuits intégrés spécialisés (tel que FIP-ART¹) sera toujours possible.

- ***Les possibilités d'interfaçage***

La carte doit posséder en version standard un nombre d'entrées/sorties suffisant pour répondre au besoin des réalisations et permettre la connexion simplifiée d'extensions (mémoires, périphériques externes).

- ***La mise en oeuvre***

L'implantation de la carte sur l'application doit s'effectuer à l'aide de connectique la plus simple possible avec le minimum de coût. Le développement et la mise au point doivent pouvoir s'effectuer à bord de l'équipement dans sa configuration réelle sans nécessiter d'émulateur coûteux.

- ***Les contraintes industrielles***

La réalisation de la carte doit prendre en compte les impératifs industriels et les contraintes du marché des composants. Ceux-ci seront autant que possible multi-source, de référence bien installée sur le marché et d'un coût raisonnable. Destinée à être un produit de série, la carte pourra être conçue avec des technologies telles que les Composants Montés en Surface, circuit imprimé multicouche, fabrication robotisée. Le but est de ne plus avoir à utiliser ce type de technologie sur le reste de l'application.

3.4 Les choix

Les choix présentés sont ceux effectués lors du développement de la carte Micro-Power. Ils sont orientés par l'approche « macro-composant » de la carte qui doit se suffire autant que possible à elle même en matière de fonctionnalité et de matériel.

3.4.1 Le processeur

Pour effectuer le choix du processeur nous avons procédé à une première sélection sur les critères suivants:

- processeur de 16 ou 32 bits avec une bonne puissance de calcul,
- approche microcontrôleur (intégration de périphériques).

- ***Les processeurs retenus***

Les i186, 196 d'INTEL

Ces références bénéficient d'un très fort support de développement (logiciel d'aide à la programmation, outil de développement aux prix raisonnables).

¹FIP-ART : coprocesseur de communication intégrant tout le protocole de communication FIP (exemple le DPS 50242 eA de CEGELEC [CEG90])

-Les *i186* : datent de l'époque du 8086. Ces références sont munies de canaux DMA. Elles sont destinées aux applications de communication nécessitant beaucoup de calcul (modem intelligent, téléphones cellulaires). Ils équipent la majeure partie des cartes Ethernet disponibles sur le marché.

-La famille *196* : Elle est riche en convertisseurs analogiques/numériques et en contrôleurs d'interruptions intelligents. Elle est typiquement dédiée au contrôle de procédé pour l'industrie.

Les compatibles 386 embarqués

Ils offrent l'avantage d'être compatibles avec les ordinateurs personnels (PC) de bureau et leurs outils de développement. Ils reproduisent l'architecture d'un PC (DUART, gestionnaire de port PCMCIA, contrôleur d'interruption) avec l'approche des microcontrôleurs modernes (intégration des périphériques, présence de chien de garde). Nous retiendrons les *i386EX INTEL* et les *ELAN AMD*.

La famille 6833X et 68HC16 de MOTOROLA

Deux gammes de processeurs peuvent être dotées d'un deuxième processeur RISC pour la gestion de microprogramme de gestion du temps sur 16 canaux (module Time Processor Unit).

- Les *68HC16* : concurrents des *i196*, ils sont des dérivés des *HC11* avec lesquels ils restent compatibles. Ils utilisent une construction modulaire autour de l'unité centrale CPU16 possèdent un accumulateur et des instructions DSP. Cette famille intègre des périphériques intelligents et de la mémoire RAM et de ROM.

- Les *6833X* : leur coeur est une unité centrale CPU 32 bits dérivée du 68020. Ils utilisent le même principe modulaire que le *HC16* et peuvent intégrer les mêmes périphériques. Ils sont dédiés aux processus temps réel.

Les familles C166 et C167 de SIEMENS

C'est une famille de processeurs à architecture RISC. Elle se caractérise par un contrôleur d'interruption très performant et peut, par son système de DMA, effectuer un transfert entre la mémoire et un registre en 100ns. Les *C166* existent en double source THOMSON (ST10). Le *C167* est une version spécialisée destinée au pilotage des moteurs.

Les SUPER-H et H8 de HITACHI

Cette gamme de circuits possède des performances intéressantes et offre un environnement de développement complet (chaîne C, éditeur fuzzy, ICE). Elle commence à bien s'installer sur le marché.

La famille TCLS-900 THOSIBA

Ces processeurs offrent la possibilité d'associer les registres de manière à travailler en 16 ou 32 bits.

Le TMS 320 TEXAS INSTRUMENT

La référence retenue est un DSP 16 bits en version microcontrôleur dédié au pilotage des moteurs. Il intègre de nombreux périphériques et notamment des fonctions *timer* et de modulation en largeur d'impulsion (PWM).

Tableau 3-2 « Comparaison des microcontrôleurs sélectionnés »

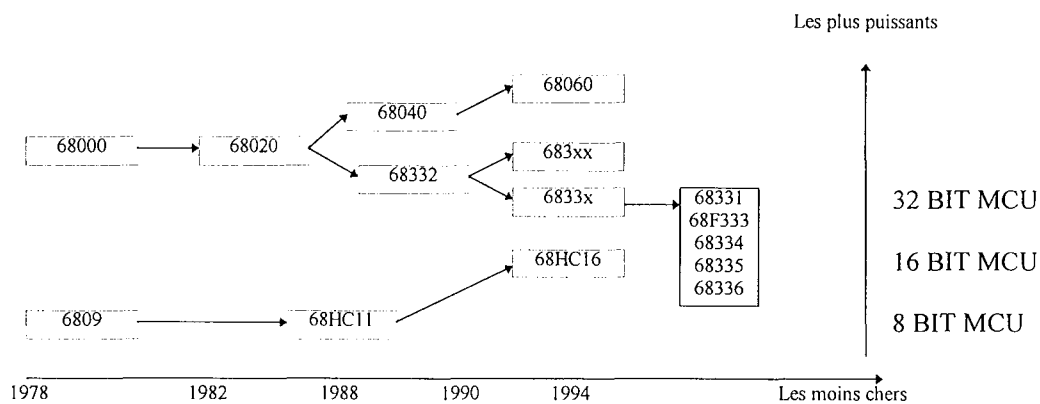
Famille de Microcontrôleur	80C186 (AMD-INTEL) Coeur 8086	Elan (AMD) Coeur 386	386 EX version embarquée (INTEL)	87MC196 version contrôle moteur (INTEL) Coeur MCS 96	SAB 166 (SIEMENS) ou ST10 (THOMSON)	C167 (SIEMENS)
Caractéristiques						
Technologie	HCMOS	CMOS	CMOS	HCMOS	HCMOS	HCMOS
Vitesse	20-40 MHz	25,3 MHz	16-25 MHz	13-20 MHz	20 MHz	20 MHz
Températures	-40 +85°C	-40 +85°C	-65 à +110°C	-40 +85°C	0 +70°C°C	-40 + 85°C
Boîtier	PQFP 100 pattes	PQFP 208 pattes	PQFP 144 pattes	PQFP 100 pattes	PQFP 100 pattes	PQFP 144 pattes
Quartz	20 à 25 Mhz	32 kHz	25 M Hz	20 à 25 MHz	20 MHz	20 MHz
CPU	CISC	CISC	CISC	CISC	RISC	RISC
Registre	16 bits	32 bits	32 bits	488 x 8 bits	512 x 8 bits	1024 x 8 bits
Bus interne	16 bits	32 bits	16 bits	16 bits	16 bits	16 bits
Bus externe	8 ou 16 bits	16 bits	16 bits	8 ou 16 bits	16 bits	16 bits
Espace adressable	1 Mb	16 Mb	64 Mb	1 Mb	256 Ko	256 Ko
Performance	5.63 Mips 6 modes d'adressage 130 instructions	xxx 6 modes d'adressage 130 instructions	xxx 6 modes d'adressage 130 instructions	xxx 1,4 us pour une multiplication 16x16 bits	10 Mips 100 ns/instruction 53 instructions	10 MIPS 100 ns/instruction 53 instructions
Périphériques						
timers	3	16	3	3 de 16 bits	2 unité de 5 timers	2 unité de 5 timers
Chien de garde	1	0	1	1	1	1
DMA	2	6	2	4	8 avec 16 priorités	8 avec 16 priorités
Interruption externe	6	12	7		32 vectorisées	32 vectorisées
Interruption interne	7	14	9	2		
Port série async	1	2	2		2	2
Port série sync	1	1	1	22		
Reset conf reg	1	0	1	10		
Pattes E/S	32	9	24		76 max	11 max
Chips select	12	8	8			5
Autres périphériques	gestionnaire de SRAM	2 port PCMCIA Contrôleur écran LCD et clavier gestion SRAM	gestionnaire SRAM	8xAD 10 bits générateur de 3 signaux PWM triphase sinus. Processeur d'événement 12 canaux	10 AD 10bits 9,7 us 16 canaux capture/compare	16 AD 10bits 9,7 us 2 x 16 canaux capture/compare 4 PWM (78Khz)
Alimentation tension Courant	3,3-5 V 5 mA/MHz	3,3 V 5 mA/MHz	3,3-5,5 V 100 à 200 mA	3,3-5 V 95 mA	5 V 50 mA	5 V 50 mA
Moyen de test	ONCE	ICE	JTAG	ONCE		
Mémoires			32K EPROM	32K EPROM	1Ko RAM 32 Ko ROM flash 12V	2Ko RAM 8 Ko ROM flash 12V
Autres		Très faible consommation Reproduit un compatible PC et ses périphériques	Reproduit l'architecture d'un compatible PC avec ses périphériques			

Famille de Microcontrôleur	MC 68HC16 (MOTOROLA) Coeur CPU16	MC 6833x (MOTOROLA- THOMSON) Coeur CPU32	TCLS-900 (THOSIBA)	SuperH - SH1 (Hitachi) Coeur SH7000CPU	H8 (Hitachi)	TMS320C24x (Texas Instrument)
Caractéristiques						
Technologie	HCMOS	HCMOS	CMOS	HCMOS	HCMOS	HCMOS
Vitesse	16,768 MHz	16-20 MHz	12 M Hz	20 MHz	10 MHz	20 MHz
Températures	-40 à +85 ou +125 °C	-40 à +85 ou +125 °C	-20 +70°C	-20 +70°C	-40 + 85°C	-40 +85 °C
Boîtier	PQFP 132 pattes	PQFP 132 pattes	PQFP 80 pattes	PQFP 80 pattes	PQFP 80 pattes	PQFP 100 pattes
Quartz	32,768 KHz	32 kHz ou 16MHz	20 MHz	10 MHz	10 MHz	20 MHz
CPU Registre Bus interne Bus externe Espace adressable	CISC 12 x 16 bits 16 bits 16 bits 1 Mb	CISC 16 x 32 bits 16 bits 16 bits	CISC 26 x 16 / 32 bits 16 bits 16 bits 16 Mb	RISC 32 bits 32 bits 16 bits 1 Mb	RISC 8x16 bits banalisés 16 bits 16 bits	DSP 9x16 bits 16 bits 16 bits
Performance	xxx 10 modes d'adressage 256 instructions Accumulateur 36 bits Registres d'index 22 bits	xxx 7 modes d'adressage 96 instructions	xxx 200 ns / instruction 14 modes d'adressage	16 MIPS Fonction DSP MAC multiplication 16x16 câblées Accumulateur 64 bits	xxx 57 Instructions 8 modes d'adressage	20 MIPS accu 32 bits multiplication 16x16 câblées jeux d'instructions DSP
Périphériques timers Chien de garde DMA Interruption externe Interruption interne Port série asyn Port série sync Reset conf reg Pattes E/S Chips select	1 1 0 7 niveau de priorités et auto-vectorisation 1 1 port SPI 1 4x8 bits max 12 maximum	1 1 0 7 niveau de priorités et auto-vectorisation 1 1 port SPI 1 4x8 bits max 12 maximum	2x16 + 2x8 bits 1 (timer 16 bits) 1 7 2 65 max 3 maximum	5 1 31 9 2 40 bits max 8 maximum	1x16 et 2x8 bits 3 sources vectorisées 2 58 bits max	3 1 1 1 port SPI 3x8bits max
Autres périphériques	8xADC 10 bits ou Processeur de temps 16 canaux ou Timers	8xADC 10 bits ou Processeur de temps 16 canaux ou Timer	4xADC 10 bits Chien de garde 2 PWM 8 bits DMA 4 canaux	AD 8x10 bits Gestionnaire SRAM ou DRAM	8x8 AD 10bits 12,2 us 4 PWM 8 Input/capture Port de communication parallèle bufferisé sur 16 octets	2xAD 10 bits 12 PWM 9 output/compare 4 input capture dont 2 pour les détections de quadrature
Alimentation tension Courant	5V	5 V 124 mA	5V	3,3-5 V	3,3-5 V	2,7-3,3-5V 70 mA
Moyen de test	ONCE	ONCE				JTAG
Mémoires	2Ko de SRAM accé en 2 cycles jusqu'à 48Ko de ROM	2 Ko de SRAM accé en 2 cycles possibilité de 48k+16k d'EEPROM	2 Ko SRAM 32 Ko ROM	1Ko SRAM 16 Ko ROM	1 Ko RAM 32 Ko ROM	544 mots SRAM (16 bits) 16x16 ROM
Autres	Intègre des instructions d'addition et accumulation					

Notre choix se porte sur les références 6833X de MOTOROLA pour les raisons suivantes :

Ces processeurs sont le résultat de l'évolution du microprocesseur 16 bits MC68000 qui est issu du projet MACSS (MOTOROLA ADVANCED COMPUTER SYSTEM on SILICON, 1976). C'est un processeur monolithique dont les performances reposent sur deux principes : la simplicité et l'orthogonalité (banalisation des registres internes vis à vis des modes d'adressage et des instructions). Les premiers échantillons furent proposés aux industriels en 1979. Malgré l'importante logique nécessaire à sa mise en oeuvre, les qualités du 68000 et ses possibilités en matière de sécurité en ont fait le processeur industriel par excellence. La dernière évolution est la création d'une nouvelle unité de traitement 32 bits le CPU32 qui équipe la famille 683xx. Celle-ci est compatible¹ au niveau source avec le reste de la gamme (réutilisation des outils logiciels et des programmes) et offre des solutions compactes et modulaires intégrant de nombreux périphériques.

Figure 3-21 « Evolution de la famille des processeurs MOTOROLA »



Parmi les références disponibles, les contraintes industrielles nous font écarter les circuits trop coûteux et difficiles d'approvisionnement (68F333, 68336 et 68335). Les contraintes de gestion de temps nous font préférer les références équipées du processeur de temps, aussi avons nous écarté la référence 68331. Des deux références restantes, le 68332 et le 68334, la référence 68332 est la mieux installée sur le marché (référence plus ancienne utilisée pour l'automobile). C'est cette référence qui est retenue pour la carte Micro-Power.

Le choix de cette famille permet également de conserver la culture sur les processeurs MOTOROLA de la société ARNATRONIC.

• Les avantages du 68332

- C'est un produit bien installé sur le marché à un prix raisonnable au vu les fonctions qu'il intègre (environ 130 F H.T.).
- Il existe en double source *Thomson*.

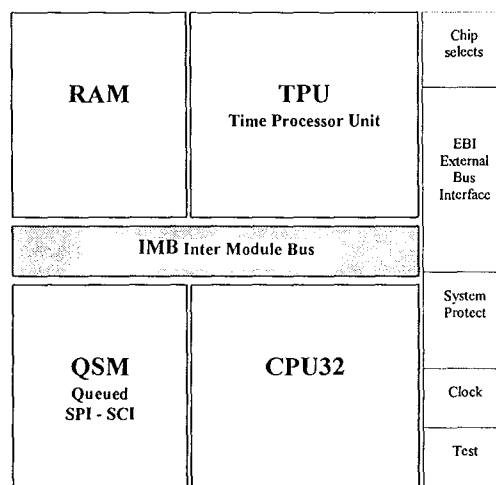
¹ Elle permet l'émulation de l'instruction si celle-ci n'est pas présente.

- Autorise une gestion simple des interruptions (autovectorisation, hiérarchie).
- Possède des périphériques intelligents autonomes, notamment un processeur de temps reprogrammable.
- Il est compatible en brochage avec le 68331 (version moins coûteuse avec un *timer* d'usage général du processeur de temps).
- Il fonctionne dans une gamme de température étendue (-40 à +85 °C, extensible à -40 à +125 °C).

3.4.2 Description du 68332

Le 68332 est un processeur de technologie HCMOS (High-speed Metal-Oxide Semiconductor) de technologie VLSI¹ utilisant la philosophie modulaire [332-1, HT91]. La puce est composée d'un bus interne central (IMB) qui relie le CPU32 aux périphériques intelligents. Parmi eux se trouvent le module d'intégration (SIM), une mémoire volatile rapide (RAM), un module d'interface série (QSM) et un processeur de temps (TPU). Chacun peut être programmé au niveau de ses privilèges d'accès, de sa zone d'adressage, de ses priorités et vecteurs d'interruptions, de sa priorité pour l'arbitrage sur le bus.

Figure 3-22 «Schéma bloc du 68332»



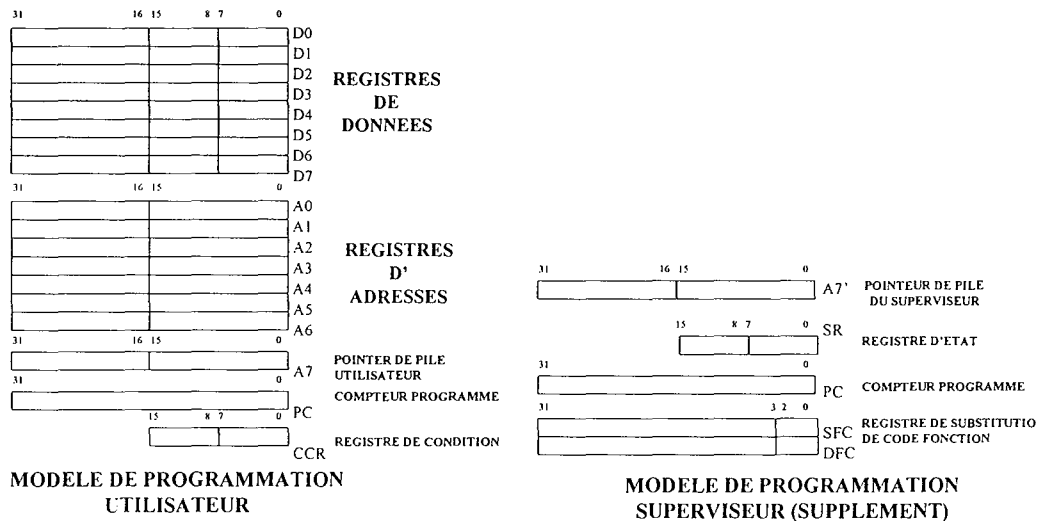
3.4.2.1 Le CPU32

Le CPU32 est la première génération du module processeur de la famille 68300. Il est proche du 68020, ce qui en fait un processeur pour des applications de hautes performances. Il est compatible au niveau source et code avec le 68000 [332-2]. Il est construit sur le modèle d'une architecture VON

¹ VLSI : Very Large Scale Integration, Très haut facteur d'intégration (plus de 10000 transistors/mm²).

NEUMANN 32 bits équipée d'un pipeline et de 16 registres de données et d'adresses de 32 bits. Il est cadencé à 16 ou 20 Mhz. Son jeu d'instructions riche comprend 50 instructions et 14 modes d'adressage.

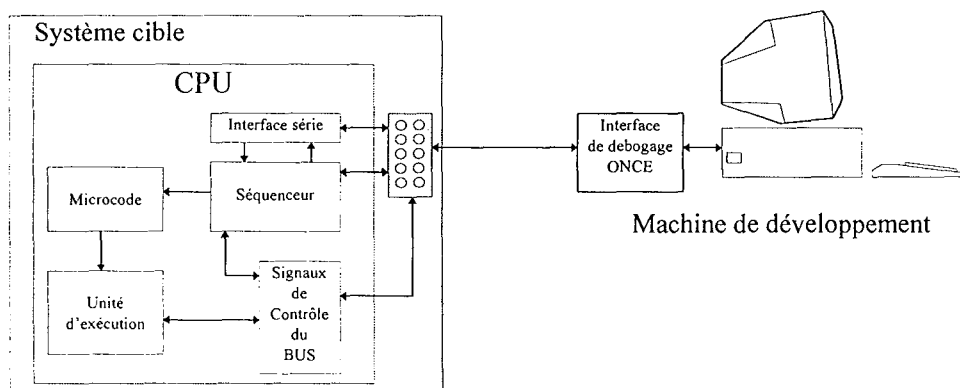
Figure 3-23 «Modèle de programmation du CPU32 »



Il est équipé d'un modèle de programmation à deux niveaux de privilège : l'utilisateur et le superviseur. L'existence d'instructions de sauvegarde du contexte permet au superviseur de commuter rapidement les tâches.

Le CPU possède une liaison de test/débugage ONCE standardisée sur les produits 683XX Motorola. Elle se présente sous la forme d'un connecteur BERG 10 contacts regroupant : l'alimentation, le signal Reset, la liaison série spécialisée (entrée, sortie et horloge), les informations d'état du processeur (Berr et Halt) et le signal de point d'arrêt (Bkpt). Pour gérer ces signaux, il suffit d'une simple carte d'adaptation connectée sur une liaison série ou parallèle de la machine du développeur.

Figure 3-24 « Synoptique de l'interface ONCE »



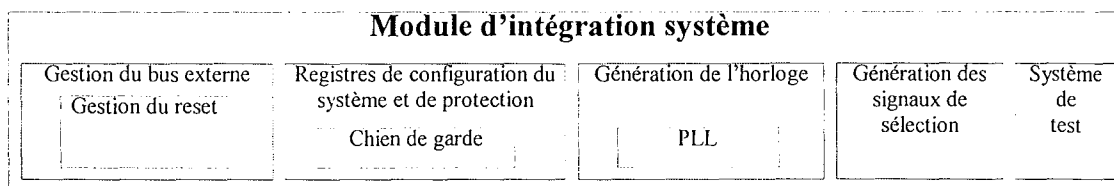
L'utilisation de cette liaison à un régime soutenu peut cependant ralentir le fonctionnement du processeur et perturber le déroulement du programme.

3.4.2.2 Le Module d'Intégration Système (SIM)

Ce module a été développé pour les processeurs 16 et 32 bits. Il fournit les services suivants :

- Test de la puce lors de la fabrication (fonction réservée au constructeur).
- Génération des signaux du bus externe (EBI) de type 68000.
- Génération des signaux de sélection de périphériques externes (*Chips select*). Les caractéristiques de ces signaux sont programmées par l'utilisateur (nombre de cycle d'attente, adresse, privilèges, format du mot de donnée).
- Génération de l'horloge système (intégrant une PLL).
- Configuration initiale.
- Chien de garde

Figure 3-25 « Schéma bloc du SIM »



3.4.2.3 Le module mémoire RAM

Ce module contient 2K octets de mémoire vive. Elle peut être sauvegardée par une tension secourue. Cette mémoire est utilisable par le processeur comme pile logicielle ou comme zone de variables du fait de son très faible temps d'accès (2 cycles horloge). Elle peut également être utilisée par le module TPU pour l'émulation des microcodes écrits par l'utilisateur.

3.4.2.4 Le module série QSM

Le QSM (Queued Serial Module) offre au processeur des moyens de communication série. Ce module est divisé en deux parties indépendantes :

- l'Interface Série de Communication (SCI) qui est une liaison série asynchrone universelle (UART) 2 fils,
- le QSPI (*Queued Serial Peripheral Interface*) qui est une interface série full-duplex haute vitesse pour communiquer avec des périphériques au sein d'une carte (protocole SPI). Ce module possède une file tampon pour l'émission et la réception des données ainsi qu'un mode d'interrogation automatique des périphériques. Il comprend tous les mécanismes qui simplifient l'interconnexion de périphériques SPI (notamment la génération des signaux de sélection des périphériques).

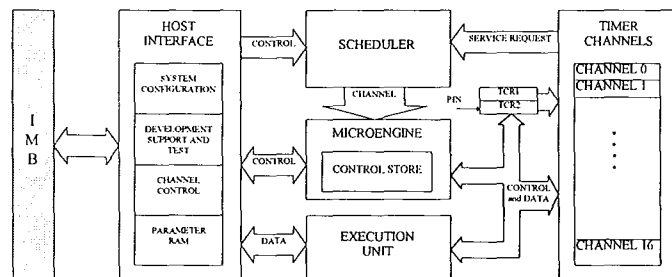
Chacun de ces modules est vu comme un périphérique par le bus interne.

3.4.2.5 Le processeur de temps TPU

Le TPU est une machine microprogrammable dédiée à la gestion du temps. Il est capable de gérer des fonctions évoluées du type *timer* simultanément sur 16 canaux sans l'intervention du CPU32. Il est constitué d'un processeur, d'une zone mémoire accessible par le CPU32 pour les variables et paramètres des programmes, d'une mémoire morte (ROM) contenant les microprogrammes des fonctions à exécuter et d'une entrée/sortie logique associée à chaque canal (16 au total) [332-3].

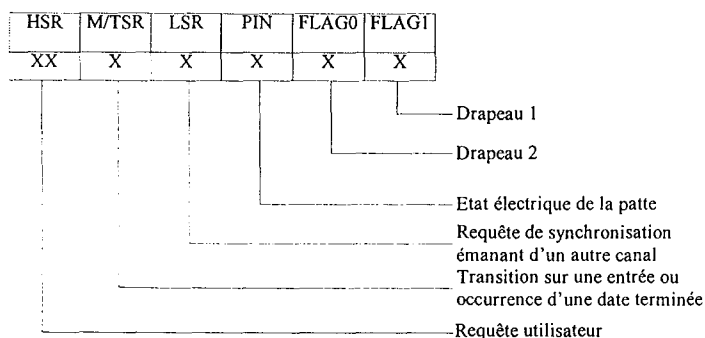
Les 16 voies sont orthogonales et indépendantes. Il est possible de les synchroniser entre elles par des événements. Les références de temps sont deux compteurs 16 bits, un alimenté par l'horloge du processeur (TCR1), l'autre par une horloge externe (TCR2).

Figure 3-26 « Schéma bloc simplifié du TPU »



Le TPU peut être considéré comme une machine à états. L'état d'un canal est représenté par un ensemble de bits (la clef). Elle est constituée par les informations suivantes :

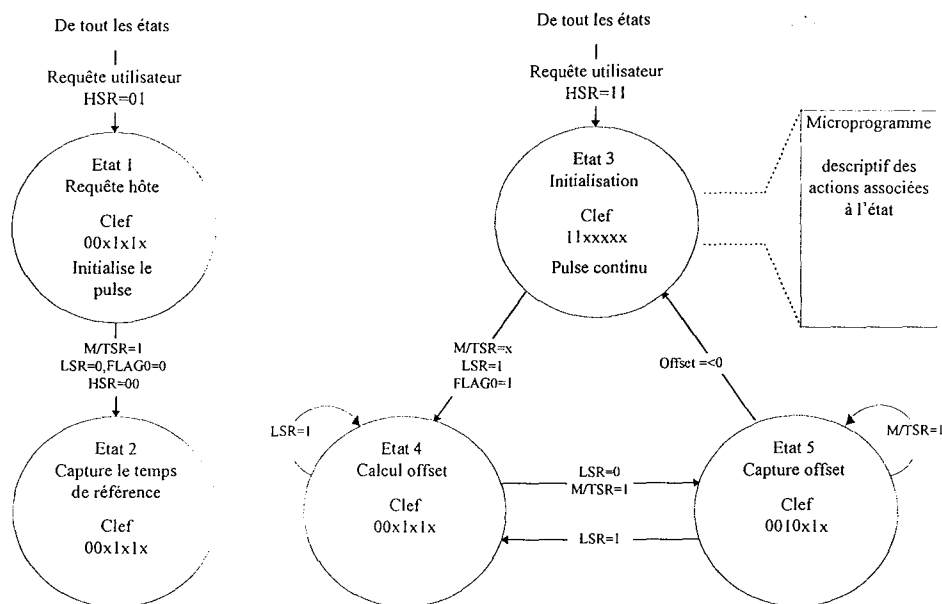
Figure 3-27 « Description de la clef du TPU »



Parmi les combinaisons d'état de la clef, seul 16 sont physiquement possibles. A chacun de ces états est associé un microprogramme différent. Celui-ci prépare l'état suivant (nouvel état de la borne, des drapeaux, envoi d'un signal de synchronisation vers un autre canal) en exploitant la valeur du compteur de

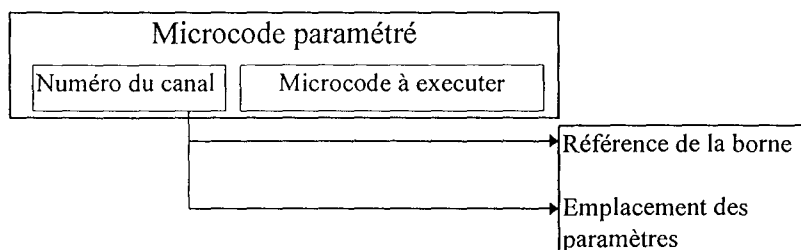
référence, et la table de paramètres associée au canal résidant en mémoire vive. L'ensemble des 16 microprogrammes constitue une fonction.

Figure 3-28 « Exemple de diagramme d'état du TPU, fonction Output-Compare »



Les microcodes des programmes possèdent un champ de bits réservé qui sert à indiquer le numéro du canal et l'adresse de ses paramètres en RAM. Ce mécanisme permet d'utiliser le même microprogramme pour différents canaux.

Figure 3-29 « Paramétrage d'un microcode »



Le TPU possède une série de 16 microprogrammes dans sa ROM. Il en existe actuellement deux versions identifiées par les lettres A et G dans la référence du processeur. Parmi ces fonctions nous retrouvons des commandes en largeur d'impulsion, la gestion de codeurs incrémentaux, des générations d'impulsions calibrées, la transformation du TPU en octuple liaison série, des mesures de périodes et de fréquences, des compteurs accumulateurs ainsi que la gestion d'un moteur pas à pas.

Lorsque les microprogrammes en ROM ne suffisent pas, l'utilisateur peut écrire d'autres fonctions en chargeant le microcode dans la RAM de 2Ko du 68332 qui est alors associée au TPU (mode émulation).

3.4.2.6 Les mécanismes de sécurité sur le 68332

Le 68332 offre toute une panoplie de mécanismes de sécurité aussi bien matériels que logiciels. Ils permettent non seulement de détecter une faute mais, lorsque l'erreur produite n'est pas bloquante pour le fonctionnement du processeur, de traiter et quelquefois de corriger celle-ci.

3.4.2.6.1 Les protections matérielles

- **La configuration matérielle au reset**

Elle permet par la mise à 1 ou 0 lors du reset de certains bits du bus de données pour affecter les signaux aux bus ou aux ports d'entrées sorties de manière à éviter les états parasites ou inconnus lors des phases d'initialisations. Par défaut, les bornes d'entrée/sortie programmables sont toutes configurées en entrées.

- **La gestion du RESET**

Le signal reset est bidirectionnel. Une instruction RESET permet de réinitialiser matériellement les périphériques. La source du RESET est indiquée dans un registre pour permettre à l'utilisateur de traiter correctement le redémarrage de son programme. Les différentes origines possibles sont les sources extérieures, la mise sous tension, le chien de garde, la perte de l'horloge, une instruction RESET, le module de test ou le moniteur du signal HALT.

- **La possibilité d'avoir un « état électrique » du processeur**

Le processeur offre la possibilité de connaître en permanence son état par des signaux électriques externes.

Exemples :

RMC: Identifie un cycle spécifique indivisible d'une opération de lecture-modification-écriture

BERR: Indique les erreurs bus

FETCH: Etat de préchargement d'un mot pour le pipeline

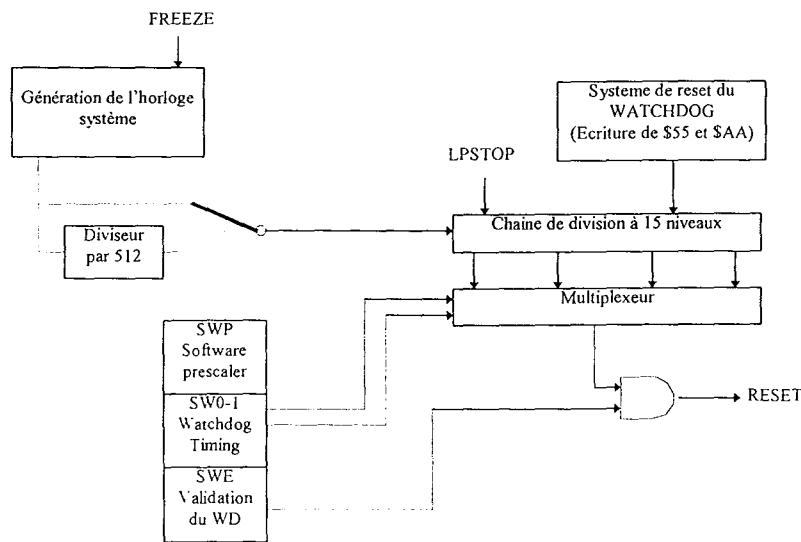
IPIPE: Un mot avance dans le pipeline

FREEZE: Le CPU indique qu'elle a rencontré un point d'arrêt

- **Le chien de garde**

Il se situe dans le module de protection du SIM. C'est un compteur cadencé sur l'horloge système divisée par un rapport programmable. La validation du chien de garde est effectuée par défaut au moment du reset. L'accès en écriture du bit SWE de validation n'est possible qu'une seule fois, l'utilisateur ne peut donc dévalider le chien de garde qu'une seule fois après le démarrage de la carte. La remise à zéro du compteur est réalisée par l'écriture de la séquence \$55 et \$AA au registre de reset du chien de garde.

Figure 3-30 « Synoptique du Watch dog interne »



- **Le monitoring de l'horloge système**

Lorsque la PLL interne du processeur est utilisée, la perte de la fréquence de référence (dans ce cas 32,768 kHz) génère un reset.

- **les erreurs bloquantes qui déconnectent le CPU**

- Une instruction provoquant une erreur est exécutée 2 fois puis provoque une exception.
- Une double erreur d'exécution ou une simple erreur de la pile système arrête et déconnecte le microprocesseur (position de repli).

- **La surveillance du bus**

Les échanges sur le bus (accès aux données et procédure d'interruption) suivent des protocoles utilisant une réponse du périphérique. Toute entorse à ces protocoles provoque une exception.

- Lors des transferts, le processeur indique la taille de la donnée à transférer au périphérique (signaux SIZ0 et SIZ1), celui ci répond en indiquant la taille possible pour ses accès (DSACK0 et DSAK1).
- L'accès à un périphérique 16 bits à une adresse impaire provoque une erreur d'adressage (vecteur n°3)
- La réponse d'un périphérique doit se faire dans le délai fixé (paramétrable en cycle de 4 à 16 cycles bus)

- **Vecteur d'interruption non initialisé ou protocole de vectorisation incorrect**

- Un vecteur d'interruption non initialisé d'un périphérique lors du protocole de vectorisation automatique provoque l'interruption *vecteur non initialisé n°14*.
- Un protocole de chargement du vecteur d'interruption non conforme au protocole établi provoque l'interruption (ce qui permet de détecter les interruptions parasites).

• La caractérisation des champs mémoires

Les signaux de sélection des boîtiers externes (Chips Selects) et les périphériques internes sont paramétrables au niveau de :

- leurs adresses de base,
- leurs tailles (de 2Ko à 1 Mo),
- leurs types d'accès en lecture et écriture,
- leurs tailles (8 ou 16 bits),
- leurs espaces d'adressage

Le non respect de ces conditions d'accès ou l'accès à une zone non affectée provoquent une erreur d'adressage (vecteurs n°3).

Les espaces d'adressage

Ils sont identifiés par le code fonction (FC0,FC1,FC2) composé de 3 bits (accessible physiquement sur le processeur). Ils permettent de distinguer 8 espaces adressables de 4 Gigabits. Chacun de ces espaces est dédié à un type de données.

Tableau 3-3 « Espace d'adressage du 68332 »

FC2	FC1	FC0	Espace d'adressage
0	0	0	Indéfini, réservé
0	0	1	Données utilisateur
0	1	0	Programmes utilisateur
0	1	1	Indéfini, réservé
1	0	0	Indéfini, réservé
1	0	1	Données superviseur
1	1	0	programme superviseur
1	1	1	Espace CPU (périphériques)

• Erreur du format de la pile lors d'un retour d'exception

Lors d'un retour d'événement, le processeur vérifie que le contenu de la pile est conforme au format correspondant à un retour d'exception.

• Les groupes et priorités des exceptions

Pour assurer une bonne gestion des événements simultanés, les exceptions du processeur sont classées en 4 groupes d'importances et affectées à une priorité (plus le numéro est faible, plus le traitement est important). Les interruptions matérielles utilisateurs sont traitées dans le groupe 4.

Tableau 3-4 « Priorités des exceptions du 68332 »

Groupe/priorité	Exception	Caractéristiques
0	Reset	Stoppe tout les traitements (instruction ou exception) et ne sauve pas le contexte actuel.
1.1 1.2	Erreur d'adresse Erreur de bus	Suspend le traitement (instruction ou exception) et sauve le contexte interne
2	Point d'arrêt, Instruction CHK division par 0, RTE Instruction TRAP	Le traitement de l'exception fait partie du cycle normal de l'exécution de l'instruction
3	Instruction illégale Emulation ligne A et F Violation de privilège	Le traitement de l'exception commence avant l'exécution de l'instruction
4.1 4.2 4.3	Mode pas à pas (TRACE) Point d'arrêt matériel Interruption utilisateur (0 à 7)	Le processus d'exception commence quand l'instruction courante ou l'exception en cours est exécutée

• Les modes de tests

Le 68332 est équipé de mode de tests spécifiques à MOTOROLA. Le bus IMB peut être asservi comme esclave à un bus externe par une combinaison matérielle (forçage en test) lors du reset. Ce mode met à disposition les périphériques internes de la puce. Ce mode est réservé aux tests en usine. Il permet cependant de déterminer la version du processeur et de simuler des états ou des cycles de celui-ci (ex: requête d'interruption). Ce mode permet de forcer des bits internes pour provoquer des états nécessitant une réponse spécifique du processeur (simulation de perte de l'horloge...).

Le test des programmes peut être effectué à l'aide :

- des modes pas à pas par instruction ou par changement de flux d'exécutions pour le CPU,
- des point d'arrêts pour la CPU et le TPU.

3.4.2.6.2 Les protections logicielles

• L'existence de niveaux de privilège (utilisateur et superviseur)

Le CPU32 peut fonctionner avec deux niveaux de privilège. Ces niveaux appelés *Utilisateur* et *Superviseur* permettent de hiérarchiser les applications. Cette hiérarchie s'effectue non seulement dans les possibilités d'utilisation de certains codes machines, mais également sur l'accès au matériel (mémoires et périphériques). Un paramétrage judicieux ne permettra à un programme utilisateur d'accéder qu'aux zones mémoire et aux périphériques qui lui sont autorisés. Le mode superviseur quant à lui permet un accès à toutes les ressources du système. En cas de tentative de violation de privilège d'un utilisateur, une exception spécifique est générée (vecteur n°8). Le mode superviseur est généralement utilisé pour la gestion des tâches et des sécurités du système et le mode utilisateur pour la programmation des tâches.

• La détection d'instruction illégale

Un instruction dont le format ne correspond pas à une instruction existante provoque une interruption d'instruction illégale (vecteur n°4). Les bits 12 à 15 d'un code illégal peuvent être utilisés pour

étendre le jeu d'instructions par émulation logicielle. Les deux exceptions *d'émulation* différenciées par les bits 1010 et 1111 génèrent respectivement les exceptions n° 10 et n°11. Le code hexadécimal \$4AFC est une instruction illégale pour toutes les familles de 68000.

- **Les erreurs de calcul ou débordements**

- Une division par 0 provoque l'interruption n°5 *division par 0*.
- Déclenchement de l'interruption n°7 sur un débordement (drapeau V) ou un autre drapeau de test par l'instruction TRAPcc
- Possibilité de tester si une valeur est dans un intervalle (CHK et CHK2) et déclenchement de l'interruption n°6 si la valeur est hors plage.

- **Le contenu de la pile système**

Les trames de pile d'événements provoquées par des exceptions donnent des informations détaillées sur l'événement qui vient de se produire. A savoir :

- La cause de l'exception
- L'état interne du CPU (registre de status, pointeur de programme, numéro du vecteur d'interruption)
- Les informations sur la cause avec dans certains cas les paramètres nécessaires à la correction du problème.

La CPU génère trois types de pile:

- La pile normale à 4 mots, utilisée pour les interruptions *normales* dans le fonctionnement.
- La pile normale à 6 mots, utilisée lorsqu'il est nécessaire de stocker l'adresse de la source de l'interruption.
- La pile à 12 mots, réservée aux erreurs de bus. Cette pile contient des informations supplémentaires sur la source de l'erreur (adresse dont l'accès a provoqué l'erreur, adresse de l'instruction ayant provoqué l'erreur, adresse de l'instruction suivante pour le retour, mot d'état spécial indiquant l'origine exacte de la faute).

3.4.3 Les périphériques

- **Les périphériques déjà intégrés** autour du bus interne du 68332 sont les suivants :

- un coprocesseur de temps qui permet la gestion complète de séquençement sur 16 canaux (TPU),
- le module série intégrant une liaison série 2 fils (SCI) et un bus série pour les circuits interfaces (QSPI),
- un module décodeur d'adresse et de gestion du bus fournissant les signaux de sélections des boîtiers externes,

- une mémoire de 2K octet de mémoire volatile sauvegardable,
- un timer système,
- un chien de garde système,
- une horloge processeur à fréquence programmable par PLL¹,
- des ports d'entrées/sorties par utilisation des pattes signaux non utilisés.

Pour compléter ces fonctions il était nécessaire d'intégrer :

- **Un circuit horloge temps réel** 68HC68T1 de chez Motorola connecté sur le bus série SPI. Il fournit les informations complètes de datation et possède des mécanismes d'alarmes et d'interruptions périodiques.
- **Des mémoires**
 - *Volatile (RAM)* composée de 2x32Koctets extensible à 1Moctets de mémoire statique en standard (possibilité de 2x512 Koctets en option). Elle est accessible par mots de 8 ou 16 bits.
 - *Reprogrammable électriquement (EEPROM)* composée d'une mémoire *Flash* ou EEPROM 8 bits destinée à être utilisée en zone de stockage par l'utilisateur.
 - *Fixe* constituée d'une EPROM ou d'une mémoire *Flash* 16 bits de 128 Koctets à 1Moctets.
- **Un circuit de gestion de l'alimentation et du reset** MAX 690 de MAXIM qui assure la surveillance de l'alimentation et génère une interruption pour prévenir de sa coupure. Il gère également une alimentation sauvegardée lorsqu'une batterie externe lui est adjointe.
- **Un circuit de liaison série** DUART 68681 de MOTOROLA. Il gère deux liaisons séries complètes et possède des facilités de programmation en offrant 6 sources d'interruptions vectorisées. Il augmente la capacité en entrées/sorties de la carte en offrant deux ports d'entrée/sortie 8 bits et un timer 23 bits.
- **Un convertisseur V24** : MAX 202 de chez MAXIM pour convertir les signaux de la liaison série du processeur (SCI) en signaux standard V24 et permettre la connexion directe de terminaux RS232.

3.4.4 La forme physique

Pour pouvoir assimiler la carte à un *simple composant*, celle-ci doit être compacte et ses connexions doivent être simples. Nous avons retenu le format *carte de crédit* avec une connectique autorisant l'empilement de plusieurs cartes (mezzanine).

3.4.5 Les outils logiciels

Les outils logiciels sont les programmes nécessaires à la création, le test et l'utilisation de la carte Micro-Power. Lors de la création de la carte, les besoins sont essentiellement l'écriture de programmes de

¹ PLL: Phase Locked Loop, boucle à verrouillage de phase.

tests. Ces besoins sont couverts par l'utilisation d'un débogueur via la liaison ONCE, puis pour les programmes plus important, un traitement de texte et d'un assembleur.

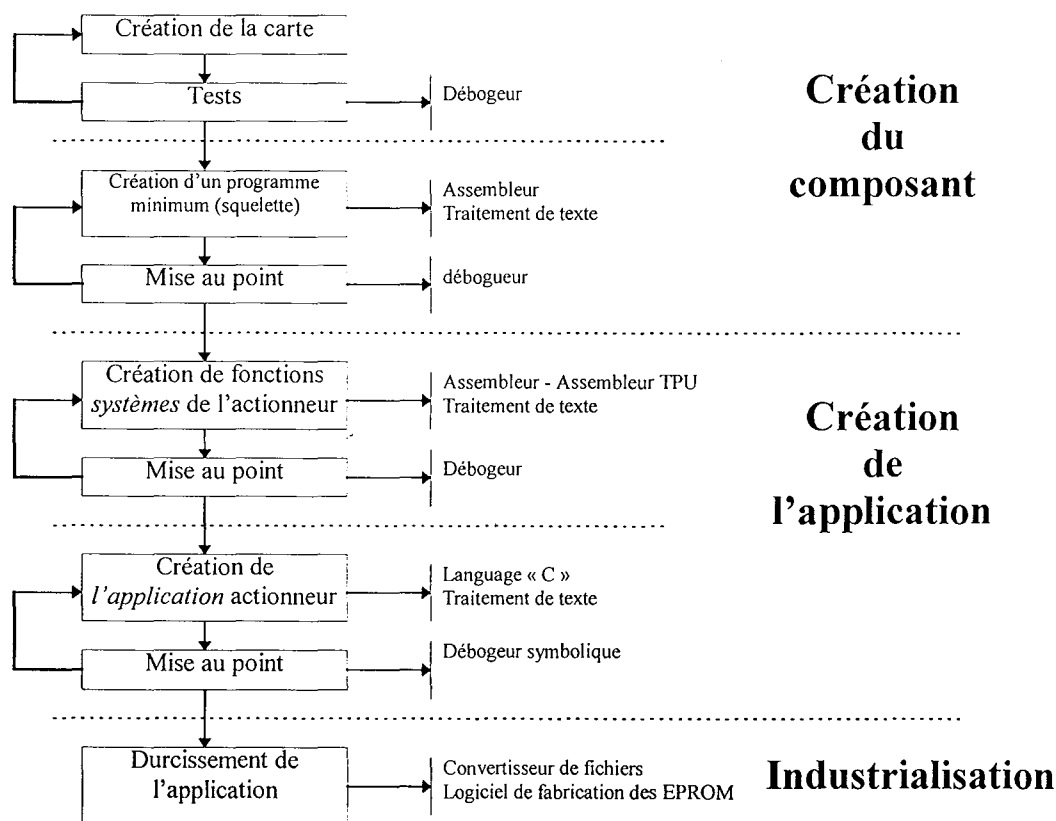
Lors de la mise en oeuvre de la carte, l'utilisateur doit pouvoir écrire des gestionnaires de bas niveau en assembleur, puis travailler de manière plus confortable avec un langage évolué. Compte tenu des outils disponibles et de la vocation industrielle de la carte, nous retiendrons le langage C ANSI (raison de portabilité des applications) [KER94]. Le déverminage de ces programmes est simplifié par un débogueur C symbolique.

L'utilisateur peut également programmer de nouvelles fonctions TPU. Pour cela il faut faire appel à un assembleur spécialisé.

Le durcissement du logiciel est réalisé à l'aide d'un programmeur d'EPROM qui nécessite la mise en forme des fichiers de données.

Les différents besoins sont recensés sur la figure suivante.

Figure 3-31 « Les besoins logiciels »



3.4.6 Architecture d'une application

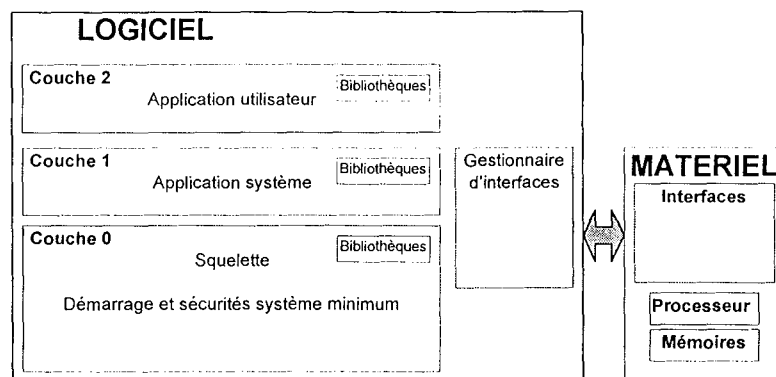
Elle représente la structure générale d'un programme utilisateur. Elle définit comment un utilisateur peut architecturer son logiciel pour tirer le meilleur parti de la carte Micro-Power en utilisant le programme générique de démarrage (squelette) et les bibliothèques déjà existantes.

Nous proposons une architecture logicielle composée de trois couches :

- *La couche 0* : C'est le squelette logiciel, elle gère la carte et ses événements. Elle a en charge le bon démarrage de la carte et le bon déroulement du programme. C'est à ce niveau que sont insérés les gestionnaires de périphérique de bas niveau.
- *La couche 1* : C'est la couche où l'utilisateur définit les éléments nécessaires au fonctionnement global de l'application. Il y écrit les procédures élémentaires, les méthodes d'accès aux données, les gestionnaires qui permettront d'écrire l'application.
- *La couche 2* : Elle contient l'application, elle assure le comportement global du système et intègre les fonctions de hauts niveaux. Elle sera généralement programmée en langage évolué.

La constitution de chaque couche fait appel à des librairies (bibliothèques de programme), ce qui permet de diminuer au fur et à mesure des études le temps de développement.

Figure 3-32 « Architecture logicielle »



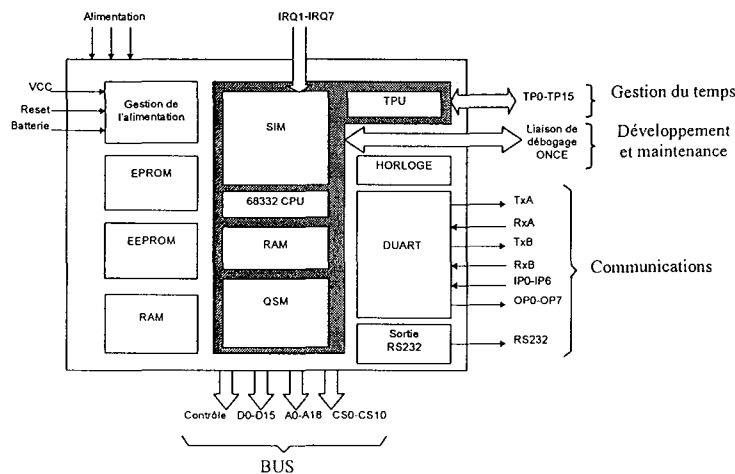
3.5 La carte Micro POWER

La carte Micro-Power V1.0 que nous présentons est le résultat des choix effectués précédemment. Elle a d'abord été validée à l'aide d'une maquette sur circuit imprimé double face et utilisant des composants en boîtier grand format (*dual-in-line*) qui a permis de tester et valider les choix. Le produit final (Micro-Power 1.0) en est une version industrielle. Depuis sa création en 1995 elle a été produite à 125 exemplaires.

3.5.1 Caractéristiques générales

La carte est construite autour du 68332. Les mémoires, le DUART et l'horloge sont connectés au processeur sans aucune logique additionnelle (utilisation des possibilités du SIM).

Figure 3-33 « Synoptique de la carte Micro Power V 1.0 »



• Les caractéristiques générales

- Microcontrôleur Motorola CMOS 32 bits MC68332 à 16 Mhz
- 32 Ko de mémoire statique sur le module et 2 KO de RAM statique rapide dans le processeur
- Un support PLCC 16bits et un support PLCC 8 bits pour mémoire Flash ou EPROM
- Sortie série synchrone (jusqu'à 1MBit/s/QSPI) avec 3 signaux de sélection de boîtier
- Double liaison série (DUART : MC 68681) 38400 bauds
- 12 signaux "Chip Select" programmables
- Chien de garde programmable intégré au processeur + chien de garde matériel (MAX 690)
- 7 niveaux de priorité d'interruption
- TPU 16 canaux 16 bits pour PWM, mesure, comptage,...
- Horloge Temps réel (68HC 68T1 sur bus SPI)
- Contrôleur de Reset et de gestion de l'alimentation (MAX 690)
- Sortie des bus d'adresse, de données et de contrôle
- Alimentation monotension 5V $\pm 5\%$ 150mA
- Dimensions : 62 x 95 mm
- Connectique : 2 connecteurs DIN41612 B Mezzanines
- Interface de débogage intégrée (ONCE)

3.5.2 Présentation physique

• La technologie

La carte utilise un circuit imprimé composé de 6 couches de classe 5 (largeur des pistes de 0.15mm). Le montage des composants est effectué en technologie CMS sur les deux faces. Ceux-ci sont de classe de température industrielle (minimum -25 à +70°C).

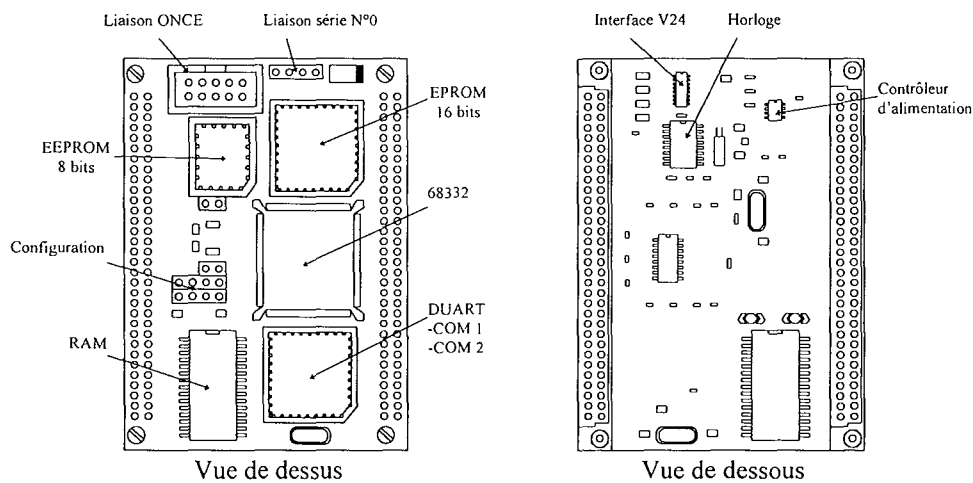
• La connectique

La carte utilise deux connecteurs double rangée de 64 broches. Ces connecteurs à la norme DIN 41612 très courants dans le monde industriel. L'utilisation de connecteur en version *mini-wrapping* permet l'empilement en mezzanine d'autres cartes du même format (uniformité de la connectique des cartes). La connexion d'un terminal V24 et de l'interface de débogage s'effectue par deux connecteurs spécifiques sur le devant de la carte.

• La configuration

La configuration matérielle de la carte s'effectue par goutte de soudure ou par pontage. La carte possède une configuration par défaut précâblée sur le circuit imprimé et ne nécessite aucune intervention de l'utilisateur.

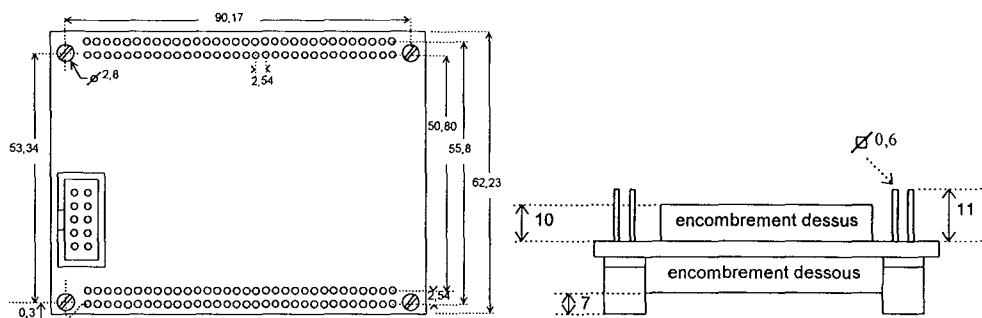
Figure 3-34 « Présentation de la carte micro Power »



• La mécanique

La carte se présente sous le format *carte de crédit*. Les caractéristiques mécaniques sont représentées sur la figure ci-dessous.

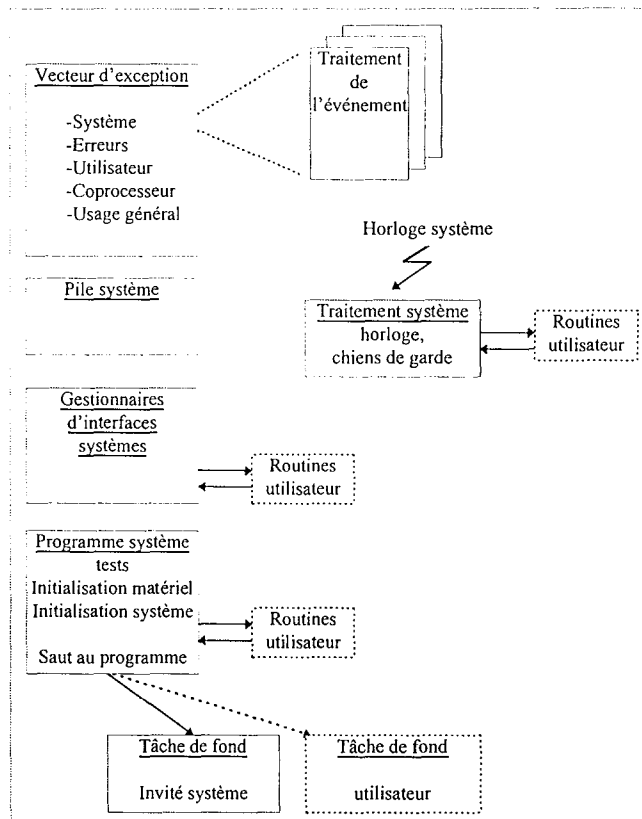
Figure 3-35 « Présentation mécanique de Micro Power »



3.5.3 Le squelette logiciel

Le rôle principal de ce programme source est d'offrir une trame logicielle intégrant un minimum de fonctionnalité de sécurité. Il permet de démarrer, initialiser et lancer le programme utilisateur. Par la suite il surveille le bon déroulement de ce dernier et traite les événements qui peuvent apparaître (défaut, interruptions). Il permet une prise en main rapide de la carte en assurant une configuration par défaut et le lancement d'une tâche en interruption destinée à la gestion du chien de garde et du *temps système*. Les événements non prévus par l'utilisateur sont traités par un sous-programme d'information (affichage en clair). Ce noyau intègre également un minimum de pilote de périphériques (principalement de la liaison série du processeur) pour permettre un retour d'information à l'utilisateur. Ce squelette peut servir de base de départ pour la création des applications.

Figure 3-36 « Le squelette logiciel de micro power »



3.6 L'environnement de développement

Pour des raisons de simplicité, nous devons offrir toutes les possibilités de développement depuis la même station de travail. Il faut y regrouper tous les outils logiciels et leurs paramétrages. La plupart de ces logiciels agissent sur les fichiers (compilateur, générateur de liens, convertisseurs de format) et n'offrent pas

d'interfaces autres que leurs lignes de commande. Pour le créer nous avons retenu le dernier endroit où l'utilisateur passe du temps : l'éditeur de texte. Et c'est autour de la fonction *éditeur de texte* que nous avons construit l'environnement *Micro-Edit*.

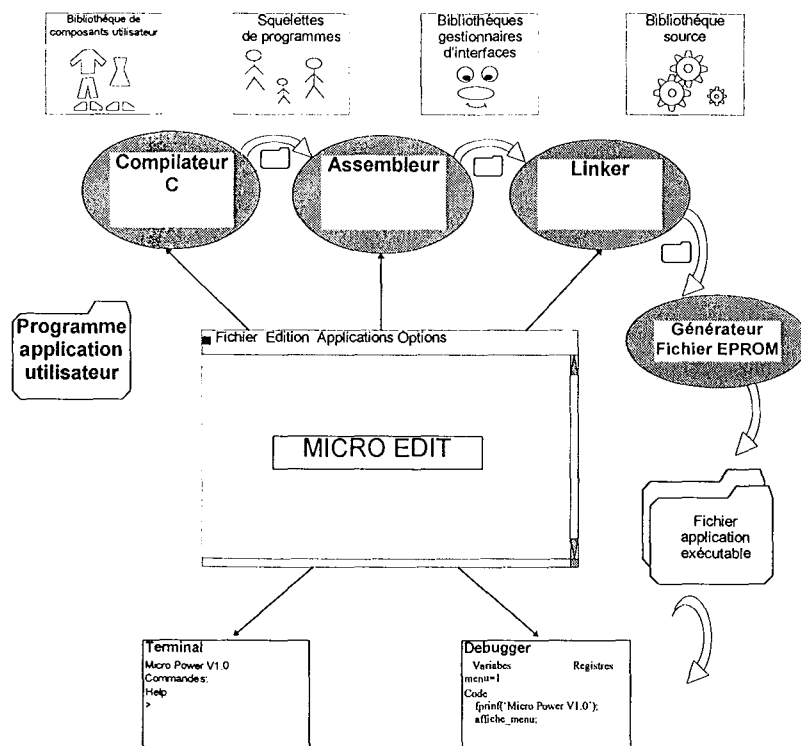
La possibilité d'unifier les composants sous l'environnement *WINDOWS*¹ a été étudiée, mais cet environnement est en plein bouleversement. Il devient difficile d'y trouver ou créer des applications portables avec la garantie d'une durée de vie acceptable pour un outil industriel. De plus la puissance matérielle requise pour cet environnement est de plus en plus importante. C'est une des raisons qui nous ont conduit à la création de notre propre environnement qui n'utilise que des ressources standard de *MS-DOS*² sur les matériels de type PC (Personal Computer).

3.6.1 L'environnement logiciel

Micro-Edit offre une solution simple pour l'interfaçage des outils logiciel et la personnalisation de l'environnement. Il est construit autour d'un éditeur multi-fenêtres permettant le travail en simultané sur plusieurs fichiers. Nous avons utilisé pour cela les bibliothèques objet *Turbo vision* de *Borland*³.

La plate-forme Micro-Edit possède plusieurs configurations selon le type de processeur ou de langage.

Figure 3-37 « Synoptique de la plate-forme de développement Micro-Edit »



¹ WINDOWS est une marque déposée par Microsoft

²MS-DOS est une marque déposée par Microsoft

³Borland : Bibliothèque du langage Turbo Pascal V 6.1

A ce jour, les deux configurations mises en oeuvre sont :

- ***L' environnement « Enseignement »***

Elle permet d'intégrer les outils du domaine public développés par Motorola. Ces logiciels ont un but évaluation de produit 68332. Cette configuration intègre :

- Un terminal simplifié fourni par défaut avec Micro-Edit
- Un débogueur niveau assembleur BD32¹ fonctionnant avec l'interface ONCE de Motorola
- Un Assembleur AS32² pour 68332 de chez Motorola
- Un compilateur langage C limité pour produit 68000.

- ***L'environnement « Professionnel »***

Il constitue la plate-forme de développement des applications industrielles et utilise des logiciels sous licence. Les logiciels interfacés sont :

- Un terminal multistandard ST240³
- Une chaîne de développement C de chez COSMIC⁴ comprenant
 - un assembleur
 - un compilateur C
 - un éditeur de liens
 - un gestionnaire de librairie
 - un débogueur symbolique pour le langage C et l'assembleur
 - les librairies sous forme source
- Un logiciel programmeur de mémoire EPROM.

Micro-Edit offre l'avantage de ne pas être dédié à la carte Micro Power et au 68332 , elle peut être considérée comme un produit autonome.

Une amélioration que nous aimerions apporter à Micro-Edit est l'intégration d'une aide du type hypertexte contenant les informations sur les logiciels, le processeur et la carte Micro Power.

¹ BD32 : Débogueur du domaine public *Motorola*

² AS32 : Assembleur du domaine public *Motorola*

³ ST240 : Logiciel *Smart Term 240* de chez *PERSOFT*

⁴ COSMIC : Société SARL *Compilateur Système MICros*

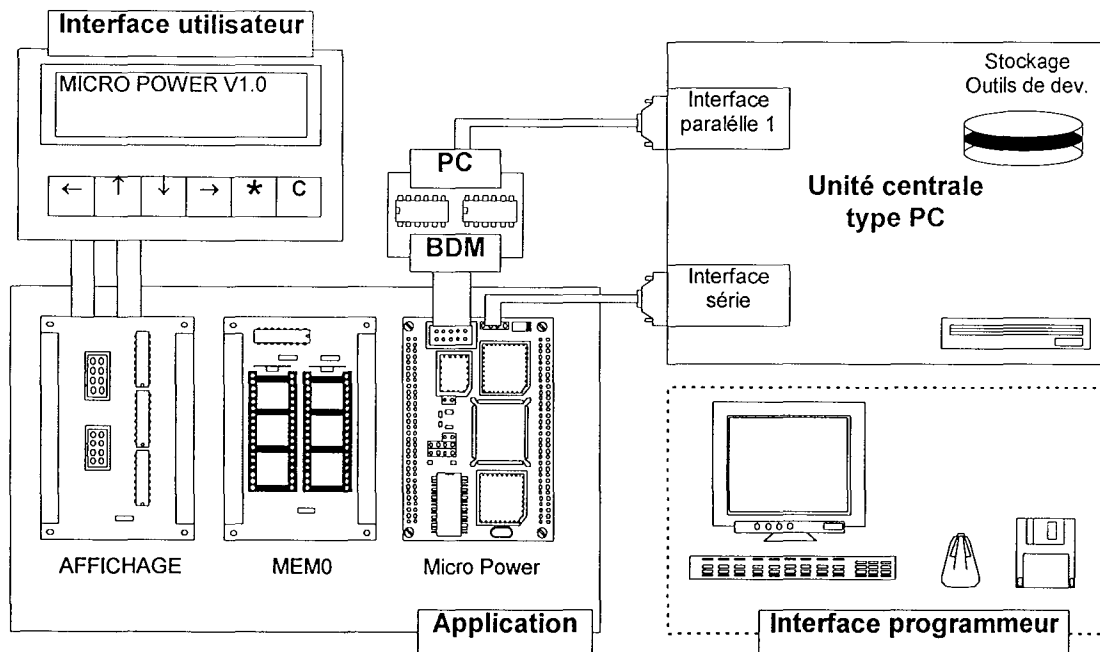
3.6.2 L'environnement matériel

Le poste développeur est constitué d'un ordinateur de type PC sans configuration particulière. Sa prise parallèle imprimante est utilisée par la liaison de débogage *ONCE* de la carte Micro-Power. Cette connexion ne modifie pas le fonctionnement de la carte et permet de programmer directement sur l'application cible.

Dans la plupart des applications, nous utilisons la liaison série RS232 de Micro-Power comme retour d'informations. Il est également possible de connecter d'autres cartes :

- La carte *MEM0 V1.1*: cette carte intègre un régulateur 5V et le bouton poussoir *Reset*. Elle comporte deux boîtiers mémoires standard 8bits. Elle stocke le code exécutable pendant la phase de développement et peut également servir de carte d'extension mémoire pour les réalisations industrielles (capacité de 1Mo par carte).
- La carte *AFFIC* : Elle permet la connexion d'un petit afficheur à cristaux liquides et d'un clavier 8 touches. Elle offre une interface opérateur simplifiée. Cette carte en est encore au stade du prototype et n'a jamais été utilisée dans une réalisation.

Figure 3-38 « Organisation matérielle de l'environnement du développeur »



Bibliographie du chapitre

[332-1] MC68332 - User's Manual

Motorola - Réf: MC68332UM/AD, 1990.

[332-2] CPU32 - Reference manual

Motorola - Réf: CPU32RM/AD Rev 1, 1990.

[332-3] TPU Time Processor Unit - Reference manual

Motorola - Réf: TPURM/AD, 1991.

[ABR79] ABRAHAM J.A., THATTLE S.M.

Fault coverage of test programs for a microprocessor
Proceeding of IEEE test conference 1979 - p 18,22

[ALL89] ALLEN C.

Analog supervisor chip keeps microprocessor out of trouble
MAXIM, SEMINAR Applications Books, 1989

[BAC82] BACONNIER

Détection et corrections des erreurs en mémoire : principes fondamentaux »
Mini et Micros, N°160, 1982, P.113-116

[BAN95] BANYAI C. GERKE D.

EMI Design techniques for microcontrollers in Automotive Applications
Application Note AP-711 INTEL, February 1995

[BAI80] BAIGET M.A.

Optimisation du test des mémoires RAM statiques
2nd colloque international sur la fiabilité et la maintenabilité, Session IIA, P. 25-30

[BAR87] BARANOWSKI F.

Etude et conception de contrôleur de sécurité en logique dynamisée
Doctorat d'état, LILLE 1, 87LIL110134, 1987

[BAR88] BARANOWSKI M.

Utilisation d'un microcontrôleur dans une application de sécurité
Thèse de doctorat d'état, LILLE 1, 88LIL10095, 1988

[CHA90] CHARPENTIER P.

Conception de systèmes à microprocesseur destinés aux milieux soumis à des perturbations électromagnétiques
Notes scientifiques et techniques de l'INRS, INRS Nancy, NS 0076, mars 1990

[CHA91a] CHARPENTIER P.

Evaluation des méthodes d'autotest Checksum et CRC
Electronique, N°4, p. 52-56, 1991

[CHA91b] CHARPENTIER P.

Comment concevoir un système sûr
Electronique, N°13, p. 55-60, 1991

[CHA92a] CHARPENTIER P.

Conception d'un dispositif à microprocesseur sûr de fonctionnement, Règles et méthodes
INRS Nancy - Cahier de notes documentaire INRS N°146 1er trimestre 1992(CDU 621.38)

[CHA92b] CHARPENTIER P.

Contrôle des déroulements du programme exécuté par un microprocesseur
Note Technique INRS n°625/02/156,1992

[CHA92c] CHAN J.C. WOMBACK B.F.

On the relation of errors and its syndrome in signature analysis
Microelectronics and reliability, Vol N°32, 1992, P. 1379-1383

[CHA93] CHARPENTIER P.

Le chien de garde appliqué au microprocesseur
Electronique, N°24, p. 55-60, janvier 1993

[CEG90] CEGELEC

FullFIP Literature Component Specifications - DPS 50242 eA
CEGELEC, Edition du 01/90

[COR96] CORVISIER P.

DSP et RISC : Le mariage du coeur
Electronique N°62 - Septembre 1996

[DAM91] DAMIAMI M. OLIVO P. RICCO B.

Analysis and design of a linear finite state machines for signature analysis testing
IEEE Transaction on computers, Vol 40, N°9, 1991, p. 1034-1045

[DEL93] DELLI VENERI, DI STEFANO, G MANCO

Testing And Diagnostics on software For Microcontrollers of Traction Electrical Drives
ITTG septembre 1993. Actes proceeding Tome 1 p.195-204

[EDF92] EDF

Les techniques d'injection de pannes dans le contexte sûreté de fonctionnement défini par la CEI

CETIM, Recueils des conférences réseaux de terrain et sûreté des automatismes - Automation 1992 - p.105-115

[EWI88] EWICS TC7

Dependability of critical computer systems

REDMILL, Tomes 1 et 2, 1988

[FRO77] FROHWEK R.A.

Signature analysis: a new digital field service method

HEWLETT PACKARD Journal, 1977, p.2-8

[GER86] GERARDIN J. Ph

Aide à la conception d'appareils fiables et sûrs :

DEF.I.

Electronique industrielle, 1986, N°116, p. 58-63

[HAM50] HAMMING R.W.

Error detecting and error correcting codes

The Bell System Technical Journal 29, 1950, H.2, p147,160.

[HAR91] HARMAN THOMAS L.

The MOTOROLA MC68332 microcontroller

Englewood cliffs : Prentice Hall 1991

[HEL86] HELSCHER H., RADER J.

Mikrocomputer in der sicherheitstechnik

Traduction INRS, Les notes scientifiques et Techniques, 1986, n°60

[IWA90] IWASAKI

Analysis of fault detection probability of CMOS combinational circuits and its application la signature testing

System and computer in Japan, Vol.21, N°5, p.29-38

[JAU88] JAULENT Patrick

Le microprocesseur 68000 et sa programmation

Paris : EYROLLES, 1988.

[JEA93] JEAN B., Direction de la SNCF

Une Centrale Odométrique de sécurité

ITTG septembre 1993. Actes proceeding Tome 1 p.195-204

[KAC93] KACPRZAC P.

Etude et conception d'un système de surveillance pour microprocesseur par analyse de signature

Thèse de doctorat, NANCY I, 93NAN10335, 1993

[KER94] KERNIGHAM B.W., RITCHIE D.M.

Le langage C, 2ème édition

Paris : MASSON, 1994.

[KOB85a] KOPKA B., GERARDIN J.P.

Amélioration du niveau de sécurité des systèmes à microprocesseurs par application du concept de redondance

Electricite Technique et Industrie, N°24, 1985

[KOB85b] KOPKA B., GERARDIN J.P.

Amélioration du niveau de sécurité des systèmes à microprocesseurs par application du concept de redondance

Electricite Technique et Industrie, N°24, 1985

[KOB88] KOPKA B.

Etude et validation d'une redondance homogène

d'ordre deux à décalage temporel pour applications à haut niveau de sécurité

Thèse de l'université de NANCY I, avril 1988

[LIG87] LIGONNIERE R.

Préhistoire et histoire des ordinateurs

Robert Laffont, 1987

[LEB80] LEBEUX Pierre, ZAKS Rodnay

Les microprocesseurs

Sybex, technique et applications, 1980

[MAH87] MAHMAGLI N.

Etude et réalisation d'un testeur logique pour

microcontrôleur - Contribution à la mise en sécurité d'un système microprogrammé

Thèse de doctorat d'état, LILLE I, 87LIL10088, 1987

[MAR80] MARINESCU M.

Test fonctionnel de la mémoire vive à grande couverture de pannes

2nd colloque international sur la fiabilité et la maintenabilité, Session IIA, P. 31-37

[MAX94] MAXIM

Article de fond : Des CI de supervision pouvant surveiller des appareils alimentés par batterie

MAXIM Engineering Journal, Volume 23, 1993

[MIC94] MICROCHIP

PIC16C Data Book and User Guide

Microchip 1994

[MOR87] MOREAU R.

Ainsi Naquit l'informatique

Paris :Dunod, 1987

[MOT94] Motorola

80356 User Manual

Motorola, 1994

[OFT92] OFT

Informatique tolérante aux fautes

Observatoire Français des Techniques Avancées, Volume ARAGO15, 1992

[PEL80] PELL C.A.

Test de mémoire par une méthode de « SumCheck »

2nd colloque international sur la fiabilité et la maintenabilité, Session IIA, 1980, P. 38-42

Cahier de notes documentaires, N°150, 1er trimestre 1993, p. 47-54

[SAR91] SARDAT P.

Réaliser une porte ET logique sécuritaire
Electronique, N°12, Novembre 1991

[SAX90a] SAXENA N.R. Mc CLUSKEY E.J.

Analysis of checksums extended - precision checksum, and cyclic redundancy checks
IEEE Tansaction on computer, Vol 39, 1990, P. 969-9785

[TAS78] TASAR

Analysis of fault detection coverage of a selftest software program
Proceeding of the Fault Tolerant Computer Symposium, 1978, p.65-71

[THO94] THOMSON

WARP 1.1 Advanced Data
SGS-THOMSON 1994

[TEX95a] TEXAS-INSTRUMENT

MSP430 Family Architecture and Module Library, User GUIDE
TEXAS-INSTRUMENT 1995

[TEX95b] TEXAS-INSTRUMENT

TMS320C31, Data sheet
TEXAS-INSTRUMENT 1995

[TUV86] TUV

Les microprocesseurs dans les techniques de sécurité
Les Notes Scientifiques de L'INRS, 1986

[VIG93] VIGNERON

Un nouvel outil d'aide à l'analyse du comportement des dispositifs électroniques en présence de défauts : DEFOR

[WIL82] WILLIAMSON T.

Designing microcontroller systems for electrically noisy environments
Application notes AP-125, INTEL Corp., 1982.

[WOB81] WOBIG K.A.

Fail safe microcomputer system for railway signaling. Problems and possibilities
Siemens AG, Braunschweig, Germany, 1981

[YAR79] YARKONI B. , WHARTON J.

Designing Reliable Software for Automotive Applications
Society of Automotive Engineers (SAE), Transactions, 790237, July 1979

[ZAK81] ZAKS Rodney

Du composant au système
Paris, SYBEX, 1981

Normes générales

[IEEE1149.1]

Standard Test Access Port and Boundary Scan Architecture , JTAG Boundary Scan
IEEE, 1990

[IEC 1508] *Une fiche technique sur la base de la norme IEC1508 est en cours d'évaluation et vise à évaluer les systèmes électroniques de commande programmable en vue de leur utilisation dans le cadre d'applications dans lequel l'aspect sécurité revêt une importance critique.*

Chapitre

4

Gestion de l'énergie électrique au sein d'une voiture ferroviaire

4. La gestion de l'énergie au sein d'une voiture ferroviaire

Le cahier des charges ci-dessous a servi de base d'étude pour appliquer la démarche *alimentation intelligente*. Dans un premier temps, nous nous sommes attachés à réaliser un chargeur de batterie qui possède toutes les bases matérielles et fonctionnelles nécessaires à la mise en oeuvre des fonctions désirées par le client. Il a servi par la suite de plate-forme d'essai pour le matériel et pour le logiciel.

4.1 Présentation du problème

Le problème est ici de concevoir l'élément de gestion de l'énergie au sein d'une voiture ferroviaire. Ces voitures sont fabriquées par la société De DIETRICH Ferroviaire pour la société des chemins de fer de l'Irlande du nord (Northen Ireland Railways). Elles constituent des trains qui desserviront la ligne Dublin-Belfast en suivant le littoral.

Chaque rame est constituée d'une motrice et d'une voiture réversible (possédant un deuxième poste de conduite) entre lesquelles sont intercalées les voitures voyageur et de service du nouveau type «Irlande». Ces rames possèdent plusieurs fonctionnalités intéressantes. En effet, elles sont dotées d'un système de supervision et d'aide à la maintenance, d'un système complexe de phonie (distribution de message et de programmes musicaux), d'un système de gestion de l'autonomie de la batterie sur les voitures ainsi que d'un système évolué d'information voyageur.

- ***Le système d'information voyageur***

La distribution des informations est réalisée à l'aide de synoptiques sous forme de cartes placées sur les plates-formes d'accès. Les informations écrites sont distribuées dans les voitures par des afficheurs alpha-numériques. Les messages phoniques sont émis par des hauts-parleurs et superposés aux programmes musicaux accessibles au siège à l'aide d'un casque. L'affichage des informations voyageurs est complété par des pictogrammes au-dessus des portes indiquant la disponibilité des équipements de confort.

Il permet aux voyageurs de recevoir des informations continues sur la position du train, les horaires d'arrivées en gare ainsi que les messages de service. Cette messagerie possède un fonctionnement

automatique qui utilise un système de localisation du train à base d'un récepteur GPS¹. L'envoi de messages manuels est effectué depuis les postes de supervision. Les informations sont complétées par des annonces envoyées par les hôtesses.

- ***Le système d'interphonie***

Il sert à la distribution des messages vocaux de services et permet la gestion des dialogues entre les agents de la rame (chef de train, pilote, hôtesses).

- ***Le système de supervision***

Il permet aux agents de maintenance ainsi qu'au chef de train de visualiser les informations d'état de la rame et de chaque équipement des voitures. L'utilisateur peut se connecter via les postes maîtres placés dans les lieux réservés au service ou sur chaque voiture via des terminaux portables. Ce système permet également un archivage des événements, de certains paramètres et des défauts en vue de la maintenance.

- ***La gestion de l'autonomie des batteries sur les voitures***

L'alimentation électrique est habituellement fournie par un réseau 380V distribué à la rame par la motrice. Cette alimentation est ensuite convertie en un réseau de sécurité basse tension dans des voitures et distribuée aux équipements. Cette alimentation basse tension fournissant l'énergie à des équipements de sécurité, elle est sauvegardée par un élément de stockage local qui est ici une batterie plomb étanche. Cette batterie suppléant au manque de réseau 380V, il est nécessaire de gérer ses caractéristiques au mieux pour tirer le meilleur de ses possibilités et préserver au maximum sa durée de vie. L'élément de conversion de l'énergie (chargeur de batterie) doit donc respecter scrupuleusement les contraintes liées à la batterie (température, courant, tension). La gestion des équipements alimentés et du délestage est effectuée par le poste de traitement local (PLC²), aussi le chargeur doit-il fournir les informations nécessaires à cette gestion. L'alimentation étant un élément clef de la sécurité avec son fonctionnement propre elle possèdera également des liens directs câblés (entrées sortie logiques) avec l'automatisme de la voiture.

Chaque rame n'ayant pas une configuration fixe, il sera nécessaire d'identifier sa constitution ainsi que la position des voitures. De plus le comportement des équipements de confort et de signalisation faisant appel à leurs positions physiques, ils devront être repérés précisément (situation dans la rame et sur la voiture, par exemple : voiture 4, avant, droit).

¹GPS: Global Positionning System, système de localisation à base de triangulation à l'aide de satellites

²PLC : Poste local de Contrôle, automate de gestion locale à la voiture

4.1.1 Architecture de l'automatisme

La rame possède un comportement par défaut pour chaque voiture et un comportement global au train. L'échange des informations se fait donc sur deux niveaux matérialisés par des réseaux informatiques :

- *Le réseau rame* : Il est constitué par l'interconnexion des automates des voitures, des postes de supervision et du système de localisation. A ce niveau transitent toutes les informations nécessaires à l'unification du comportement de la rame (message voyageur, disponibilité des équipements des voitures) ainsi que des requêtes spécifiques aux demandes de la supervision.
- *Le réseau voiture* : Il permet à l'automate (PLC) d'assurer un fonctionnement par défaut des équipements de la voiture si celle-ci se trouve isolée.

Les points relevant de la sécurité (fermeture des portes, anti-enrayeur des freins) sont traités de manières classiques (liaisons câblées). Seules des fonctions de consultation d'informations concernant ces points sont disponibles par le système informatique.

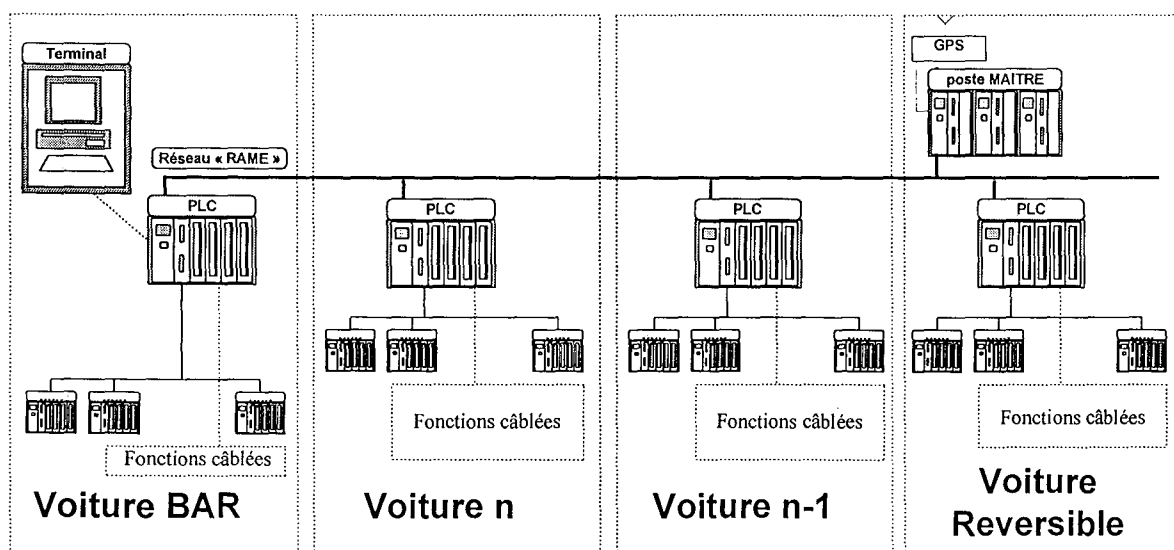
- *La gestion de la rame*

Le réseau RAME relie les PLC des voitures (esclaves) au poste maître placé dans la voiture réversible (une seule voiture de ce type possible par rame). Ce dernier assure la gestion de la supervision, de l'archivage ainsi que les fonctions de localisation et messagerie.

A l'initialisation du système, le poste maître identifie la constitution de la rame, le sens des voitures et la disponibilité des équipements. Il configure ensuite les automates pour permettre la gestion des informations de la rame (messageries) et de proximités (gestion de l'appel hôtesse, disponibilité des toilettes des voitures adjacentes, information de la voiture BAR)

L'utilisateur accède à ce réseau soit par la station maître (mode supervision), soit par un terminal connecté sur un PLC esclave (terminal esclave).

Figure 4-1 « L'architecture d'une rame »



• La gestion du niveau voiture

Chaque voiture possède son comportement propre par défaut. Il est cependant étoffé par les informations du réseau RAME disponibles dans le PLC. Les voitures sont équipées de matériel de technologies hétérogènes, aussi retrouvons nous le réseau VOITURE pour les équipements évolués, ainsi que des fonctions câblées (pour des raisons de simplicité ou de sécurité). Le PLC assure les fonctions de gestion de la voiture, de concentration des informations et de passerelle vers le réseau RAME. Les ordres ou informations transitant d'un réseau à l'autre sont filtrées et contrôlées par le PLC (le comportement voiture primant le comportement de la rame).

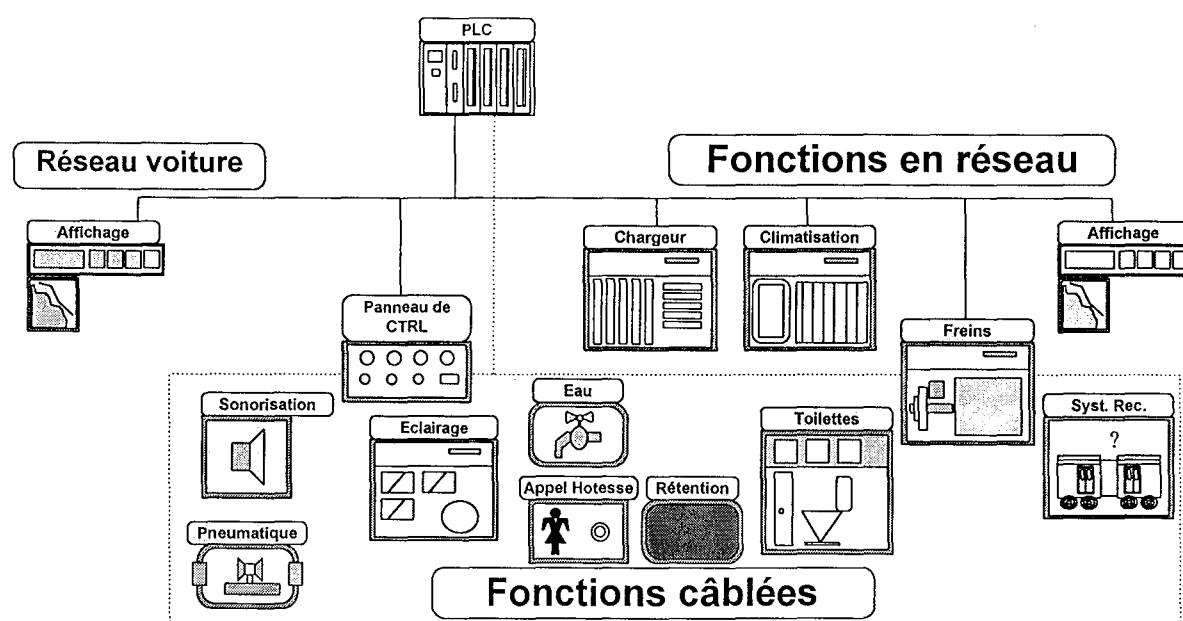
Les fonctions d'automatismes câblées sont :

- Les informations sur les circuits pneumatiques et les différents réservoirs (eaux propres ou usées)
- La gestion de l'éclairage
- La sonorisation
- La gestion de l'appel hôteesse
- Les toilettes
- Le panneau de contrôle/visualisation locale
- Le système de reconnaissance de la position des voitures.

Les fonctions sur le réseau VOITURE sont :

- Les fonctions d'affichage et pictogramme
- La consultation du système anti-enrayeur (frein genre ABS)
- Le système de climatisation
- Le chargeur de batterie

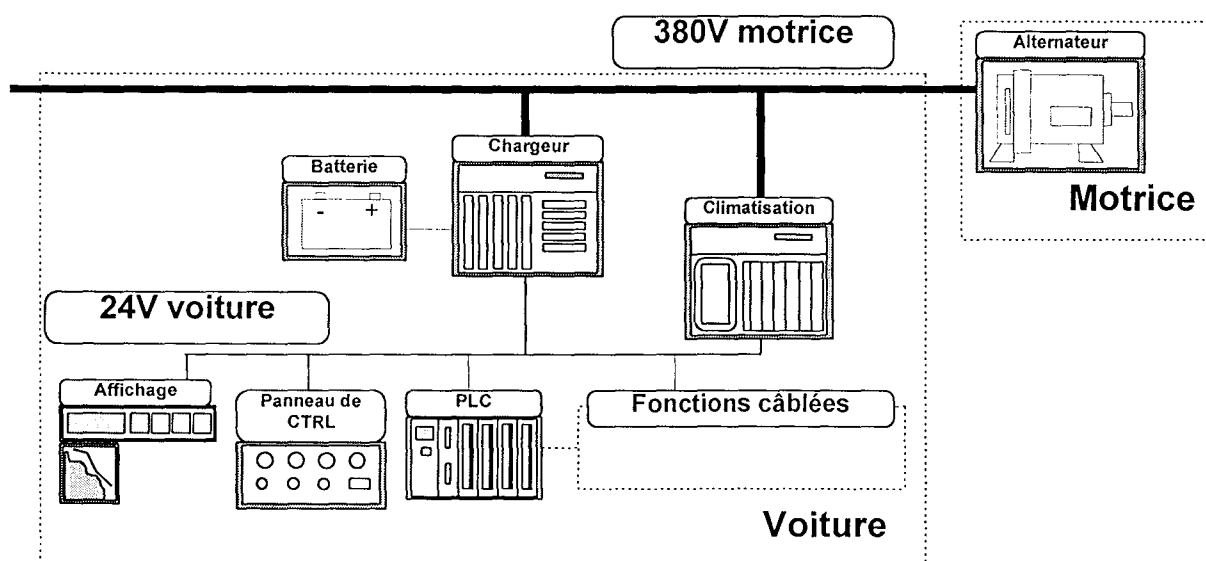
Figure 4-2 « Architecture d'une voiture »



4.1.2 La gestion de l'énergie

La source primaire d'énergie principale est le réseau de distribution triphasé 3x380V 50 Hz fourni par groupe rotatif de 440 kVA situé dans la locomotive et distribué par une *ligne de train* (caractéristiques générales selon la norme NF.F.01.510). Cette source alimente les gros consommateurs d'énergie (compresseur de climatisation, gros éléments de chauffage) et le chargeur de batterie. Ce dernier transforme le réseau 380V en basse tension (environ 24V) pour le distribuer sur la voiture. Il gère également une batterie locale qui supplée le manque de 380V et qui doit assurer le bon fonctionnement de la voiture pendant environ 5 heures en alimentant sélectivement les équipements suivant leurs fonctions et importances.

Figure 4-3 « Architecture de la distribution d'énergie »



• Les sources d'énergies

- *Le réseau 3x380V + Neutre* : bien que source primaire, elle n'est pas considérée comme une source fiable. Il est nécessaire de vérifier en permanence sa présence et ses caractéristiques (souvent la fréquence varie et les phases ne sont pas équilibrées).
- *L'alimentation 24V* : Elle est fournie soit par le chargeur lorsque l'alimentation 3x380V est estimée correcte soit par la batterie. Elle provient d'un redresseur abaisseur de tension isolé. La valeur de la tension de ce réseau n'est en réalité pas 24V mais égale à la tension de charge de la batterie positionnée en tampon (parallèle) sur la sortie du chargeur. Elle varie entre 25 et 31V.
- *La batterie* : C'est l'élément de sécurité. Elle est considérée comme la seule source fiable d'énergie. Elle est tantôt consommatrice, tantôt génératrice d'énergie.

• La gestion de la batterie

Les paramètres de la batterie sont à intégrer dans le fonctionnement du chargeur. Ils sont donnés par les valeurs directement accessibles (courant, tension, temps, température). Ces paramètres permettent en connaissant l'état précédent de déterminer les consignes du chargeur.

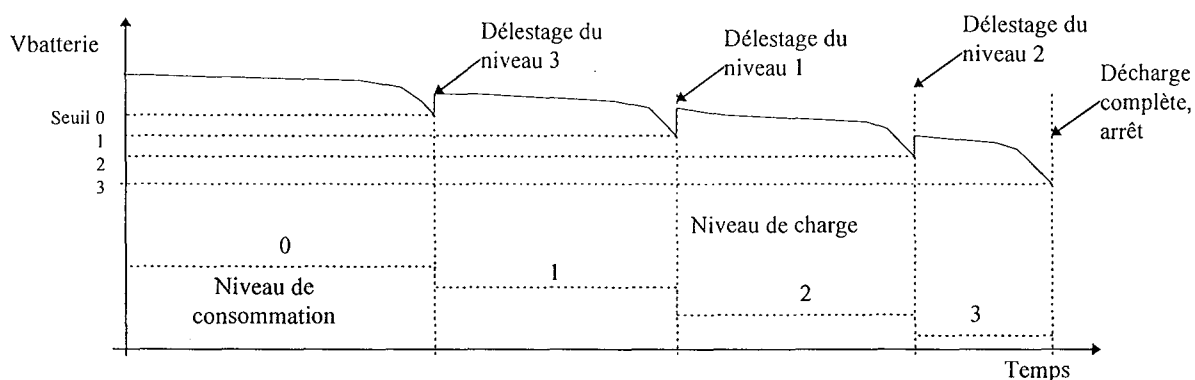
- *En charge* : c'est le chargeur qui impose ses paramètres et modes de charge, mais en respectant les contraintes des consommateurs. Ce mode est actif lorsque réseau 3x380V est présent et jugé de qualité suffisante par le chargeur de batterie.
- *En décharge* : après dégradation ou disparition du réseau d'alimentation principal, le chargeur stoppe sa fonction de recharge mais surveille les paramètres courant et tension de l'installation. Les mesures sont envoyées à l'automate local qui assure la gestion de l'autonomie par délestage progressif des consommateurs.

• La gestion de l'autonomie de la batterie

Le fonctionnement expliqué ci-dessous fait référence à des connaissances élémentaires sur le comportement de la batterie. Il a l'avantage d'être simple et de faire appel à des grandeurs physiques facilement mesurables (la capacité restante dans la batterie n'étant pas disponible).

Son fonctionnement utilise la diminution de la tension batterie au fur et à mesure de sa décharge pour délester les équipements.

Figure 4-4 « Principe de détermination du niveau de décharge »



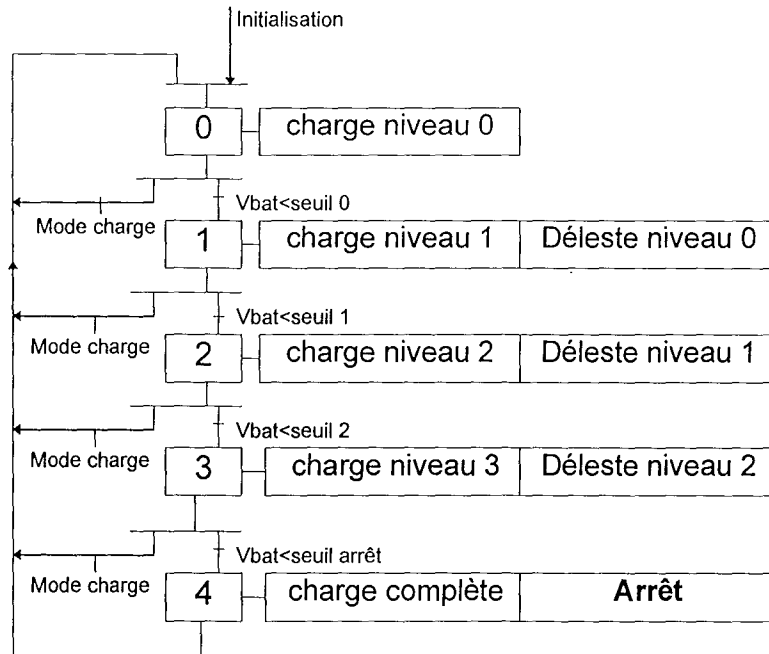
Chaque consommateur du réseau 24V peut être classé selon son degré d'importance (de 0 à 3, 3 pour les plus importants). Certains équipements peuvent être répartis sur plusieurs degrés pour offrir des modes de fonctionnement dégradés et échelonner leur coupure (éclairage).

Figure 4-5 « Exemple de consommateurs avec leur importance »

Importance \ Consommateur	0	1	2	3
Lampes d'appoints	x			
Eclairage voiture lampes paires		x		
Eclairage voiture lampes impaires			x	
Eclairage secours				x
Calculateur chargeur de batterie				x
automate (PLC)				x

La tension mesurée et le mode de fonctionnement de la batterie sont envoyés par le chargeur de batterie au PLC via le réseau VOITURE. La décharge de la batterie est estimée en utilisant les seuils de tension prédéfinis et l'automate déleste les consommateurs dont le degré d'importance est inférieur au seuil de charge. Son fonctionnement peut se schématiser comme suit.

Figure 4-6 « Algorithme de détermination des consommateurs du PLC »



4.1.3 Les différents aspects du problème

- ***Les aspects fonctionnels***

La diversité des fonctions incluses dans le chargeur montre la nécessité de penser le chargeur, non pas comme un redresseur classique, mais comme un objet ayant un comportement précis dans l'installation. Il doit assurer des tâches complexes (régulations, gestion de la batterie) permettre la visibilité de ses paramètres et mesures (base de données) au reste de l'installation et aux opérateurs via un réseau informatique.

- ***Les aspects sécurité de fonctionnement***

Le fonctionnement de la voiture dépend de l'énergie disponible. Cette énergie est contrôlée par le chargeur de batterie. Il doit donc être conçu de manière à obtenir le matériel avec la meilleure fiabilité tant au niveau matériel que fonctionnel.

Les aspects industriels

Le contexte est un marché de 28 voitures, ce qui constitue une petite série. La conception du chargeur nécessite un développement sur mesure (mécanique, électrique et logiciel). L'aspect normes est important.

Ce chargeur servant de base d'étude à la démarche sur l'alimentation intelligente, il se pose le problème d'utiliser correctement le temps et le budget pour développer et livrer le produit au client.

- ***Les aspects normatifs***

Le chargeur est un matériel ferroviaire embarqué sur une voiture transportant des passagers. La conception, réalisation et réception demandera d'être très rigoureuse au point de vue des normes. Ces normes spécifiques à ce genre de réalisation font l'objet d'une clause du contrat.

Parmi ces normes :

-normes générales sur le matériel électrique,

NF.F.01.510 Mode de montage en armoire non ventilée d'alimentation

NF.C.60.000 Règles générales pour le matériel électrique

NF.F 60.000 Règles générales pour le matériel ferroviaire

NF.F.63.826 et 63.808 Norme des câbles matériels roulants

-normes sur la protection des personnes,

NF.F.60.100 Protection contre les chocs électriques

-normes sur le classement feu/fumée des équipements,

NF.F.16101 et 16.102 Tenue au feu, Catégorie B, installation à l'intérieur des véhicules ferroviaires, dégagement de feu et de fumées, spécification A2

-normes générales sur le matériel ferroviaire roulant,

NF.F.60.002 , CEI 571 Tenue au vibration, matériel roulant ferroviaire

-normes sur l'environnement de fonctionnement (emplacement, classe de température, isolation)

UIC 616-3.12.12 et 3.12.4 Essais de rigidité diélectriques

-normes relatives aux essais et mesures

NF.F 63.110 et NF.F.62000 Essais et contrôles dimensionnels

UIC 533 Protection contre les mises à la masse

UIC 550 Essais et mesures sur les chargeurs de batterie

UIC 550-2 chap 1.3 Caractéristiques électriques du chargeur de batteries

UIC 616-3.12.12 et 3.12.4 Essais de rigidité diélectriques

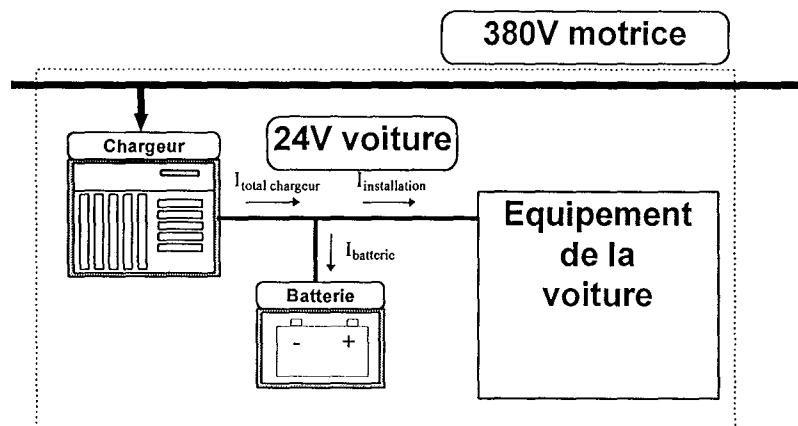
Ces aspects en font une bonne cible pour un essai sur l'actionneur intelligent.

4.2 Description du chargeur de batterie

• La gestion de l'énergie

Le chargeur de batterie transforme l'énergie de la ligne de train 3x380V en réseau basse tension isolé pour alimenter la batterie et les consommateurs de la voiture. Il commence à redresser dès l'apparition d'un réseau 3x380V correct (présence et ordre des phases, fréquence)..

Figure 4-7 « répartition de l'énergie par le chargeur »



En fonctionnement normal, il fournit la puissance de 7,5 Kw nécessaire aux consommateurs de la voiture et à la charge de la batterie . Cette limite permet de respecter le paramètre de puissance nominale du chargeur (7,5 kW). Elle peut être paramétrée par le PLC dans la plage 50 à 100% de cette puissance. Cette limite agit sur la valeur maximum du courant de sortie de chargeur de manière à respecter :

$$P_{max} = U_{consigne\ chargeur} \times I_{max} \quad (4.1)$$

Figure 4-8 « Caractéristique tension et courant de sortie du chargeur sans limitation de I_{batterie} »

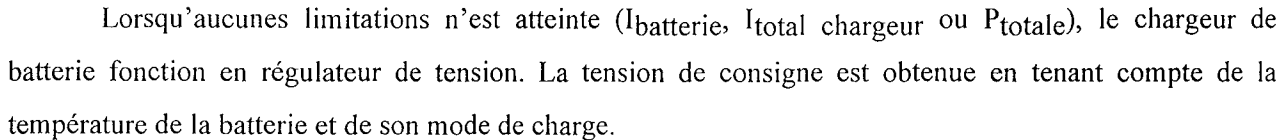
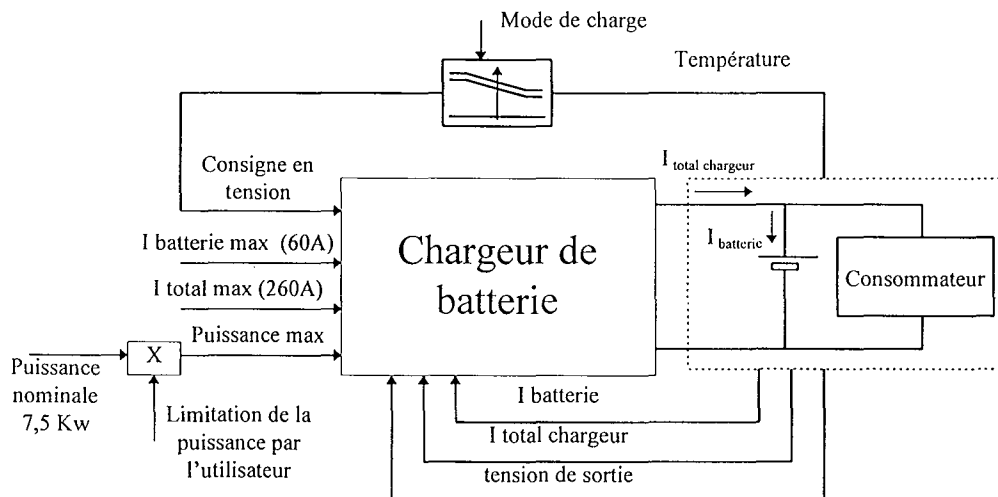


Figure 4-9 « Présentation de la gestion de l'énergie »

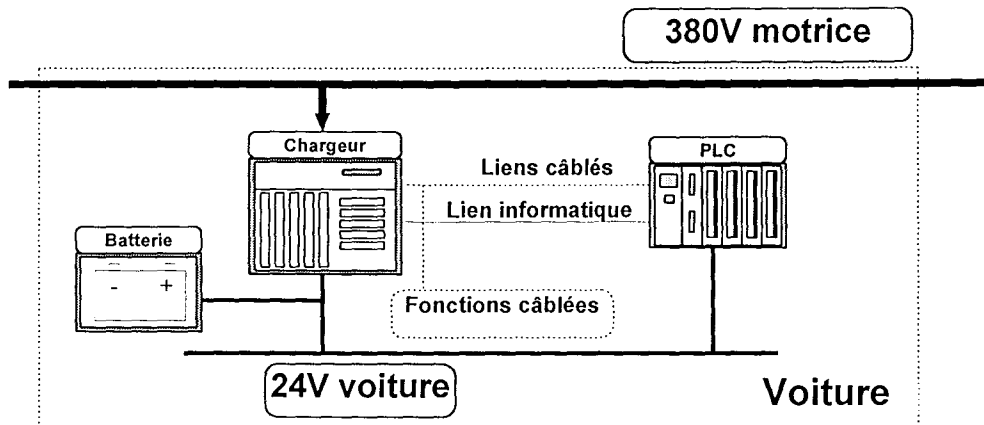


Le chargeur est connecté à l'automate local par le réseau VOITURE. Le PLC interroge cycliquement le chargeur à une fréquence de 1Hz. Le standard retenu pour la liaison est le RS485. Ces dialogues sont codés sur des trames au format du type :

¹ CRC16 : Cyclic Redundance Check 16 bits, calcul d'un mot de vérification calculé par division polynomiale

Le chargeur possède également des liens directs avec l'automatisme. Ce sont la *chaîne de sécurité* qui permet la coupure du contacteur principal (pour le verrouillage lors des interventions) et l'indication sur contact sec que la tension fournie à la voiture est supérieure à la tension d'arrêt (21V). Ce dernier contact a une action directe sur l'automatisme et pallie les problèmes de communications entre le PLC et le chargeur.

Figure 4-10 « Intégration du chargeur »



Le chargeur de batterie est connecté à des lignes à différents potentiels, mais il doit préserver les isolations qui sont de 1500V entre les signaux de nature différents et de 2000V par rapport à la ligne de train 3x380V.

4.2.1 La gestion de la batterie

La batterie retenue est une batterie plomb étanche sans entretien de marque: FULMEN, d'une capacité de 490 Ah, composée de 12 éléments en série monté dans un berceau monté sous le châssis à côté du chargeur de batterie (poids environ 250 Kg).

La gestion est fondée sur le respect des paramètres électriques importants de la batterie. Ces paramètres constituent une base de connaissance suffisante pour assurer la sécurité et préserver la durée de vie de la batterie.

- **Le respect du courant de charge batterie I_{batterie}**

Pour ne pas endommager l'accumulateur, il est nécessaire de limiter son courant de charge. Le constructeur définit cette valeur à 60A. Le respect de cette limite est prioritaire et prime sur la régulation de tension.

- **Le respect de la tension de charge batterie**

La tension de charge est la tension appliquée en fin du cycle de charge à la batterie pour entretenir sont niveaux de charge.

La tension de charge dépend de deux paramètres (Figure 4-11 « Consigne tension du chargeur en fonction de la température ») :

- *la température* : elle influe directement sur la chimie de la batterie et son influence est très importante pour la durée de vie de la batterie. La tension de consigne doit donc prendre en compte ce paramètre. La caractéristique tension de consigne/température fournie par le constructeur est une droite.

- *le mode de charge* : il existe deux modes de charge pour la batterie. Le premier, le mode normal, qui recharge la batterie à 50% de sa capacité en 8h environ. Le deuxième mode, le mode rapide ou égalisation, permet une recharge rapide (50% en 5h). Il est utilisé après une décharge de la batterie, son rôle est également d'équilibrer les FEM des différents éléments accumulateurs constituant la batterie. Ce mode est obtenu en appliquant une tension de consigne supérieure à celle du mode normal de 1,25V, augmentant ainsi le courant de charge.

• *La protection contre la décharge profonde*

Les décharges profondes, voire complètes, sont préjudiciables pour la durée de vie de la batterie¹. En fin de décharge, la tension batterie chute rapidement. Au passage en dessous d'un seuil critique de 1,75 V/éléments, la batterie est considérée comme déchargée. Il faut délester les derniers consommateurs et indiquer que l'alimentation ne peut plus assurer ses fonctions.

• *La limitation des résiduelles alternatives*

Les composantes alternatives des courants étant dommageables pour la durée de vie de la batterie, il est nécessaire de respecter les limites d'ondulations de tensions aux bornes de la batterie. Ces valeurs sont fournies par le constructeur.

• *La gestion de l'autonomie*

La gestion de l'autonomie est centralisée dans l'automate local PLC qui déleste les récepteurs au fur et à mesure de la décharge constitue un comportement primaire mais fonctionnel. L'autonomie de la voiture doit être de 5 heures dont 2 avec tous les équipements de confort.

• *Les caractéristiques des batteries*

Type.....	Plomb étanche
Nombre d'éléments.....	12 éléments
Capacité C5 (capacité de décharge en 5h)	490 Ah
Courant de court-circuit estimé (7*C5)	3430 A
Courant de charge maximum (inférieur à 0.15*C5)	60A
Tension de charge rapide à 20°C	2.4 V/élément
Tension de charge rapide pour la batterie à 20°C (U1)	28.8 V
Tension de charge normale (floating) à 20°C	2.3 V/élément
Tension de charge normale (floating) pour la batterie à 20°C (U2)	27.6 V
Tension d'arrêt à 20°C (pas de compensation de température).....	1.75 V/élément

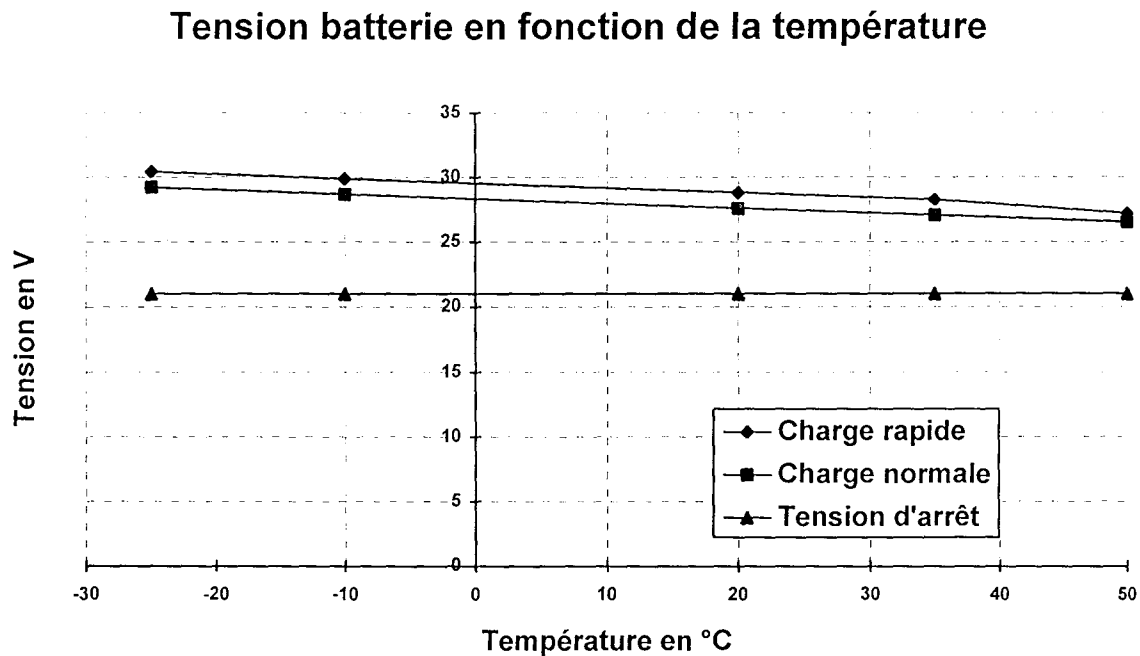
¹ Voir chapitre *La batterie plomb étanche*

Tension d'arrêt de la batterie à 20°C.....	21V
Résistance interne.....	0,416 mΩ/élément
Résistance interne totale pour les 12 éléments.....	5 mΩ
Compensation de température par élément	-0.003 V/élément °C
Compensation de température pour la batterie.....	-0.0369 V/°C

Règle de passage du mode charge normal à charge rapide- Coupure secteur depuis plus de 5 minutes

Règle de passage du mode charge rapide à charge normale.....- Charge rapide depuis une heure
- Courant de charge batterie inférieur à 5 A

Figure 4-11 « Consigne tension du chargeur en fonction de la température »



Bibliographie du chapitre

[PAN94] PANEFIEU B.

Les essais des récepteur GPS

L'onde électrique Janvier 1994 Vol 74 - N°1

Normes générales

- NF.F.01.510 Mode de montage en armoire non ventilées d'alimentation
- NF.F.60.002 , CEI 571 Tenue au vibration, matériel roulant ferroviaire
- NF.F.16101 et 16.102 Tenue au feu, Catégorie B, installation à l'intérieur des véhicules ferroviaires, dégagement de feu et de fumées, spécification A2
- NF.C.60.000 Règles générales pour le matériel électrique
- NF.F 60.000 Règles générales pour le matériel ferroviaire
- NF.F.60.100 Protection contre les chocs électriques
- NF.F.63.826 et 63.808 Norme des câbles
- NF.F 63.110 et NF.F.62000 .. Essais et contrôle de l'aspect dimension
- UIC 533 Protection contre les mises à la masse
- UIC 550 Essais et mesure sur les chargeurs de batterie
- UIC 550-2 chap 1.3 Caractéristiques électriques du chargeur de batteries
- UIC 616-3.12.12 et 3.12.4 Essais de rigidité diélectriques

Cahier des charges De DIETRICH avec références



De Dietrich

- FERROVIAIRE -

Usine de Reichshoffen

CROSS BORDER RAIL PROJECT



NORTHERN IRELAND RAILWAYS



IARNROD éireann

Chapitre

5

Le stockage de l'énergie : l'accumulateur électrochimique

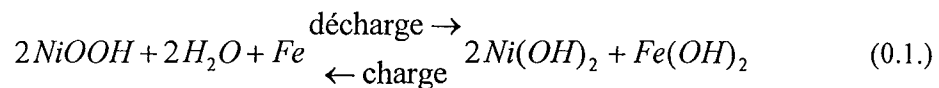
5. Le stockage de l'énergie : l'accumulateur électrochimique

Les accumulateurs et piles électrochimiques permettent de disposer d'une réserve d'énergie électrique autonome. Leur utilisation est très répandue et en plein essor, notamment avec le développement du véhicule électrique [FAU89]. Le problème de ces éléments énergétiques est de réussir à les maintenir en état le plus longtemps possible bien qu'ils soient le siège de nombreux phénomènes électrochimiques non linéaires et qu'ils subissent une altération de leurs performances au cours du temps et des utilisations. C'est pourquoi est apparu la notion de *batterie intelligente*, ce terme résumant les mécanismes mis en oeuvre autour de la batterie pour en améliorer et estimer la confiance de cette source d'énergie [BRO90]. Dans ce chapitre nous nous proposons d'étudier les accumulateurs électrochimiques et plus particulièrement la batterie plomb étanche, l'objectif étant de créer une base de connaissances sur ce type d'accumulateur et permettre une analyse pertinente de ses performances.

5.1 Les différents accumulateurs électrochimiques

- **Les accumulateurs Nickel-Fer (Ni-Fe) [WRO85]**

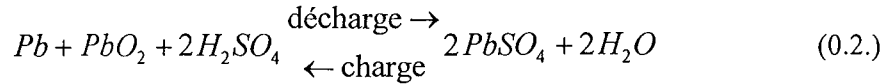
Ce type d'accumulateur a été développé par EDISON en 1901 et fût l'accumulateur le plus répandu jusqu'en 1920. Les réactions électrochimiques sont limitées par les deux électrons de réduction du fer et peuvent être décrites par :



- **Les accumulateurs au plomb (Pb-PbO₂) [BRO90, WRO85]**

C'est l'accumulateur le plus utilisé par l'industrie, du fait de son rapport coût/prix de revient. La forme plomb-ouvert est presque abandonnée du fait des normes de sécurité très contraignantes [CEI896] qui oblige à posséder un local spécifique pour les batteries répondant aux normes de l'industrie chimique (sale d'eau, système anti-incendie, protection contre les dégagements d'hydrogène et oxygène). Elle est désormais remplacée par les batteries plomb étanches à électrolyte gélifié. Ces batteries ne dégagent

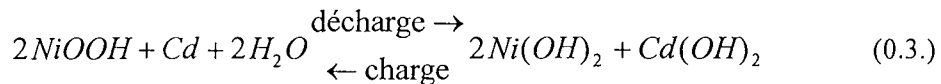
pratiquement plus de mélange gazeux explosif et n'offrent pas de risque de contact avec l'acide. Elles peuvent être directement installées dans les équipements.



Si ce type d'accumulateur n'est pas correctement recyclé, il pose le problème de rejet de métaux lourds dans l'environnement (rejet autorisé de $[Pb^{2+}] < 1 \text{ ppm}$).

- **Les accumulateurs Nickel-Cadmium (Ni-Cd)**

Ils offrent des performances supérieures au plomb en terme de capacité et durée de vie. Ils demandent cependant une alimentation de charge très propre et leur prix est nettement plus élevé que les batteries plomb (environ 1,5 fois).

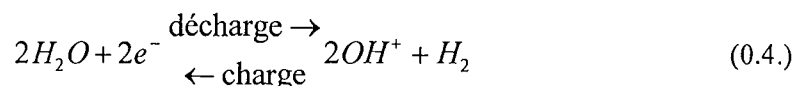


Comme le plomb, la concentration maximale autorisée dans les rejets est très inférieure à 1ppm en Europe.

- **Les accumulateurs Nickel Hydrogène (Ni-H₂) [JON93]**

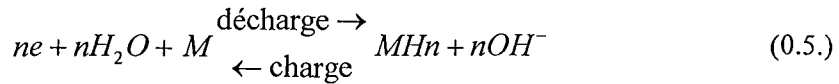
Depuis 1964, les piles H₂/O₂ sont couramment utilisées dans les applications spatiales (satellite et navette). Sur les satellites, ils servent d'accumulateur pour stocker le surplus d'électricité fournit par des panneaux solaires pour le restituer lors des éclipses (grand nombre de cycles).

Cet accumulateur est très supérieur au Ni-Cd car il offre une très grande résistance au cyclage (plus de 10000 cycles avec des décharges à 40% de la capacité). Les ions actifs pour les échanges sont les ions hydrogène H⁺ et l'électrode positive est à base d'hydroxyde de nickel, analogue à celle utilisée dans les accumulateurs NiCd. Durant la décharge, l'hydrogène se recombine en eau avec l'oxygène de l'hydroxyde de nickel. Mais durant la recharge, il se produit un fort dégagement d'hydrogène sous forme gazeuse et la pression à l'intérieur de la batterie peut atteindre 70 bars, d'où son allure de bonbonne de gaz. Ce type d'accumulateur conserve de bonnes caractéristiques à basse température (encore 400Wh/kg à -18°C avec un nombre de cycle jusqu'à 30000). Certains modèles sont capables de fournir 500Wh/Kg pour des démarrages d'avions à réaction.



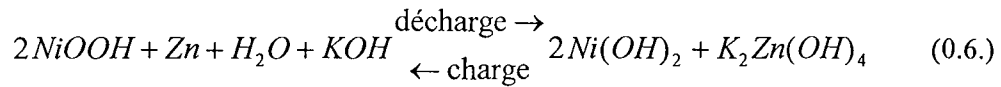
- **Les accumulateurs Nickel-Metal-Hybride (Ni-MH)**

Ils sont une forme dérivée des batteries Nickel-Hydrogène. La batterie Ni-MH recombine les gaz comme l'hydrogène sur des alliages métalliques pour former des oxydes. Ils offrent des performances encore supérieures au Ni-Cd (capacité environ 1,8 fois supérieure) mais son prix est encore dissuasif pour les applications industrielles habituelles [JON93].



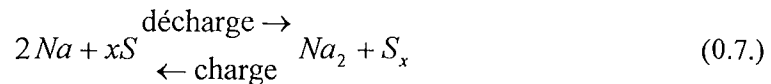
• *Les accumulateurs Nickel-Zinc (Ni-Zn) [WRO85]*

Ce couple à l'avantage d'être moins coûteux que le Ni-Cd et d'avoir une tension d'utilisation 25% plus élevée. En revanche, son plus gros défaut est une mauvaise résistance au cyclage¹ (environ 600 à 1000 cycles).



• *Les accumulateurs Sodium-Soufre (Na-S)*

Il est très intéressant de par son énergie massique d'environ 100 Wh/kg, mais en fonctionnement il génère des températures de 325 à 1000°C, difficilement compatible avec le sodium qui est hautement inflammable.



avec x entre 5 et 2 suivant l'état de charge.

• *Les accumulateurs à négative de lithium (LiNiO₂)*

Ils fournissent une tension élevée par cellule (3,9V), mais sont très coûteux et réservés aux applications militaires ou miniatures. L'utilisation du lithium semble limitée et le nombre de cycle est compris entre 100 et 150.

• *Les accumulateurs Zinc-halogènes [WO85]*

Les avantages des électrodes en nickel sont un coût relativement faible, sa légèreté et produit potentiel élevé. Pour améliorer le cycle de vie de ce type d'accumulateur, des études ont conduit au remplacement de l'électrolyte alcalin par une solution acide. Les couples les plus prometteurs sont Zinc-Chlore (Zn-Cl₂) et Zinc-Brome (Zn-Br₂). Ce dernier donne une FEM de 1,9V. Ce type de pile est adapté au régime de décharge soutenu sur un faible intervalle de temps.

• *Les piles à combustibles [LIN81]*

On parle de pile à combustible lorsqu'il y a consommation d'un élément (d'une ou des deux électrodes), ce qui rend le phénomène irréversible (électrode comburante et combustible). La charge de la pile est réalisée en remplaçant les éléments usés (électrode comburante) et le combustible. Il est cependant possible de remplacer une ou les deux électrodes par des gaz. Les électrodes sont alors composées d'alliage inattaquable plongé dans l'électrolyte.

Ce sont des concurrents sérieux pour les accumulateurs où la recharge s'effectue par inversion des phénomènes électrochimiques.

A l'origine, ce sont des applications militaires. Elles remplacent les groupes électrogènes par des groupes ne laissant pas de signature thermique ou sonore. Des recherches sont en cours en vue de l'adapter au véhicule électrique. Ce sont soit des piles à combustible, soit des générateurs à recharge mécanique (Zn-air ou Al-air).

Le gros avantage des piles à combustible est leur rendement énergétique élevé : 40 à 45% de l'énergie est transformée en électricité contre 30% pour un diesel ou turbine à gaz, 35% pour les centrales thermiques. Le système est également silencieux.

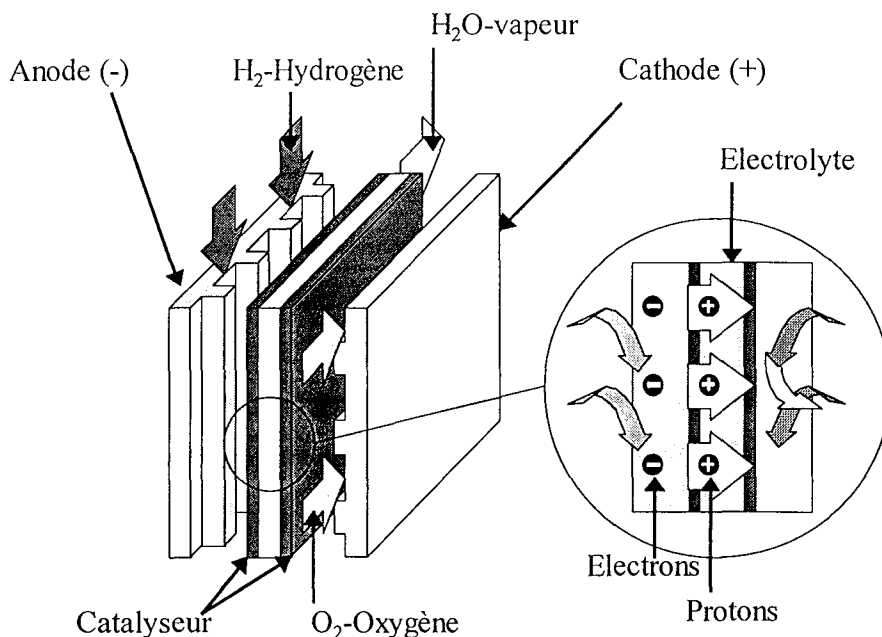
Remarque : Dans la dénomination de leur couple électrochimique, le suffixe air indique que l'on consomme à une électrode un gaz contenu dans l'air (oxygène)

- La pile à combustible H_2 -air [GLA96]

L'électrolyte est fixé sur une matrice poreuse pour éviter qu'il n'envahisse les pores des électrodes.



Figure -5-15-2 « Principe du générateur H_2 -air » d'après [GLA96]



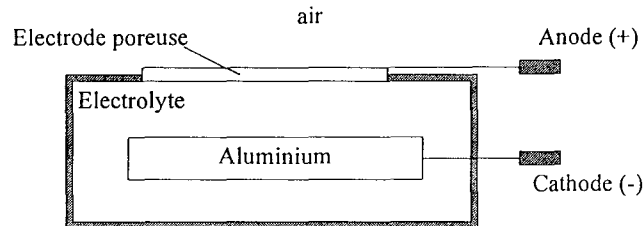
- Le générateur Al-air [RUD88, WRO85]

Il présente des caractéristiques intéressantes en terme d'énergie massique (400 Wh/kg pour une autonomie de 100h) et il est en cours d'adaptation au véhicule électrique [RUD88]. L'électrode à air fonctionne en milieu alcalin (hydroxyde de potassium KOH, NaOH ou NaCl). Elle réalise continuellement la réduction de l'oxygène de l'air en ions OH^- , c'est une électrode analogue à celle utilisée dans les piles à combustibles H_2 -air. L'électrolyte constitue le combustible, mais l'électrode d'aluminium est oxydée lors

¹ cyclage : capacité à conserver ses caractéristiques à la suite des cycles de charge/décharge

de la décharge sous la forme d'aluminate de potassium ou de sodium. Les aluminates peuvent être redécomposées dans un organe annexe pour redonner du KOH ou NaOH et Al_2O_3 , H_2O . L'aluminium n'étant pas régénérable électriquement à partir des aluminates, le fonctionnement du système impose donc le remplacement périodique de l'électrolyte et de l'électrode d'aluminium.

Figure 5-3 « Principe de fonctionnement du générateur Al-air » d'après [ECT96]



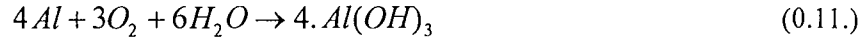
L'aluminium réagit avec les ions OH^- et forme un hydroxyde d'aluminium en libérant 3 électrons de valence par atome d'aluminium (fort rendement électronique).



A l'électrode poreuse, l'eau de l'électrolyte réagit avec l'oxygène de l'air et absorbe les électrons fournis par la cathode après leur passage dans le circuit externe.



La réaction globale est :



Cette réaction s'effectue jusqu'à consommation complète de l'électrode d'aluminium ou ouverture du circuit externe (pas de phénomène d'autodécharge de la pile). La tension de la pile à électrolyte KOH est d'environ 1,2V.

Dans la version sous-marine de cette pile qui commence à concurrencer les générateurs H_2 -air, l'électrode poreuse est en contact, non plus avec de l'air, mais de l'eau. La réaction à la cathode devient :



Dans ce cas, la tension de la pile baisse alors à 0,5V et il se produit un dégagement d'hydrogène à l'électrode poreuse.

Tableau 5-1 « Les différents électrolytes de la pile Al-air » d'après [ECT96]

Type	Température de fonctionnement	Application ou potentiel d'application
Alcalin	50 à 100°C	utilisé dans les véhicules spatiaux (Gemini, Apollo, navette), très efficace mais très cher
Polymère solide	50 à 100°C	Fort potentiel pour les voitures et bus (40 bus prototypes équipés au Canada) Prévision de commercialisation vers 1998
Acide phosphorique	200°C	Existe en unité de 200kwh aux USA
Carbone	600°C	Existe en unité de 1 à 2 MW (Santa Clara, USA, 1996) Extrêmement fiable, mais coûte environ 1000 à 2000\$/kW
Oxyde solide	500 à 1000°C	Existe en unité de 2kW à 2MW

Remarque: Les piles fonctionnant à haute température sont généralement couplées à un système de récupération de la chaleur (turbine, chauffage).

- Le générateur Zn-air [ZUM94, WRO85]

C'est un générateur similaire à la pile Al-air sauf que l'électrode Aluminium a été remplacée par du Zinc. Son rendement électronique est plus faible (2 électrons de valence au lieu de 3).

Utilisé à l'origine au Japon et en France par la CGE, il semblait être une des voies les plus prometteuses pour la traction, notamment sous la forme de réacteur triphasique² avec des particules de zinc en suspension. Il est actuellement à l'essai en Allemagne pour l'équipement de véhicule électrique utilitaire (MERCEDES BENZ).

La recharge s'effectue par remplacement de l'électrode en zinc et l'électrode à air ne nécessite pas de platine ou de palladium pour les catalyseurs mais peut utiliser du carbone.

Tableau 5-2 « Résumé des différents couples électrochimiques les plus utilisés »

Batterie Couple	Energie /Poids	Tension d'une cellule	Tension en fin de décharge lente/rapide	Nombre de cycle	Température de fonctionnement	Remarques
Nickel-Fer <i>Ni-Fe</i>	25Wh/kg	1,2V		900	-20°C	la capacité décroît très fortement avec la température
Plomb <i>Pb-PbO₂</i>	45 Wh/kg	2 V	1,8 à 1,65 V	600 à 1000	20 à 50°C	coût de 1000 à 1500 ff/kWh
Nickel Hydrogène <i>Ni-H₂</i>	56Wh/kg	1,2 V		10000	-20 à +60°C	doit résister à de forte pression interne
Nickel Cadmium <i>Ni-Cd</i>	60 Wh/kg	1,2 V	1,09V / 0,7V		20 à 50°C	
Nickel Zinc <i>Ni-Zn</i>	90 Wh/kg	1,5 V		600 à 1000	20 à 50°C	
Sodium Soufre <i>Na-S</i>	100 Wh/kg				325 °C	
Lithium ion <i>Li-ion</i>	120 Wh/kg	3,9 V	2,75V / 1,45V		-20 à +55 °C	
Nickel Métal Hybride <i>Ni-MH</i>					20 à 50°C	
Générateur Hydrogène Oxygène <i>H₂-O₂</i>		1,1V			1000°C	
Générateur Zinc air <i>Zn-air</i> électrolyte au carbone	208 Wh/kg			400 à 1800 pour l'électrode à air suivant le régime	600°C	utilisation jusque 80% de consommation de l'électrode en zinc
Générateur Aluminium air <i>Al-air</i> électrolyte alcalin	400 Wh/kg	1,2V			40 à 100°C	recharge par remplacement des électrodes et de l'électrolyte

² triphasique : faisant intervenir les état solide, liquide et gazeux

5.2 Principes physiques

La création d'une base de connaissances nécessite une bonne compréhension des phénomènes internes des accumulateurs. Bien qu'il soit difficile de décrire précisément les réactions électrochimiques, il est possible de donner un comportement chimique global suffisamment représentatif pour servir de support d'analyse. Aussi, les principes exposés dans ce paragraphe sont-ils fondamentaux pour la compréhension du comportement et des caractéristiques des piles et accumulateurs. Ils permettent de comprendre la définition et l'interaction des différents paramètres de fonctionnement.

5.2.1 Rappel sur la théorie des piles électrochimiques

Les piles électriques constituent une application particulière d'un phénomène d'interaction entre corps chimiques et électrodes appelé réaction électrochimique. Elles sont fondées sur la création d'un couple d'oxydation et de réduction de deux électrodes immergées dans une solution acide ou alcaline.

- *La tension d'électrode [HLA79]*

Lorsqu'un métal M est plongé dans une solution contenant des ions M^{n+} ou dans un solvant ionisant, il aura tendance à se charger négativement en surface par la suite d'un excès d'électrons. Il attire les ions positifs de son voisinage pour former une couche positive à sa surface.

Le tableau ci dessous montre les potentiels électrochimiques de différents métaux utilisables pour la fabrication des électrodes.



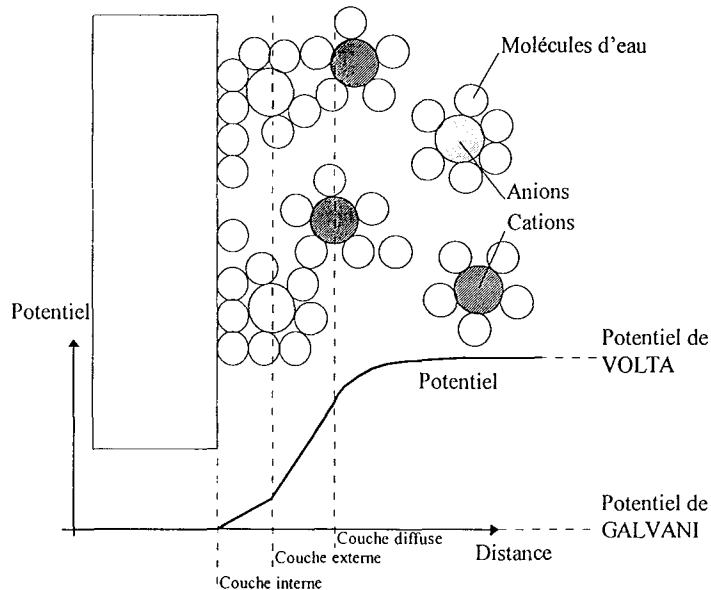
Tableau 5-3 « Exemple de potentiels électrochimiques »

Métal	Potentiel (V)
$Au^{+++} + 3e^- \rightarrow Au$ (Or)	+1,42
$Cu^+ + e^- \rightarrow Cu$ (Cuivre)	+0,522
$Pb^{++} + 2e^- \rightarrow Pb$ (Plomb)	-0,1263
$Ni^{++} + 2e^- \rightarrow Ni$ (Nickel)	-0,23
$Cd^{++} + 2e^- \rightarrow Cd$ (Cadmium)	-0,4026
$Fe^{++} + 2e^- \rightarrow Fe$ (Fer)	-0,409
$Cr^{++} + 2e^- \rightarrow Cr$ (Chrome)	-0,557
$Zn^{++} + 2e^- \rightarrow Zn$ (Zinc)	-0,7628
$Al^{+++} + 2e^- \rightarrow Al$ (Aluminium)	-1,706
$Ca^{++} + 2e^- \rightarrow Ca$ (Calcium)	-2,76
$Ba^{++} + 2e^- \rightarrow Ba$ (Baryum)	-2,9
$K^+ + e^- \rightarrow K$ (Potassium)	-2,924
$Li^+ + e^- \rightarrow Li$ (Lithium)	-3,045

Par équilibre, une couche d'ions de signe opposé va également se former quasi instantanément le long de cette première couche. La couche double électrochimique ainsi formée montre qu'il existe une différence de potentiel E_M entre le métal et la solution appelée tension absolue ou tension de surface de l'électrode [BAR80, BEC74]. Par définition elle est égale à :

$$E_M = \text{Potentiel de GALVANI} - \text{Potentiel de Volta} \quad (0.14.)$$

Figure 5-4 « Modèle de la double couche de GOUY et CHAPMAN »



• La formule de NERNST³

Le calcul de cette différence de potentiel E_M est donné par la formule de NERNST (1890) :

$$E_M = E_0 + \left(\frac{RT}{nF} \right) \times \ln(a_{M^{n+}}) \quad (0.15.)$$

Avec

E_0 : tension constante appelée tension normale du métal.

R : constante des gaz parfaits (BOLTZMAN) ($J.K^{-1}.mole^{-1}$).

T : température absolue (K).

F : constante de FARADAY, charge d'une mole d'électrons (C).

$a_{M^{n+}}$: activité des ions M^{n+} dans la solution.

La mesure d'une différence de potentiel ne peut s'effectuer qu'entre deux conducteurs plongeant dans l'électrolyte, donc E_M ne peut être connue en valeur absolue. Elle sera donnée par rapport à un élément de référence. Par convention, le zéro de l'échelle des potentiels est fourni par une électrode à hydrogène.

³ Walter NERNST, physicien et chimiste Allemand (Briesen, Prusse, 1864-1941), prix Nobel de chimie en 1920

• **La force électromotrice d'une pile ou tension d'équilibre U_0**

Une pile est constituée par l'association de deux électrodes dissemblables plongeant dans un ou plusieurs électrolytes. La représentation schématique d'une pile est donnée par l'indication des couples métaux des électrodes/électrolytes.

La force électromotrice d'une pile est la différence de potentiel qui existe en circuit ouvert entre ces électrodes (aucun courant ne circule).

$$U_0 = E_{\text{électrode 1/électrolyte 1}} - E_{\text{électrode 2/électrolyte 2}} \quad (0.16.)$$

La mesure de ces potentiels peut être réalisée par la technique de TAFEL (Voir annexe B).

• **L'énergie électrique d'une pile [HLA79, BAR80, NEW91]**

Lors de la décharge, l'énergie chimique libérée est transformée en énergie électrique. En circuit ouvert, le travail électrique fourni par une pile est égal à nFU_0 ; n est le nombre d'électrons mis en jeu lors de la réaction élémentaire aux électrodes, F le Faraday (96500 Coulombs) et U_0 la FEM de la pile.

A toute réaction chimique correspond une variation d'enthalpie libre ΔG du système formé par l'ensemble des réactifs. En utilisant les principes de la thermodynamique on exprime l'égalité des travaux chimiques et électriques par :

$$nFU_0 = -\Delta G \quad (0.17.)$$

En combinant cette équation avec celle de GIBBS-HELMOLTZ :

$$\Delta G = \Delta H + T \cdot \Delta S \quad (0.18.)$$

On obtient :

$$U_0 = -\frac{\Delta H}{nF} + T \left(\frac{dU_0}{dT} \right)_p + T \left(\frac{dU_0}{dP} \right)_T \quad (0.19.)$$

ΔH représente la variation d'enthalpie de la réaction chimique.

La formule montre qu'en plus de la FEM d'origine chimique s'ajoute une FEM d'origine thermique. Cette dernière énergie est fournie par le milieu extérieur sous la forme de chaleur afin de maintenir constante la température de la pile.

Le terme $\left(\frac{dU_0}{dT} \right)_p$ est le coefficient de température, il peut être positif ou négatif et atteindre un ou deux millivolts par degré.

• Les réactions chimiques aux électrodes

Lorsque l'on relie les électrodes par un conducteur métallique, des électrons circulent à travers le circuit de la cathode vers l'anode. En partant de l'électrode négative, le manque d'électrons crée une réaction d'oxydation. Le matériau de l'électrode *réducteur* se décompose en ions qui se recomposeront avec des ions négatifs, généralement de l'oxygène :



En arrivant sur l'électrode positive, les électrons vont produire une réduction sur la surface de l'électrode en contact avec l'électrolyte (composition avec les ions positifs oxydants de l'électrolyte) :

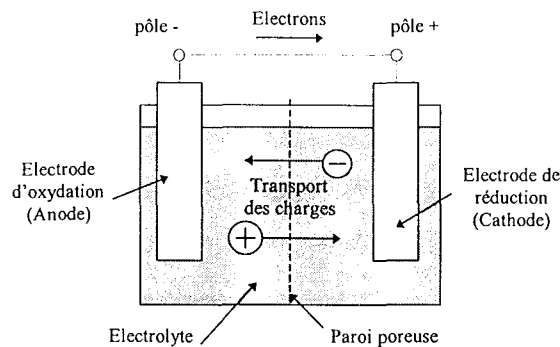


La réaction globale s'écrit



Il y a dissolution de l'électrode négative et augmentation du volume de l'électrode positive; la concentration en ions des électrolytes diminue.

Figure 5-5 « Schéma de principe d'une pile » d'après [HLA79]



Remarque sur la polarité des électrodes :

La cathode, au sens habituel, est l'électrode qui attire. Elle correspond à la borne électrique positive de la pile (Anode). L'anode et la cathode des électrodes au sens électrique correspondent donc respectivement à la cathode et l'anode au sens chimique. Nous utiliserons la convention électrique de la pile dans le reste de ce chapitre.

Nous rappellerons également que le sens réel des électrons et le sens inverse de la convention utilisée pour la notation du sens des courants.

La formule de NERNST fait intervenir l'activité des espèces oxydantes $a(OX)$ et réductrices $a(RED)$ et peut s'écrire sous la forme plus commune :

$$E_M = E_0 - \left(\frac{RT}{nF} \right) \cdot \ln \left(\frac{a(RED)}{a(OX)} \right) \quad (0.23.)$$

Remarque : $a(i)$ représente l'activité de l'espèce i .

- **Le phénomène de polarisation**

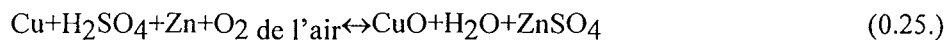
La polarisation d'une électrode peut être définie comme la différence de tension entre le potentiel de l'électrode lorsque le circuit est ouvert avec la tension à ses bornes lorsqu'elle débite un courant. Cette mesure de la polarisation d'une électrode peut être réalisée par la technique de TAFEL [BRE96] (Voir annexe C). Elle correspond à la production de forces électromotrices en sens inverse de la FEM faisant ainsi diminuer le potentiel aux bornes de la pile. Elles résultent de la modification de la nature des électrodes et l'accumulation à leur entourage de produits engendrés par les réactions. Cette concentration d'ions de signe inverse des électrodes altèrent l'efficacité des réactions électrochimiques en limitent le nombre d'oxydoréduction conduisant à une diminution du potentiel (application de la formule de NERNST). Cette chute de tension peut rendre la pile inutilisable, elle est dite polarisable.

Exemple :

La pile DANIELL: $\text{Cu}/\text{CuSO}_4/\text{ZnSO}_4/\text{Zn}$ est impolarisable car lors de la réduction se forme un dépôt de Cu sur l'électrode en Cuivre et lors de l'oxydation du ZnSO_4 à partir de l'électrode en Zinc. Les électrolytes contiennent un type de sel de l'électrode.



La pile VOLTA : $\text{Cu}/\text{H}_2\text{SO}_4/\text{Zn}$ est polarisable car lors de l'oxydation il se produit un dépôt d'oxyde de cuivre CuO sur la cathode et un dépôt de sulfate de plomb ZnSO_4 sur l'anode lors de la réduction.

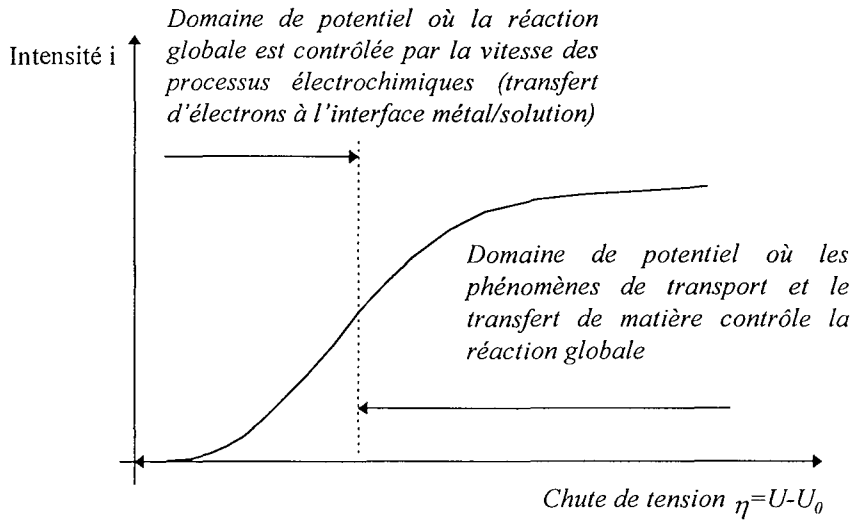


Les piles utilisables pratiquement sont celles dont on a réussi à éliminer de façon continue les produits de réaction responsable de la polarisation en les recombinaient avec un dépolarisant (l'oxygène de l'air, électrolyte alcalin, halogènes). Dans ce cas, les principales sources de surtension sont les phénomènes de transport de masses.

- **Le transport des masses**

A la double réaction chimique des électrodes s'ajoute le déplacement des ions de l'électrolyte (*phénomènes de transport*). Ce transfert de masse est un phénomène très important en électrochimie. En effet, la cinétique des transferts de charge et les réactions chimiques associées peuvent être très rapides devant les phénomènes de transport. Ceci implique que dans le cas d'un système électrochimique homogène, la vitesse globale de la réaction chimique peut être totalement contrôlée par la vitesse avec laquelle les espèces électroactives se déplacent.

Figure 5-6 « Influence du phénomène de transfert de masse sur la chute de tension de la pile »



On dénombre trois types de transport de matière :

- La migration

C'est le mouvement d'une espèce chargée sous l'effet d'un champ électrique. L'équation du flux de migration pour une espèce i s'écrit :

$$J_i(x) = \frac{z_i F}{RT} \times D_i \times C_i \times \frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} \quad (0.26.)$$

D_i : coefficient de diffusion (m^2s^{-1})

C_i : concentration (mole.m^3)

$\Phi(x)$: potentiel électrique à la distance x de la surface (V)

$J_i(x)$: flux ($\text{mole.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$)

- La diffusion

C'est le mouvement d'une espèce sous l'influence d'un gradient de concentration chimique.

L'équation du flux de diffusion est pour une espèce i :

$$J_i(x) = D_i \times \frac{\partial C_i(x)}{\partial x} \quad (0.27.)$$

- La convection

C'est le transport d'une espèce par mouvement hydrodynamique⁴ de l'élément de volume de fluide qui la contient. Les lois de la dynamique des fluides s'appliquent pour déterminer la vitesse $v(x)$ de l'écoulement qui peut être laminaire, turbulent, naturel ou forcé. Le flux est donné par :

$$J_i(x) = C_i.v(x) \quad (0.28.)$$

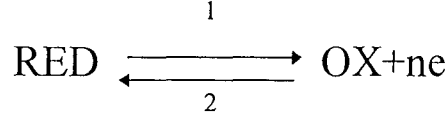
$v(x)$: vitesse de l'écoulement (m.s^{-1})

⁴ mouvement hydrodynamique : mouvement de l'ensemble du fluide

Ce dernier phénomène est pratiquement éliminé dans les systèmes où l'électrolyte est stagnant ou figé (gel, fixation sur un support poreux).

• **La cinétique des réactions électrochimiques [BAR80, VET67]**

D'une manière générale, la surtension de transfert de charge s'écrit :



Par convention, dans le sens d'oxydation 1, le courant est anodique et positif, dans le sens de la réduction, il est cathodique et négatif.

Le modèle de BUTLER-VOLMER permet d'écrire les vitesses (mole.s^{-1}) des réactions chimiques en fonction des exponentielles de la différence de potentiel entre l'électrode E et le potentiel d'équilibre de la réaction E_0 :

$$k_1 = k_0 \cdot \exp\left(\frac{\alpha n F}{RT} (E - E_0)\right) \quad (0.29.)$$

$$k_2 = k_0 \cdot \exp\left(\frac{-(1-\alpha)nF}{RT} (E - E_0)\right) \quad (0.30.)$$

k_0 : constante de vitesse standard de la réaction (mole.s^{-1}) correspondant à la vitesse de transport des masses. Si $E=E_0$ alors $k_1=k_2=k_0$

α : coefficient de transfert de charge, $0 \leq \alpha \leq 1$

n : nombre d'électrons transférés.

Les courants d'électrode I_a anodique et I_c cathodique :

$$I_a = nF \cdot k_1 \cdot A \cdot [R]_{el} \quad (0.31.)$$

$$I_c = -nF \cdot k_2 \cdot A \cdot [O]_{el} \quad (0.32.)$$

A : Aire de l'électrode (m^2)

$[R]_{el}, [O]_{el}$: concentration à la surface de l'électrode

Le courant de circulation I est égale à la somme algébrique : $I = I_a + I_c$ (0.33.)

$$I = nFAk_0 \left[[R]_{el} \cdot \exp\left(\frac{\alpha n F}{RT} (E - E_0)\right) - [O]_{el} \cdot \exp\left(\frac{-(1-\alpha)nF}{RT} (E - E_0)\right) \right] \quad (0.34.)$$

A la tension d'équilibre U_0 , aucun courant I ne circule, le module du courant anodique est égal à celui du courant cathodique. Ce courant d'échange est noté I_0 :

$$I_0 = nFAk_0[R] \cdot \exp\left(\frac{\alpha nF}{RT}(U_0 - E_0)\right) = nFAk_0[O] \cdot \exp\left(\frac{-(1-\alpha)nF}{RT}(U_0 - E_0)\right) \quad (0.35.)$$

D'où l'on tire la relation

$$\frac{[O]}{[R]} = \exp\left(\frac{nF}{RT}(U_0 - E_0)\right) \quad (0.36.)$$

$[R], [O]$: concentrations au coeur de la solution

Ce qui permet de poser

$$I_0 = nFk_0 \cdot [R]^{1-\alpha} \cdot [O]^\alpha \quad (0.37.)$$

La chute de tension $E-E_0$ est appelée surtension η

$$\eta = E - E_0 \quad (0.38.)$$

L'expression du courant I devient alors

$$I = I_0 \left[\frac{[R]_{el}}{[R]} \cdot \exp\left(\frac{\alpha nF}{RT}(E - E_0)\right) - \frac{[O]_{el}}{[O]} \cdot \exp\left(\frac{-(1-\alpha)nF}{RT}(E - E_0)\right) \right] \quad (0.39.)$$

En posant pour hypothèse que les concentrations sont identiques en surface et au sein de la solution, nous obtenons la relation de BUTLER-VOLMER [STO93].

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha n \eta F}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-(1-\alpha)n \eta F}{RT}\right) \right] \quad (0.40.)$$

- I : courant apparent (A)
- I_0 : courant d'échange (A)
- α : coefficient de transfert de charge, $0 \leq \alpha \leq 1$
- n : nombre d'électrons transférés
- η : surtension

En pratique dans les accumulateurs électrochimiques, l'électrolyte est stagnant et soumis à un faible champ électrique (tension de cellule faible par rapport à la distance des électrodes). De ce fait la vitesse de la réaction peut être approchée par le phénomène prépondérant de diffusion (mouvement dû au gradient de concentration). Dans l'hypothèse que la variation de la concentration dans la couche de diffusion est linéaire, nous pouvons simplifier l'expression du gradient et obtenir :

$$J_O = D_O \times \frac{[O] - [O]_{el}}{d} \quad (0.41.)$$

$$J_R = D_R \times \frac{[R] - [R]_{el}}{d} \quad (0.42.)$$

- $J_{O,R}$: Densité de flux de matière sous forme Oxydée et Réduite ($\text{mole.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
- $J > 0$ pour l'espèce produite à l'électrode

$J < 0$ pour l'espèce consommée.

$D_{O,R}$: coefficient de diffusion

d : épaisseur de la couche de diffusion (zone de l'électrolyte en contact avec l'électrode où la concentration de l'électrolyte ne peut être considérée comme constante)

On peut alors exprimer les courants en fonction des flux de diffusion :

$$I_a = nFAJ_O = nFAD_O \times \frac{[O] - [O]_{el}}{d} \quad (0.43.)$$

$$I_c = nFAJ_R = nFAD_R \times \frac{[R] - [R]_{el}}{d} \quad (0.44.)$$

• La tension aux bornes d'un accumulateur V

La courbe représentant le potentiel V aux bornes d'une pile en fonction du courant débité i est communément appelé caractéristique de la pile. Cette courbe est déduite de la différence des courbes de polarisation de chaque électrode et de la résistance interne.

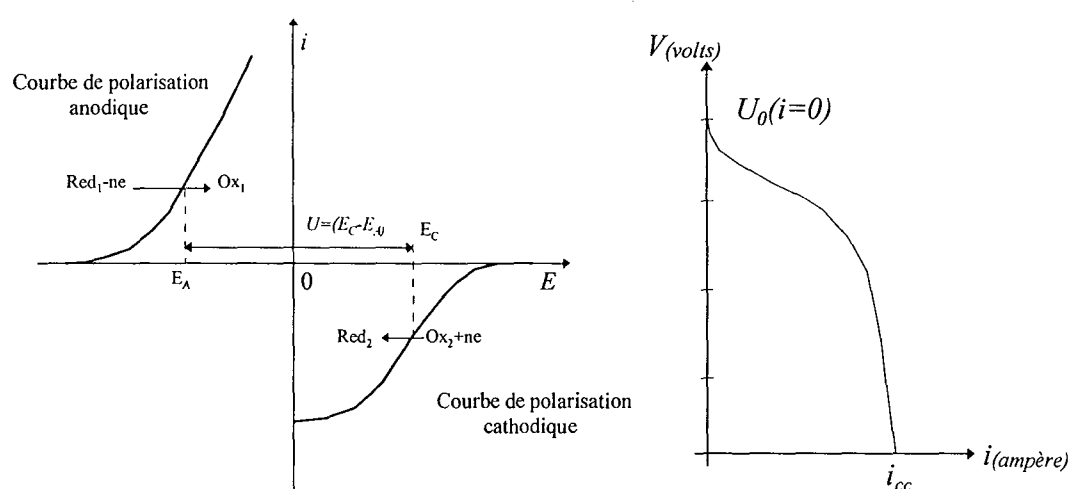
$$V = U - r_{\Omega} i \quad (0.45.)$$

U est obtenu en effectuant la différence des potentiels des électrodes à i à l'aide des courbes de polarisation des électrodes.

$$U = E_C - E_A \quad (0.46.)$$

Les caractéristiques obtenues sont de la forme :

Figure 5-7 « Allure des courbes de polarisation des électrodes et de tension en fonction du courant de décharge »



Cette tension U peut s'exprimer en fonction de la tension d'équilibre en circuit ouvert U_0 en tenant compte des différentes chutes de tension (surtensions) qui interviennent lors du fonctionnement de l'accumulateur.

$$V = U_0 + \sum \eta_x - r_\Omega \cdot I \quad (0.47.)$$

V : Tension de l'élément en régime stationnaire

U_0 : Tension d'équilibre

r_Ω : Résistance ohmique

$\sum \eta_x$: Somme des surtensions dues aux phénomènes électrochimiques (négative en décharge)

Les hypothèses simplificatrices que l'on peut apporter consiste principalement à négliger la non-homogénéité de certains paramètres et réactions. Ce sont :

- Les densités de courant sont uniformes sur toute la surface des électrodes.
- Les effets de bord sont négligés.
- La stratification verticale de l'électrolyte est négligée.
- La température est considérée comme constante au sein de l'accumulateur.
- La nature poreuse des électrodes est considérée comme un empilement d'électrodes planes de compositions homogènes [MIC76].
- Les phénomènes transitoires ne sont pas pris en compte.
- Les groupements d'éléments constituant une pile sont assimilés à un seul couple Anode-Cathode.

Les surtensions de cristallisation sont négligées.

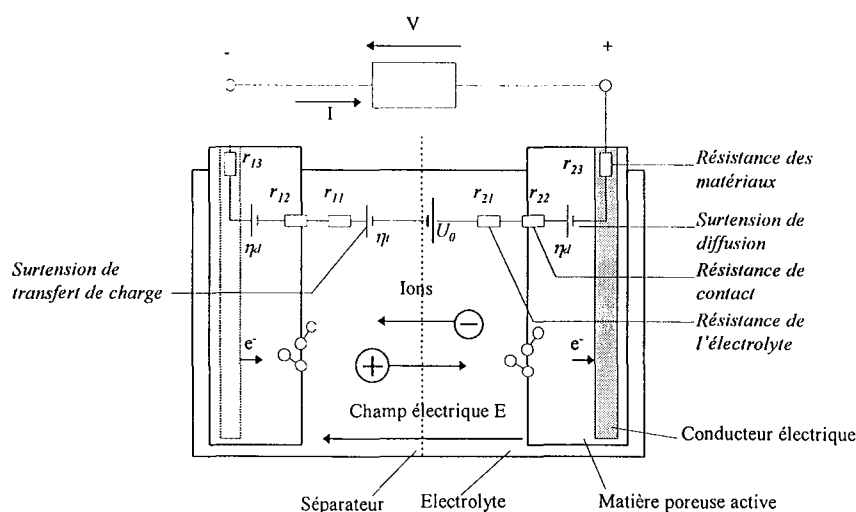
Ces hypothèses permettent d'écrire :

$$V = U_0 + \eta_d + \eta_t - r_\Omega \cdot I \quad (0.48.)$$

η_d : Surtension de diffusion

η_t : Surtension de transfert de charge

Figure 5-8 « Les chutes de tension au sein d'une pile »



• **La tension d'équilibre U_0**

La détermination précise de la FEM par application de la formule de NERNST nécessite la connaissance des activités d'oxydations et de réductions aux concentrations des solutions à la température et pression utilisée. Elle peut être mesurée aux bornes de l'accumulateur en circuit ouvert après élimination des phénomènes de polarisation (après plusieurs heures).

• **La surtension de diffusion η_d**

Lors des réactions électrochimiques, il se produit l'apparition et la disparition d'éléments créant des différences de concentrations (plus particulièrement des ions). L'étude des mouvements de ces espèces conduit la plupart du temps à des systèmes d'équations différentielles dont on ne connaît pas de solutions analytiques générales. Ces systèmes d'équations sont directement fonction du nombre de transformation (oxydation et réduction), de la structure des composants, de la porosité des électrodes, du régime de fonctionnement de l'accumulateur et de la répartition de la matière active encore disponible.

La relation donnant la profondeur X de pénétration d'une réaction au sein d'une électrode de matière poreuse est de la forme [DEL67]:

$$X = C_0 \cdot D \cdot \frac{\theta}{\tau} \cdot \frac{z \cdot F}{\frac{i}{S} \cdot (1 - \theta)} \quad (0.49.)$$

- D : coefficient de diffusion ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
 θ : porosité
 τ : tortuosité
 i : courant (A)
 S : surface géométrique de l'électrode (m^2)

La profondeur X doit être de l'ordre de grandeur de l'épaisseur du film diffusionnel de la couche de matière active de l'électrode de manière à consommer toute l'électrode.

Sous l'hypothèse que l'électrode est de structure et de composition homogène, le flux de matière à travers la couche s'écrit :

$$J(x) = D \frac{\theta}{\tau} \times \frac{\partial i(x)}{\partial x} \quad (0.50.)$$

La densité de courant et la couche étant homogène, la densité volumique de courant devient :

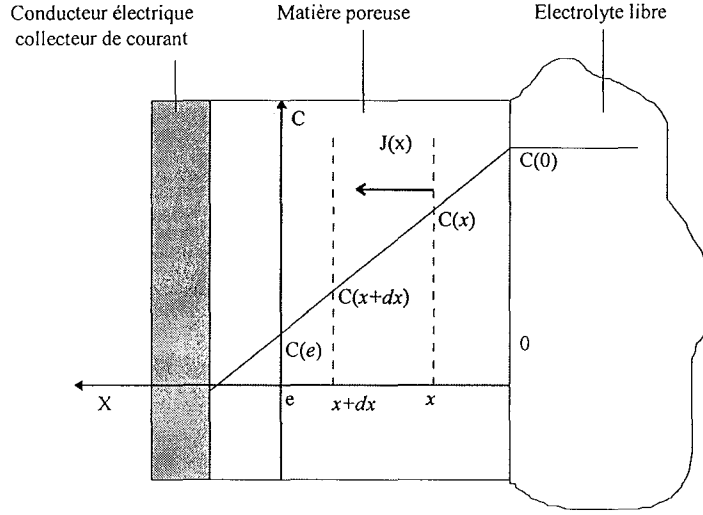
$$\frac{I}{S \cdot e} = nFj = \text{constante} \quad (0.51.)$$

- I : courant
 $|j|$: $\text{mole} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$
 e : épaisseur de l'électrode

et

$$-j = \frac{\partial \mathcal{I}}{\partial x} \quad (0.52.)$$

Figure 5-9 « La surtension de diffusion selon le modèle du film de NERNST »



Les conditions aux limites sont en $x=0$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \text{ en } x=0 \text{ et } C(e) = C_0 - \frac{j e^2}{D \cdot \frac{\theta}{\tau}} = C_0 - \frac{I e}{n F \cdot S \cdot D \cdot \frac{\theta}{\tau}} \text{ en } x=e \quad (0.53.)$$

La surtension de concentration due au phénomène de diffusion s'écrit :

$$\eta_d = \frac{RT}{nF} \cdot \ln \frac{C(e)}{C_0} \quad (0.54.)$$

Dans une cellule comme un accumulateur, l'électrolyte est stagnant et seulement soumis à un très faible champ électrique. De ce fait, la diffusion est le phénomène de transport prépondérant.

• **La surtension de transfert de charge η_t**

On applique l'équation de BUTLER-VOLMER avec pour convention $I > 0$ en décharge lorsque $\eta_t < 0$.

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha n F}{RT} \eta_t\right) - \exp\left(\frac{-(1-\alpha) n F}{RT} \eta_t\right) \right] \quad (0.55.)$$

Pour chaque électrode, les valeurs de η_t sont petites. Si l'on développe au premier ordre, nous obtenons :

$$\eta_t = \frac{-RT}{nF} \times \frac{I}{I_0} \quad (0.56.)$$

• **La résistance ohmique**

Ce terme prend en compte la chute de tension engendrée par la conduction électronique dans la phase solide, aux surfaces de contact et par conduction ionique dans l'électrolyte.

D'une manière générale, la conductivité des éléments solides utilisés est très fortes devant celle de l'électrolyte.

Exemple : La conductivité de l'oxyde de plomb PbO_2 est d'environ $\sigma_{PbO_2} = 250 \Omega^{-1}.cm^{-1}$ alors que celle de l'acide sulfurique H_2SO_4 à $25^\circ C$ est $\sigma_{H_2SO_4} \leq 1 \Omega^{-1}.cm^{-1}$.

La résistance ohmique d'un conducteur de section S et de longueur d s'écrit :

$$r_{\Omega}^{Sol} = \frac{d}{S \cdot \sigma_{mat}} \quad (0.57.)$$

L'influence de la température sur la conductivité est donnée par :

$$\sigma_{mat} = \sigma_0 \cdot (1 - aT) \quad (0.58.)$$

σ_0 : Conductivité du matériau à $0^\circ C$

T : Température en $^\circ C$

a : Coefficient de température

La plage de température utilisée et la résistance du matériau étant généralement faible, l'action de la température induit donc des variations négligeables.

La résistance ohmique de l'électrolyte entre deux plans de surface S et distant de d s'écrit :

$$r_{\Omega}^{Liq} = \frac{d}{S \cdot \sigma_{H_2SO_4}} \quad (0.59.)$$

La conductivité $\sigma_{H_2SO_4}$ de l'électrolyte est fonction de sa composition et n'est donc pas constante lors du fonctionnement de l'élément (variation de la concentration d'acide).

5.2.2 Les accumulateurs

Un accumulateur peut être considéré comme une pile ayant la propriété de réversibilité des phénomènes chimiques dans certaines conditions (régénération des électrodes et de l'électrolyte par passage d'un courant inverse à celui qui a été débité).

Comme il existe un terme prenant en compte la température dans les équations caractéristiques de l'accumulateur, les définitions suivantes sont à prendre en compte avec la condition d'une température constante.

5.2.2.1 La capacité

On appelle capacité d'un accumulateur ou d'une pile, la quantité maximale d'électricité que ce générateur peut fournir. Cette capacité est limitée par la consommation des électrodes (généralement la négative) ou de l'électrolyte. Pour un accumulateur, cette capacité est également limitée par les conditions de réversibilité des phénomènes électrochimiques. Cette quantité est de la forme :

$$Q = \int_0^T i \cdot dt \quad (0.60.)$$

t : Durée de passage du courant en seconde

i : intensité en Ampères (constant)

Q : exprimé en Coulombs ou Ampère-heure (1 Ah = 3600 C)

La capacité est une grandeur non mesurable et difficilement représentable car sa définition oblige à fixer certains paramètres d'influence pour les tests. C'est pourquoi nous distinguerons 3 types de capacité.

- **La capacité nominale en n heures : C_n**

La capacité nominale C_n représente l'énergie que peut délivrer la batterie à partir de son état de pleine charge et dans un environnement de référence pour terminer à la tension d'arrêt. Cette mesure s'effectue lors d'une décharge à courant constant à $I = C_n/n$ à la température nominale θ_n pendant n heures. Les valeurs utilisées habituellement par les constructeurs sont $n=20, 10, 5$ ou 3 heures et 1,75V ou 1,8V pour la tension d'arrêt. Chaque constructeur utilise des conditions de tests différentes.

Exemple: $C_{10}=20\text{Ah}$ signifie que la batterie est capable de fournir un courant de 2 A pendant 10h à la température ambiante nominale θ_n .

Si les conditions de température ou d'intensité de décharge change, la batterie ne restituera pas la même quantité d'énergie.

La capacité nominale est donnée par

$$C_n = \int_{t_0}^{t_a} I \cdot dt \quad \text{à} \quad \theta_n = \theta_n \quad (0.61.)$$

Avec

t_a : temps pour atteindre la tension d'arrêt (généralement 1.75V par élément)

I : intensité constante de décharge $I = C_n/n$

- **La capacité stockée : Q_s**

Elle représente l'énergie que pourrait débiter la batterie à l'instant t si elle devait le faire dans les conditions de références. Elle est de la forme :

$$Q_s(t) = \int n_1(t).i(t).t.d t \quad (0.62.)$$

avec i = courant batterie ($i > 0$ si charge et $i < 0$ si décharge)

La fonction $n_1(t)$ représente la fonction de transposition tenant compte des paramètres d'influence à l'instant t pour évaluer l'efficacité de la charge .

$$n_1(t) = f(i(t), Q_s(t), \theta(t)) \quad (0.63.)$$

• **La capacité récupérable : Q_r**

Elle représente l'énergie que pourra restituer l'accumulateur dans les conditions actuelles si elles restent constantes. Elle est la transposition de la capacité stockée Q_s donnée pour un environnement de référence dans l'environnement actuel.

$$Q_r(t) = n_2(t).Q_s(t) \quad (0.64.)$$

La fonction $n_2(t)$ représente la fonction de transposition tenant compte des paramètres d'influence à l'instant t pour évaluer l'efficacité de la décharge .

$$n_2(t) = f(i(t), Q_s(t), \theta(t)) \quad (0.65.)$$

5.2.2.2 Le rendement énergétique

Lors de la charge, l'énergie W_c est fournie à l'accumulateur et l'énergie utile restituée à la décharge W_d pendant un temps T est donnée par :

$$W_d = \int_0^T u.i.d t \quad (0.66.)$$

Avec u différence de potentiel aux bornes de l'accumulateur.

Il est possible de définir le rendement énergétique w comme le rapport de W_d et W_c .

$$w = \frac{W_d}{W_c} \quad (0.67.)$$

Ce rendement est typiquement de 70 à 80% dans les meilleures conditions pour un accumulateur au plomb.

5.2.2.3 Le rendement en courant

Il est possible de définir le même type de rendement sur les quantités de courant. On notera q le rapport entre la quantité d'électricité restituée lors de la décharge Q_d et celle fournie lors de la charge Q_c .

$$q = \frac{Q_d}{Q_c} \quad (0.68.)$$

Cette grandeur peut atteindre 90% pour les bons accumulateurs lorsque l'on respecte les valeurs normales des intensités de charge et de décharge.

5.3 L'accumulateur au plomb

Dans ce paragraphe nous décrirons les caractéristiques des accumulateurs au plomb et plus particulièrement celle de la batterie au plomb étanche.

5.3.1 Principe

- ***Le modèle de PLANTE***

La première batterie susceptible d'utilisation pratique a été mise au point par Gaston PLANTE en 1859. Elle est constituée de deux lames de plomb immergées dans une solution d'acide sulfurique diluée. Chaque lame est recouverte d'oxyde de plomb formé au contact de l'air (PbO). La chaîne est représentée par : $\text{Pb/PbO/H}_2\text{SO}_4\text{/PbO/Pb}$. Lors d'une électrolyse de *formation*, l'oxygène dégagé se combine à l'anode avec le PbO pour former du bioxyde de plomb (PbO_2). L'hydrogène réagit avec le PbO de la cathode pour donner de l'eau en laissant à la surface une mince couche de plomb spongieux. La chaîne électrochimique obtenue est devenue : $\text{Pb/PbO}_2\text{/H}_2\text{SO}_4\text{/Pb spongieux/Pb}$. Elle n'est plus symétrique et peut jouer le rôle d'une pile.

Lors de la décharge, les phénomènes inverses se produisent mais l'oxyde de plomb PbO apparaîtra sous la forme de sulfate plombeux PbSO_4 (action de l'acide sulfurique). La chaîne redevient alors symétrique : $\text{Pb/PbSO}_4\text{/H}_2\text{SO}_4\text{/PbSO}_4\text{/Pb}$. Cette symétrie montre la possibilité d'inverser la polarité de l'élément lors d'une autre charge.

5.3.2 Théorie de l'accumulateur au plomb

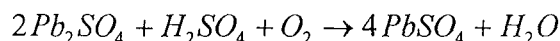
- ***La complexité des réactions***

La détermination explicite de chacun des termes du paragraphe théorique sur l'accumulateur nécessite une connaissance précise des activités des corps oxydants et réducteurs. Bien que de nombreux auteurs se soient intéressés à ce problème, il a été mis en évidence la complexité des phénomènes mis en jeu dans les accumulateurs au plomb et il semble qu'aucune description fine du mécanisme ne soit connue à ce jour.

Parmi les diverses théories proposées, la théorie de la *double sulfatation* (GLADSTONE et TRIBE, 1882) est celle qui semble faire l'unanimité pour la description des batteries plomb. Cette théorie est fondée sur l'apparition simultanée de sulfate de plomb sur les deux électrodes lors de la décharge. Cette représentation a l'avantage d'être simple et de fournir un outil de vulgarisation accessible pour les utilisateurs de ce type d'accumulateur, même si elle ne peut servir de vérité scientifique.

Parmi les auteurs qui ont proposé d'autres théories, nous citerons FERY qui avance une explication complémentaire à la double sulfatation. Il a émis l'hypothèse suivante :

Pendant la charge il se forme sur la plaque positive du peroxyde Pb_2O_5 tandis que la plaque négative est réduite à l'état de plomb spongieux. Durant la décharge, un sous-sulfate Pb_2SO_4 prend naissance à l'électrode négative tandis que du bioxyde PbO_2 apparaît à l'électrode positive. La couleur noire de la plaque négative serait due au Pb_2SO_4 qui se transformerait rapidement à l'air en sulfate de plomb $PbSO_4$ (blanc) selon la réaction :



Ce qui expliquerait que l'on ne doit pas laisser une batterie au repos déchargée. Car si l'oxygène se dissout dans l'électrolyte et provoque cette réaction, il y a création d'une couche supplémentaire de sulfate de plomb et l'accumulateur ne peut être ramené que difficilement à l'état précédent (la batterie est dite sulfatée).

Chacune de ces théories est complémentaire des autres mais reste toujours incomplète. Nous prendrons pour argument l'analyse chimique et cristallographique d'une électrode fait apparaître les composés de plomb suivant [BLA97, CHEN95]:

αPbO : Oxyde de plomb à structure orthorhombique⁵

βPbO : Oxyde de plomb à structure tétragonale⁶

αPbO_2 : Dioxyde de plomb à structure orthorhombique.

βPbO_2 : Sulfate de plomb à structure tétragonale

PbO_4 : lorsque le pH local est à -0,48

$PbSO_4$: Sulfate de plombeux (II)

Pb_2SO_4 : Sulfate de plomb (I)

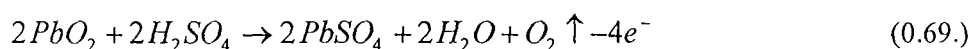
Pb_3O_4 : composé d'oxyde de plomb

L'apparition de ces éléments dépend de paramètres tels que : les gradients d'acidité des solutions, la température, le degré de pureté des composants, les réactions engendrées par les composants des divers alliages.

5.3.2.1 La décharge

• Réaction à la plaque positive [CHR93]

L'acide H_2SO_4 se décompose avec l'oxyde de plomb PbO_2 . Il en résulte la production d'eau H_2O , de sulfate de plomb $PbSO_4$, un dégagement d'oxygène O_2 et un manque de 4 électrons.



⁵ orthorhombique : les atomes forment une structure cristalline ou $a \neq b \neq c$ et $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

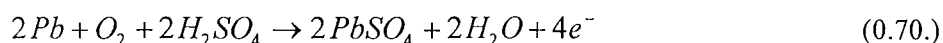
⁶ tétragonale : les atomes forment une structure cristalline ou $a = b \neq c$ et $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

Les électrons manquant seront fournis par la réaction à la plaque négative via le circuit extérieur. L'oxygène généré est guidé par les séparateurs microporeux en fibre de verre vers la plaque négative.

La tension générée par cette réaction est d'environ 1,685V. Pendant cette transformation, la concentration de l'électrolyte diminue (consommation du H_2SO_4 et apparition d'eau H_2O). Le rendement théorique de la réaction peut être de 0,229 Ah par gramme de PbO_2 [PLA85] pour l'électrode positive mais elle est en réalité limitée par la surface réelle de l'électrode (surface d'échange), le régime de décharge, l'utilisation uniforme de la matière active.

• Réaction à la plaque négative

L'électrode négative Pb se trouve en présence d'acide H_2SO_4 et de l'oxygène O_2 provenant de l'anode. Le plomb spongieux se transforme en sulfate de plomb $PbSO_4$ en libérant de l'hydrogène H_2 permettant ainsi la recombinaison de l'oxygène en H_2O .

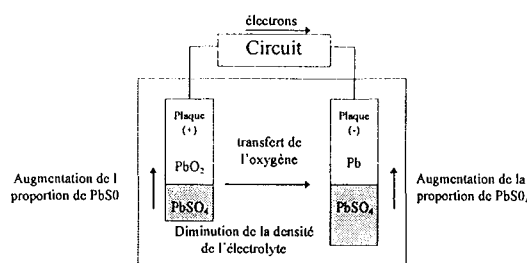


Cette réaction produit 4 électrons excédentaires qui rejoignent l'anode par le circuit extérieur. La tension générée par cette réaction est d'environ 0.35V (faible). Pendant cette transformation, la concentration de l'électrolyte diminue (consommation du H_2SO_4 et apparition d'eau H_2O). Le rendement théorique de la réaction à l'électrode négative est de 0,259 Ah par gramme de Pb [PLA85], mais ce rendement est limité par le régime de décharge. à régime lent, ce rendement peut atteindre 70% mais en régime rapide il peut descendre à 10 ou 15% à cause de la transformation superficielle du Pb.

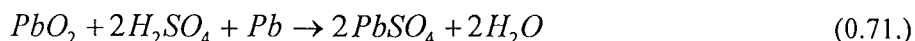
• Réaction globale

Le dioxyde de plomb PbO_2 des plaques positives et le plomb spongieux Pb des plaques négatives réagissent avec l'acide sulfurique et l'électrolyte et se transforment peu à peu en sulfate de plomb. Il y a production d'électron à la plaque négative et absorption des électrons à la plaque positive. Le transfert des électrons d'une plaque à l'autre s'effectue par le circuit extérieur.

Figure 5-10 « Les réactions de l'accumulateur en décharge »



La réaction chimique de l'accumulateur en décharge se résume par :

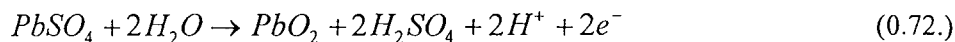


Ce qui traduit l'apparition de $PbSO_4$ simultanément sur la plaque positive et négative et l'apparition de H_2O dans l'électrolyte.

5.3.2.2 La charge

- *Réaction à la plaque positive [CHR93]*

L'énergie fournie par le chargeur permet de dissocier les molécules d'eau H_2O et de sulfate de plomb $PbSO_4$ pour recomposer les éléments acide sulfurique H_2SO_4 et dioxyde de plomb PbO_2 . La réaction génère des ions H^+ et libère 2 électrons qui transitent vers la plaque négative par le circuit électrique.



- *Réaction à la plaque négative*

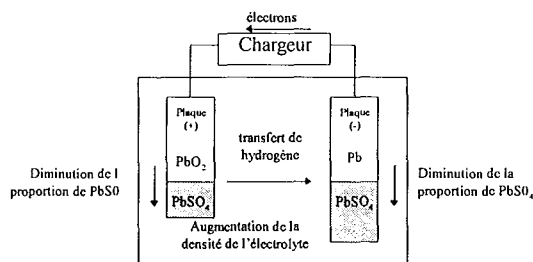
Les électrons et les ions H^+ sont recombinaés avec le sulfate de plomb en plomb spongieux et en acide.



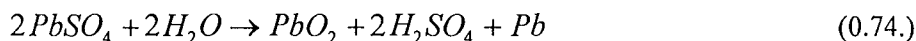
- *Réaction globale*

A l'inverse de la décharge, les matières actives positives et négatives qui ont été transformées en sulfate de plomb se retransforment peu à peu, respectivement en dioxyde de plomb PbO_2 et en plomb spongieux Pb . Le sens des électrons est ici fixé par le chargeur de batterie.

Figure 5-11 « Les réactions de l'accumulateur en charge »



La réaction chimique de l'accumulateur en charge se résume par :



Ce qui traduit la disparition simultanée du sulfate de plomb $PbSO_4$ des électrodes et l'augmentation de la densité d'acide H_2SO_4 dans l'électrolyte.

5.3.2.3 La fin de charge

Quand la charge de la batterie approche le stade final, le courant de charge n'a plus comme fonction que la décomposition de l'électrolyte. Il en résulte une génération d'oxygène par les plaques positives et une génération d'hydrogène par les plaques négatives. En général, les gaz générés s'échappent de la batterie, provoquant une diminution de la quantité d'eau, ce qui nécessite de temps en temps un réapprovisionnement. Cependant, les batteries plomb étanches utilisent un mécanisme de recombinaison des gaz utilisant le surplus de $PbSO_4$ de la plaque négative.

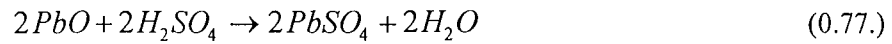
En effet, le dégagement de l'oxygène et de l'hydrogène ne s'effectue pas simultanément et l'oxygène se dégage en premier.



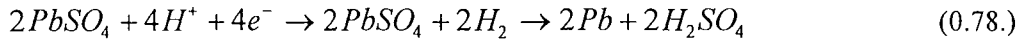
L'oxygène se dégage à la plaque positive vers le plomb spongieux de la plaque négative avant que ne commence le dégagement d'hydrogène sur cette dernière. Les conditions sont réunies pour qu'une réaction rapide entre le plomb et l'oxygène entraîne la formation d'oxyde de plomb :



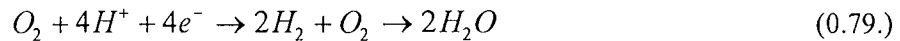
L'utilisation d'un séparateur spécial en microfibre de verre hautement poreux facilite la diffusion d'oxygène à l'intérieur de l'élément et permet d'obtenir cette réaction. Lorsqu'il se retrouve en présence d'une solution d'acide sulfurique (l'électrolyte), l'oxyde de plomb réagit pour former des sulfates de plomb :



Le sulfate de plomb, déposé sur une surface dégageant de l'hydrogène, se trouvera à son tour réduit en plomb et acide sulfurique :

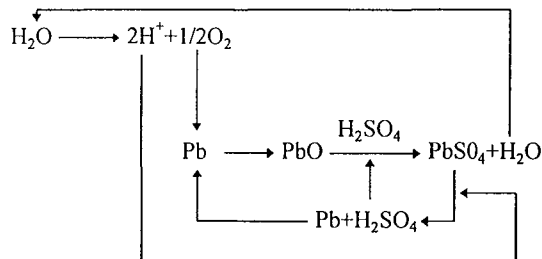


Si nous additionnons ces deux équations et que nous supprimons les termes identiques, nous obtenons l'équation suivante :



Les réactions ci-dessus résument ce que l'on entend par recombinaison des gaz. Si le processus était efficace à 100%, la batterie ne perdrait pas d'eau. Cependant, bien que les composants internes de la batterie soient conçus et fabriqués avec grand soin, le taux de recombinaison ne peut atteindre que 99%.

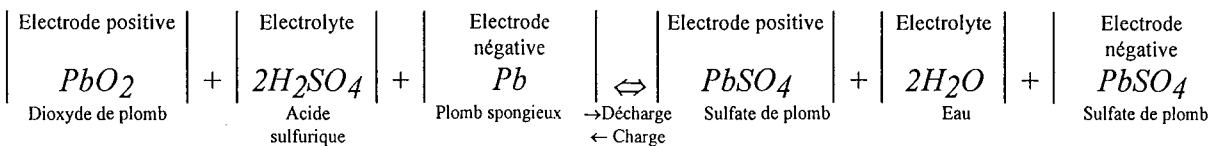
Figure 5-12 « Synoptique de la réaction (hypothèse de 100% de recombinaison) »



5.3.2.4 Réaction chimique globale

En regroupant les réactions chimiques de charge, décharge et de fin de charge, nous obtenons l'équation simplifiée représentant le bilan des réactions au sein de l'accumulateur au plomb.

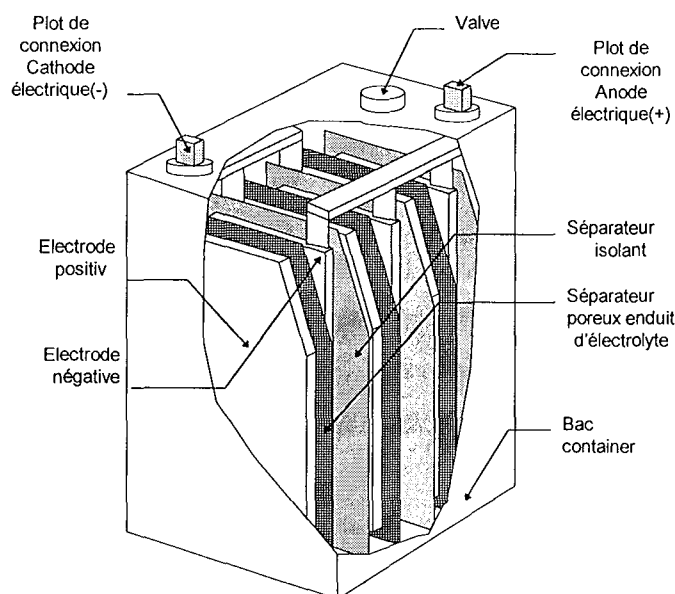
Figure 5-13 « Equation chimique globale de la batterie plomb (0.80.) »



5.3.3 Constitution

Une batterie est constituée d'une suite d'éléments. Chaque élément est constitué de plaques de plomb séparées entre elles par des séparateurs imbibés d'électrolyte gélifié (acide chlorhydrique). Le tout est assemblé dans un bac en plastique. La connexion électrique entre les plaques est réalisée de manière à obtenir le nombre d'éléments en série nécessaire pour générer la tension désirée (environ 2V par éléments).

Figure 5-14 « Constitution d'une batterie plomb étanche »



- **Les plots de connexion**

Ils sont le lien entre l'intérieur de la batterie et l'installation extérieure. Ils assurent l'interconnexion des plaques de plomb des éléments.

- **Le bac conteneur**

Généralement en ABS, il est résistant aux chocs ainsi qu'à l'acide, retardant à la flamme. Il est conçu pour résister à de grandes variations de la pression interne durant les différents cycles de fonctionnement.

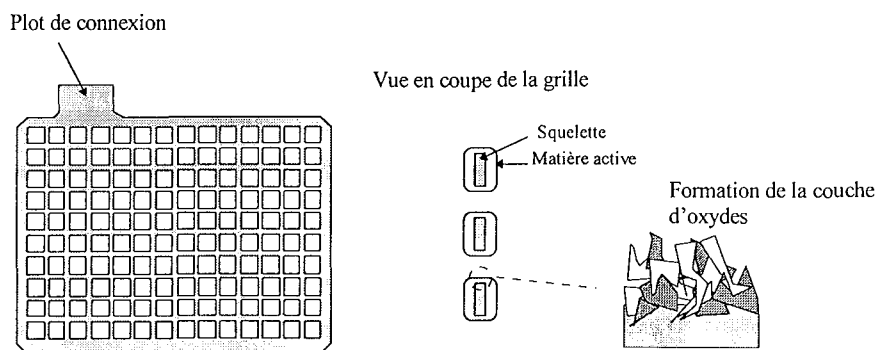
- **Les valves**

Chaque cellule possède une valve de sécurité pour permettre l'échappement des gaz lorsque la pression interne est trop importante. Cette limite se situe au environ de 0.3 atmosphère (30 kPa).

- **Les électrodes**

Elles sont constituées d'une grille d'alliage de plomb (le plus neutre possible) empâtée avec un mélange d'oxydes de plomb dont la préparation varie avec les constructeurs. De manière à augmenter la surface d'échange pour les réactions chimiques, les oxydes de plomb sont mélangés puis fixés sur la grille de manière à former une électrode poreuse.

Figure 5-15 « Constitution d'une électrode »



La grille

Elle sert de support à la matière active et assure la conduction des électrons. Sa forme est très importante car elle permet de définir la surface de l'électrode et le volume de la couche de matière active.

Exemple :

Selon l'application cette électrode peut être de forme plane (démarrage, éclairage) ou tubulaire (stationnaire, traction). Une électrode fine et plane a l'avantage de fournir de fort courant tandis qu'une électrode tubulaire présente une meilleure tenue mécanique en cyclage.

Elle doit être aussi neutre que possible de manière à ne pas être altérée et déformée par les réactions chimiques. Elle est constituée d'un matériau aussi inattaquable que possible. Les plus utilisés sont les alliages de plomb/antimoine ($\text{Pb}+3\%\text{Sb}$) ou plomb/calciure et étain ($\text{Pb}+0+1\%\text{Ca}+1\%\text{Sn}$ [ABD85]) qui ont les caractéristiques suivantes :

Tableau 5-4 « Les alliages à base d'antimoine » d'après [LAK97]

Elément de l'alliage	Effet bénéfique	Effets négatifs
Antimoine faible (0,8-3 %) fort (3-11%)	Améliore la capacité de l'électrode positive à fournir des décharges profondes. Augmente la résistance de la grille	Crée un phénomène d'auto décharge Augmente la surcharge de courant causant la perte d'eau
Arsenic (0,05-0,3 %)	Améliore la résistance à la déformation des grilles	Risque possible de génération durant les surcharges
Sélénium (0,015-0,04 %) (Sulfure de cuivre)	Produit des grains fins et ronds élimine les craquelures Réduit la corrosion	Un mauvais contrôle de la température lors de la coulée élimine cet élément
Etain (0,05-0,5%)	Améliore la coulée	

Tableau 5-5 « Les alliages à base de calcium » d'après [LAK97]

Elément de l'alliage	Effet bénéfique	Effets négatifs
Calcium faible (0,03-0,09) fort (0,1-0,18%)	Améliore la conductivité électrique Diminue les phénomènes d'autodécharge	Difficile à doser et mélanger dans l'alliage en fusion (problème d'oxydation) Diminue la résistance au décharge profonde
Etain (0,25-2%)	Améliore la coulée Augmente les caractéristiques mécaniques décroît la polarisation de l'électrode positive	Coût
Aluminium (0,01-0,03%)	prévient la perte de calcium durant la coulée de la grille	
Argent (0,015-0,045%)	Augmente la résistance à la corrosion et	Très cher Augmente la fragilité des grilles

La matière active positive

Les plaques positives sont recouvertes de pâte, comportant généralement un quart de litharge⁷ (PbO) pour trois quarts de minium (Pb₃O₄), humectée d'une solution sulfurique à 15°B. Au cours de la décharge, des cristaux de sulfate de plomb (PbSO₄) remplacent progressivement le dioxyde de plomb. Cette transformation s'accompagne d'une importante variation de volume (+85% environ).

La matière active négative

Pour les plaques négatives, les proportions sont de ¼ de Pb₃O₄ pour ¾ de PbO. Diverses substances sont ajoutées aux mélanges afin d'augmenter la porosité des matières actives. La décharge et la production de sulfate de plomb produit une variation de volume de +168%.

• *L'électrolyte*

Son rôle est double, il génère le potentiel de l'électrode et assure le transport de l'électricité par conduction ionique. Il est formé d'eau distillée et d'acide sulfurique (H₂SO₄). La concentration d'acide varie pendant le fonctionnement. En fin de charge, la densité est de 1,2 à 1,38 selon les conditions d'emploi de l'accumulateur. A la fin de la décharge, la densité est plus faible mais ne doit pas descendre en dessous de 1,12 afin de ne pas faire fonctionner les plaques dans des conditions défectueuses.

Théoriquement, la concentration optimale d'acide sulfurique est celle qui permet d'atteindre le maximum de la capacité d'un accumulateur (définie pour une tension de fin de décharge fixée). Cette capacité passe par un maximum lorsque la concentration d'acide utilisée correspond au minimum de résistivité de l'électrolyte. En réalité, cette concentration optimale d'acide est adaptée en fonction du régime de décharge.

Exemple : Pour les régimes lents, la diffusion de l'acide au sein de la matière active s'opère régulièrement, on aura donc intérêt à utiliser la concentration du minimum de résistivité (densité=1,226). Pour les régimes élevés le transfert de matière à l'intérieur des plaques est limité, de ce fait une concentration d'acide plus élevée permettra une meilleure utilisation des matières actives (densité=1,38).

• *Les séparateurs*

Le séparateur poreux

Pour des raisons d'encombrement et de réduction de la résistance interne (diminution du chemin à parcourir par les ions), les plaques positives et négatives sont très proches les unes des autres ($d \leq 10\text{mm}$). Aussi, ce type de séparateur est placé entre les deux électrodes afin d'éviter les court-circuit. Il sert également de support à l'électrolyte gélifié. Il est réalisé en microfibres de

⁷ litharge : Oxyde de plomb fondu et cristallisé (PbO), de couleur rouge-orangé

verre très poreux afin de favoriser au maximum la diffusion de l'oxygène (ce qui permet de maintenir une résistance interne faible et facilite le cycle de recombinaison de l'oxygène). Ses caractéristiques principales sont :

- une grande résistivité électrique,
- une bonne porosité aux ions de manière à favoriser au maximum la diffusion de l'oxygène,
- une bonne résistance chimique à l'acide sulfurique.

Le séparateur isolant

Il forme une poche autour de l'élément et assure l'isolation galvanique entre les éléments.

Figure 5-16 « Constitution d'un élément »



Ces séparateurs sont généralement doublés d'une grille gaufrée en matière élastique dans le but de maintenir en pression la matière active lors des fortes variations de volume que subissent les électrodes.

5.4 Les caractéristiques de la batterie plomb

Les paramètres de la batterie peuvent se classer en deux groupes :

- *les accessibles* représentés par les données physiques visibles et mesurables depuis l'extérieur de la batterie (température du bac, tension, courant et impédance, quantité d'énergie stockée). Ce sont ces grandeurs qui intéressent l'utilisateur et qui servent à définir les caractéristiques des accumulateurs. Parmi ces grandeurs, nous différencierons les grandeurs *externes* (courant, tension) et *internes* (résistance, état de charge).
- *les inaccessibles* qui sont des grandeurs internes qui touchent la chimie et représentent l'état de l'accumulateur (quantité de matière active, densité de l'électrolyte, pression interne, porosité et tortuosité de l'électrode). Ces derniers sont généralement inaccessibles et non mesurables en fonctionnement.

L'évolution de ces paramètres est fonction de facteurs d'influence liés aux conditions d'utilisation et principalement la densité de courant et la température. Ils sont également soumis à de lents phénomènes d'usure conduisant à la dégradation des performances de l'accumulateur. Ces altérations sont directement liées aux événements passés de la batterie.

5.4.1 La F.E.M

La valeur de la FEM du générateur de tension parfait équivaut elle est égale à la tension en circuit ouvert ou tension d'équilibre U_0 .

L'application de la relation thermodynamique permet de calculer la force électromotrice d'un accumulateur si l'on connaît les réactions chimiques productrices d'énergie électrique. A la réaction de double sulfatation correspond une variation d'enthalpie de 85200 cal pour une concentration normale d'acide sulfurique; d'autre part le coefficient de température a pour valeur 4.10^{-4}V/deg . Ces valeurs donnent une FEM d'environ 2V qui est peu différente de celle mesurée dans les conditions expérimentales. Cette coïncidence entre les valeurs théoriques et mesurées est l'un des meilleurs argument en faveur de la théorie de la double sulfatation.

La force électromotrice de l'accumulateur dépend de la concentration de l'électrolyte en contact avec les électrodes et de la température [BUL91], [BIS92].

Figure 5-17 « Les paramètres de la FEM »

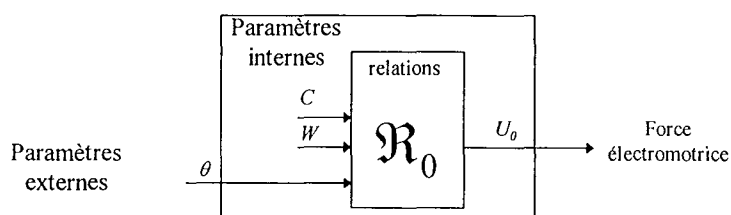


Figure 5-18 « Variation de la tension d'équilibre de la pile $\text{PbO}_2/\text{H}_2\text{SO}_4/\text{Pb}$ en fonction du pourcentage de masse de H_2SO_4 à $T=25^\circ\text{C}$ » d'après [BIS92]

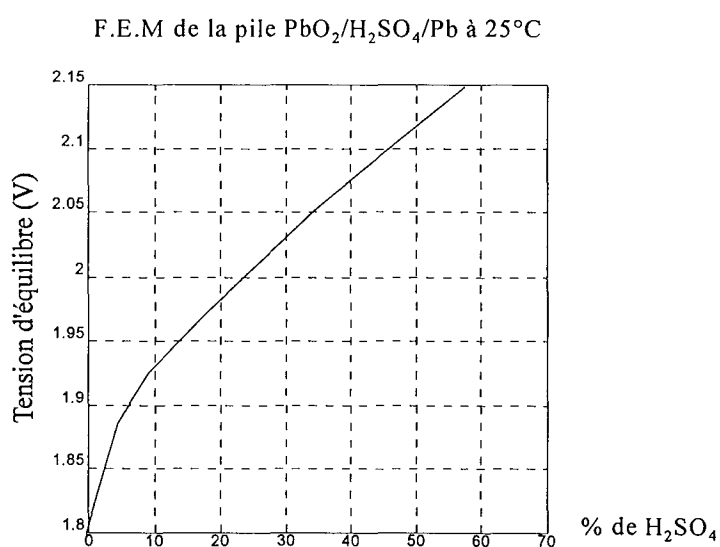
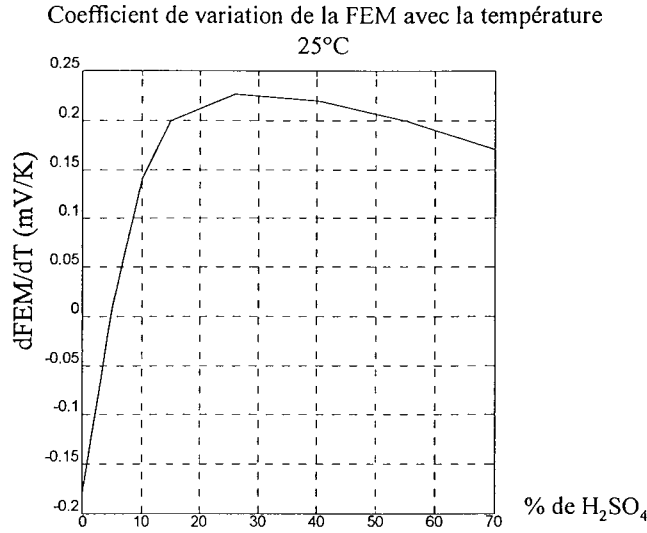


Figure 5-19 « Coefficient de variation en température de la tension de la pile $\text{PbO}_2/\text{H}_2\text{SO}_4/\text{Pb}$ » d'après [BIS92]



Les caractéristiques de la pile au plomb ne correspondent pas exactement à celle de l'accumulateur au plomb industriel qui est légèrement supérieure. Pour les concentrations d'acide rencontrées en cours de fonctionnement, le pourcentage en masse de H_2SO_4 (W) est compris entre 10 et 40%, ce qui correspond à une variation de tension d'environ 1,9V à 2,2V. Les approximations suivantes sont celles utilisées communément par les constructeurs [BIS92].

Dans cet intervalle U_0 peut être représenté par une droite et $\frac{\partial U_0}{\partial T}$ par une parabole

$$U_0(25^\circ\text{C}) = C_1 W + C_2 \quad (0.81.)$$

$$\frac{\partial U_0}{\partial T} = aW^2 + bW + c \quad (0.82.)$$

Une bonne concordance avec la réalité est obtenue avec :

$$\begin{aligned} 10 \cdot 10^{-3} \text{ V} \leq C_1 \leq 5 \cdot 10^{-3} \text{ V} \quad \text{et} \quad C_2 \approx 1,9 \text{ V} \\ a = 3,458 \cdot 10^{-7} \text{ V}^\circ\text{C}^{-1} \quad b = 1,770 \cdot 10^{-5} \text{ V}^\circ\text{C}^{-1} \quad c = 1,565 \cdot 10^{-5} \text{ V}^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned}$$

Le potentiel d'équilibre de la cellule $\text{PbO}_2 / \text{H}_2\text{SO}_4 / \text{Pb}$ s'écrit alors :

$$U_0(W, T) = U_0^{25^\circ\text{C}}(W) + \frac{\partial U_0^{25^\circ\text{C}}}{\partial T}(T - 25) \quad (0.83.)$$

Dans la gamme des températures ambiantes, la déviation fonction de la température est très faible (environ 10 mV pour un $\Delta T = 50^\circ\text{C}$), le terme $\frac{\partial U_0}{\partial T}$ est donc habituellement négligé. De plus les valeurs fournies par la littérature concernent des matériaux très pur contrairement aux matériaux utilisés dans les accumulateurs industriels qui contiennent des éléments susceptibles d'introduire des différences (Antimoine, calcium).

La forme simplifiée retenue pour la description de la tension d'équilibre est alors :

$$U_0 = P_1 \cdot W + P_2 \quad (0.84.)$$

P_1, P_2 : Ce sont des paramètres estimés que l'on peut rapprocher aux valeurs C_1 et C_2 fournies par la littérature.

W : Pourcentage de masse de H_2SO_4 .

Pour rapprocher cette relation de la caractéristique fournie par les constructeurs $U_0=f(Ah \text{ déchargés})$, il faut exprimer W en fonction du nombre d'Ampère heure.

La proportion en masse d'acide W est obtenue par :

$$W = \frac{M_{H_2SO_4}^{Qd}}{M_{H_2SO_4}^{Qd} + M_{H_2O}^{Qd}} \quad (0.85.)$$

Les masses d'acide et d'eau sont liées au nombre d'ampère heure déchargé Qd :

$$M_{H_2SO_4}^{Qd} = M_{H_2SO_4}^0 - M_{H_2SO_4} \frac{3600}{F} Qd \quad (0.86.)$$

$$M_{H_2O}^{Qd} = M_{H_2O}^0 + M_{H_2O} \frac{3600}{F} Qd \quad (0.87.)$$

Nous obtenons :

$$W_{Qd} = \frac{1}{1 + \frac{M_{H_2O}^0 + 0,67Qd}{M_{H_2SO_4}^0 - 3,66Qd}} \quad (0.88.)$$

Avec

Qd : Quantité d'Ampère-heure déchargés

M_i^{Qd} : Masse de produit i après Qd Ah déchargés

M_i^0 : Masse de produit i initiale

M_i : Masse molaire du produit i (Kg)

Remarque:

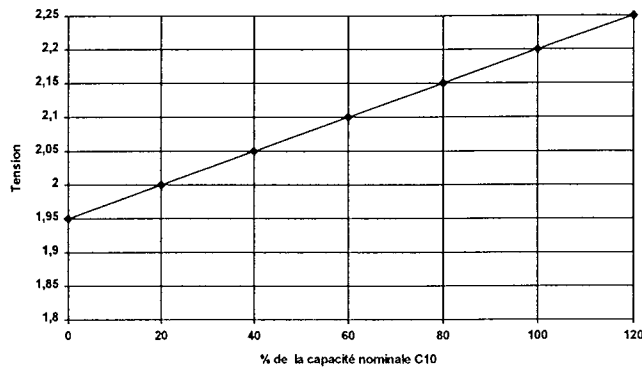
Certains auteurs [SZA96] simplifient ces relations à température ambiante en calculant la tension à circuit ouvert en ajoutant la valeur de la densité de l'électrolyte avec une constante :

$$U_0 = W + K \quad (0.89.)$$

Où K est une constante donnée à 0,84V pour 25°C.

Ce qui permet de relier la caractéristique de U_0 à la quantité d'électricité stockée Qs .

Figure 5-20 « Exemple d'une caractéristique constructeur simplifiée $U_0=f(Q_s)$ » [FIA95]



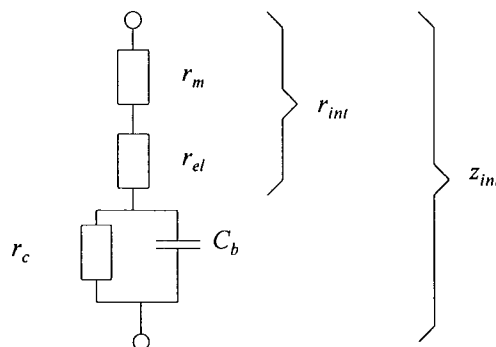
5.4.2 L'impédance interne

Cette grandeur est fréquemment employée pour évaluer les caractéristiques des accumulateurs car elle est directement liée à l'état des éléments et fait intervenir la plupart des événements électrochimiques. Bien que des modèles sophistiqués de l'impédance interne existent, nous retiendrons un modèle du circuit composé :

- d'une résistance série r_{int} regroupant la résistance ohmique des matériaux r_m et la résistance électrochimique r_{el} (assimilation des surtensions à une résistance),
- d'un condensateur C_b représentant l'effet capacitif des différentes plaques en vis à vis,
- d'une résistance non linéaire représentant la résistance de contact entre les plaques et l'électrolyte.

Les effets inductifs sont négligés.

Figure 5-21 « Schéma simplifié d'une impédance d'un accumulateur »



5.4.2.1 La résistance interne r_{int}

Les chutes de tension dues à la résistance interne et à la résistance électrochimique sont communément regroupées sous la notion de résistance interne. Sa caractéristique est très difficile à donner car sa valeur est fonction des matériaux utilisés (finesse des plaques, matériaux de séparation, électrolyte),

de l'état des composants, de la température, de la charge de la batterie et de la densité de courant. Elle est obtenue par:

$$r_{\text{int}} = r_{\text{elec}} + r_{\text{const}} \quad (0.90.)$$

Avec

r_{int} : résistance interne équivalente de la batterie,

r_{elec} : résistance équivalente des réactions électrochimiques,

r_{const} : résistance de la batterie due aux matériaux et à la construction.

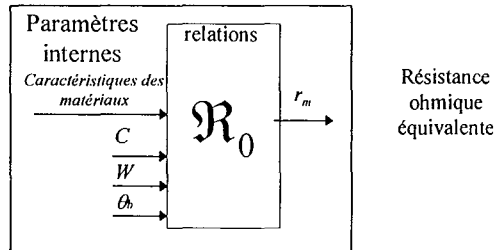
La valeur de la résistance interne d'un accumulateur en bon état est relativement faible (quelques miliohms). Sa mesure fait appel à des méthodes de mesure en courant continu.

• **La résistance des matériaux r_m**

Elle est constituée de l'ensemble des résistances ohmiques des éléments traversés. Elle est généralement donnée à température ambiante et à charge nominale (100% C_n). Elle est principalement due à la résistance de l'électrolyte.

$$r_{\Omega} = \sum \frac{d}{S \cdot \sigma_{\text{mat}}} \quad (0.91.)$$

Figure 5-22 « Les paramètres de la résistance électrochimique »



Sa mesure peut être réalisée en utilisant des techniques en courant continu ou en courant alternatif dans une gamme de fréquence où la réponse de l'accumulateur est relativement plane (50 à 300Hz) et en négligeant la phase des signaux.

La résistance des conducteurs

Elle est obtenue en calculant la résistance des matériaux. Cette résistance augmente avec l'apparition de sulfate de plomb sur les grilles. La conductivité de l'oxyde de plomb PbO_2 est d'environ $\sigma_{\text{PbO}_2} = 250 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$

La résistance de l'électrolyte

La plage de concentration utilisée (16 à 37%) assure une dissociation presque totale (presque 100%) de l'acide sulfurique en H^+ et HSO_4^- et dans de bien plus faible proportion en 2H^+ , SO_4^{2-} ce qui permet d'obtenir une résistivité très faible de l'électrolyte. Cette résistivité varie avec la concentration et passe par un minimum pour une solution de 30% environ. Les électrolytes des accumulateurs industriels ont une concentration comprise entre 25 et 37%, ce qui leur assure les

meilleures conditions de conductibilité. La conductivité de l'acide sulfurique H_2SO_4 à $25^\circ C$ est d'environ $\sigma_{H_2SO_4} \leq 1 \Omega^{-1}.cm^{-1}$.

D'une façon empirique, les variations de conductivité de l'électrolyte peuvent être représentées par la fonction suivante [BIS92]:

$$\sigma(W, T) = K_T \exp(a.W^b (W - W_0)^2) \quad (0.92.)$$

avec

T : température en $^\circ C$

W : pourcentage en masse de H_2SO_4

K_T : influence de la température de la forme

$$K_T = c.T + d \quad (0.93.)$$

W_0 : pourcentage en masse du maximum de conductivité, le terme est de la forme

$$W_0 = e.T + f \quad (0.94.)$$

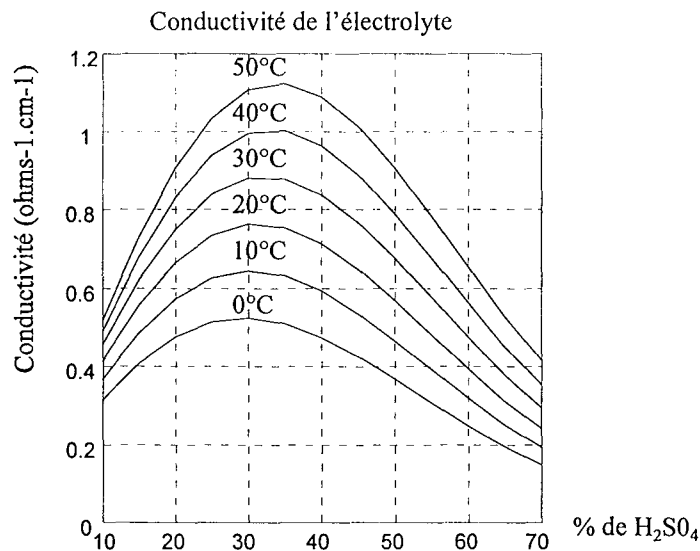
a, b, c, d, e, f : constantes réelles .

Pour une batterie au plomb avec un électrolyte à base de H_2SO_4 ces constantes prennent les valeurs:

$$a = -2,61.10^{-3} ; b = -0,288 ; c = 0,012 ; d = 0,5238 ; e = 0,091 ; f = 29,47$$

L'allure générique de la caractéristique est alors de la forme :

Figure 5-23 « Conductivité de l'électrolyte d'une pile $PbO_2 / H_2SO_4 / Pb$ »



La résistance de contact

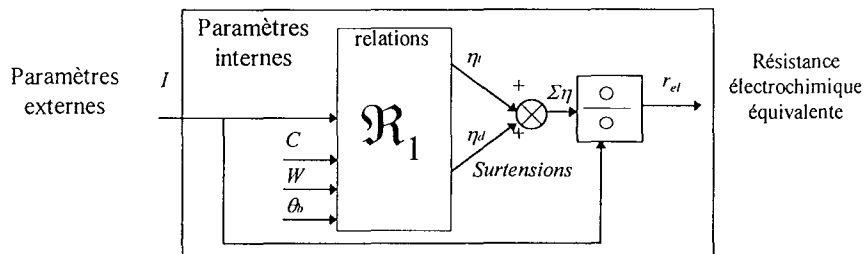
Elle est constituée par les soudures et les connections externes. Elle contribue à environ 15 à 20% de la résistance ohmique.

- **La résistance électrochimique r_{el}**

Elle peut être évaluée par la mesure de la chute de tension initiale de la tension au début de la décharge.

$$r_{el}(t) = \frac{\sum \eta(i(t))}{i(t)} \quad (0.95.)$$

Figure 5-24 « Les paramètres de la résistance électrochimique »



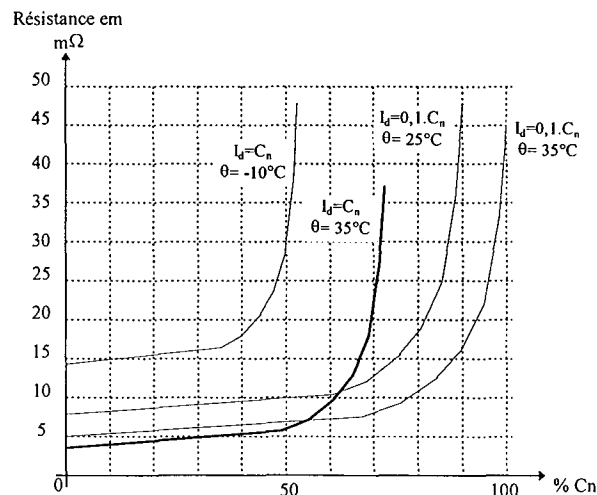
Les méthodes en courant alternatif ne mesurent pas cette résistance de transfert de charge. Cette résistance de transfert de charge est fonction de la température et de la composition de l'acide et plus particulièrement de la densité de courant.

Exemple : à un taux de charge en 15 mn, la résistance ohmique représente environ 40% de la résistance interne, avec une résistance de transfert de charge égale à 60%. Au taux de décharge en 8h, la proportion de la résistance ohmique chute à 5%.

- **Evolution de la résistance interne**

Sa valeur est la plus à pleine charge de l'accumulateur. Ce phénomène est lié à l'augmentation de la résistance de l'électrolyte et principalement à celle des électrodes (phénomène de sulfatation). La valeur de la résistance interne croît également rapidement avec la diminution de la température, ce qui est principalement dû au changement de résistance de l'électrolyte.

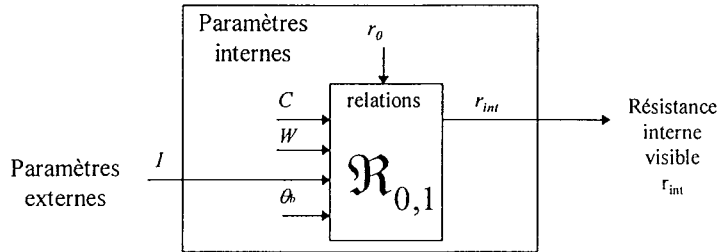
Figure 5-25 « Allure de $r_{int}=f(\text{Capacité})$ au couple (I_{decharge} , température) ».



La résistance interne peut donc être décrite comme une résistance ohmique fixe à laquelle s'ajoute un terme lié à la densité de courant, la température, la quantité de matière active et la densité d'acide (relié à la capacité stockée).

$$r_{\text{int}}(t) = r_{o_{\text{int}}} + r \cdot f(\theta(t), W(t), C(t), I(t)) \quad (0.96.)$$

Figure 5-26 « Les paramètres de la résistance interne »



Les approximations couramment utilisées simplifient cette relation en négligeant l'effet de la température, en remplaçant le terme fonction de la quantité de matière active W et de la concentration d'acide C par la capacité stockée Q_s et en utilisant une valeur de r_{el} fonction de i .

$$r_{\text{int}}(t) = r_{o_{\text{int}}} + r \cdot f(Q_s(t)) = r_{o_{\text{int}}} + r \cdot f\left(\int_0^t i(t) \cdot dt\right) + r_{el}(i(t)) \quad (0.97.)$$

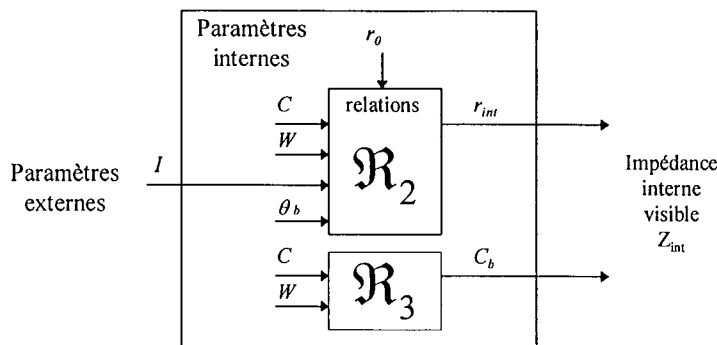
5.4.2.2 L'impédance

L'impédance interne de la batterie est donnée à une fréquence ou une plage de fréquence. Elle contient des informations supplémentaires à la résistance interne, car sa valeur fait intervenir le condensateur équivalent C_b représentatif de l'état de l'électrolyte et des électrodes.

• Le condensateur équivalent C_b

Il représente le condensateur électrochimique formé par les plaques et l'électrolyte. Sa valeur est représentative de l'état de ces derniers. Sa valeur peut atteindre 1,3 à 1,7 Farads pour 100 Ah. La valeur du condensateur est déduite de la phase des signaux courant et tension si la résistance ohmique est identifiée.

Figure 5-27 « Les paramètres de l'impédance interne »



5.4.3 La température

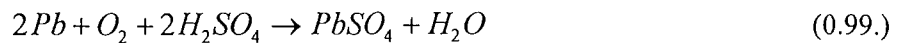
Elle intervient directement sur les phénomènes électrochimiques en agissant sur la mobilité des ions (conductivité de la solution et cinétique des phénomènes de transfert). Elle est très influente sur les caractéristiques des batteries [BAI76].

- *Les événements thermiques au sein de la batterie*

Lors de l'électrolyse, 18g d'eau décomposés donne 117k cal (49kJ) de chaleur qui sont éliminées lors de la libération des gaz dans l'atmosphère dans les batteries plomb ouvertes [WHI96].



Mais sur les batteries plomb étanches, l'oxygène migre de l'électrode positive à l'électrode négative pour se recomposer avec l'hydrogène en eau.



Ce cycle ne permet pas d'éliminer aussi facilement les calories générées, car l'évacuation s'effectue par conduction avec les éléments et les parois de la batterie. A ces effets s'ajoutent les pertes par effet joule qui peuvent atteindre des valeurs très importantes en régime de courant impulsional. Il en résulte un risque d'emballement thermique dans certaines conditions d'utilisations nécessitant une forte activité électrochimique (nécessité de pointes répétées de courant : véhicule électrique, recharge ultra-rapide). Ce risque existe à partir d'une température interne de 60 ou 70°C [BAR94].

- *Il est possible de différencier 3 températures*

- *La température nominale* θ_n qui correspond à la température de référence utilisée pour l'établissement des caractéristiques de la batterie par le constructeur. Elle se situe généralement à 20 ou 25°C.
- *La température ambiante* θ_a d'utilisation qu'il est conseillé de rapprocher autant que possible de la température de référence.
- *La température interne de la batterie* θ_b . Elle est le résultat des calories générées par les différentes réactions électrochimiques et par effet Joule.

Cette température peut être rendue accessible par un capteur interne à la batterie, mais elle est généralement mesurée par un capteur externe en contact avec un plot de connexion ou le bac de l'accumulateur. Dans ce cas, les hypothèses posées sont que la température de la batterie est homogène et que la température mesurée correspond à la température interne apparaissant avec un retard dû à la conduction thermique des matériaux. Le modèle le plus simple pour la représentation du transfert de chaleur est une relation du premier ordre similaire à celle utilisée en protection par image thermique.

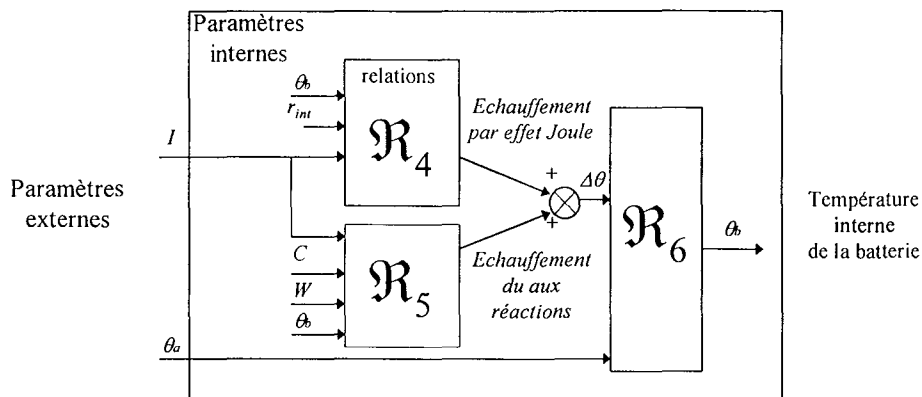
L'échauffement de la batterie correspond à l'élévation de température par rapport à la température ambiante :

$$\theta = \theta_b - \theta_a \quad (0.100.)$$

$$\theta = \theta_{ie} \frac{t}{Tr} \text{ avec } Tr \text{ constante de temps de refroidissement.} \quad (0.101.)$$

Remarque : Si la température interne est supérieure à θ_n les échanges chimiques de libération de l'énergie sont favorisés ce qui a tendance à augmenter les performances de la batterie en décharge, mais qui diminue son aptitude à assimiler le courant lors de la charge. La réciproque est vraie lorsque θ_b est inférieure à θ_n . Dans tous les cas, cette température ne devra pas dépasser les limites minimum et maximum données par le constructeur (aux environs de -35 à $+45^\circ\text{C}$).

Figure 5-28 « La température de la batterie »



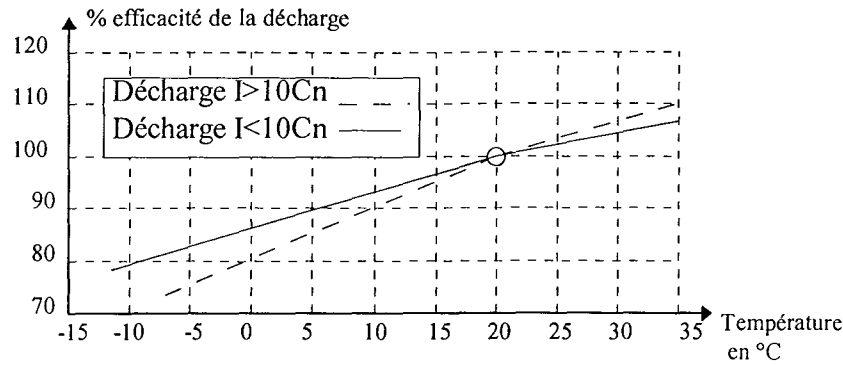
• Influence lors de la charge

Pour effectuer une charge dans de bonne condition, les constructeurs préconisent une tension de charge de 2,27V par élément qu'il est nécessaire de compenser la valeur de la tension de charge en fonction de la température pour compenser le terme $\left. \frac{dU_0}{dT} \right)_p$. Une tension trop faible se traduira par un mauvais transfert de l'énergie du chargeur vers l'accumulateur et une tension trop élevée induira des dégagements gazeux préjudiciables.

• Influence lors de la décharge

La capacité utilisable augmente avec la température de l'élément. Ce fait s'explique d'une part, avec l'augmentation du coefficient de diffusion des solutions d'acide sulfurique ($+2,4\%/^\circ\text{C}$), d'autre part avec la baisse de la résistivité de l'électrolyte pour les concentrations généralement employées. Inversement, en basse température, la capacité disponible est nettement moins importante.

L'influence de la température se traduit par un facteur de correction en fonction de la température à appliquer à la capacité stockée Q_s . La valeur du courant de décharge a une influence limitée, cependant une correction peut être appliquée dans le cas de décharge à très fort courant.

Figure 5-29 « Efficacité de la décharge en fonction de la température $n_d(\theta_b)$ »

5.4.4 La densité de courant

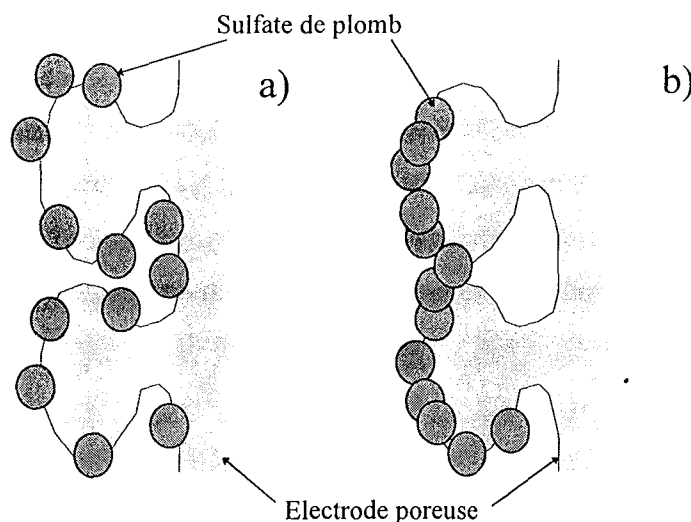
Outre son action sur les surtensions η_d et η_t se traduisant par des pertes, la densité de courant a une forte influence sur la transformation des électrodes et la distribution des matériaux.

- **Influence sur la distribution de l'oxyde de plomb** [SUN82] [WON81a]

La densité de courant a une forte influence sur la distribution d'oxyde de plomb sur une plaque en fonction du régime de décharge :

- Lors d'une décharge lente (figure a), l'oxyde de plomb de l'électrode poreuse est consommée uniformément. Cette consommation peut atteindre 60 à 80% de la matière active.
- Lors d'une décharge rapide, les réactions se font superficiellement sur les surfaces des électrodes. Le sulfate de plomb crée alors une couche protectrice qui protège l'oxyde de plomb et empêche sa consommation. Il en résulte une forte diminution de la capacité utilisable.

Figure 5-30 « Influence de la densité de courant sur la consommation d'une électrode » d'après [PLA85]

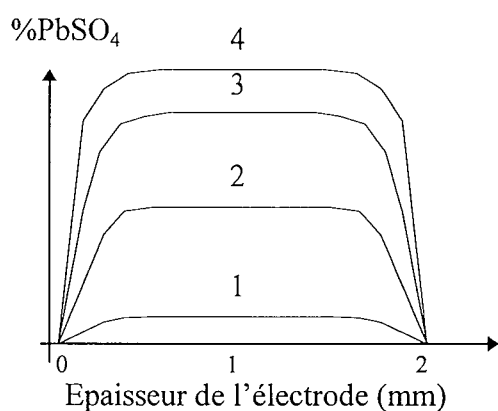


La figure *c* montre la distribution de sulfate de plomb dans une électrode pour différents états de charge de l'accumulateur avec comme hypothèse une densité de courant de charge faible.

La figure *d* montre l'influence de la densité de courant lors de la décharge. Pour de faible courant de décharge, la distribution de PbSO₄ est quasiment uniforme, mais pour de plus forte densité de courant ($i > 50 \text{ mA/cm}^2$), la réaction se déroule de façon non-homogène en privilégiant la face externe de l'électrode.

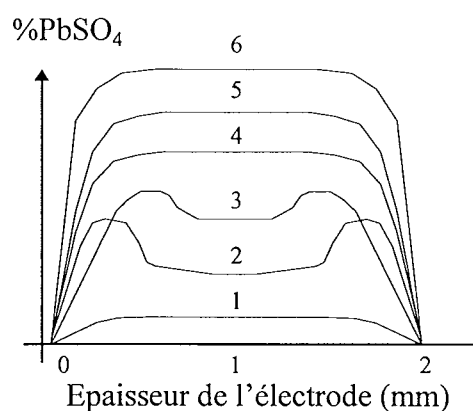
Figure 5-31 « Influence de la densité de courant sur la répartition de PbSO₄ à l'intérieur de l'électrode » d'après [BIS92]

c) Distribution de PbSO₄ pour différents régimes de charge



- 1 chargée
- 2 50% chargée
- 3 75% chargée
- 4 100% chargée

d) Distribution de PbSO₄ pour différents régimes de décharge



- 1 chargée
- 2 déchargée à 180 mA/cm²
- 3 déchargée à 60 mA/cm²
- 4 déchargée à 30 mA/cm²
- 5 déchargée à 6 mA/cm²
- 6 déchargée à 1,5 mA/cm²

La capacité récupérable diminue lorsque l'intensité de décharge croît. En effet, la quantité d'acide nécessaire par unité de temps, à l'intérieur de la matière active est proportionnelle à l'intensité du courant de décharge. Comme la diffusion amène par unité de temps une quantité d'acide inversement proportionnelle à la longueur des pores, les réactions chimiques se poursuivent d'autant moins profondément que l'intensité de décharge est élevée. La formule empirique de PEUCKER permet d'établir la relation :

$$Qr = Cn \left(\frac{I_0}{I_r} \right)^{(k-1)} \quad (0.102.)$$

où

k : coefficient caractérisant le type d'élément généralement $1,2 \leq k \leq 1,6$.

Cn : capacité de référence (connue)

I_0 : régime de référence (connu)

Q_r : capacité pour le régime de décharge I_r

La prise en compte par les constructeurs lors de l'établissement des caractéristiques d'un accumulateur de la densité de courant est réalisée en utilisant le taux de charge/décharge K_I . Ce taux de charge/décharge est un moyen de normaliser les courbes caractéristiques de la batterie. Il est obtenu par division de la valeur du courant dans la batterie en Ampère par la valeur de la capacité nominale C_n en Ampère-heure définie dans les conditions initiales du constructeur.

$$K_I = \frac{I}{C_n} \quad (0.103.)$$

Les taux les plus utilisés sont :

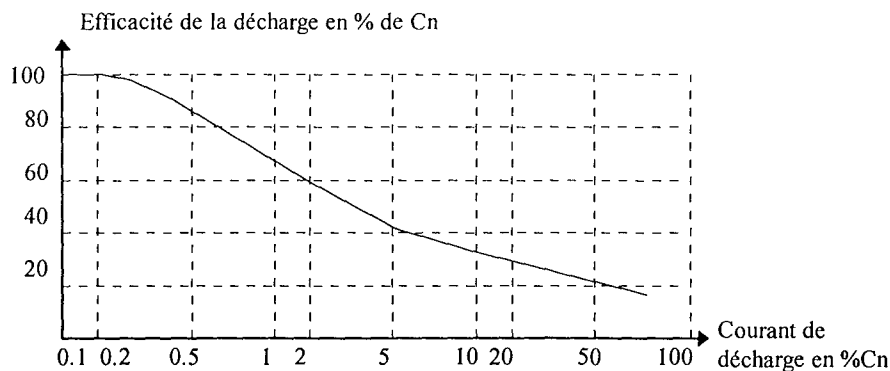
- Le taux de charge : $K_{Ich} = I_{ch}/C_n$ (0.104.)

- Le taux de décharge : $K_{Idch} = I_{dch}/C_n$ (0.105.)

• Influence lors de la décharge

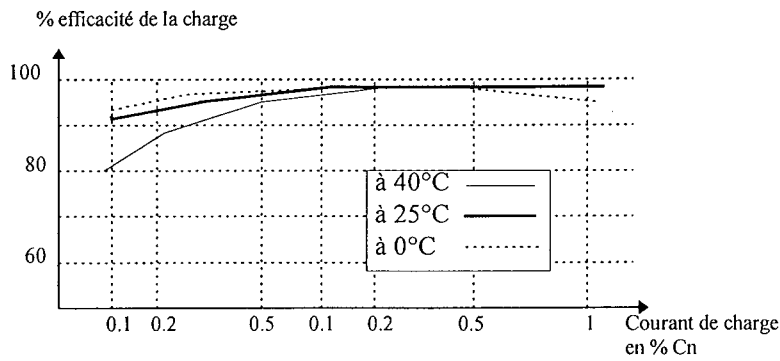
La courbe suivante présente l'allure de la caractéristique donnant la capacité récupérable en fonction du taux de décharge.

Figure 5-32 « Efficacité de la décharge en fonction du courant de décharge K_{Idch} »



• Influence lors de la charge

La correction à effectuer en fonction du courant de charge dépend également de la température. Nous observons sur cette caractéristique de mauvais rendements pour les courants de charge faible. Cette zone correspond au cas de fin de charge de la batterie qui n'absorbe un courant que pour entretenir sa charge.

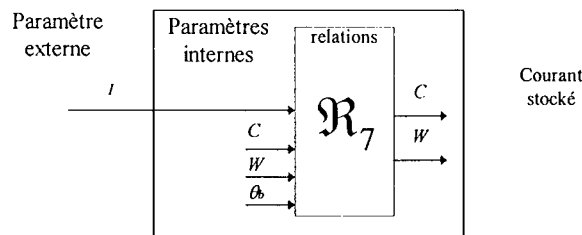
Figure 5-33 « Efficacité de la charge en fonction du courant de charge et de la température η_I »


5.4.5 L'état de charge

• L'accumulation du courant

Elle est représentée par la régénération de la matière active disponible et de l'électrolyte. Cette régénération peut être quantifiée en évaluant le nombre d'électrons utilisés pour les réactions chimiques, ce qui peut être réalisé en comptant la quantité d'ampères par unité de temps, corrigé en fonction des paramètres d'influence qui sont principalement la densité de courant, la température et le niveau de charge de l'accumulateur.

Figure 5-34 « Les paramètres de l'accumulation du courant »



La fonction représentant le niveau de charge peut donc être considérée comme un intégrateur de l'intensité corrigée.

$$C_s = \int_{t_0}^{t_1} n(I(t), Cs(t), \theta(t)) \cdot t \cdot dt \quad (0.106.)$$

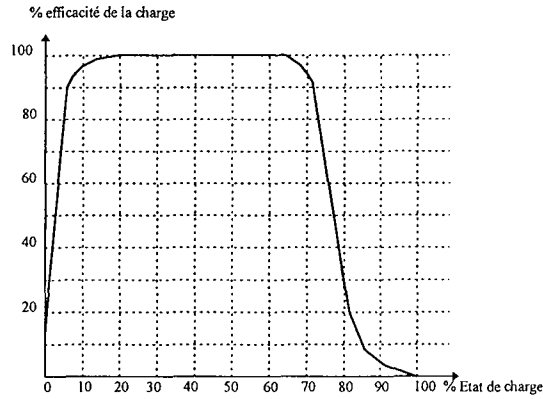
L'évaluation du niveau de charge de l'accumulateur est réalisée dans un environnement nominal utilisé comme référentiel.

• Influence de l'état de charge

L'influence de l'état de charge de la batterie se traduit par un très mauvais rendement lorsque la batterie est totalement déchargée (cas des décharges profondes). Une fois le processus de recharge amorcé, l'influence de la capacité stockée disparaît pour ne réapparaître qu'en fin de charge où toute la matière

accessible a été réactivée. Ce cas correspond à la fin de charge, la batterie stocke de moins en moins d'énergie. Le rendement devient nul à pleine charge.

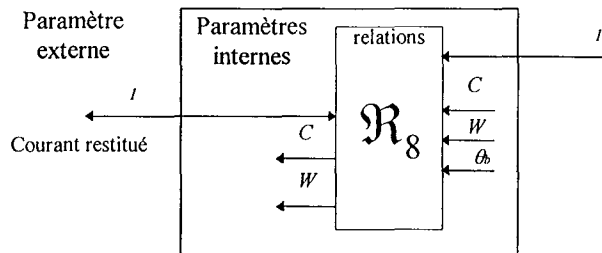
Figure 5-35 « Efficacité de la charge en fonction de l'état de charge : η_c »



• La restitution du courant

Si la restitution du courant s'effectue dans d'autres conditions que celles de référence, il est également nécessaire de convertir le paramètre de la capacité stockée normalisée C_s dans le nouveau contexte. Cela s'effectue en calculant les influences de la température et du courant de décharge.

Figure 5-36 « Les paramètres de la restitution du courant »



Le résultat de ce calcul est la capacité récupérable C_r que peut consommer l'utilisateur dans les conditions actuelles.

$$C_d(t) = n_l(t) \cdot n_\theta(t) \cdot C_s(t)$$

L'énergie consommée peut alors être déduite de la capacité disponible par :

$$C_d(t) = C_{d0} - \int_{t_0}^t i(t) \cdot t \cdot dt$$

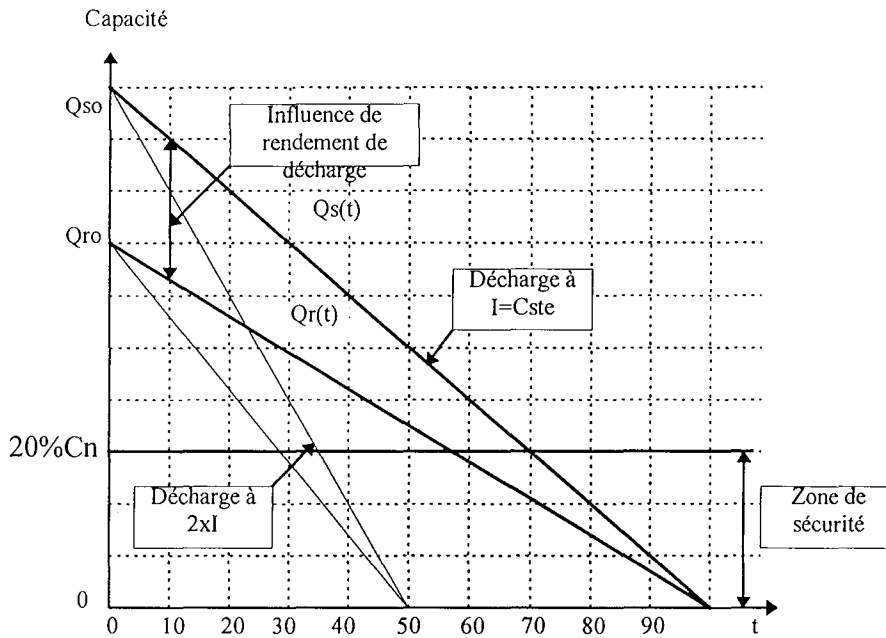
Ce qui diminue la capacité stockée de :

$$C_s(t) = C_o - \int_{t_0}^t \frac{i(t) \cdot t}{n_l(t) \cdot n_\theta(t)} dt$$

Si la décharge s'effectue à courant constant à une température donnée fixe, le résultat est un réseau de droites. Les points de départ sont donnés par les capacités récupérables à l'instant t_0 . Les pentes des

droites sont directement proportionnelles au courant de décharge. La droite de la capacité stockée normalisée C_s et de la capacité réelle disponible C_d se rejoignent sur l'axe des abscisses. La batterie ne doit normalement jamais atteindre la zone de sécurité des décharges profondes.

Figure 5-37 « Allure de C_s durant la restitution du courant »



5.4.6 Les comportements de la batterie plomb

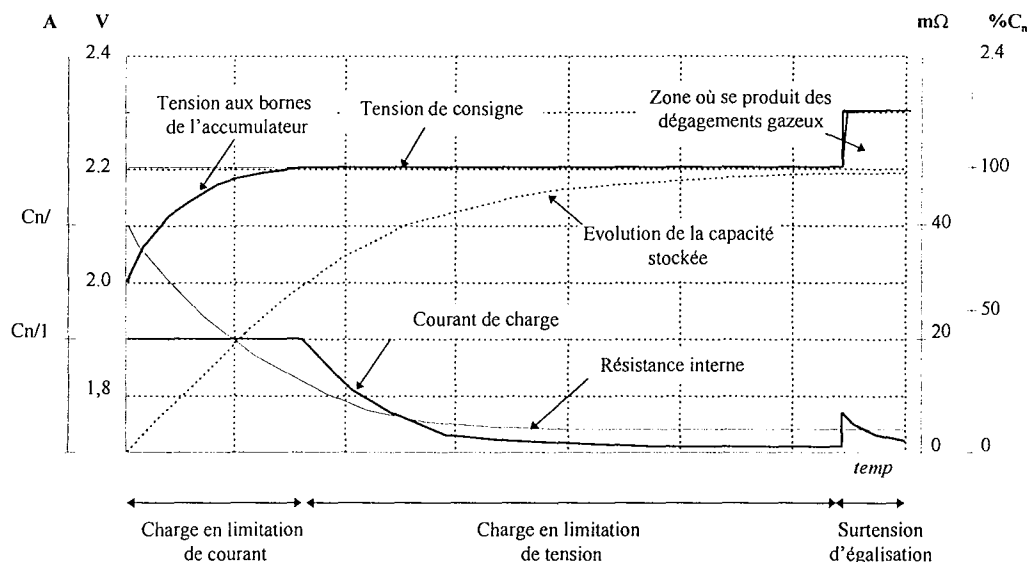
Pour pouvoir étudier les caractéristiques de la batterie, il est nécessaire d'identifier les états qui représentent les modes d'utilisation de la batterie. La batterie possède quatre comportements distincts [KOZ95]:

- *La charge* : L'accumulateur est connecté à une source d'énergie. La batterie agit comme un récepteur et stocke une partie de l'énergie qu'elle consomme.
- *La décharge* : L'accumulateur est connecter à un circuit consommateur. La batterie agit comme une source d'énergie.
- *Le stockage* : L'accumulateur n'est connecté à aucune source ni récepteur. Il n'y a pas d'échange avec l'extérieur.
- *Le floating* : L'accumulateur est connecté en tampon sur la sortie d'une alimentation. Elle est en permanence soumise à une tension même si elle est chargée et ne stocke plus d'énergie. Elle peut être considérée comme une forme particulière de stockage.

5.4.6.1 Comportement lors de la charge

Pour être effectuée dans de bonnes conditions, elle doit se faire aux conditions nominales précisées par le constructeur pour la limitation du courant (généralement $C_n/10$) de charge et la tension en fin de charge. La température doit être égale ou légèrement supérieure à la température nominale.

Figure 5-38 « Evolution des paramètres de la batterie durant la charge »



La force électromotrice de l'accumulateur n'est pas accessible directement, mais elle peut être déduite de la tension de charge, du courant de charge et de la résistance interne. Elle croît du fait de l'augmentation du niveau de charge pour finir par atteindre la valeur de la tension de charge en fin de charge.

Au début de la charge, il faut limiter le courant, donc le nombre de réaction chimique au sein de l'accumulateur. Un trop fort courant a tendance à échauffer rapidement l'accumulateur du fait de l'augmentation de la résistance interne (principalement due aux surtensions électrochimiques), par l'énergie dégagée par les réactions chimiques. De plus les phénomènes d'altérations de l'accumulateur sont aggravés et il y a une mauvaise transformation de la matière active de l'électrode.

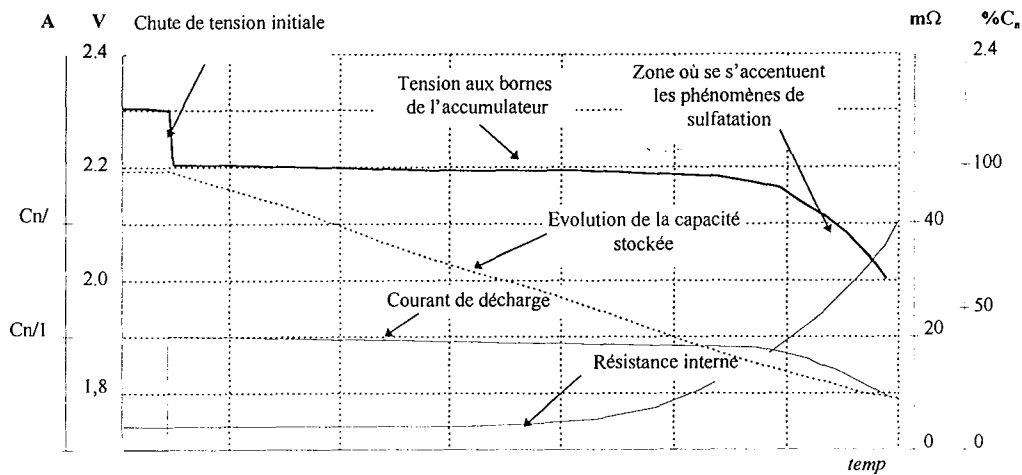
Remarque : la surtension d'égalisation doit s'effectuer en fin de charge et permet de lutter contre la stratification de l'électrolyte.

5.4.6.2 Comportement lors de la décharge

La décharge doit s'effectuer en respectant certaines règles :

- Le courant de décharge ne doit pas atteindre des valeurs conduisant à une très mauvaise consommation des électrodes, un emballement thermique (limiter les décharges en pic de courant).
- La capacité résiduelle ne doit pas descendre en-dessous de 20% de la capacité nominale C_n .

Figure 5-39 « Evolution des paramètres de la batterie durant la décharge »

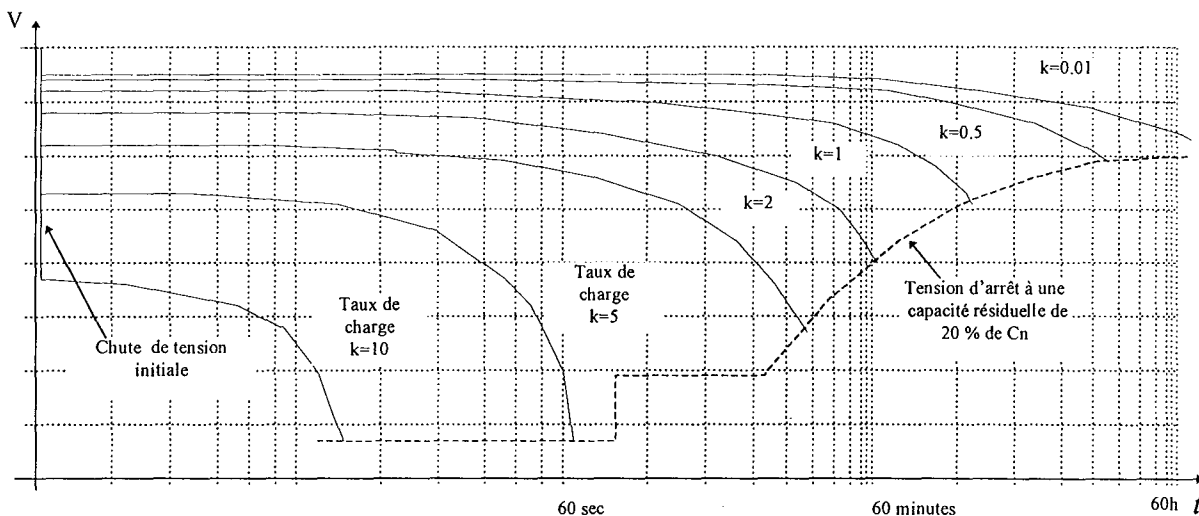


La décharge optimum est obtenue avec des faibles densités de courant qui consomment régulièrement les électrodes.

La batterie décharge son énergie dans le circuit. La tension à ses bornes est égale à sa force électromotrice diminuée de la chute de tension dans sa résistance interne. Après la chute de tension initiale, les phénomènes de polarisation et l'influence de la résistance interne sont quasi constants. La tension diminue principalement avec la valeur de la FEM. Vers 60%, la matière active devient moins accessible et plus rare (surtout en fort régime de décharge), la chute de tension est accentuée par l'augmentation de la résistance interne.

La valeur de cette chute de tension a une forte influence sur la restitution de l'énergie.

Figure 5-40 « Allure des caractéristiques décharge en fonction du temps et des régimes de charge » [CHO95]



La tension d'arrêt

Elle est fournie par le constructeur en fonction du taux de charge. Elle sert d'indicateur à l'utilisateur pour éviter les décharges complètes de l'accumulateur.

5.4.6.3 Comportement lors du stockage

Quand une batterie est stockée pour une période de temps importante, sa capacité emmagasinée décroît graduellement. La batterie consomme l'énergie électrique sans la décharger dans un circuit électrique extérieur. Ce phénomène s'appelle *l'auto-décharge*. IL est inévitable et se produit même si la batterie est neuve. La cause de cette décharge est d'ordre :

- *chimique* : les substances actives des anodes (oxyde de plomb) et des cathodes (plomb spongieux) activées par la charge sont décomposés dans une réaction lente avec l'acide sulfurique de l'électrolyte, qui les transforme en sulfate de plomb stable;
- *électrochimique* : les impuretés et l'oxydation réduit les électrodes.

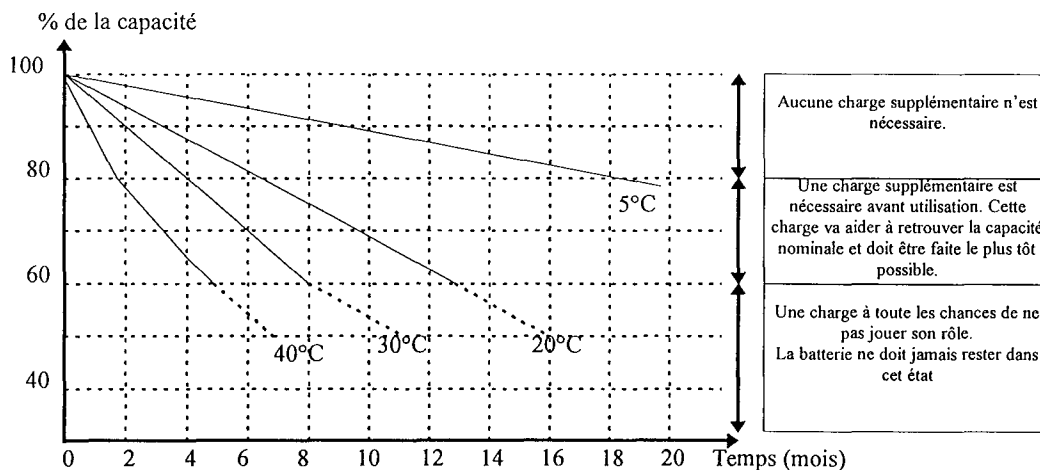
Le phénomène d'*auto-décharge* est très lié à la température qui accélère le phénomène.

La capacité restante peut s'exprimer en un pourcentage de la capacité stockée en début de la phase de stockage, elle est égale à :

$$C_{\text{fin de stockage}} = C_{\text{début de stockage}} \times K\%(\text{temps, température de stockage}) \quad (0.107.)$$

A la sortie de ce mode d'utilisation, il est nécessaire de suivre les instructions dans les encadrés de la figure ci-dessous.

Figure 5-41 « Caractéristiques d'auto-décharge » [YUA94]

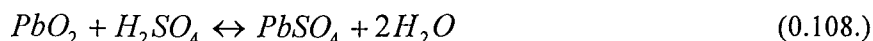


Pour stocker sur de longues périodes, il est nécessaire de charger préalablement la batterie et de prévoir des cycles de recharge environ tous les 6 mois. Le stockage à des températures supérieures à 30°C est à proscrire.

• Le phénomène d'autodécharge

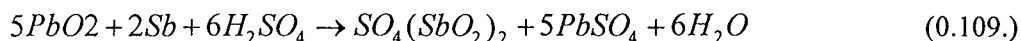
On entend par autodécharge l'ensemble des réactions chimiques et électrochimiques se produisant sans donner lieu à une énergie électrique utilisable. Ce courant d'autodécharge correspond à l'utilisation d'électrons générés par l'oxydation de certains éléments pour en réduire d'autres. Les deux principales causes sont [BIS92, PLA85]:

- La réaction entre le plomb spongieux et l'acide sulfurique



La cinétique de ces réactions croît fortement avec la concentration d'acide et la température, conduisant à de gros et peu solubles cristaux de sulfate. Cette réaction reste cependant réversible.

- La réaction induite par la présence d'antimoine dans l'alliage des plaques :



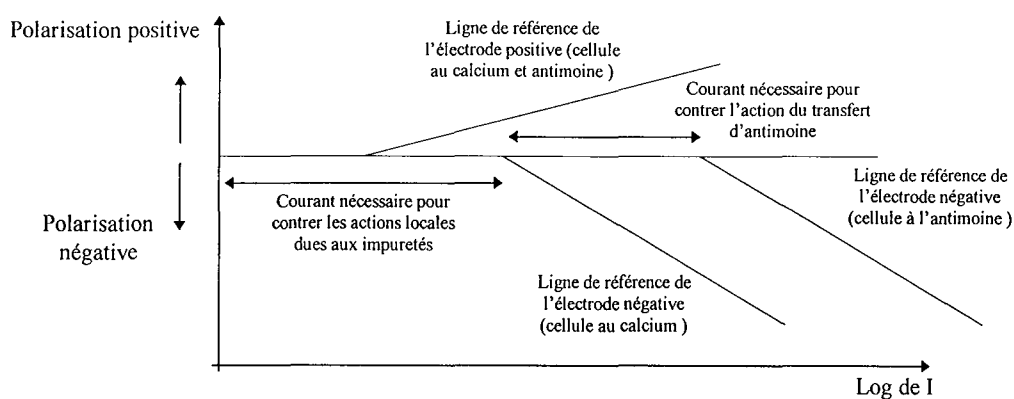
Il en résulte une corrosion de la grille (alliage plomb-antimoine). Contrairement à la précédente, cette réaction est irréversible et à pour effet de diminuer la capacité utile de l'accumulateur.

D'autres réactions existent également au sein de la batterie mais en quantité plus réduite. Ce sont les réductions des composants polluants de l'électrolyte (Arsenic, Bismuth, fer, cuivre, antimoine) ou ceux ajoutés (nickel, platine).

Globalement, le phénomène d'autodécharge peut être rapproché d'un courant de fuite d'un condensateur. Il est possible de fortement limiter le phénomène d'autodécharge en appliquant une tension légèrement supérieure à la tension batterie ce qui a pour effet de polariser les électrodes et d'effectuer une électrolyse « d'entretien » (mise en *floating*⁸ de la batterie).

Remarque: En comparant le diagramme de TAFEL d'un accumulateur équipé de grille à l'antimoine et d'un équipé de grille au calcium, on s'aperçoit que les batteries équipées de grille à l'antimoine nécessitent un courant d'entretien supérieur avant de pouvoir contrer le phénomène de corrosion..

Figure 5-42 « Comparaison du diagramme de TAFEL d'accumulateurs aux grilles de calcium et antimoine »



5.4.6.4 Le comportement en tampon

L'accumulateur se charge lorsque l'alimentation principale est présente et fournit de l'énergie quand celle-ci est absente ou insuffisante. En temps normal, l'accumulateur est maintenu chargé et n'est parcouru

⁸ floating : mise en parallèle de la batterie avec une alimentation

que par le courant d'entretien (recombinaisons de l'oxygène en fin de charge). Sa durée de vie est alors fonction des phénomènes de pertes de gaz (déshydratation).

5.5 Les phénomènes de vieillissement

La durée de vie d'un accumulateur est atteinte lorsque sa capacité potentielle est tombée à 80% de sa capacité nominale. La raison de cette perte de capacité est la lente altération des divers éléments composant l'accumulateur et plus particulièrement les électrodes et l'électrolyte [BER93].

5.5.1 L'altération des électrodes

La diminution de la surface des électrodes par modification de la répartition de la matière active (déformation, apparition de précipité) qui affaiblit également la porosité de l'électrode. L'inaccessibilité des matériaux actifs et aggravée par la sulfatation de l'électrode.

- ***La sulfatation de l'électrode négative***

Ce phénomène, qui apparaît principalement sur l'électrode négative, traduit l'apparition de sulfate de plomb résiduel qui n'est plus consommé lors des réactions chimiques [KAP82]. Son origine peut être la stratification de l'électrolyte conduisant à une augmentation de la densité d'acide, le déplacement de la matière active, la faible tension de la grille négative conséquente du cycle de l'oxygène

Ses conséquences sont la création d'une couche isolante électrique et moins poreuse aux ions qui freine la diffusion de l'acide. La matière active devient moins accessible et la capacité récupérable diminue.

La sulfatation peut être fortement augmentée par une élévation de température à la plaque négative (oxydation de la surface par le cycle de l'oxygène qui dégage de la chaleur).

- ***La corrosion de l'électrode positive***

Toutes les batteries plomb ont une durée de vie finie à cause de la corrosion des grilles positives, particulièrement dans les applications où elles sont en floating [BOU81, FOI92]. La grille positive et la zone conductrice est le support pour la matière positive. Sa corrosion augmente la résistance électrique de la grille (de 5 à 30%) et une augmentation de son volume, qui associés à une modification de la distribution de matière active, conduit à une perte du contact électrique avec le gel. L'augmentation de la masse de la grille positive ou la diminution de sa corrosion augmente la durée de vie de la batterie. La grille négative n'est pas sujette à la corrosion.

5.5.2 La déshydratation des éléments

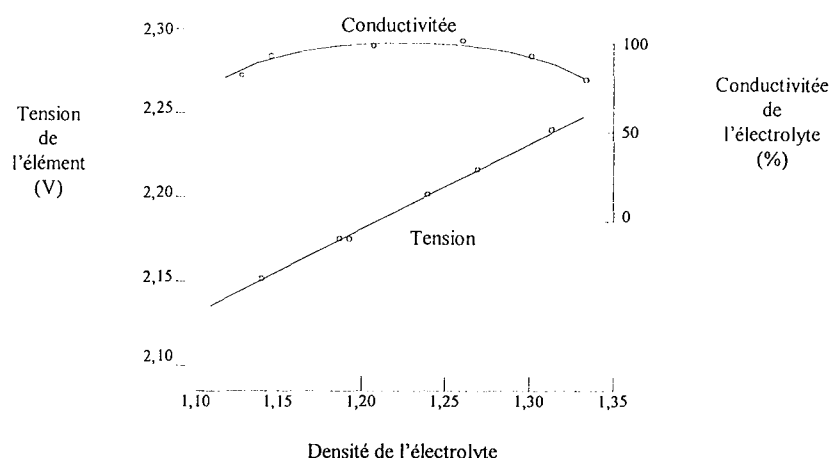
Durant l'utilisation, le mécanisme de recombinaison des éléments n'est pas efficace à 100% et l'eau est perdue petit à petit par sa transformation en gaz par électrolyse.

C'est une des principales raisons de panne. La perte d'eau conduit à une augmentation de la densité de l'électrolyte (une évaporation de 25% d'eau correspond à une variation de la densité de 1,3 à 1,36). A la valeur limite de 1,36, le phénomène de sulfatation des grilles s'accélère et la densité commence à diminuer (transformation irréversible). La tension de la cellule qui est directement proportionnelle à la densité de l'électrolyte et n'est donc plus un très bon indicateur de l'état de santé de la batterie.

Tableau 5-6 « Influence de la perte d'eau sur la tension à circuit ouvert batterie 100Ah » d'après ERA

Tension en circuit ouvert (V)	Capacité résiduelle (%C ₃)	Etat de santé
2,21	31%	Perte d'eau et sulfatation
2,17	105%	normal
2,14	75%	25% sulfatée

Figure 5-43 « Influence de la densité de l'électrolyte sur sa conductivité et la tension de l'élément » d'après [FED97]



• La perte de gaz

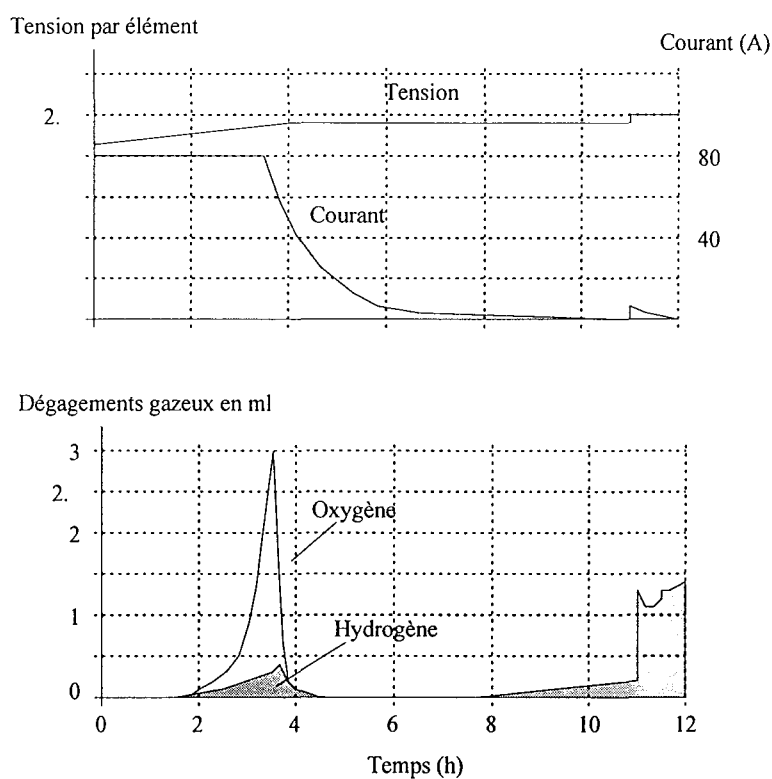
C'est un phénomène important pour la batterie car elle correspond à l'échappement d'hydrogène et d'oxygène (donc à une perte d'eau). Cette perte est expliquée par les variations du rapport entre l'oxygène et l'hydrogène au sein de la batterie durant la charge. La présence de ces gaz conduit à une surpression du bac étanche et le risque d'explosion est éliminé par évacuation du surplus par la valve. Ces variations de pression sont principalement dues à [BER94]:

- La différence de rendement de charge de l'électrode négative (environ 100%) et de l'électrode positive (95% maximum). Ce qui implique que l'électrode négative atteint 100% de charge alors que l'électrode positive n'a pas achevée sa charge. L'électrode positive est alors surchargée et produit de l'hydrogène en fin de charge.

- Aux bulles causées par l'utilisation d'une forte densité de courant qui implique la nécessité d'effectuer beaucoup de recombinaisons aux électrodes, chose rendue difficile lorsque l'électrode a atteint un certain niveau de charge, donc consommer une grande partie de sa matière active, d'où dégagement d'hydrogène et plus particulièrement d'oxygène.

La figure suivante illustre ces phénomènes sur une batterie de traction de 400 Ah (document VARTA) chargée à courant constant de 80A puis à une tension de charge maximum de 2,4V. La première évacuation correspond au dégagement du gaz produit sous forme de bulle par une forte densité de courant avec un certain état de charge de l'élément (dont la tension augmente et tend vers la tension limite de fin de charge). La deuxième évacuation correspond à la fin de charge et au dégagement d'hydrogène à la cathode. Le phénomène est fortement amplifié si l'on applique même une petite surtension appelée charge d'égalisation (échelon de 0,1V).

Figure 5-44 « Echappement de gaz sur une batterie en charge » d'après VARTA



Les quantités de gaz évacués sont faibles et ne présentent pas de danger pour l'environnement (risque d'explosion) sauf si la batterie importante est placée dans un endroit confiné et étanche (effet cumulatif des dégagements gazeux).

• Influence de la température sur la perte de gaz

Nous retiendrons l'importance du phénomène d'assèchement notamment dans les applications en floating ou les pertes (principalement en hydrogène) sont directement liées à la température et à la tension

de fin de charge, d'où les soins particulier à apporter à la compensation de cette tension en fonction de la température.

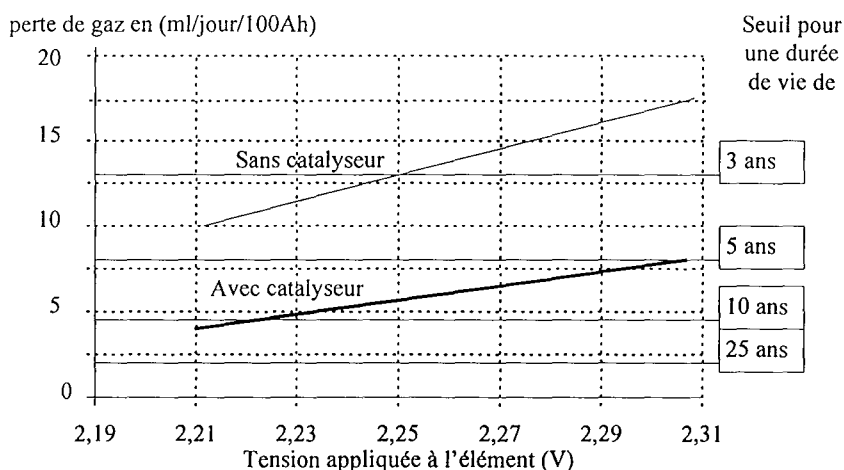
Exemple : Pertes de gaz d'une batterie 100Ah 48V AGM en fonction de la température et de la tension de floating.

Tableau 5-7 « Volume des gaz d'échappement en fonction de la tension et de la température »

Tension appliquée et température	Volume des gaz d'échappement
à 2,27 V et 20 °C	>4,3 ml/jour
à 2,4V et 20 °C	>28 ml/jour
à 2,27V et 40°C	>17 ml/jour

Lorsque la batterie est équipée d'un système catalytique de recombinaison, la perte de gaz causée par le premier pic est réduite par recombinaison de l'hydrogène présent avec l'oxygène (seul l'oxygène excédentaire s'échappe) ce qui permet d'augmenter de manière très significative la durée de vie de l'accumulateur (environ 1/3).

Figure 5-45 « Variations des perte de gaz en fonction de la tension de charge à 32°C (batterie AGM) » d'après [FED97]

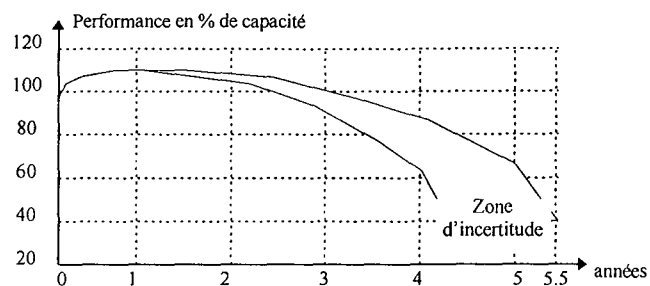


• L'utilisation en tampon (floating)

L'utilisation en tampon est l'utilisation de la batterie en parallèle avec l'alimentation principale. Elle est soumise continuellement à une tension de charge appelée *tension de maintien*.

En service normal, la tension de charge est maintenue, les gaz générés à l'intérieur de la batterie sont continuellement recombinés à travers les plaques négatives pour reformer l'eau de l'électrolyte. Il y a peu de perte de capacité due à l'assèchement de l'électrolyte mais due à la très lente et graduelle corrosion des électrodes. La batterie perdra finalement de la capacité et arrivera à la fin de sa durée de vie.

Figure 5-46 « Durée de vie en tampon » [FIA95]



Ce phénomène de corrosion est accéléré par les températures élevées ou les tensions de charge trop importantes. En effet, une augmentation de la température et de la tension provoque des dégagements gazeux et de la chaleur propices à la sulfatation de l'électrode négative. Il est très important de calculer la tension en charge tampon de manière à minimiser également cet effet.

5.5.3 La stratification de l'électrolyte

Au fur et à mesure des cycles, la distribution de l'électrolyte devient de moins en moins uniforme [WON81b]. Les ions étant plus lourds que l'eau, ils tendent à s'accumuler dans le fond du bac créant ainsi une stratification de la densité d'acide. Les conséquences sont une mauvaise consommation de l'électrode dans les zones à faible densité d'acide et une très forte accélération du phénomène de corrosion des grilles pour les zones fonctionnant avec une densité d'acide supérieure à 1,38.

Ce phénomène de stratification est limité et n'apparaît qu'à plus long terme sur les batteries à électrolyte gélifié.

Un moyen pour lutter contre la stratification de l'électrolyte et l'utilisation du phénomène de dégagement gazeux pour homogénéiser la densité d'acide. Ce phénomène est obtenu par l'application d'une légère surtension sur l'élément.

5.5.4 L'effet mémoire

Ce terme est habituellement appliqué à la batterie Cadmium-Nickel. Il a pris naissance dans l'industrie aéronautique où ce type d'élément était utilisé dans les satellites géostationnaires. L'accumulateur était seulement déchargé périodiquement à 25% de sa capacité initiale et rechargé à exactement 100% sans surcharge. Il en résultait une détérioration apparente des 75% de capacité restant. Il a alors été pris comme acquis que cette perte de capacité était due à l'effet mémoire de la structure de l'élément qui ne réagissait que dans la gamme de capacité dans laquelle il était utilisé. Cependant cet effet disparaissait complètement quand le programme de charge était modifié en vue d'appliquer une légère surcharge. Ce phénomène semblait confirmer l'existence d'un certain *effet mémoire*.

La justification de cet effet serait la modification de la répartition de la charge sur l'électrode par la création de zones privilégiées utilisées dans les réactions chimiques lors des cycles de charge/décharge, les zones moins utilisées devenant de plus en plus passives. Mais en pratique, on s'est aperçu qu'il était impossible d'en apporter la démonstration. Par vulgarisation, ce terme est quelquefois employé pour l'accumulateur au plomb. Mais en réalité, un bon nombre des effets néfastes de la batterie sont incombés à cet effet mémoire (sulfatation, déshydratation).

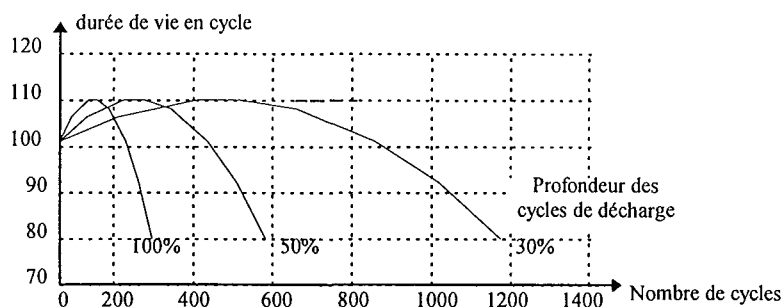
5.5.5 La caractéristique de cyclage

Le phénomène de cyclage est le résultat de l'altération de la batterie due aux effets d'un vieillissement dans des conditions nominales. Elle prend en compte les phénomènes de détérioration naturels qui sont la détérioration des plaques et séparateur, la déshydratation des éléments. Elle donne une caractéristique montrant l'évolution de la capacité de stockage de l'accumulateur en fonction du nombre et de la profondeur des cycles de charge-décharge. Son évaluation est réalisée en suivant les tests de la norme BS6290.

L'importance du nombre de cycle est d'autant plus importante que leur amplitude est importante. Ce qui a pour effet de nettement diminuer la durée de vie de la batterie lors de son utilisation en décharges profondes.

Cette caractéristique est habituellement fournie par les constructeurs sous forme d'un tableau donnant la durée de vie (en cycles) en fonction des profondeurs de décharge.

Figure 5-47 « Durée de vie en cyclage »



• Effet des décharges profondes

En fin de charge, la densité d'acide baisse. Si l'énergie stockée passe sous le seuil de 20% de la capacité nominale, cette densité sera trop faible pour que l'accumulateur fonctionne de manière optimale. Il se produit des dégradations et altérations (sulfatation excessive des plaques conduisant à l'augmentation de la résistance interne). La recharge sera moins efficace et ne s'effectuera plus dans de bonnes conditions et produira des échauffements et des disparités dans la transformation de l'électrode.

5.5.6 Le couplage d'éléments

Dans une batterie, plusieurs éléments sont placés en série pour obtenir la tension voulue. Malgré les précautions des constructeurs, il se pose le problème de la dispersion des caractéristiques des différents éléments. Si les éléments ne sont pas homogènes, la répartition de la tension idéale de la batterie ne se répartira pas de façon égale, il en sera de même pour l'énergie. Des éléments peuvent se trouver soumis à des conditions qui vont conduire à leur vieillissement précoce qui augmente généralement le déséquilibre (emballement) et conduit à la défaillance de celui-ci.

Les phénomènes les plus observables sont le retournement de la tension d'un élément qui se polarise en sens inverse des autres ou une très forte impédance de l'accumulateur qui peut aller jusqu'à la coupure de la conduction électrique. Un symptôme de ces dysfonctionnements est une tension en circuit ouvert faible et un échauffement anormal de la batterie.

Bibliographie du chapitre

[ABD85] ABDELKAB B.

Etude préliminaire d'un alliage de PbCa0,06% destiné à la fabrication des plaques négatives des accumulateurs au plomb
Mémoire de DEA Université de NANCY I, Sciences et génie des matériaux, 1985

[BAI76] BAIKIE P.E. GILLIBRAND M.I., PETERS K.

The effect of temperature and current density on the capacity of lead-acid battery plates
Electrochimica Acta, Vol 17, 1976, p 839-844

[BAL97] BLAIR T.

Battery Making - Crystal hold, the key for perfect pastes
Batteries International, Janvier 1997, p. 37-42

[BAR80] BARD A. , FAULKNER L.R.

Electrochemical Methods . Fundamentals and Applications.
Wiley and Sons, New-York, 1980

[BAR94] BARNES S.

Thermal management for hybrid electric vehicle VLRA batteries
EVS-12 Symposium, december 1994, Anaheim USA

[BEC74] BECK F.

Elektroorganische Chemie, Grundlagen und Anwendungen
Verlag Chemie, Weinheim, 1974

[BER93] BERNDT D., MEISSNER E., RUSCH W.

Aging Effects in Valve-Regulated Lead-Acid Batteries
Proceeding Intelec 93, S.22.B., p.139-145

[BER94] BERNDT D.

Double acting vent valve for VRLA batteries
Batteries International, Janvier 1994, p.86-87

[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

[BOU81] BOUET J. et POMPOM J.P.

Analyse des causes de dégradation des plaques positives de batteries plomb
Electrochimica Acta. Vol 26,N°10, 1981, p 1477-1478

[BRO90] BRONOEL G.

Les accumulateurs électrochimiques : progrès et tendances
Rhone Poulenc, L'actualité chimique, N°3, mai 1990, issn 0151-9093

[BUL91] BULLOK K.R.

The electromotive force of the lead-acid cell and its half-cell potential
Journal of Power Sources review Jan. 1991

[CEI896] CEI-896 (EN 60896 ou NFC 58-431)

Batteries stationnaires au plomb - Prescription générale et méthodes d'essais

1ère partie : batterie plomb ouvert, CEI-896-1 (EN 60896-1 ou NFC 58-431), Complément par CEI-896-1/A1 et A2

2ème partie : batterie plomb étanche, CEI-896-2 (Projet)

[CHEN96] CHEN T. DUTRIZAC E.

The mineralogical characterization of lead acid battery past
Hydrometallurgy, 1996, Vol 40 N°12 p. 223-245

[CHO95] Chloride POWERSAFE

Recommandation Standby Power Batteries
SPECIFIER'S MANUAL, 1995.

[CHR93] CHRAA A.

Etude des processus d'oxydo-réduction intervenant dans les plaques anodique
Thèse de doctorat,PARIS 6, 93PA066532, 1993

[DEL67] DE LEVIE, P. DELAHAY ; C.W. TOBIAS

Advances in electrochemistry and electrochemical engineering
Wiley Interscience, New-York,Vol . 6 1967

[ECT96] ECT, Electro-Chem-Technic

FUEL CELL

81 Old Road, Headington, OXFORD OX3 7LA, U.K.
Site d'information internet : ectechnic@patrol.i.way.co.uk

[FAU89] FAUVARQUE J.F.

L'électrochimie et ses applications
Rhone Poulenc, L'actualité chimique, novembre 1988, issn 0151-9093

[FED97] FEDER D.

Variation in gassing rates of VLRA
Batterie International, Janvier 1997, p.62-66
Report of the 18th Intelec meeting, Boston, October 1996

[FIA95] FIAMM Monolite Recombination Battery
ENGINEERING MANUAL, 1995

[FOI92] FOISSOTE M.P.
Contribution à l'étude de la corrosion des plaques positives d'accumulateur plomb
Mémoire de DEA, NANCY I, Sciences et génie des matériaux, 1992

[GLA94] GLASER S.
The fuel cell challenge shapes up
Batteries international, October 1996

[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

[HLA79] HLADIK J.
Accumulateur électriques
Paris, Presse universitaire, collection *que sais-je*, 1979

[JON93] JONES R.
Bringing Nickel-Hydrogen Down to earth
Batteries International, Avril 1993

[KAP82] KAPPUS W. WINSEL A.
Sulfate passivation in the lead-acid system as a capacity limiting process
Journal of Power Sources, N°8, 1982, p 159-173

[KOZ95] KOZIN L. USACH F.
Electric characteristics of lead acid battery
Russian journal of applied chemistry, 1995, Vol 143 N°3 p. 790-798

[LAK97] LAKSHMI C.S.
Battery Making - On form and function
Batteries International, Janvier 1997, p. 37-42

[LIN81] LINDEN D.
HANDBOOK OF BATTERIES AND FUEL CELLS
McGraw-Hill, New York

[MIC76] MICKA K., ROUSAR I.
The theory of the porous electrodes-XIV, the lead-acid cell
Electrochimica Acta : Vol 21, 1976, p 599-603

[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

[NEW91] NEWMAN J.
Electrochemical systems
Prntice Hall, Englewood Cliffs, 1991, 2nd Edition

[PLA85] PLANKEELE J.M
Conversion physico-chimique des lignosulfates - amélioration de leurs performances en tant qu'expandeurs des plaques négatives des accumulateurs au plomb
Thèse de docteur Ingénieur, NANCY I, 1985

[RUD88] RUDD E.J.
Overview of the Al-air battery program
33th International Power Sources Symposium, 13-16 juin 1988

[STO93] STORK A. et COEURET F.
Elément de génie chimique
Lavoisier, Paris, 1993, 2nd Edition

[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

[SZA96] SWAKACS B.
Let's learn about...battery finishing
Batteries International, January 1996, p. 100-101

[VET67] VETTER K.J.
Electrochemical Kinetics
Academic Press, New-York, 1967

[WHI96] WHITEHEAD M.
Battery Science - The state we're in
Batteries International, Avril 1996, p 45-49

[WON81a] WON G., SUNU and BRIAN
Current density and electrolyte distribution in motive power lead-acid cells
J. Electrochemical Society : Electrochemical science and technology
Vol128, N°7, 1981, P. 1405-1411

[WON81b] WON G., SUNU and BRIAN
Electrolyte stratification and charge characteristics of industrial lead-acid cells
J. Electrochemical Society : Electrochemical science and technology
Power sources 8, 1981

[WRO85] WROBLOWA H.S.
Modern aspects of electrochemistry
New York, Plenum Press, Vol. 16 , 1985
Power sources 8, 1981

[YUA94] Batterie YUASA
Manuel Technique, 1994.

[ZUM94] ZUMWINKEL K.
German connections behind EFL's Zn-air
Batteries international, October 1994

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.

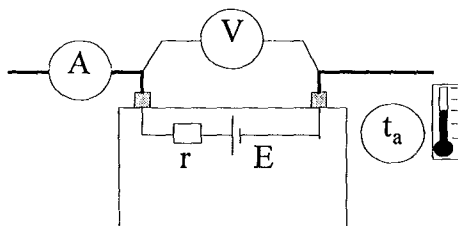
6.1 L'évaluation des accumulateurs

L'accumulateur offre des grandeurs accessibles qui sont dépendantes les uns 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 »

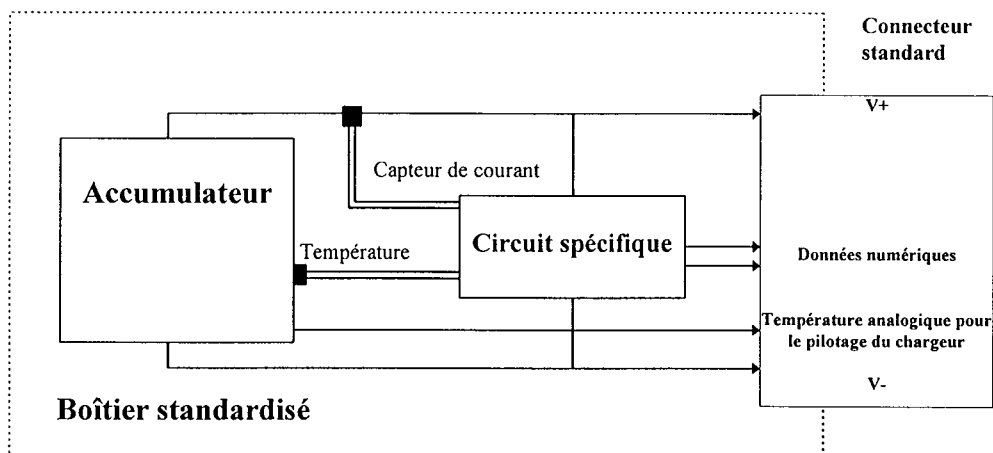


6.1.1 Les méthodes rencontrées

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 modèle 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 :

$$i = I_0 \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot \eta \cdot n \cdot F}{R \cdot T}\right) - I_0 \cdot \exp\left(\frac{-(1 - \alpha) \cdot \eta \cdot n \cdot F}{R \cdot T}\right) \quad (0.1.)$$

- i : densité de courant apparent (A/cm²)
- I_0 : densité de courant d'échange (A/cm²)
- 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 :

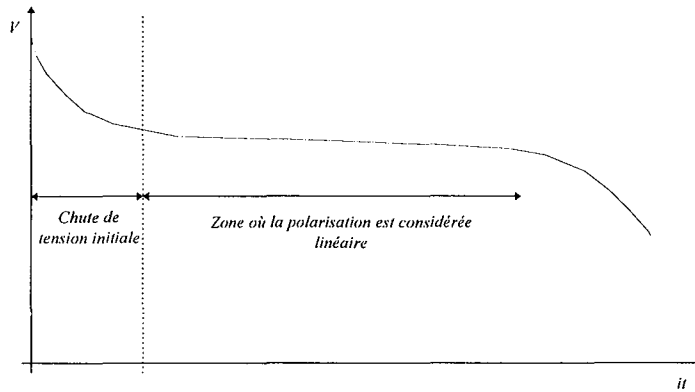
$$\eta = \left(\frac{R.T}{n.F.I_0} \right) . i \quad (0.2.)$$

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 :

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

E_{0C} : potentiel constant

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

i_m : densité de courant en A/m²

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 :

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

t : temps en heures

Q_c : quantité de matière active de la cathode en Ah/cm²

i : densité de courant en décharge A/cm².

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 $\Omega \cdot \text{cm}^2$

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 :

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

• 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.

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

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

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	$I^n.t=c$	I : courant de décharge t : temps total de décharge n, c : constantes associées à l'accumulateur
BILLERBECK	$U=U_G+U_T-I_dR$	$U_G=f(PDD)$: 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	$U = A + \frac{B}{C - X} + D.exp(-EX)$	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	$U = E^\circ + \frac{RT}{F} \ln\left(\frac{1+X}{X}\right) + K \frac{RT}{F} (2X - 1) - I.R_o \exp(X - 1)$	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

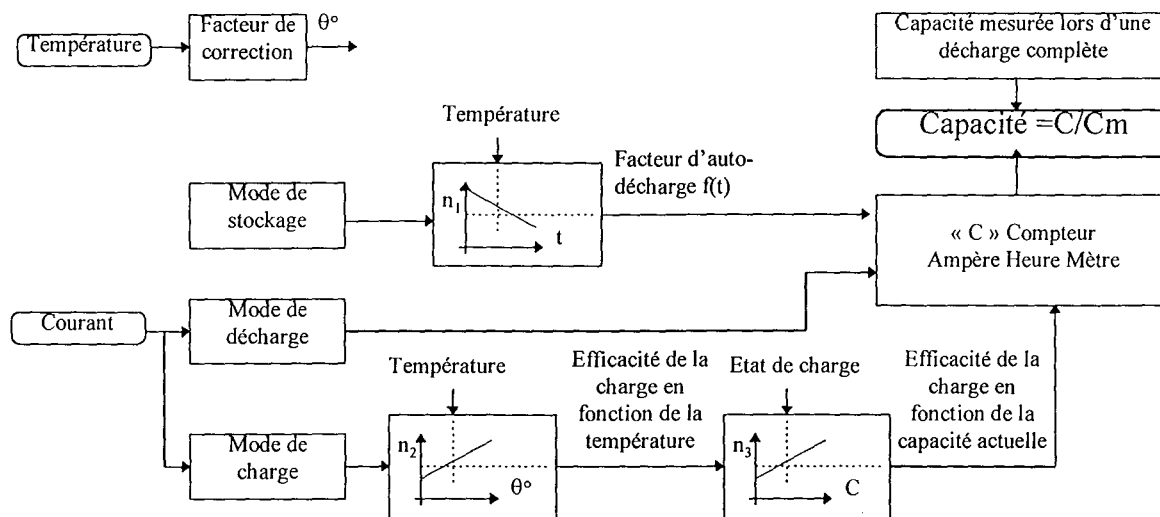
L'amélioration proposée par de nombreux auteurs passe par la prise en compte d'autres grandeurs d'influences. Ce sont principalement la température et la densité de courant. La prise en compte de mesures

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 »

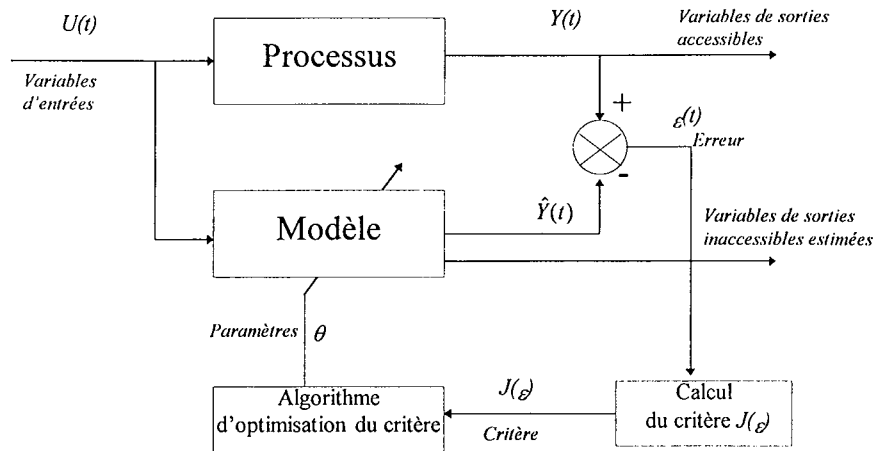


L'utilisation des modèles pose également le problème de la dérive des caractéristiques de l'accumulateur conséquence des phénomènes d'usure. Il est donc nécessaire d'utiliser ces modèles avec prudence en restant dans des conditions de fonctionnement où leurs hypothèses simplificatrices sont vérifiées 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].

¹EEPROM : Mémoire à lecture seule effaçable électriquement

Figure 6-5 Les modèles auto-adaptatifs, 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.

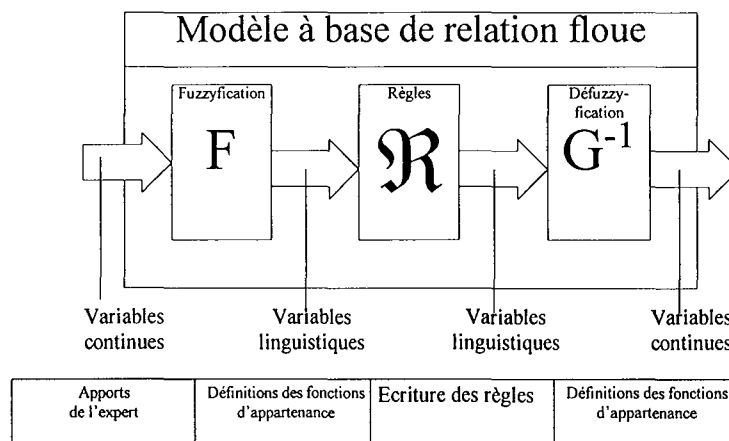
La disponibilité de moyens techniques

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 $\mathcal{R}$ 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 G^{-1} de défuzzyfication. Notre travail nécessite donc de définir chacune de ces étapes en précisant les méthodes et hypothèses utilisées [BOU95].

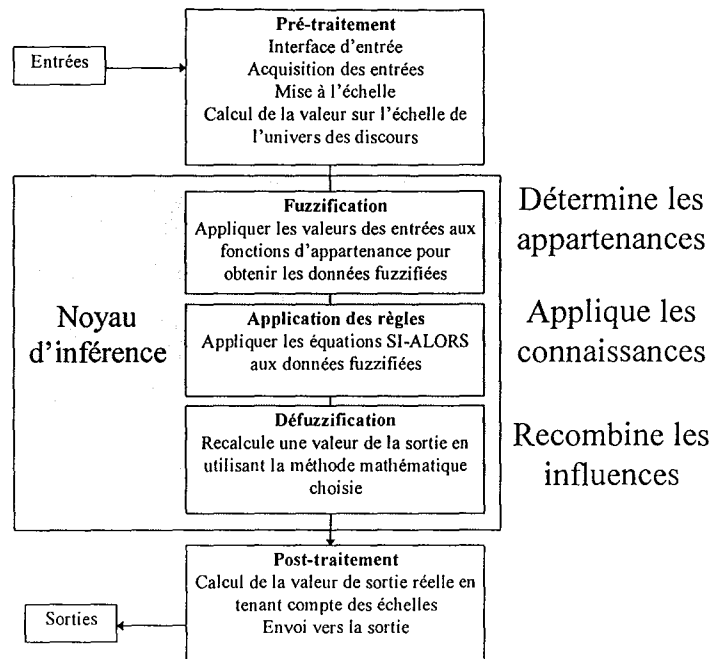
Figure 6-7 « Structure générale d'un système flou »



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 »



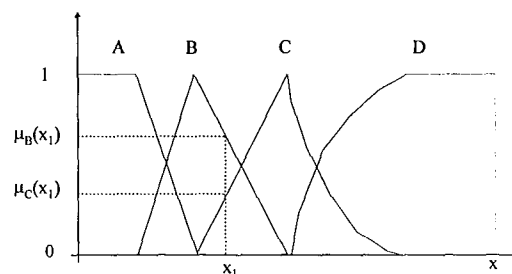
6.3.1.1 Définition du noyau d'inférence

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 »



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

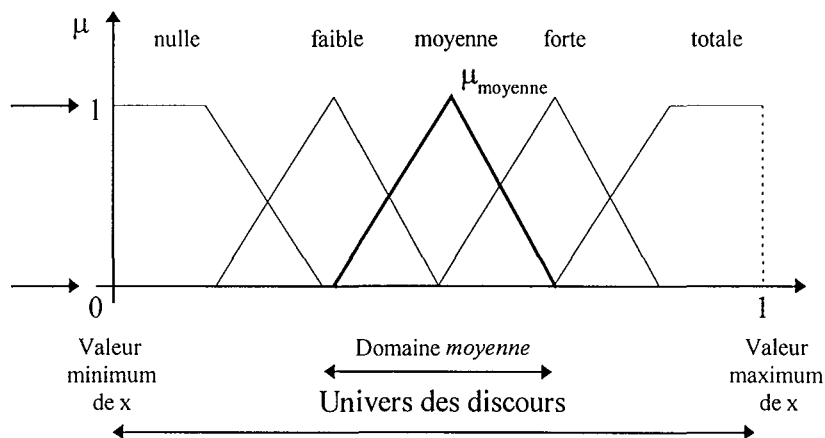
Les fonctions d'appartenance les plus usitées sont de forme :

- **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.)

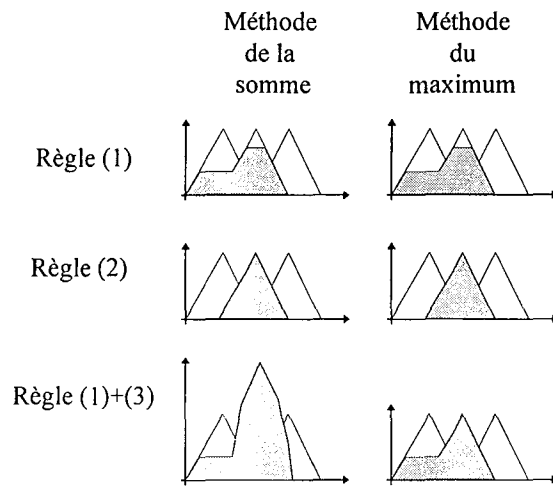
Fonction OU : $\mu_{A+B} = \max(\mu_A, \mu_B) = \mu_A \vee \mu_B$ (0.15.)

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 rencontré.*

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 :

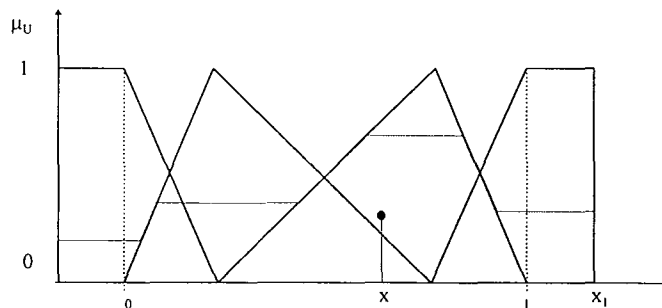
La méthode du maximum [MAM74]

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 valeur.

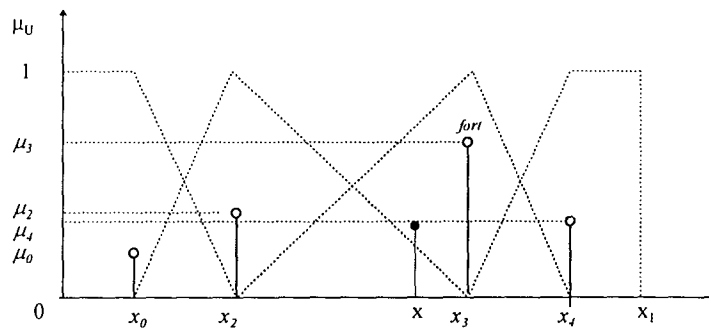
Figure 6-12 « Défuzzification par la méthode du centre de gravité »



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

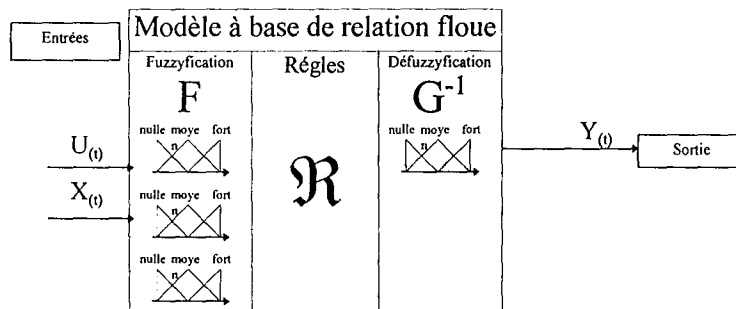


$$x = \frac{\sum \mu_i \cdot x_i}{\sum \mu_i} \text{ avec } 1 \leq i \leq n \quad (0.17.)$$

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 »

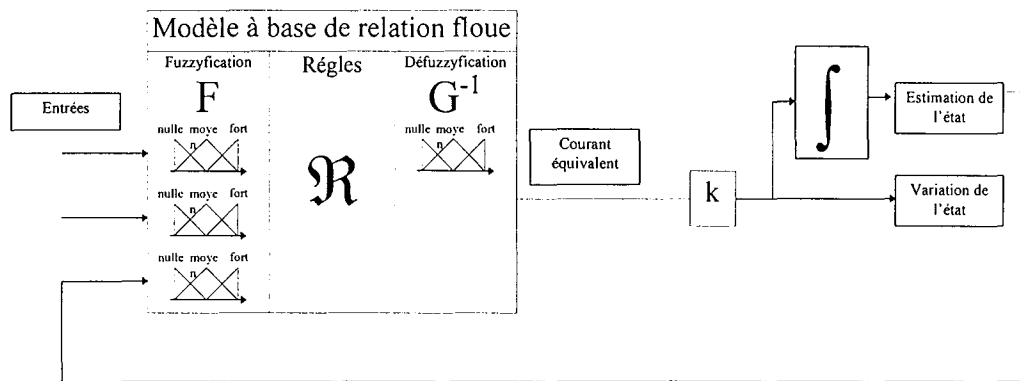


Le comportement des variables de l'accumulateur que nous souhaitons modéliser (capacité stockée et usure) sont des fonctions d'eux même et de paramètres immédiats (courant, température). Leurs variations ne sont sensibles qu'à long terme par rapport à la fréquence de calcul de notre modèle (quelques 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 »



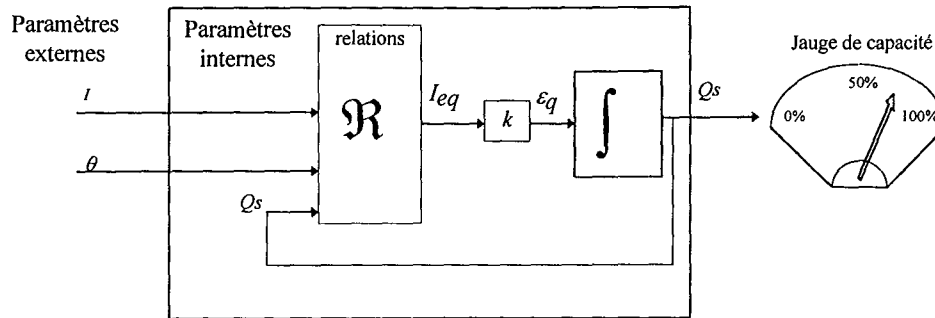
Une fois le comportement programmé, la mise en oeuvre de ce modèle nécessitera une phase d'adaptation aux caractéristiques de la batterie. Pour cela nous nous proposons d'utiliser des courbes de mesures effectuées sur un accumulateur ainsi que les quelques caractéristiques du constructeurs à notre disposition.

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 »



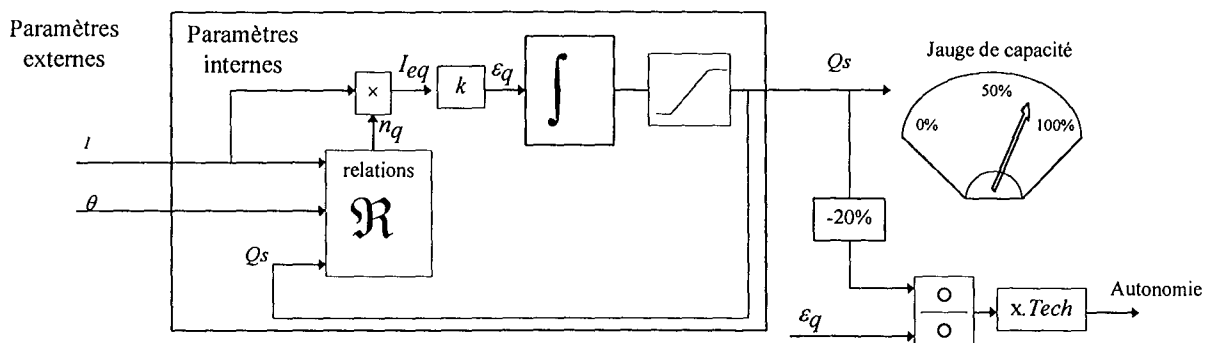
Il nous faut calculer la contribution du courant fourni à l'accumulateur pour obtenir la capacité stockée. Cette information *courant* nous renseigne sur la densité du courant et sur la quantité d'énergie fournie à l'accumulateur sur la période d'échantillonnage.

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

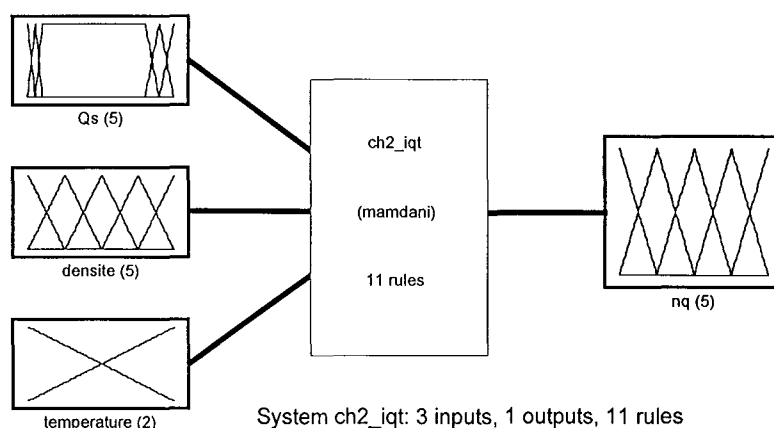
Pour corriger les dérives dues aux erreurs d'intégration au cours des cycles de charge et décharge. Il est nécessaire de définir des situations de réinitialisation de la grandeur Q_s . Dans notre application, l'accumulateur est placé en tampon, son état de *repos* est la pleine charge. Aussi lorsque 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 °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 »

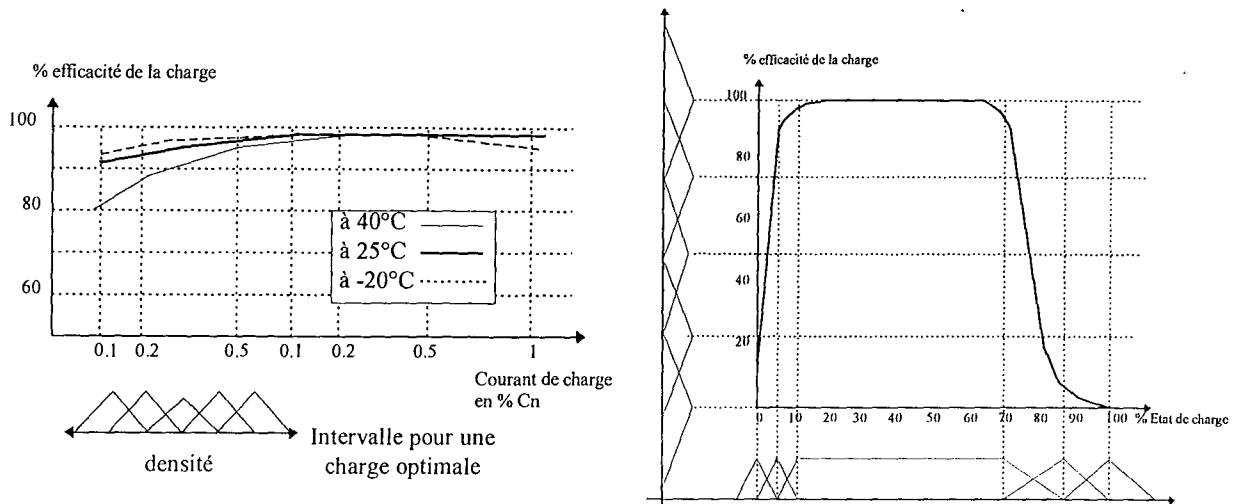
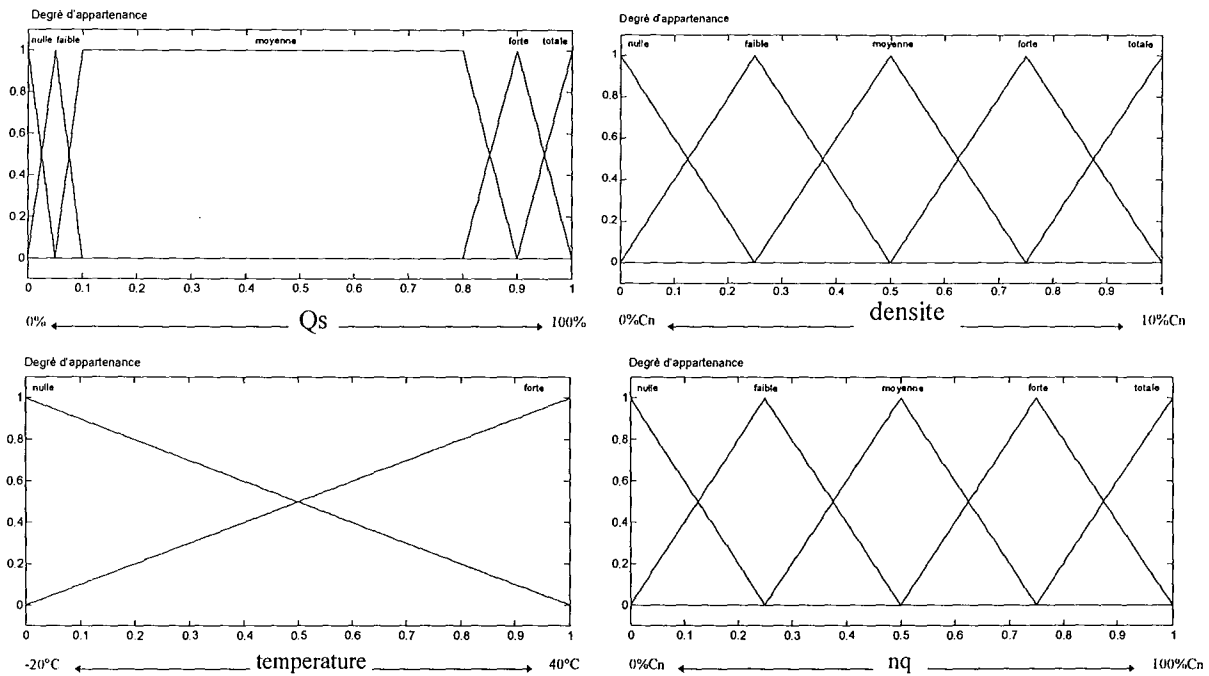


Figure 6-20 « Les fonctions d'appartenance du modèle de charge »

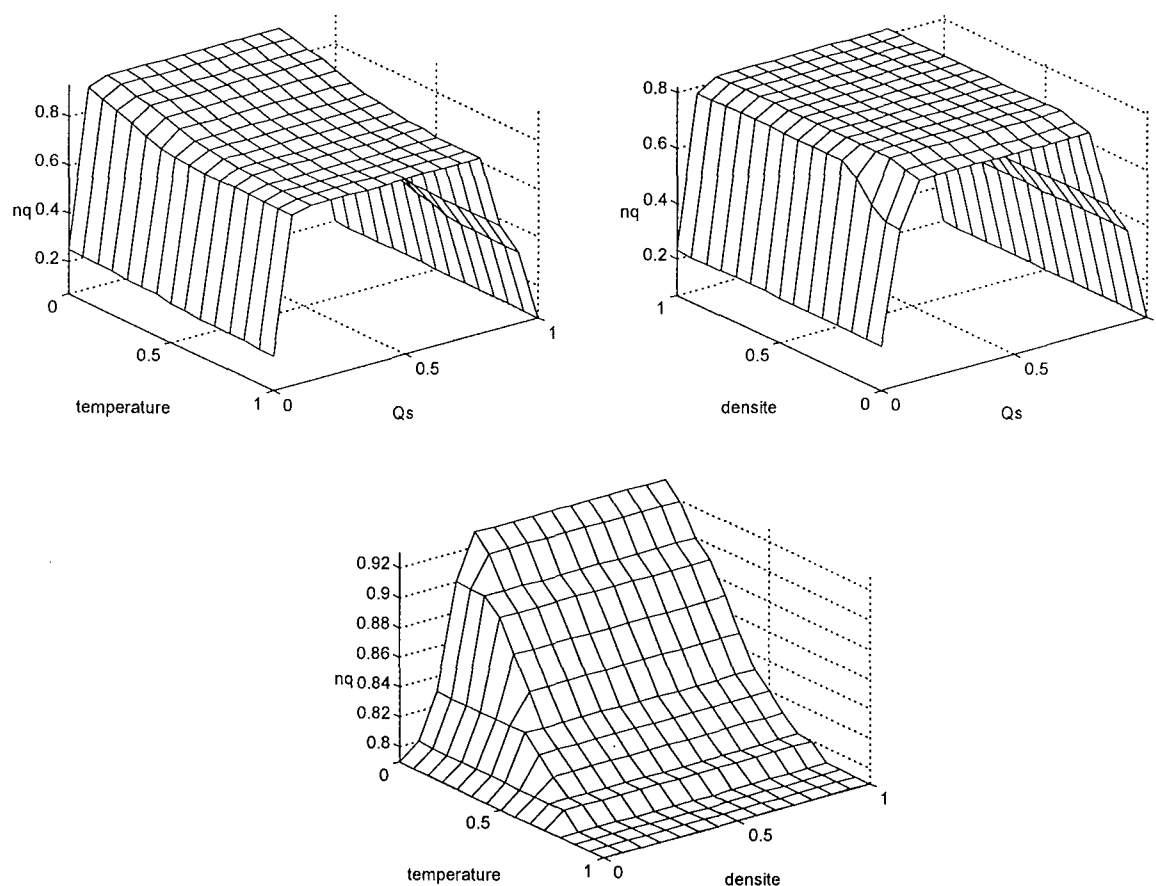


• Définition des règles

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 »

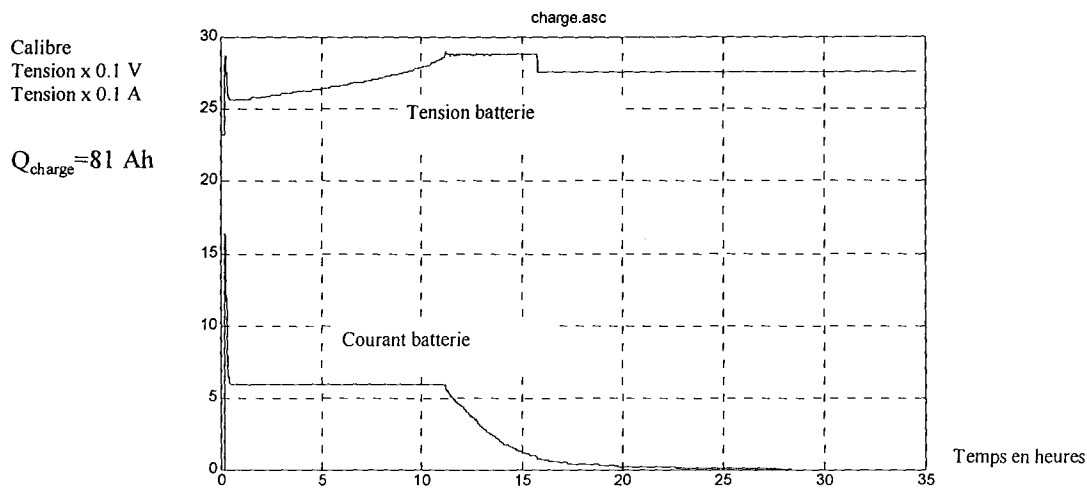
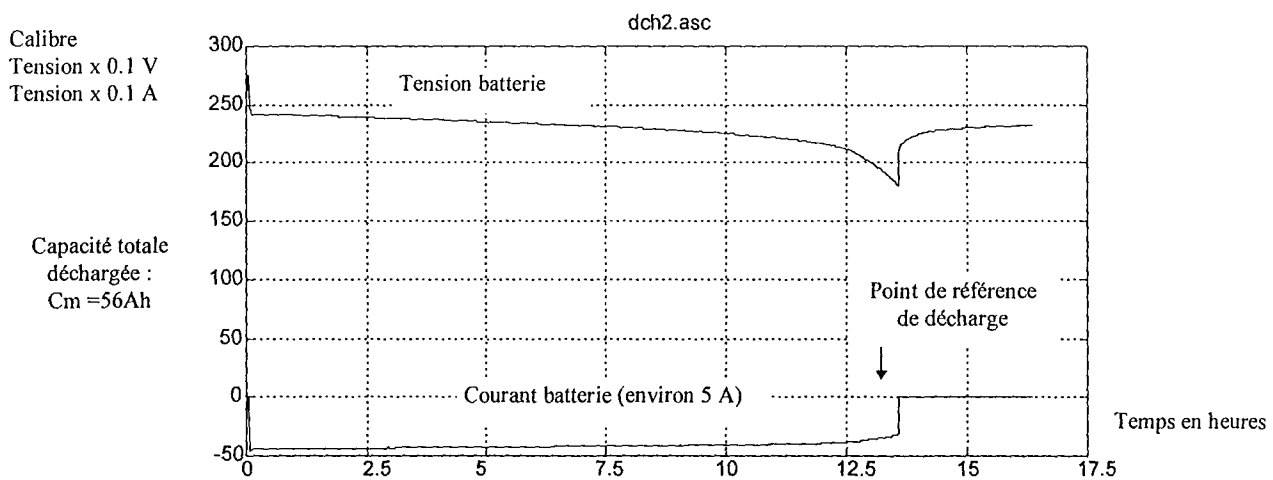


Figure 6-23 « La décharge étalon »

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 :

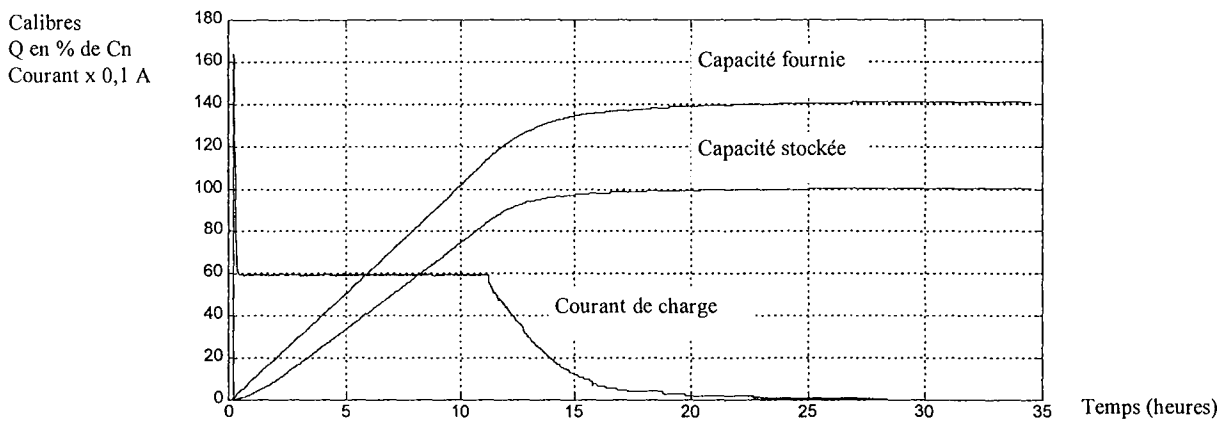
$$k_{ch} = \frac{8}{3600} \times \frac{1}{58} = 3.8314 \times 10^{-5} \quad (0.19.)$$

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

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

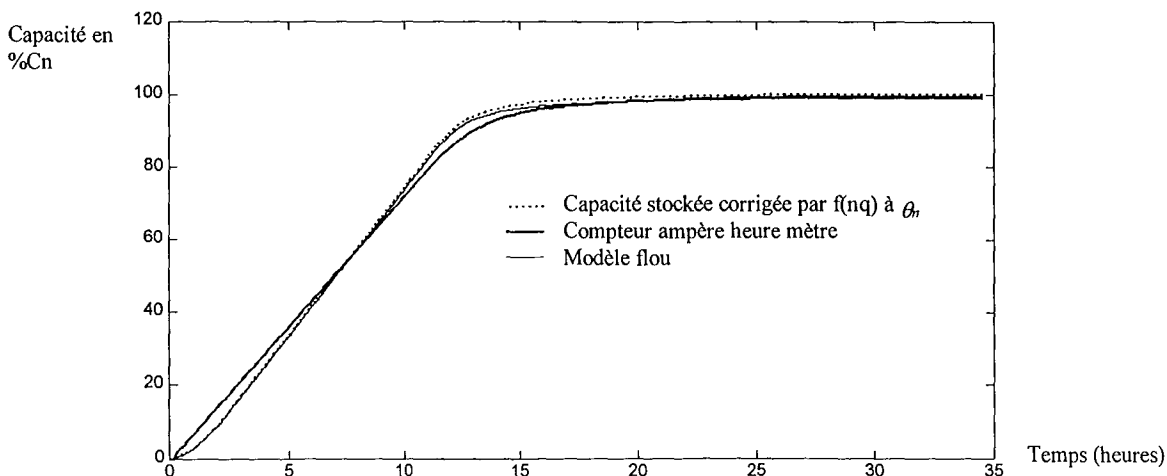
• Résultats

Figure 6-24 « Evolution du modèle de charge »



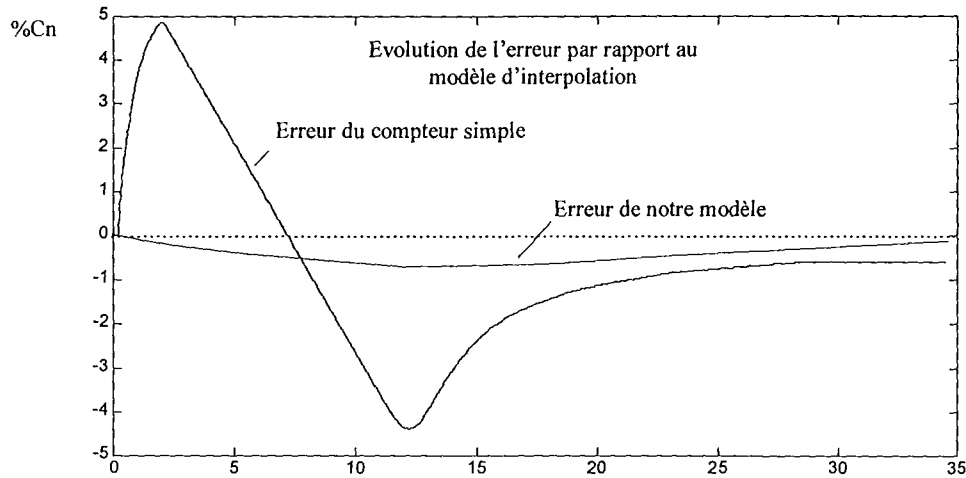
Le comportement obtenu de l'accumulateur en charge semble satisfaire nos besoins d'estimation de la capacité à la recharge. Pour comparaison, les courbes suivantes montrent la comparaison des résultats d'un compteur ampère heure classique normalisé par la valeur mesurée lors de la charge (81Ah), de notre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

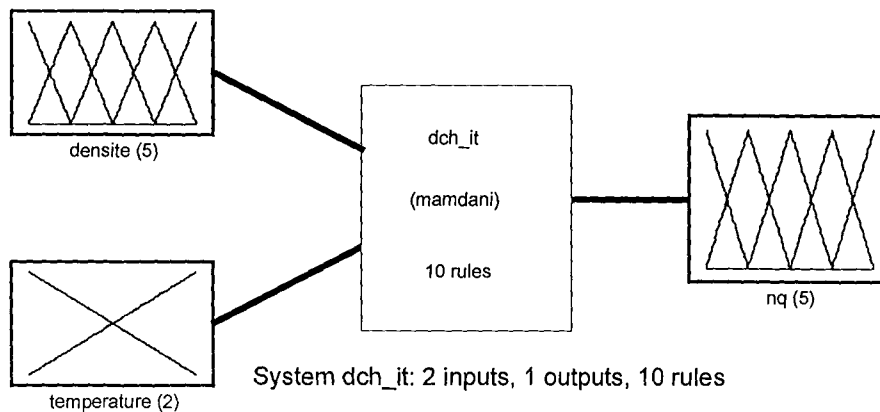


L'erreur de notre modèle est présentée autour du point de fonctionnement utilisé pour son adaptation. Dans d'autres conditions, cette erreur sera plus importante. Mais en comparaison au compteur simple, notre modèle effectue un meilleur suivi de la caractéristique théorique, principalement en début et 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_{dch} . Elle varie de 0 à $2x C_n$. 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 »

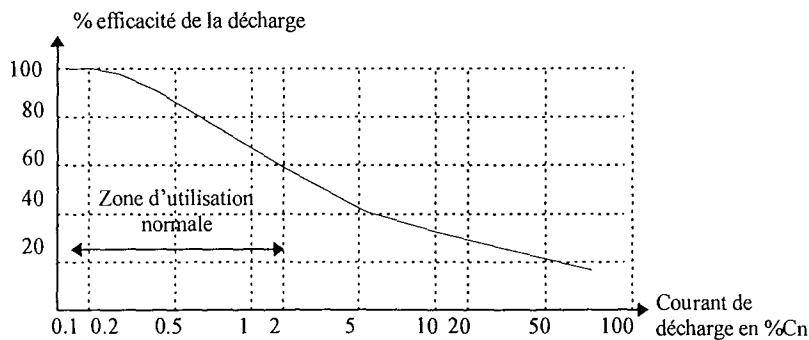


Figure 6-29 « Efficacité de la décharge en fonction de la température »

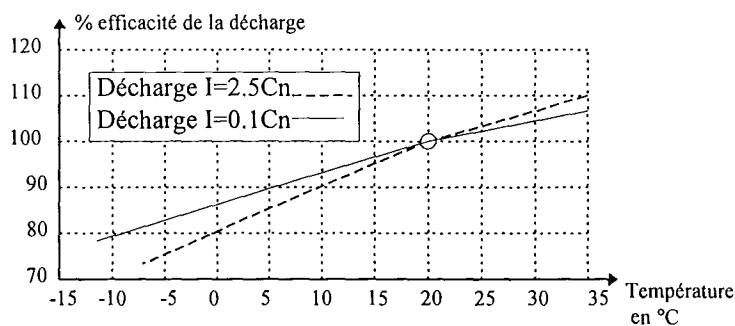
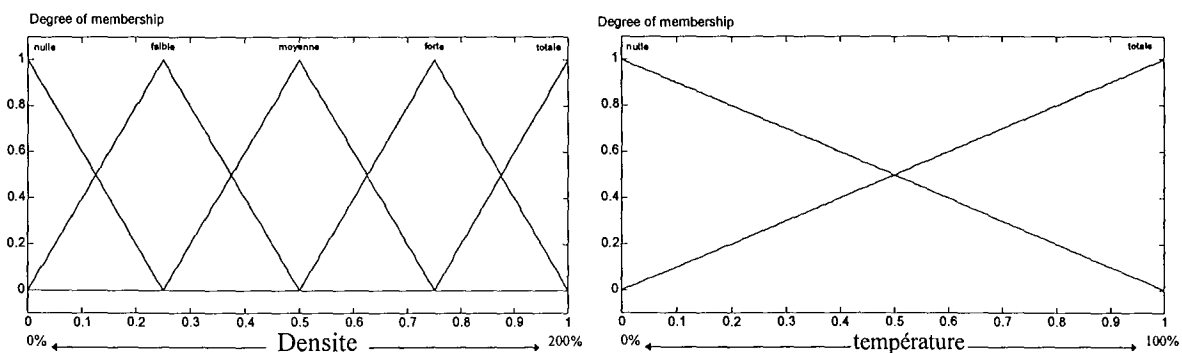
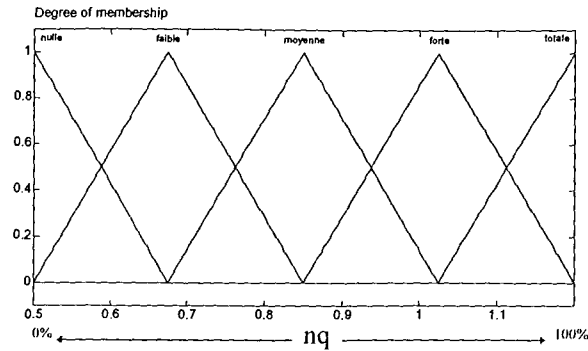


Figure 6-30 « Les fonctions d'appartenance du modèle de décharge »

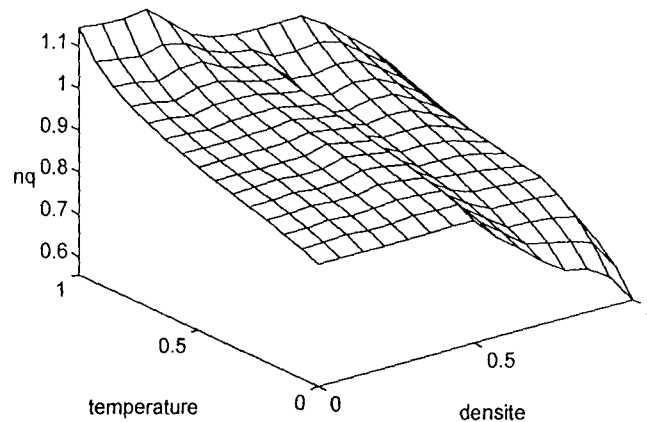




• Définition des règles

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)..

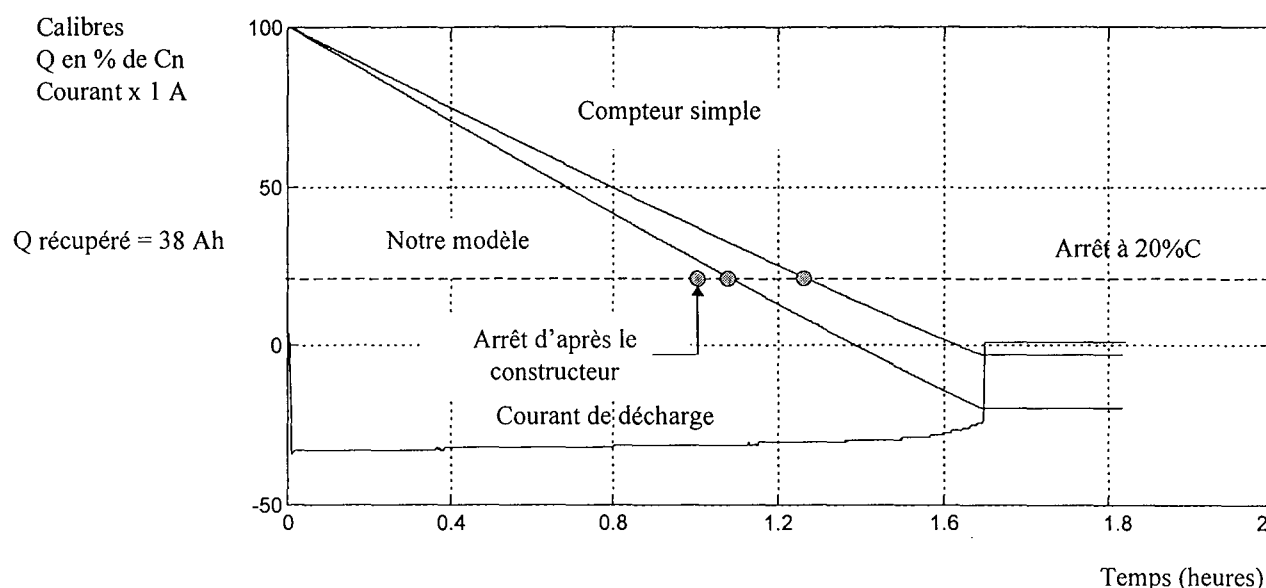
$$k_{dch} = \frac{8}{3600} \times \frac{1}{58} = 3.8314 \times 10^{-5} \quad (0.21.)$$

• 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.

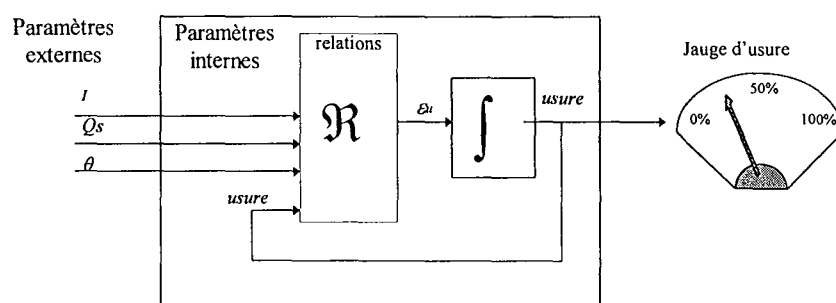
Figure 6-31 « Comparaison des modèles de décharge »



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

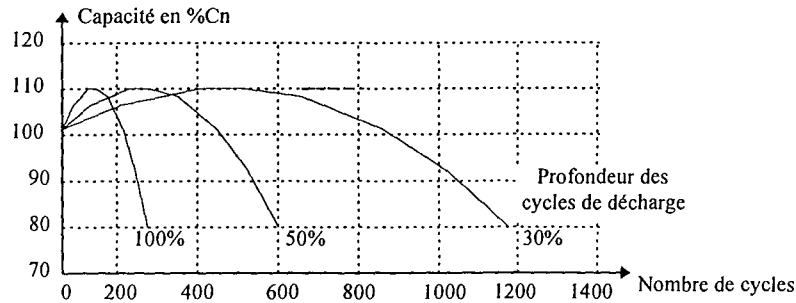
Figure 6-32 « Forme générale du modèle d'usure »



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 .

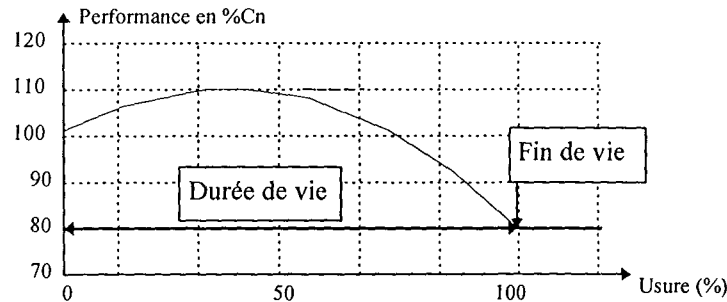
Figure 6-33 « Durée de vie en cyclage »



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.

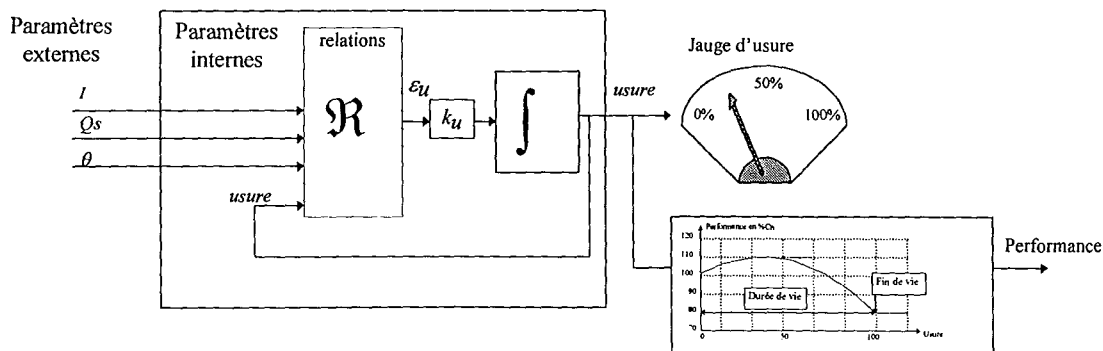
Nous allons donc normaliser cette courbe en fonction de l'usure. Elle pourra nous servir à corriger les évaluations de la capacité et de l'autonomie.

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 optimum 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 profondeur de cycle. Dans notre exemple nous obtenons :

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

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 :

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

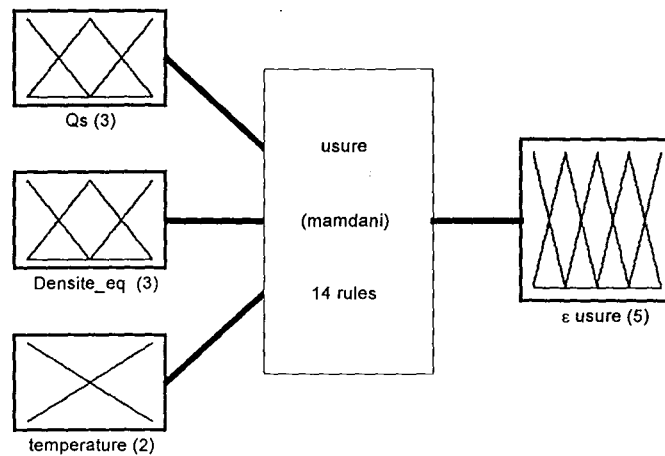
Profondeur de décharge	Nombre de cycle	Contribution à 30%	Ratio 50%	Contribution équivalente des 20% suivants	Ratio 100%
30% de Cn	1200	$0.3 \cdot 1200 \cdot 2 \cdot C_n = 720 C_n$			
50% de Cn	600	$600 \cdot 0.3 \cdot 2 \cdot C_n = 360 C_n$	$\frac{720 - 360}{600 \cdot 0.2 \cdot 2} = 1.5$	$1.5 \cdot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

• 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

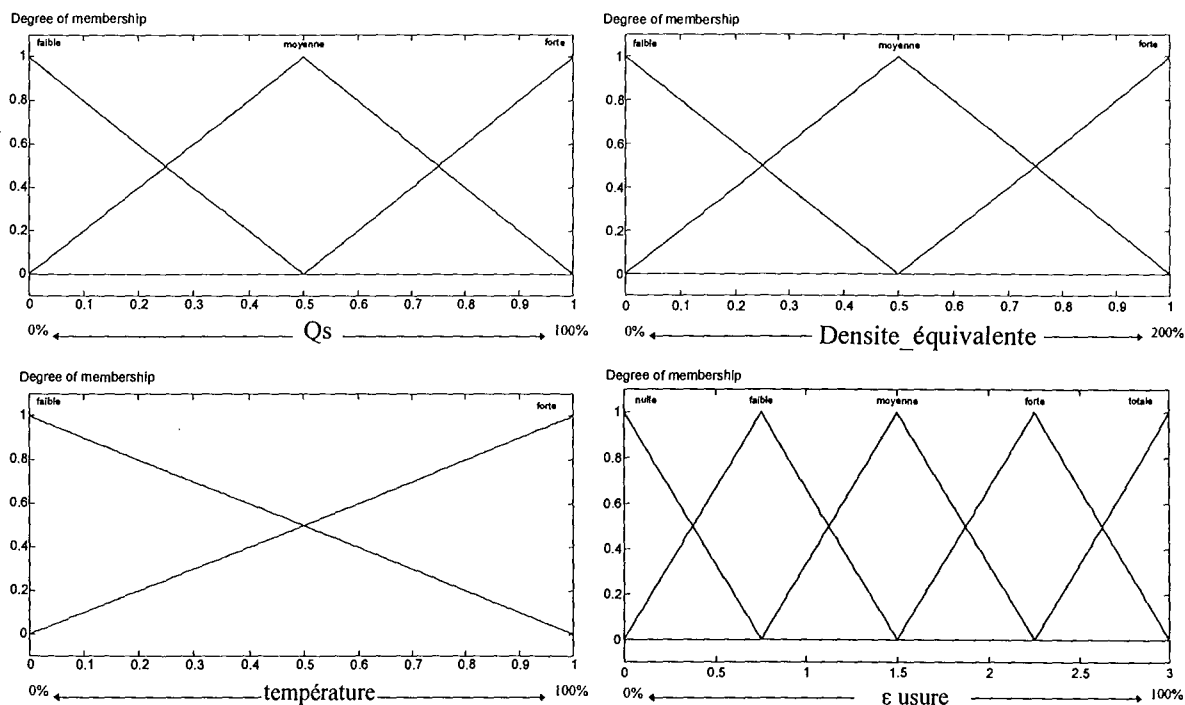
Figure 6-36 « Le modèle de la variation d'usure »



System usure: 3 inputs, 1 outputs, 14 rules

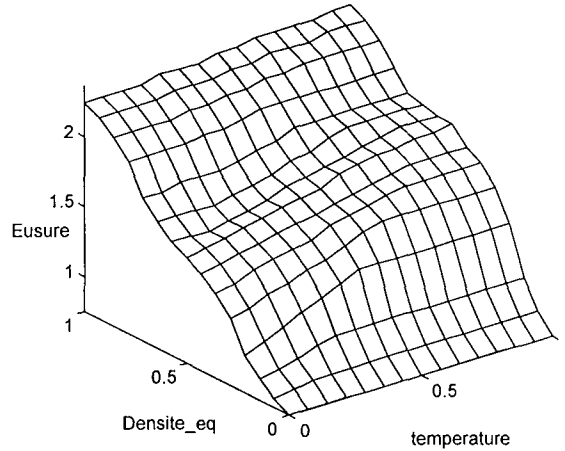
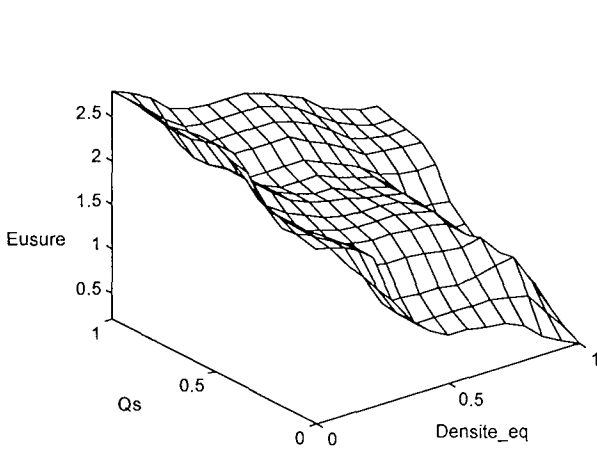
L'échelle d'usure choisie varie entre 0 et 3. Cet intervalle a été choisi pour permettre une description permettant de représenter le ratio calculé précédemment.

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»

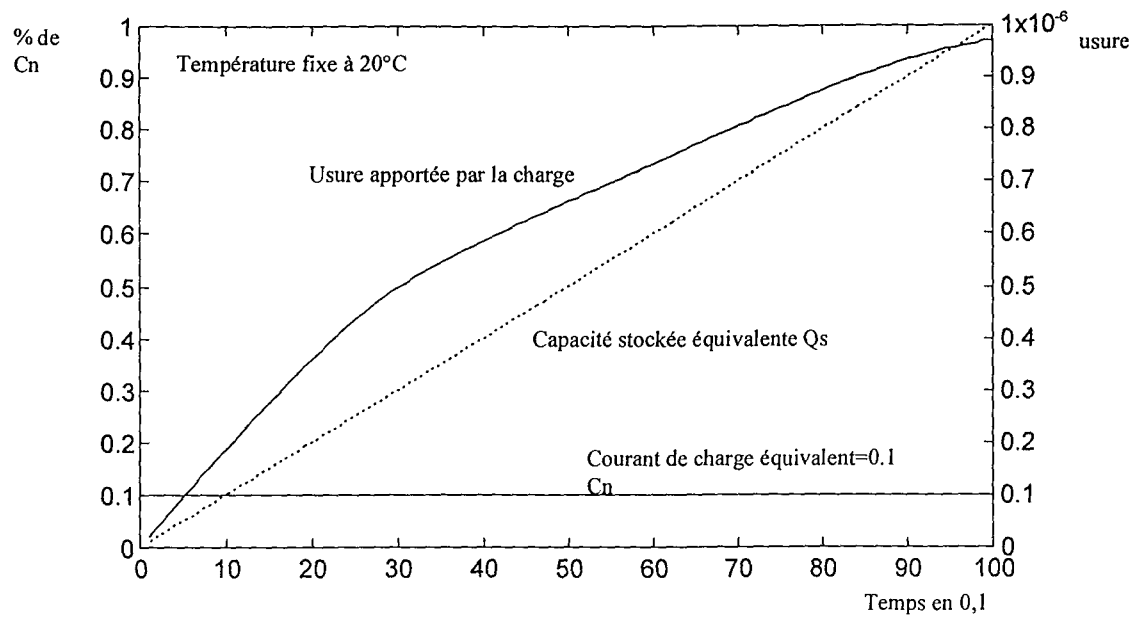


Figure 6-39 « Usure d'un cycle de décharge profonde »

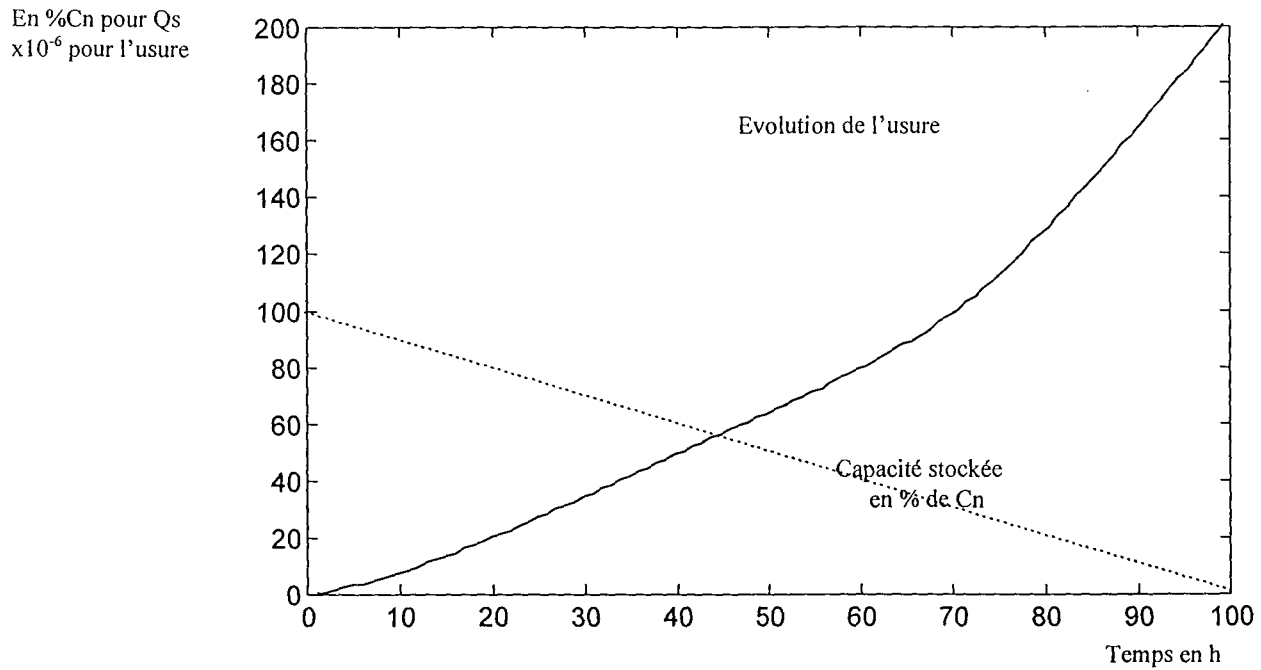


Tableau 6-2 « Nombre de cycle obtenu avant l'usure totale en fonction de la profondeur de décharge »

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 :

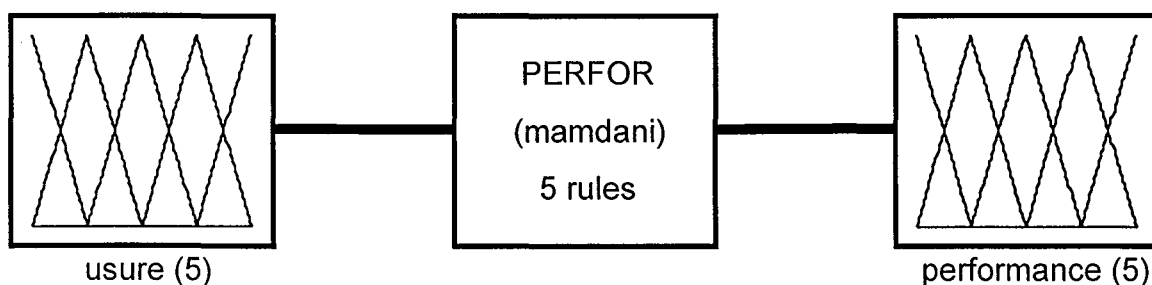
- *En introduisant l'usure dans les règles floues*, ce mode de représentation est adapté à la description d'une dégradation des rendements de charge et décharge. Il apporte une modification du comportement de la jauge de capacité en modifiant la dynamique de ses variations.. Ce comportement peut être 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 »

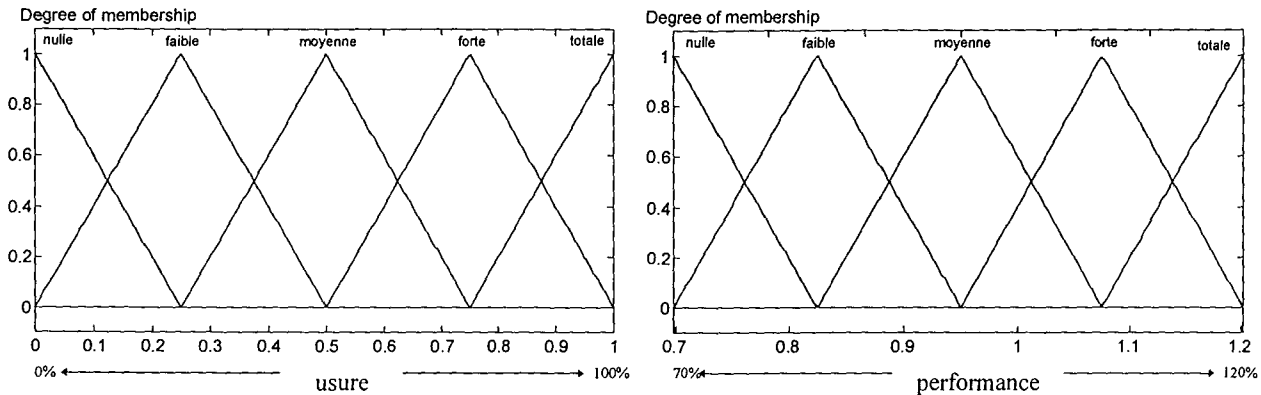


System PERFOR: 1 inputs, 1 outputs, 5 rules

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

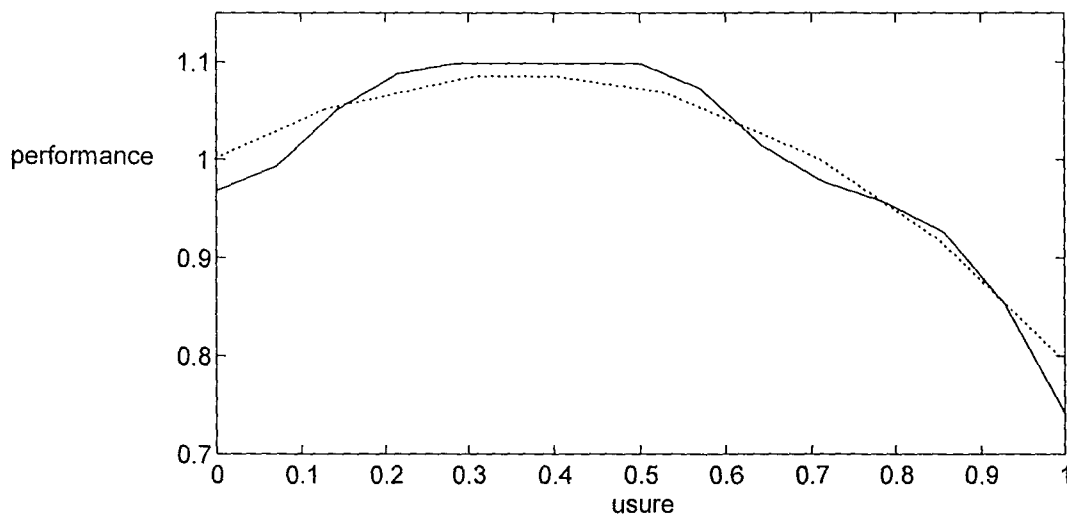
1. If (usure is nulle) then (performance is moyenne) (1)

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 du 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% .

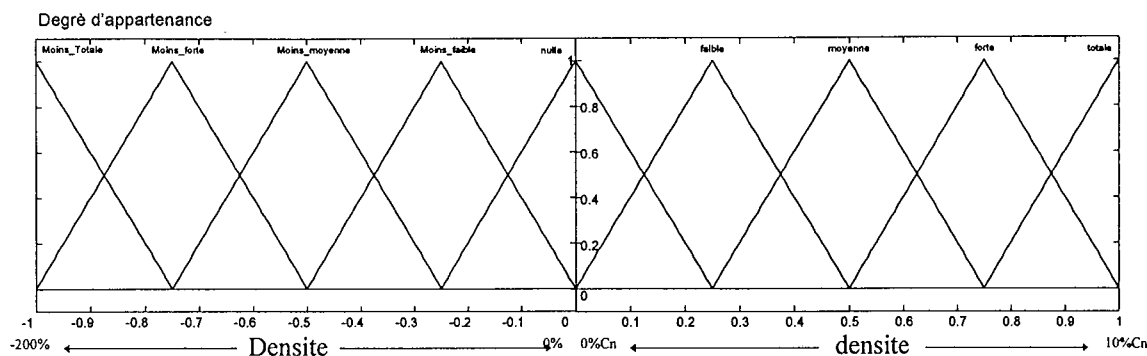
Figure 6-42 « Comparaison de la performance codée en flou par rapport à la performance théorique »



• Structure du modèle global

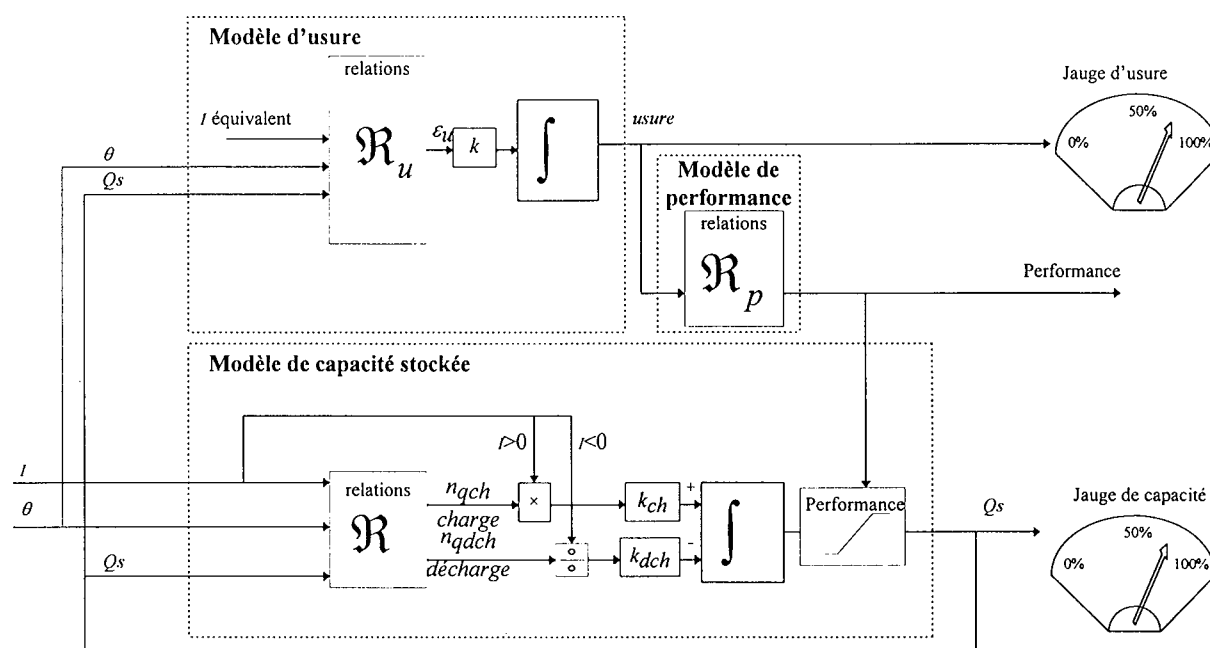
Si nous assemblons les modèles actuels, nous obtenons une structure qui nécessite un double traitement du courant de charge qui doit être traité pour la charge et la décharge. Pour simplifier ce modèle et éviter les conflits aux niveaux de l'écriture des règles, nous proposons d'appliquer une notation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



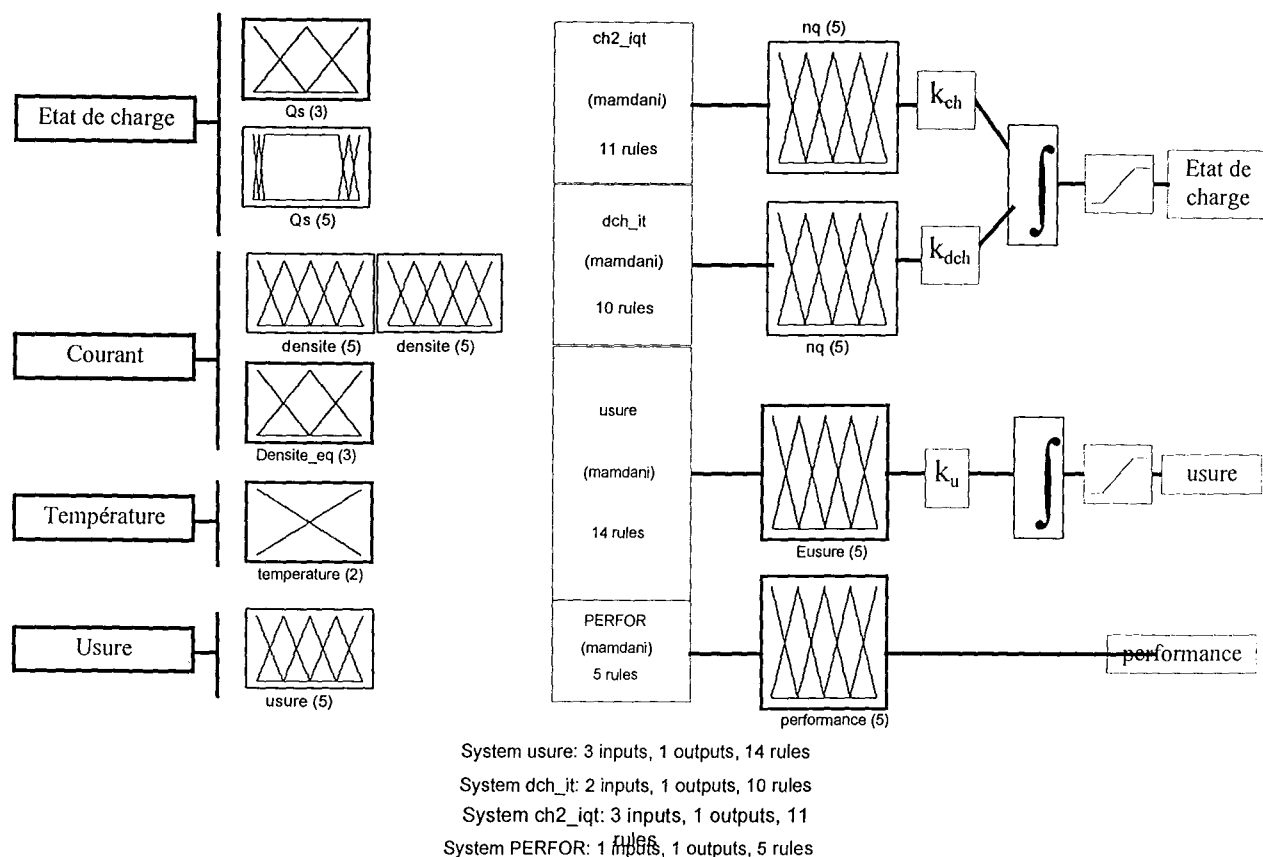
• Codage du modèle

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 calcul 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 »



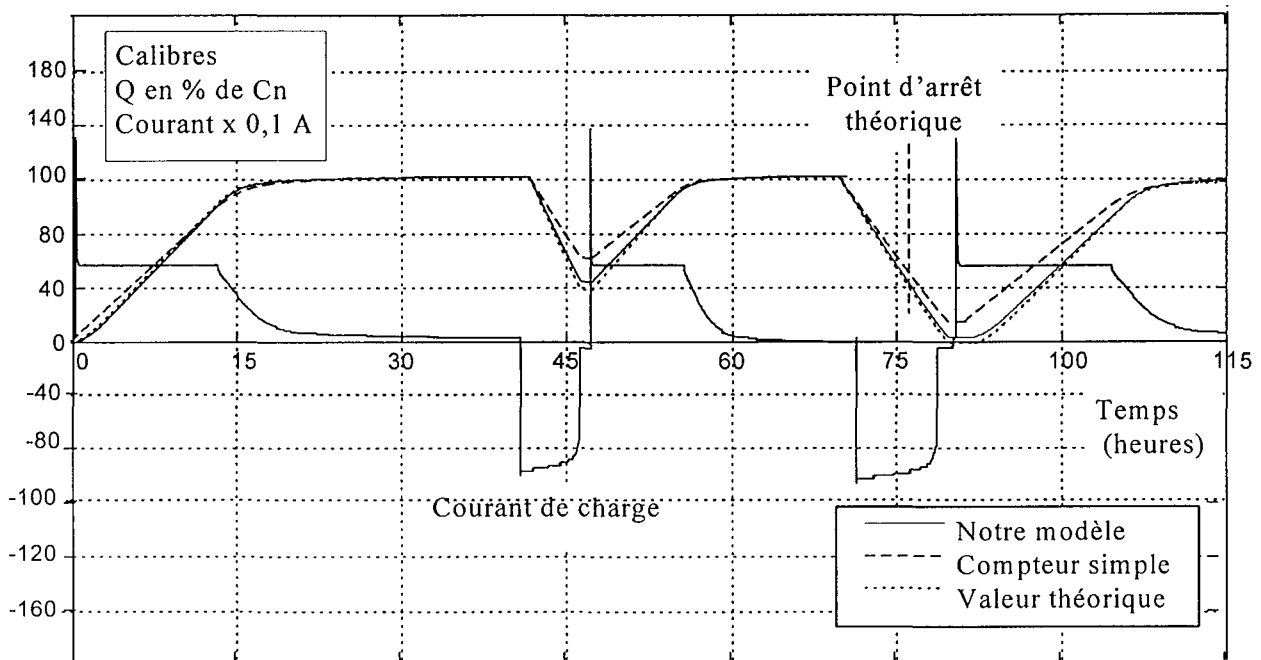
• Résultats

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., MENGÀ 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] MAMDANI 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] MENGÀ 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

[ZIM91] ZIMMERMAN H.J.
Fuzzy sets theory and its applications
Kluwer Academic Publisher, Boston, MA (2nd), 1991

**[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 impédance 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

Chapitre

7

Application à un chargeur de batterie intelligent

7. Application à un chargeur de batterie intelligent

Dans ce chapitre nous présentons le chargeur de batterie qui a été conçu pour le client. Il n'est pas un exemple parfait de ce que donnerait une démarche d'*actionneur intelligent*, mais il correspond à une réalité industrielle.

7.1 Les régulations

- *Rappel sur le comportement des régulations*

Elles ont une action durant la charge de l'accumulateur. En début de charge, l'accumulateur tend à consommer une forte quantité de courant, sa charge est alors assurée par la boucle de limitation du courant de charge à 60A. Le fonctionnement en fin de charge est le mode de régulation en tension. Elle applique la tension aux bornes de l'accumulateur suivant une consigne calculée en fonction de la température et du mode de charge. Lorsque le courant en sortie du chargeur est supérieure à 260 A ou que le courant de charge dépasse à nouveau 60 A, elle commute alors en régulation de courant. Le courant maximum du chargeur est obtenu à partir de la limite de puissance fournie par l'utilisateur (P_{max}/U_{cons}).

Lors de la mise en oeuvre, nous avons fait le choix de séparer la régulation de tension des régulations de courants.

- *Le circuit de puissance*

Le transformateur

Le constructeur de transformateur effectue les hypothèses suivantes :

- Le pont est en pleine conduction ($\alpha=0$)
- La chute de tension des semi-conducteurs est approximée à $V_{sm}=2.4V$
- L'inductance de filtrage possède une résistance négligeable, mais elle offre environ 5V de chute de tension due à son impédance
- Une marge de sécurité de 10% est prise sur la valeur de la tension continue.

La tension moyenne maximum à fournir est de $U_{do}=28,8V$, l'inductance.

$$U_{eff} = \frac{\pi(U_{do} + 5) \times 1.1}{3\sqrt{2}} + 2,4 = \frac{\pi \cdot 28,8}{3\sqrt{2}} \approx 30V$$

Transformateur triphasé 10KVA, couplage étoile-triangle, $U_p=380V$, $U_s=30V$, $I_p=14.4A$, $I_s=200A$.

L'inductance de filtrage

La valeur de la résiduelle de tension maximum aux bornes de la batterie doit être de 0.1 V efficace sous 260

A. Le constructeur de transformateur préconise une inductance de 0,65mH.

Inductance monophasé, $I_n=260A$, $L=0,65 \text{ mH}$

Le pont redresseur

Le pont préconisé par le fabricant est conçu pour un refroidissement par convection naturelle.

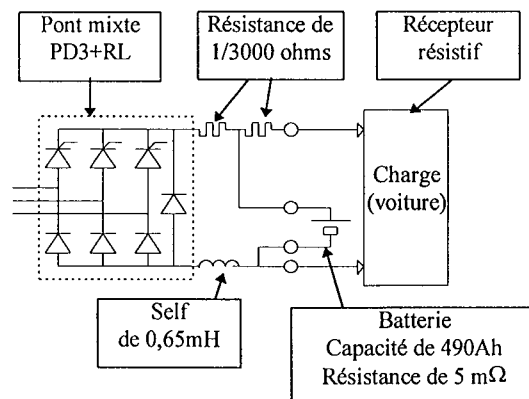
Pont triphasé mixte avec diode de roue libre (PD3+RL), diode de 250A/V IR, Thyristor 230A/V

Les shunts de mesure

Shunt 100mV pour 300A, $R_{shunt}=0.003 \text{ m}\Omega$

L'organe de commande est constitué d'un pont mixte diode/thyristor. Le filtrage en courant est réalisé par une inductance de lissage. Les courants sont mesurés à l'aide de shunts.

Figure 7-1 « Structure du montage à piloter »



La définition de la fonction de transfert se fait avec les hypothèses suivantes :

- Nous étudierons la régulation en phase de charge de l'accumulateur (tension batterie < tension de consigne).
- La FEM de la batterie est considérée comme constante.
- La constante de temps du filtre logiciel utilisé sur la tension mesurée est de la forme :

$$m_n = \frac{7}{8} m_{n-1} + \frac{1}{8} U \text{ calculé tout les } 0,1 \text{ seconde} \quad (0.1.)$$

U est une valeur normalisée : le 0% correspond à 24V et une variation de 100% correspond à une variation de 24V (centrage de la régulation autour de cette tension). Ce filtre est assimilable à une fonction de transfert du premier ordre de constante de temps 8 période de calcul (0,8s) ce qui est le temps nécessaire pour atteindre 65% de la réponse à un échelon unitaire. Le gain de la chaîne de mesure est k_2 .

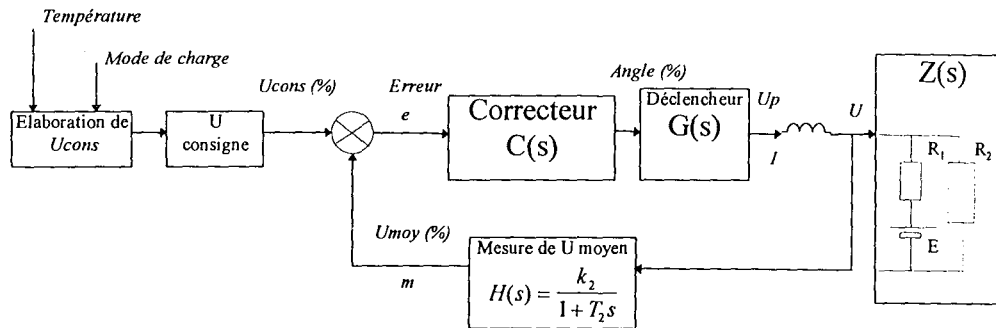
$$H(s) = \frac{k_2}{1 + T_2 s} \quad (0.2.)$$

- En régulation, la résistance équivalente des consommateurs est obtenue par les résistances de la batterie et des récepteurs de la voiture. - Les résistances des shunts de mesures sont négligées.

$$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (0.3.)$$

La valeur de R_2 varie de $0,1\Omega$ à l'infini (pas de récepteur). La résistance R_1 de l'accumulateur varie de $5m\Omega$ (chargé) à $50 m\Omega$ (déchargé).

Figure 7-2 « La régulation de tension »



$$Up(s) = U(s) + L \cdot I(s)s = U(s) + \frac{L \cdot U(s)}{R_{eq}} \cdot s \quad (0.4.)$$

$$X(s) = \frac{U(s)}{Up(s)} = \frac{1}{1 + \frac{L}{R_{eq}} \cdot s} = \frac{1}{1 + T_1 s} \quad (0.5.)$$

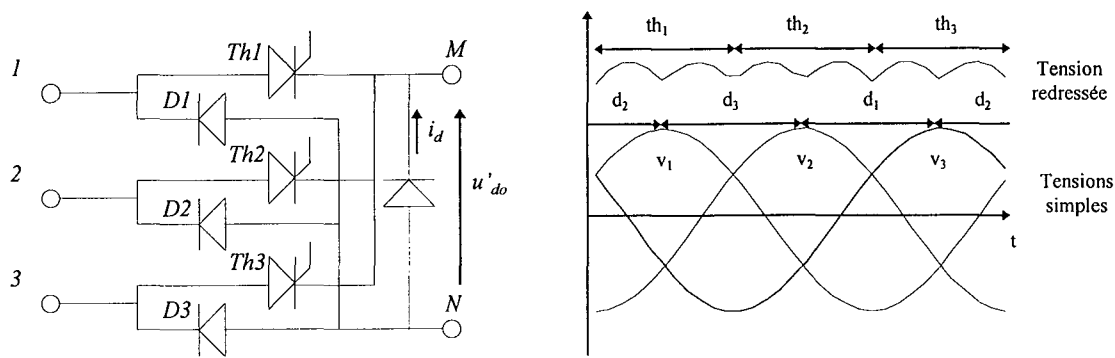
Nous avons choisi de réguler le signal de mesure m . La fonction de transfert en boucle ouverte

$$F_{bo}(s) = C(s) \cdot G(s) \cdot Z(s) \cdot H(s) \cdot X(s) = C(s) \cdot G(s) \cdot \frac{1}{1 + T_1 s} \cdot \frac{k_2}{1 + T_2 s} \quad (0.6.)$$

7.1.1 La commande du redresseur pont mixte PD3

Pour effectuer une commande correcte du pont redresseur, nous nous sommes penchés sur son problème de non linéarité entre la tension moyenne commandée et l'angle de retard à l'allumage α .

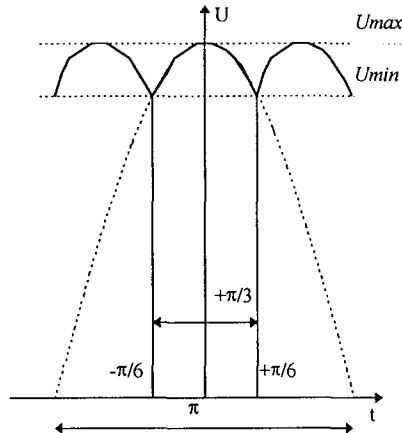
Figure 7-3 « Le pont redresseur PD3 »



La tension redressée u'_d est la différence entre la tension $vm-v_o$ et $vn-v_o$ la première est donnée par le commutateur (thyristor). Elle est formée de 3 portions de sinusoïde par période T. La seconde est issue des diodes. elle est formée de 3 sommets négatifs de sinusoïdes par période. Les thyristors commutent lorsque la tension simple de leur branche est la plus positive, les diodes lorsque la tension simple associée à leur branche est la plus négative.

• **Calcul de la tension moyenne redressée sans retard à l'allumage : U_{do}**

La valeur moyenne U_{do} : c'est la moyenne arithmétique de la tension continue du convertisseur en supposant qu'il n'y a pas de réduction de l'angle d'allumage (angle de retard à l'enclenchement $\alpha=0$).

 Figure 7-4 « Calcul de U_{do} »


Avec

U_{max} = tension composée crête

$$U_{min} = U_{max} \cdot \cos \frac{\pi}{6} = \frac{U_{max} \sqrt{3}}{2}$$

La tension moyenne est calculée par :

$$U_{moyen} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot dt$$

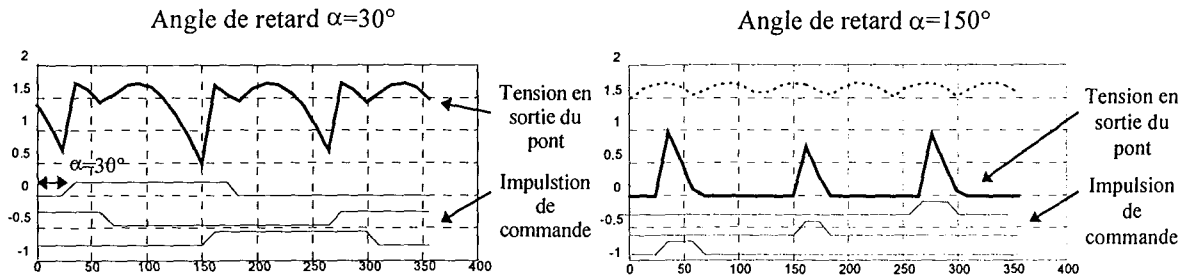
$$U_{do} = U_{max} \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{+\frac{\pi}{6}} \cos(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{3U_{max}}{\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi}{6}\right) - \sin\left(-\frac{\pi}{6}\right) \right] = \frac{3U_{max}}{\pi} \quad (0.7.)$$

• **Calcul de la tension redressée avec un angle de retard à l'allumage α : U'_{do}**

En faisant varier l'angle α de 0 à π , la tension moyenne redressée U'_{do} varie de son maximum U_{do} à zéro. La tension ne peut pas s'inverser car c'est un pont mixte. La forme d'onde de la tension redressée peut prendre deux allures différentes en fonction de la valeur de α . Tant que les intervalles de conduction

des deux semi-conducteurs reliés à la même borne secondaire ne se recouvrent pas (α est inférieur à $\pi - (2\pi/3)$), $u'd$ est formé de deux portions de sinusoïdes pour chacune de ses périodes $T/3$.

Figure 7-5 « allure de la tension redressée »



L'ensemble ne peut fonctionner que dans un quadrant. Dans le cas d'une charge inductive, il se produit un effet de roue libre pour $\alpha > 60^\circ$. Le courant de roue libre ne peut se reboucler par le pont mixte du fait de la diode parallèle inverse de *roue libre* qui dérive ce courant.

• **Fonctionnement avec un angle de retard à l'allumage $\alpha > \pi/3$**

Dans ce cas, la tension redressée correspond à la portion de sinusoïde de la tension composée. La valeur moyenne peut se calculer simplement en intégrant cette arche de sinusoïde.

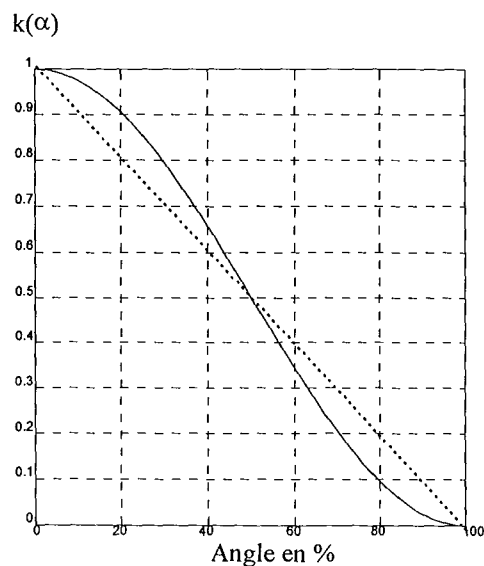
Avec un angle α de retard à l'amorçage, la valeur moyenne est donnée par

$$U'_{do} = U_{\max} \frac{3}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2} + \alpha}^{+\frac{\pi}{2}} \cos(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{3U_{\max}}{2\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \right] = \frac{3U_{\max}}{2\pi} [1 + \cos(\alpha)] \quad (0.8.)$$

$$U'_{do} = U_{do} \frac{1 + \cos \alpha}{2} = U_{do} \times k(\alpha) \quad (0.9.)$$

En normalisant l'angle en divisant par π on obtient

Figure 7-6 « Allure de $k(\alpha)$ »



• **Fonctionnement avec un angle de retard à l'allumage $\alpha < \pi/3$**

Lorsque α est inférieur à $\pi/3$, la conduction est assez longue pour voir intervenir le changement de diode lors de la conduction du thyristor. Il faut donc décomposer le signal en sommant la tension résultante du thyristor et de la première diode, puis celle résultante du thyristor avec la deuxième. Cette conduction prend fin lorsque le thyristor suivant est amorcé car dans ce cas il est capable de fournir une tension supérieure à celle en cours.

Avec un angle α de retard à l'amorçage, la valeur moyenne est donnée par

$$U'_{do} = U_{\max} \frac{3}{2\pi} \left[\int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} \cos(\omega t) \cdot d\omega t + \int_{\alpha-\frac{\pi}{2}}^{-\frac{\pi}{6}} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \cdot d\omega t \right] \quad (0.10.)$$

$$U'_{do} = \frac{3U_{\max}}{2\pi} \left[\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) - \sin\left(-\frac{\pi}{6}\right) + \sin\left(\alpha - \frac{7\pi}{6}\right) - \sin\left(-\frac{5\pi}{6}\right) \right] \quad (0.11.)$$

$$U'_{do} = \frac{3U_{\max}}{2\pi} \left[1 + \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right) \right] = \frac{3U_{\max}}{2\pi} \left[1 - 2 \cdot \cos(\alpha) \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \right] \quad (0.12.)$$

$$U'_{do} = \frac{3U_{\max}}{2\pi} [1 - \cos(\alpha)] = \frac{3U_{\max}}{2\pi} [1 + \cos(\alpha)] \quad (0.13.)$$

Nous obtenons le même résultat que précédemment

$$U'_{do} = U_{do} \frac{1 + \cos \alpha}{2} = U_{do} \times k(\alpha) \quad (0.14.)$$

• **La commande du pont redresseur**

Le réglage de la tension et du courant est obtenu en variant la position de l'impulsion de déclenchement des thyristors. Cette position est représentée par l'angle α de retard à l'allumage. Pour la génération de cet angle à partir d'un signal de commande u_c il est possible d'utiliser une relation linéaire ou une relation permettant d'obtenir un gain entre la tension redressée U'_{do} et la tension de commande u_c constant.

Le gain de l'ensemble déclencheur, pont redresseur est obtenu par :

$$G_{\text{redresseur}} = G_{\text{déclencheur}} \times G_{\text{pont}} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta u_c} \times \frac{\Delta E_{\alpha}}{\Delta \alpha} \quad (0.15.)$$

Avec

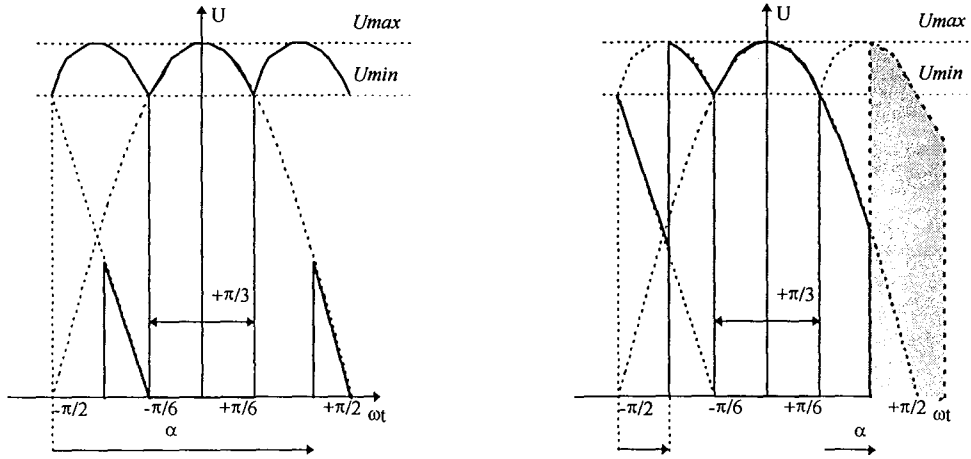
$G_{\text{redresseur}}$: gain de l'ensemble déclencheur et pont redresseur

$G_{\text{déclencheur}}$: gain du déclencheur

G_{pont} : gain du pont redresseur

Figure 7-7 « Redressement avec $\alpha > \pi/3$

et

 Redressement avec $\alpha > \pi/3$ »


La commande par rampe

L'angle de retard à l'enclenchement α est directement proportionnel à la consigne du déclencheur u_c . L'angle varie de 0 à π pour une tension de commande variant de 0 à U_{cm} .

$$\text{Le gain en angle du déclencheur est : } G_{\text{déclencheur}} = \frac{\pi}{u_{cm}} = Cste \quad (0.16.)$$

$$\text{Le résultat obtenu est la relation: } U'_{do} = U_{do} \frac{1 + \cos\left(\pi \cdot \frac{u_c}{u_{cm}}\right)}{2} = U_{do} \cdot G_{\text{pont}}(u_c) \quad (0.17.)$$

Cette relation fait intervenir un cosinus, elle est de la forme de $k(\alpha)$. Pour l'étude de la régulation il est préférable de linéariser cette relation plutôt que de tenir compte en permanence de ces variations. Le principe est de rendre constant le gain du pont en modifiant le gain du déclencheur.

$$G_{\text{pont}} = G_{\text{déclencheur}} \times G_{\text{redresseur}} = \frac{\Delta_{\alpha}}{\Delta_{uc}} \times \frac{\Delta E_{\alpha}}{\Delta_{\alpha}} = Cste \quad (0.18.)$$

$$\text{Le gain du pont est : } U'_{do} = U_{do} \frac{1 + \cos \alpha}{2} = U_{do} \times k(\alpha) \quad (0.19.)$$

$$\text{Nous posons alors la relation : } \alpha = \arccos\left[\frac{u_c}{u_{cm}} - 1\right] u_{cm} = u_c \text{ maximum et } \alpha_0 = 180^\circ \quad (0.20.)$$

avec u_{cm} tension de commande du déclencheur pour U'_{do} maximum soit U_{do}

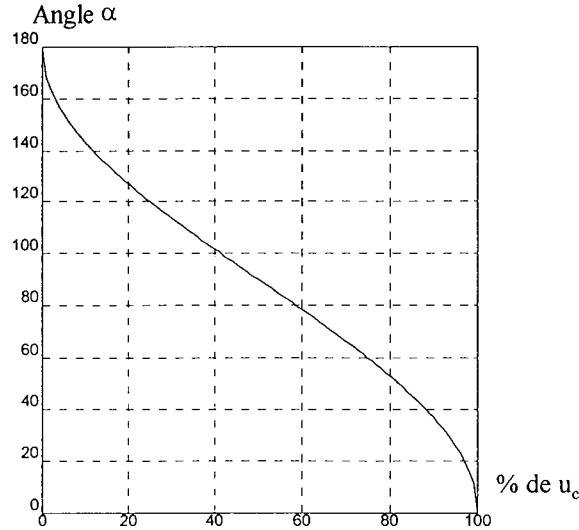
$$\text{Le gain obtenu est : } G_{\text{pont}} = \frac{U_{do}}{2u_{cm}} = Cste \quad (0.21.)$$

La tension de commande u_c varie de 0 à 100% de u_{cm} . Lorsque $u_c=0$, $\alpha=180^\circ$ mais lorsque $u_c=100\%$, $\alpha=90^\circ$ ce qui donne une tension en sortie du pont de $U'_{do}=U_{do}/2$. Ce qui peut être corrigé en apportant une correction au calcul de α :

$$\alpha = \arccos \left[2 \frac{u_c}{u_{cm}} - 1 \right] \quad (0.22.)$$

Dans ce cas lorsque $u_c=0\%$, $\alpha=180^\circ$ et si $u_c=100\%$, $\alpha=0^\circ$

Figure 7-8 « Allure de $\alpha=f(u_c)$ »



Le gain obtenu pour le redresseur est :

$$G_{pont} = \frac{U_{d0}}{u_{cm}} = Cste \quad (0.23.)$$

7.1.2 L'élaboration de la consigne

La consigne est normalisée entre 0 et 100% autour du point de fonctionnement minimum qui est 24 V qui correspond à 0%. Elle est directement obtenue par la formule :

$$U_{cons} = \frac{V_{mini} + (\theta - \theta_{max}) * \Delta V + (mode_rapide * 1.2)}{24} - 1 = \frac{26.49 + 0.0369 * (\theta - \theta_{max}) + (mode_rapide * 1.2)}{24} - 1 \quad (0.24.)$$

Avec

V_{mini} : Tension de consigne minimum (26.49V à 50°C)

θ_{max} : Température maximum (50°C)

θ : Température mesurée

Mode_rapide : Indication de charge rapide (1 si actif, 0 si inactif)

ΔV : Variation de la tension de consigne entre θ_{min} et θ_{max} (0.0369V/°C).

• La validation de la consigne

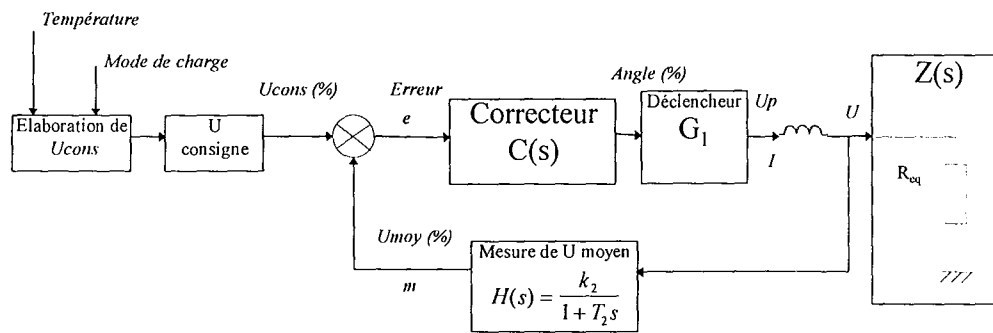
Le calcul de la consigne par cette formule n'est viable que si la mesure de température fournie par le module de mesure est fiable. Un contrôle de la mesure de θ à l'entrée de la fonction de calcul de la consigne permet d'éviter le calcul avec une valeur hors plage. De plus si une indication de défaut mesure ou

défaut capteur est signalée par le programme d'acquisition des entrées, la tension de consigne sera minimisée en effectuant le calcul avec la température maximum prévue pour le calcul (50°C). Dans ce mode de fonctionnement dégradé, la charge rapide est toujours possible.

7.1.3 La régulation de tension

La boucle de régulation est constituée du correcteur, du déclencheur, de l'inductance de lissage, et de la chaîne de mesure. Autour du point de fonctionnement, le récepteur est considéré équivalent à une résistance R_{eq} .

Figure 7-9 « La boucle de régulation en tension »



• Choix du régulateur

Le gain du redresseur est constant et égal à G_1 , le gain k_2 de la chaîne de mesure sera choisi de manière à obtenir un retour unitaire $k_2.G_1=1$. Si on choisit $C(s)$ pour obtenir un gain unitaire de la fonction de transfert en boucle ouverte

$$F_{bo}(s) = \frac{1}{(1 + T_1s).(1 + T_2s)} \quad (0.25.)$$

Les deux racines du dénominateur sont $r_1 = -\frac{1}{T_1}$ et $r_2 = -\frac{1}{T_2}$ réelle négative. La réponse est stable et apériodique. Si l'on choisit un correcteur proportionnel de gain k , la fonction de transfert en boucle fermée devient

$$F_{bf}(s) = \frac{F_{bo}(s)}{1 + F_{bo}(s)} = \frac{k}{k + (1 + T_1s)(1 + T_2s)} \quad (0.26.)$$

$$\text{La réponse est du deuxième ordre avec : } z = \frac{T_1 + T_2}{2\sqrt{(k+1).(T_1T_2)}} \text{ et } z < 1 \quad (0.27.)$$

La réponse est apériodique mais non précis car il subsiste une erreur de position : $\lim_{s \rightarrow 0} s\varepsilon(s) = \frac{k}{k+1}$

Nous retiendrons donc un correcteur PI.

• La mise en oeuvre du correcteur PI

Le régulateur est de la forme :

$$C(s) = \frac{u_c(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (0.28.)$$

Nous choisissons la synthèse par transformation bilinéaire. Cette transformation est le résultat de l'approximation trapézoïdale de la fonction intégration entre deux échantillons séparés d'une période T . Elle permet de passer directement de l'équation continue à sa forme discrète échantillonnée à la période T en remplaçant s par :

$$s = \left(\frac{2}{T}\right) \cdot \left(\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}\right) \quad (0.29.)$$

L'équation du correcteur $C(s)$ devient :

$$C(z^{-1}) = \frac{\left(K_p + \frac{T}{2} K_i\right) + \left(K_i \frac{T}{2} - K_p\right) \cdot z^{-1}}{(1 - z^{-1})} \quad (0.30.)$$

Le calcul de u_c à l'échantillon n est :

$$u_c(n) = u_c(n-1) + \left(K_p + \frac{T}{2} K_i\right) \cdot e(n) + \left(K_i \frac{T}{2} - K_p\right) \cdot e(n-1) \quad (0.31.)$$

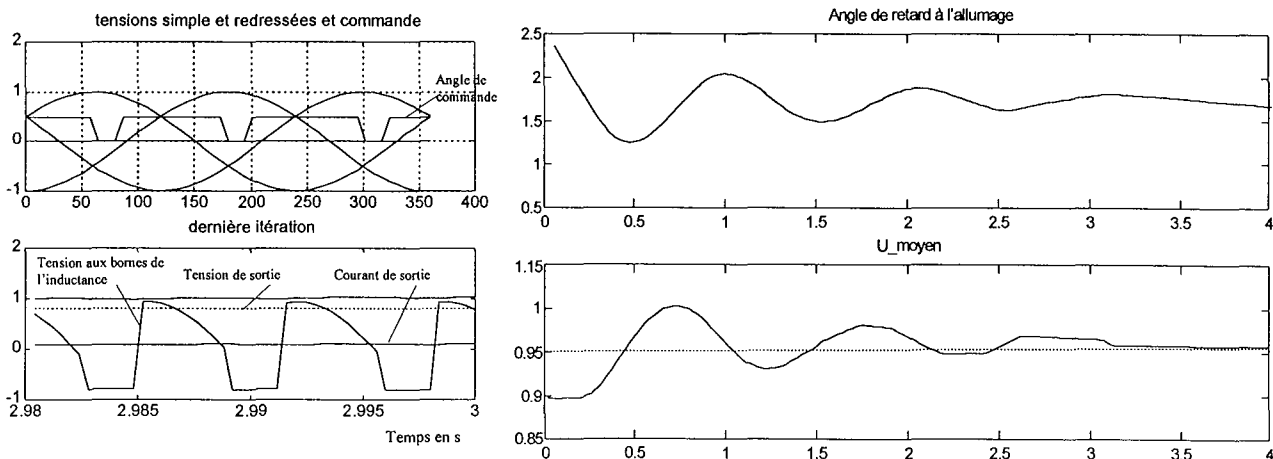
$$u_c(n) = u_c(n-1) + K_1 \cdot e(n) + K_2 \cdot e(n-1) \quad (0.32.)$$

• La mise en oeuvre des algorithmes

La mise en oeuvre de la régulation a été effectuée en tirant parti de l'arithmétique 32 bits disponibles sur le processeur. Le format de nombre choisi est un nombre à virgule fixe dont la partie entière est comprise entre $[+255 -256]$ représente la valeur en pour-cent.

La simulation suivante nous montre la réponse de la boucle de tension. La charge est constituée d'un accumulateur de tension 90% de 24V et la consigne est fixée à 95%. La boucle de simulation utilise un module reproduisant le comportement du gradateur dont on peut examiner les formes d'onde.

Figure 7-10 « Réponse simulée de la boucle de régulation de tension »



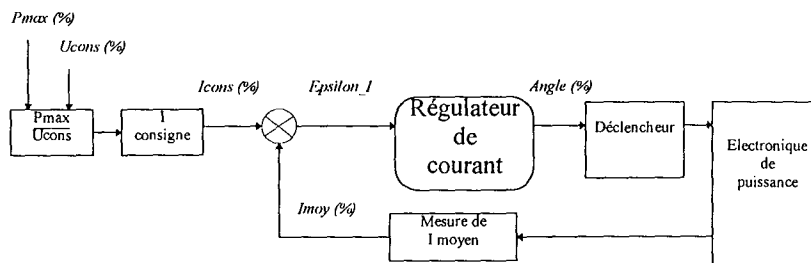
7.1.4 La régulation de courant

La régulation de courant n'intervient que lorsque le courant dans le circuit est trop important et qu'elle préconise une commande du pont inférieure à celle effectuée par la régulation de tension.

La régulation de courant possède une dynamique plus rapide que la régulation de tension de manière à répondre rapidement même à une faible surcharge.

La limitation de courant total est obtenue en divisant la puissance permise par l'utilisateur (par défaut 7,5kW) par la tension de consigne. Le résultat sert de consigne à un régulateur proportionnel intégral.

Figure 7-11 « La limitation du courant total »

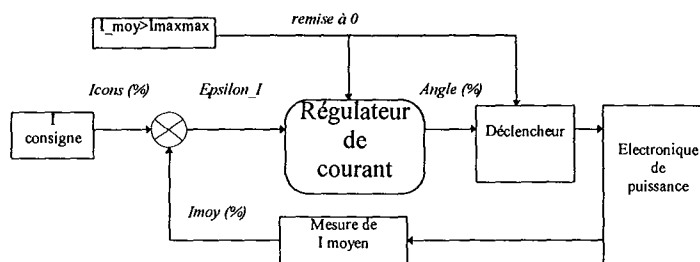


- **La protection réflexe contre les court-circuits**

Cette protection permet de couper à 10ms près la commande du pont lorsque le courant dans le circuit atteint une valeur supérieure à celle d'un transitoire fixé ici à 350 A. Elle a pour action de bloquer le déclenchement des thyristors (action immédiate) et de réinitialiser les régulateurs de manière à redémarrer en régulation de courant. Cette protection est rendue possible et efficace par la présence de l'inductance de lissage qui permet au courant de ne pas dépasser la valeur limite des composants avant le déclenchement de la protection.

Le temps de cycle de la protection est 10ms, le courant de court-circuit maximum du transformateur est donné pour 4000A, les semi-conducteurs supportent plus de 5000A pendant 10ms en courant pic.

Figure 7-12 « La protection contre les courts-circuits »



- **La limitation du courant batterie**

Elle est réalisée par une deuxième boucle de régulation. Comme la première, son action est de réduire la commande du pont si nécessaire. La consigne de la boucle est fixée à 60A. Elle agit sur la

consigne de la boucle de limitation de courant total en multipliant la consigne de limitation de puissance par un facteur réducteur k compris dans l'intervalle $[1 \ 0]$. La valeur si le courant batterie est inférieur à 60 A est 1. Cette boucle de régulation est environ 8 fois plus longue que la boucle de limitation du courant total (la batterie est capable de supporter un faible instant les pics de courant résultant du temps de réponse de la régulation).

Figure 7-13 « La limitation du courant batterie »

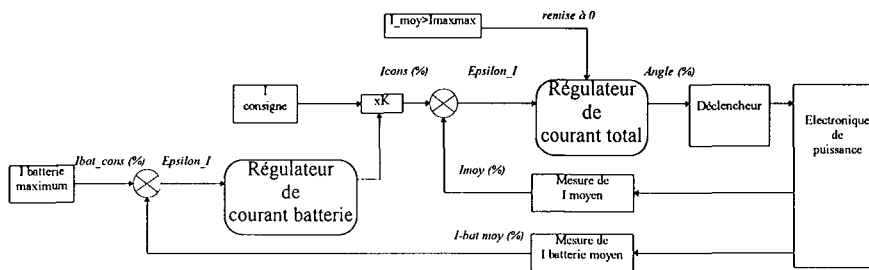
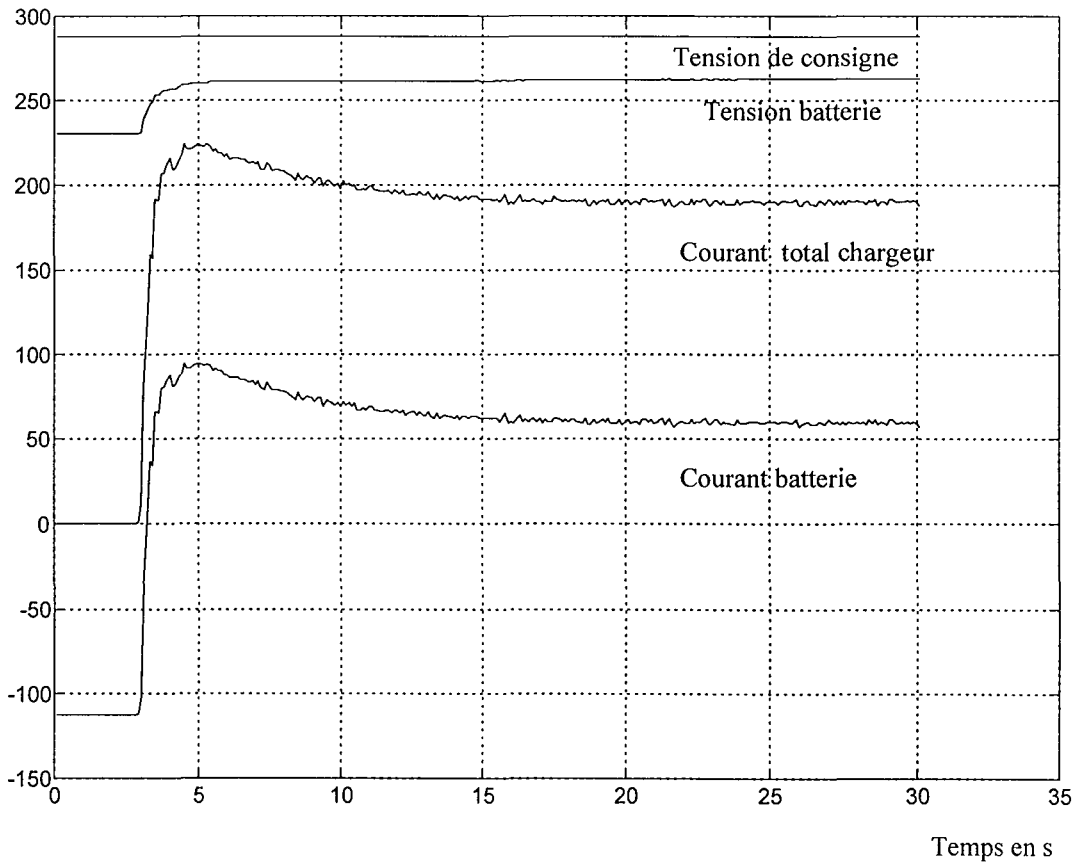


Figure 7-14 « Exemple de réponse de la limitation de courant batterie avec un récepteur de consommation 110A »

Echelle
x1A pour les courants
x0,1V pour les tensions

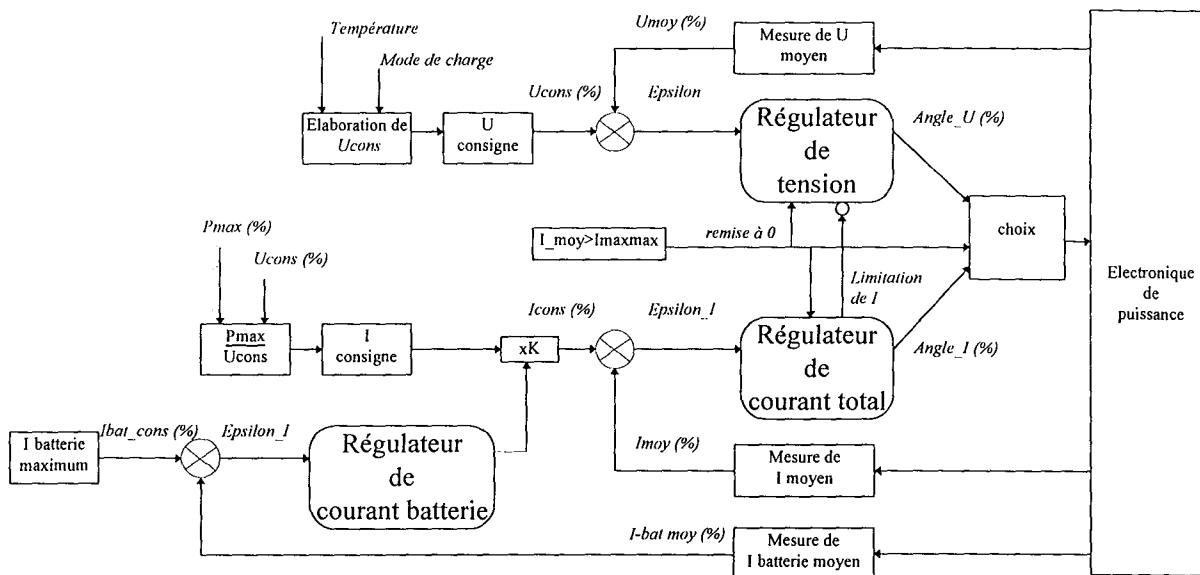


7.1.5 Mise en place des régulations

La mise en oeuvre des boucles de régulation nécessite la mise en place d'un choix qui détermine si il doit fonctionner en régulation de courant ou de tension. Les critères de choix sont :

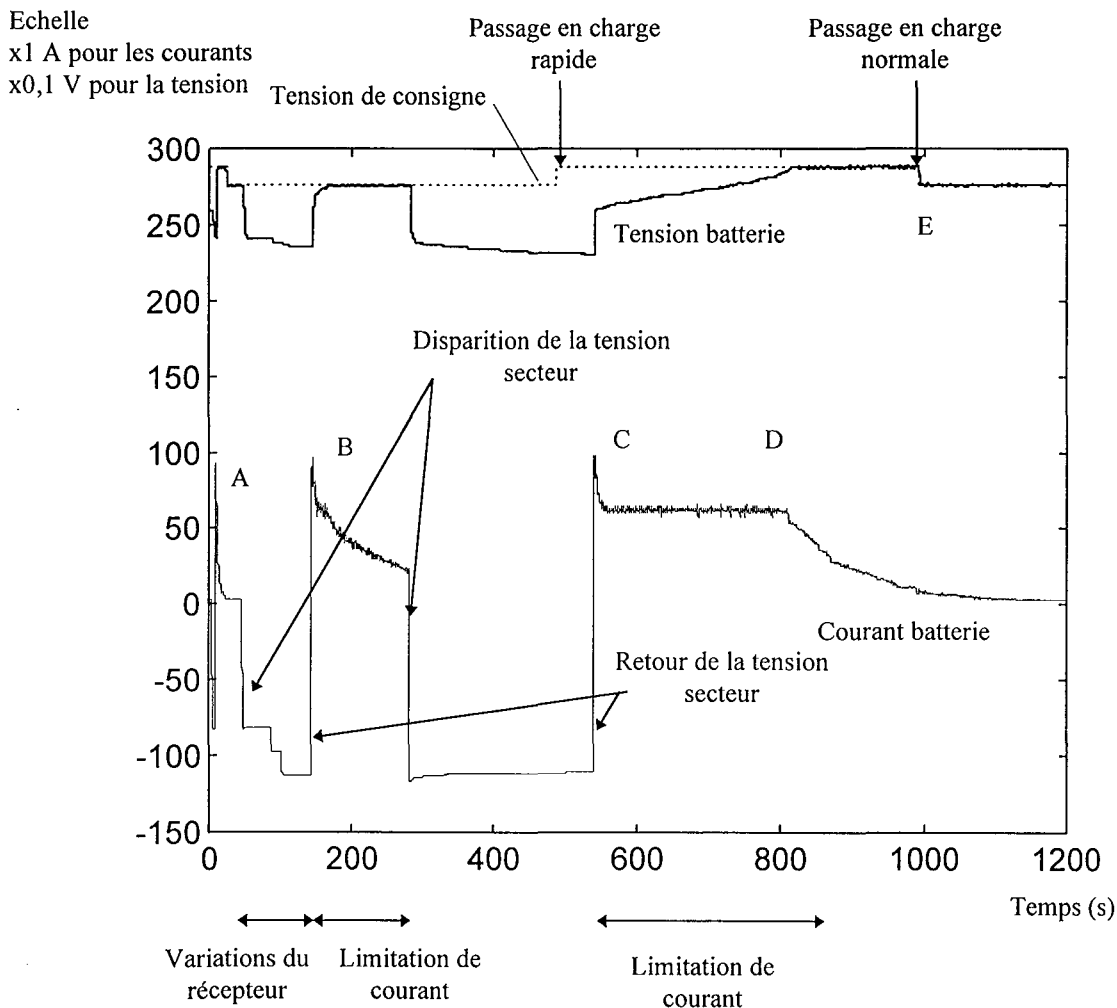
- pour le passage régulation de tension à régulation de courant : Si le courant est supérieur à l'une des consignes en courant et que la commande en courant est inférieure à la commande en tension
- pour le passage régulation de courant à régulation de tension : Si la tension aux bornes de l'accumulateur est supérieure à la consigne en tension (le régulateur de tension est alors initialisé au point de fonctionnement en annulant son action dérivée).
- pour la limitation contre les courts-circuits : Si le courant est supérieur à I maximum de 350 A.

Figure 7-15 « Synoptique de la régulation »



L'exemple suivant illustre le fonctionnement de l'ensemble par une succession de coupure de la tension secteur avec un ensemble de test de 65Ah. L'accumulateur est initialement chargé. A la première coupure (A), il fournit le courant au circuit extérieur. Lors du retour secteur, il consomme une pointe de courant (B) puis, n'ayant été que peu déchargé, celui-ci passe rapidement sous la barre des 60A. Par contre après une deuxième coupure plus prolongée, l'accumulateur est rechargé en limitation de courant (C) jusqu'à ce que le niveau de charge soit suffisant pour commuter en régulation de tension (D). Le point (E) indique la fin de charge en mode rapide.

Figure 7-16 « Exemple de réponse des régulations avec un récepteur consommant environ 100A »



7.2 La création des interfaces

Le schéma utilisé pour la création des interfaces utilise les enseignements concernant la sûreté de fonctionnement de la fin du chapitre *actionneur intelligent*. Les étapes sont les suivantes :

- *La description de la fonction* : C'est le cahier des charges.
- *Les choix de conception* : Le concepteur définit ses choix technologiques en fonction des impératifs techniques et de l'expérience.
- *L'étude des défaillances et des conduites à tenir* : On cherche à identifier ce qui risque d'altérer le fonctionnement, la méthode de détection des défaillances et la conduite à tenir en cas d'erreur.
- *La révision de la conception et du cahier des charges* : Le concepteur révisé ses choix techniques et son cahier des charges de manière à consigner les nouvelles informations.
- *La création de la fonction*.

7.2.1 L'amélioration de la mesure de température de la batterie

Nous détaillerons la mesure de température car elle est un bon exemple de l'amélioration apportée par le schéma que nous avons utilisé.

• Description de la fonction

Nous désirons effectuer la mesure de la température de l'accumulateur à l'aide d'une sonde placée en contact avec le bac. Cette sonde est située en dehors du chargeur. La plage de température normale d'utilisation est -25°C à $+50^{\circ}\text{C}$.

• Les choix de conception

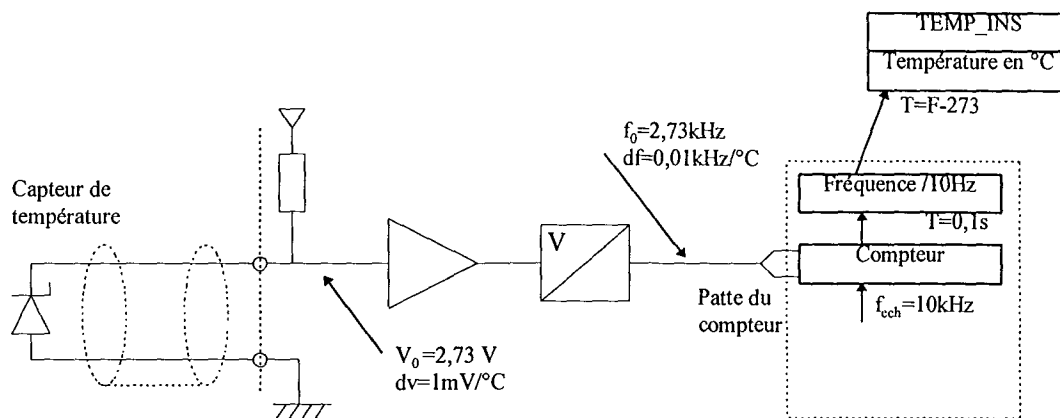
Les mesures analogiques par conversion tension/fréquence

La mesure par transformation tension/fréquence est une solution permettant de concilier :

- la robustesse aux bruits de mesure par un moyennage naturel de la grandeur mesurée sur la période de comptage,
- la possibilité d'effectuer des mesures précises en ajustant la période de comptage des impulsions,
- une mise en oeuvre simple du fait de l'existence de nombreux compteurs autonomes sur notre processeur,
- une mesure directe de la grandeur si le gain tension/fréquence est judicieusement choisi.

Le gain de notre convertisseur sera de $0.01^{\circ}/\text{HzC}$ et la période d'échantillonnage du compteur de 100ms. Notre capteur sera une diode sensible à la température, sa sensibilité est $1\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ et sa tension à 0°C de $2,73\text{V}$.

Figure 7-17 « Les choix pour la mesure de la température »



• Etude des défaillances

Le tableau non exhaustif suivant résume différentes causes de panne altérant la fiabilité de la mesure ainsi que les solutions envisageables.

Tableau 7-1 « Etude de la fonction mesure de la température batterie »

Pannes	Détection	Solution(s) matérielle(s)	Conduite à tenir	Informations de Sortie
Rupture du câble	La mesure est égale à la tension d'alimentation le compteur compte une fréquence supérieure à 5kHz	Mise en place d'une résistance de rappel au Vcc	Indication d'une panne de la sonde de température	Défaut_sonde
La température et en dehors de la plage de fonctionnement normal d'utilisation de la sonde	La température est en dehors de l'intervalle [-40 , +50°C]		Indiquer une défaillance en température de la batterie	Défaut_temp
La température et en dehors de la plage de fonctionnement de la batterie	La température est en dehors de l'intervalle [-25 , +40°C]		Indiquer un problème de température	Défaut_sonde
La température de l'accumulateur est supérieure à 40°C	La température est en dehors de l'intervalle [-25 , +40°C]		Indiquer un problème de température	Alarm_temp Défaut_tempt
Injection d'une tension extérieure sur l'entrée		Isolation galvanique		
Dérive d'un élément de la chaîne de mesure		Prévoir un test par la mesure d'une tension de référence.		
Défaillance du convertisseur V/F	La mesure sort de l'intervalle normal d'utilisation			Défaut_sonde
La tâche mesure n'est pas exécutée	déclenchement du chien de garde de la fonction		indiquer le déclenchement au noyau logiciel	
La mesure est bruitée	La mesure varie rapidement La valeur du compteur varie rapidement	filtrage analogique du signal de mesure filtrage des valeurs numériques		
L'interface n'est plus alimentée	Pas d'oscillation du convertisseur La fréquence mesurée=0		Indication problème d'interface	Défaut_sonde

Nous retiendrons

- L'acquisition des entrées est réalisée de manière isolée pour préserver l'intégrité de la partie processeur. Cette solution sera également appliquée aux sorties.
- La validation de la donnée *température* en surveillant sa plage de variation.
- La prise en compte d'un défaut sonde.

Nous ne retiendrons pas

- La validation de la mesure par surveillance de sa dynamique.
- La mesure d'une référence à l'initialisation qui augmente le coût de l'équipement.

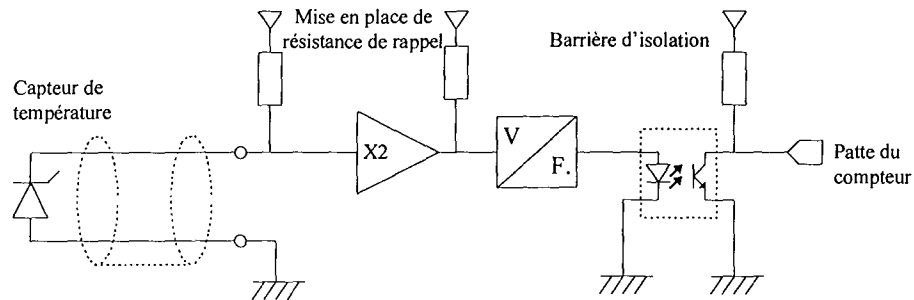
• **Révisions du cahier des charges**

En cas de défaut de la sonde (Défaut_sonde) ou de défaut de température batterie (Défaut_temp), le chargeur considère l'acquisition comme erronée et calcule sa consigne en tension du chargeur avec le cas le plus défavorable de 50°C. Ce défaut ne stoppe pas le fonctionnement du chargeur. Lorsque la température de l'accumulateur est en surchauffe (Alarm_temp_bat), il faudrait stopper le chargeur et basculer en mode de défaut (cas non retenu par le client).

• **La réalisation**

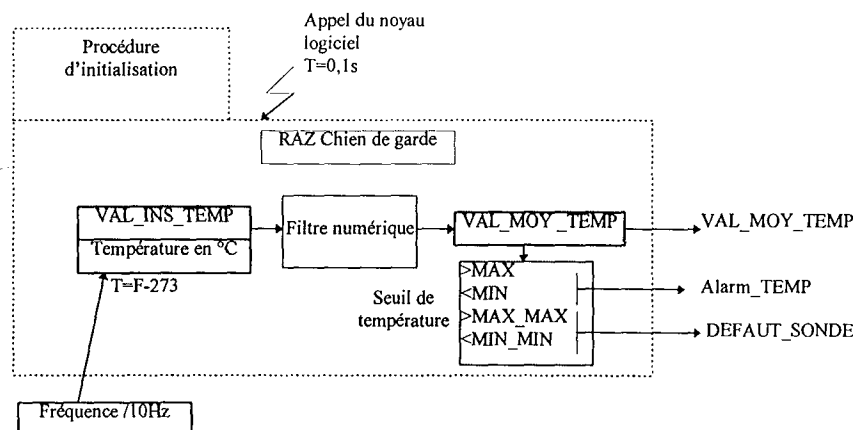
La réalisation matérielle est améliorée en introduisant des résistances de rappel à la tension d'alimentation (solution très peu coûteuse).

Figure 7-18 « La fonction matérielle d'acquisition de la température »



La fonction logicielle associée effectue une mesure tous les 0,1s. Elle est associée à un chien de garde logiciel surveillé par le noyau logiciel de l'actionneur. Les alarmes sont générées par comparaison à des seuils de la mesure filtrée avec une constante de temps de quelques minutes (imposée par le client).

Figure 7-19 « La fonction logicielle d'acquisition de la température »



7.2.2 Autres exemples

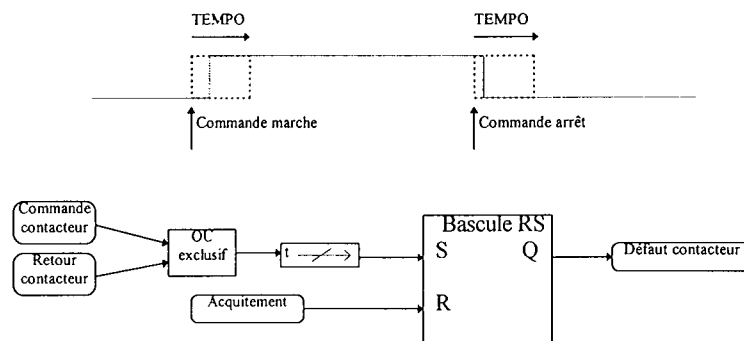
Les autres acquisitions analogiques ont été réalisées en réutilisant les enseignements de la mesure de température. Il en résulte des études qui n'ont pas allongé les temps de conception.

7.2.2.1 La commande du contacteur

L'étude de la fiabilité de la commande du contacteur principal montre la nécessité de posséder une information de retour (contact). Celle-ci permet de vérifier que le contacteur est dans un état conforme à celui demandé par l'actionneur. Cette vérification doit être temporisée de manière à ne pas générer des

défauts lors des changements d'état normaux du contacteur. Le contact de retour est choisi à fermeture. L'algorithme que nous avons implanté reproduit la fonction suivante :

Figure 7-20 « Le contrôle du contacteur par retour d'état »



Conséquences : Lors d'une demande de changement d'état par l'actionneur, celui-ci attend obligatoirement le retour d'état.

- **Révision du cahier des charges**

- Lors du cycle de commande du contacteur : Si le contacteur n'a pas répondu correctement, on effectue 3 tentatives. Si elles sont infructueuses, le chargeur passe en position de repli. Les nouvelles tentatives seront alors effectuées lors de la prochaine remise sous tension secteur.
- En fonctionnement : L'apparition d'une erreur provoque l'arrêt du chargeur qui repasse en position d'initialisation.

7.2.2.2 Le contrôle de phase et le déclencheur

La fonction d'acquisition des synchronisations de phase pour le déclenchement des thyristors est liée à la détection des défauts du réseaux 380V. Celui-ci est fourni par un alternateur et peut être instable, aussi il est important de vérifier sa qualité avant de piloter les thyristors.

- **Description de la fonction**

Nous désirons acquérir les ordres de synchronisation pour le déclenchement des thyristors sous réserve que les phases soient présentes et déphasées de 120° , que leur ordre soit correct et que la fréquence du secteur soit 50 Hz.

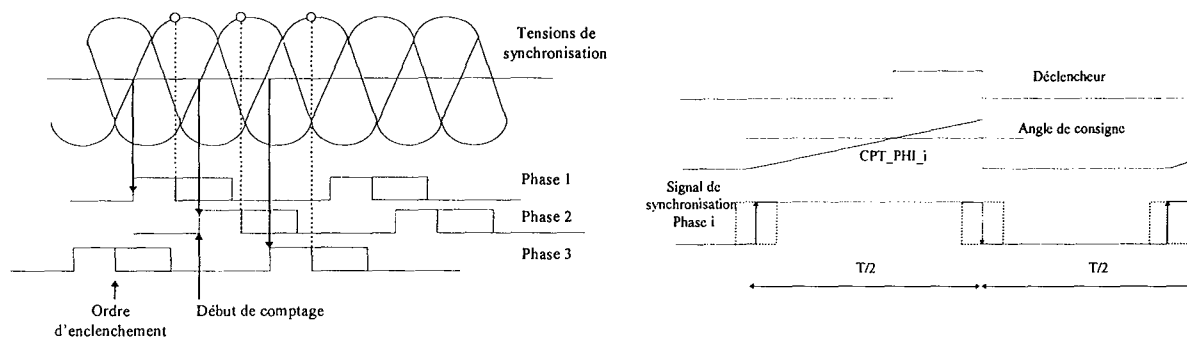
- **Choix du concepteur**

La prise des synchronisations est effectuée à l'aide de comparateur de tension. Le domaine d'amorçage des thyristors est en phase avec les tensions de synchronisations obtenues par un transformateur étoile/triangle. Le signal en sortie du comparateur est 5V lorsque le thyristor peut être piloté (tension de synchronisation positive) et 0V sinon.

- **Principe du déclenchement**

Il s'effectue par 3 déclencheurs, chacun est associé à un thyristor et à la tension de synchronisation correspondante. Chaque déclencheur possède un compteur incrémenté (CPT_PHI) lorsque la tension de synchronisation est positive. Quand la valeur de ce compteur atteint la valeur fixée par une valeur de consigne, le déclencheur donne l'ordre de s'enclencher au thyristor correspondant. Nous effectuons une remise à zéro du compteur sur le front descendant du signal de synchronisation.

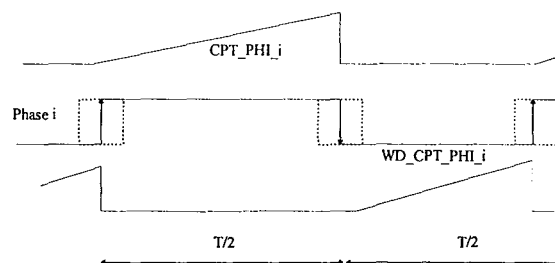
Figure 7-21 « Principe du déclencheur »



• Le contrôle de la présence de phase et de la fréquence

Il s'effectue simplement utilisant un deuxième compteur (WD_CPT_Phi). Ce compteur est analogue au premier, mais compte lorsque la tension de synchronisation est négative. Si ce compteur dépasse un seuil fixé à la période, la phase est considérée comme absente. En complétant ce test avec une comparaison à un seuil égal à la demi-période des compteurs CPT_Phi et WD_CPT_Phi, cela nous permet également de contrôler la fréquence de la phase.

Figure 7-22 « Principe du contrôle de la présence et de la fréquence de la phase »

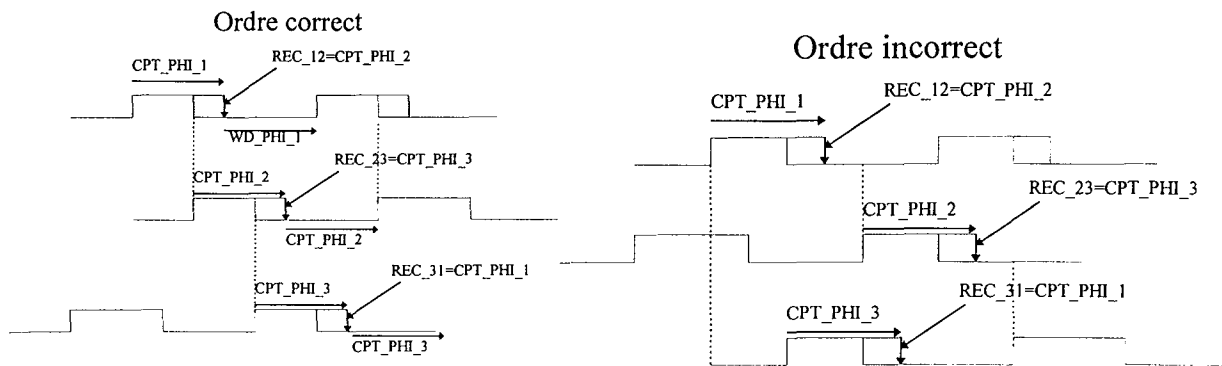


• Le contrôle de l'ordre de phase

Cette protection n'est pas utile pour le fonctionnement de notre chargeur, mais elle constitue une information de contrôle pour l'automate local.

Pour détecter si l'alimentation nous fournit un système de tension directe ou indirecte, nous avons observé le cadencement des signaux de synchronisations des trois phases. Pour ce faire lors d'un front montant du signal de synchronisation, on stocke la valeur du compteur CPT_Phi de la phase censé la précéder. Cette valeur est stockée dans RECii+1-CPT. Si les valeurs stockées sont nulles alors l'ordre est incorrect.

Figure 7-23 « Principe du contrôle de l'ordre de phase »



- **Le déclenchement de la protection**

Pour ne pas déclencher sur des défauts fugitifs, elle est réalisée par un compteur de défaut. Tout les 10ms, on ajoute à ce compteur le nombre de défauts détectés sur chaque phase (absence, mauvaise fréquence, mauvais ordre). Ce compteur est décrémenté s'il n'y a aucun défaut. La valeur normale de ce compteur est 0. Si il dépasse le seuil de 5 défauts, il déclenche la protection de défaut secteur.

Ce compteur est fixé à 100 lors de l'initialisation du chargeur, ce qui lui permet de ne démarrer que lorsqu'il est sûr de la présence d'un secteur stable.

7.3 Description du logiciel

Le logiciel suit la décomposition en trois couches choisies pour le développement des applications sur la carte Micro-Power.

- **Définition de la couche 0**

Le travail de cette couche est cadencé par les interruptions cycliques et par les interruptions des périphériques. Elle est construite sur la base du squelette logiciel de la carte Micro-Power. Cette première couche assure principalement :

La sécurité : Elle regroupe le traitement des erreurs de programme et celles propre au microprocesseur, la vérification de la bonne exécution des diverses tâches et données importantes pour l'actionneur (contrôle des chiens de garde logiciels et matériels). Elle est capable de générer des réactions de type réflexe pour répondre à un défaut (manque de phase indiquée par le déclencheur).

La gestion des périphériques : Elle comprend la gestion de la liaison série pour les communications et la gestion du déclencheur de thyristor assurant également la fonction de contrôle de phase.

La gestion des entrées/sorties

La gestion du cadencement : Elle génère des bases de temps cyclique à l'aide de compteur pour l'exécution des différentes tâches. Les fréquences principales sont 100Hz pour les fonction de cette couche et 10Hz pour les fonctions de la couche 1.

- **Définition de la couche 1**

Elle prend en charge la réalisation des fonctions élémentaires de l'actionneurs. A ce niveau nous trouvons :

- le traitement des trames de communication et l'identification des requêtes utilisateur,
- le calcul de la consigne,
- les régulateurs,
- la gestion des temporisations,
- les fonctions nécessaires à la présentation des données (génération d'écran de contrôle),
- la gestion de l'automatisme de bas niveau (commande contacteur, procédure d'initialisation),
- la gestion des protections élémentaire (protection contre les courts-circuits).

- **Définition de la couche 2**

Cette couche définit le comportement global du chargeur en gérant les cycles et modes de fonctionnement à partir des informations des couches inférieures et des requêtes utilisateur. Elle assure également la gestion des diagnostics.

7.4 Présentation du chargeur

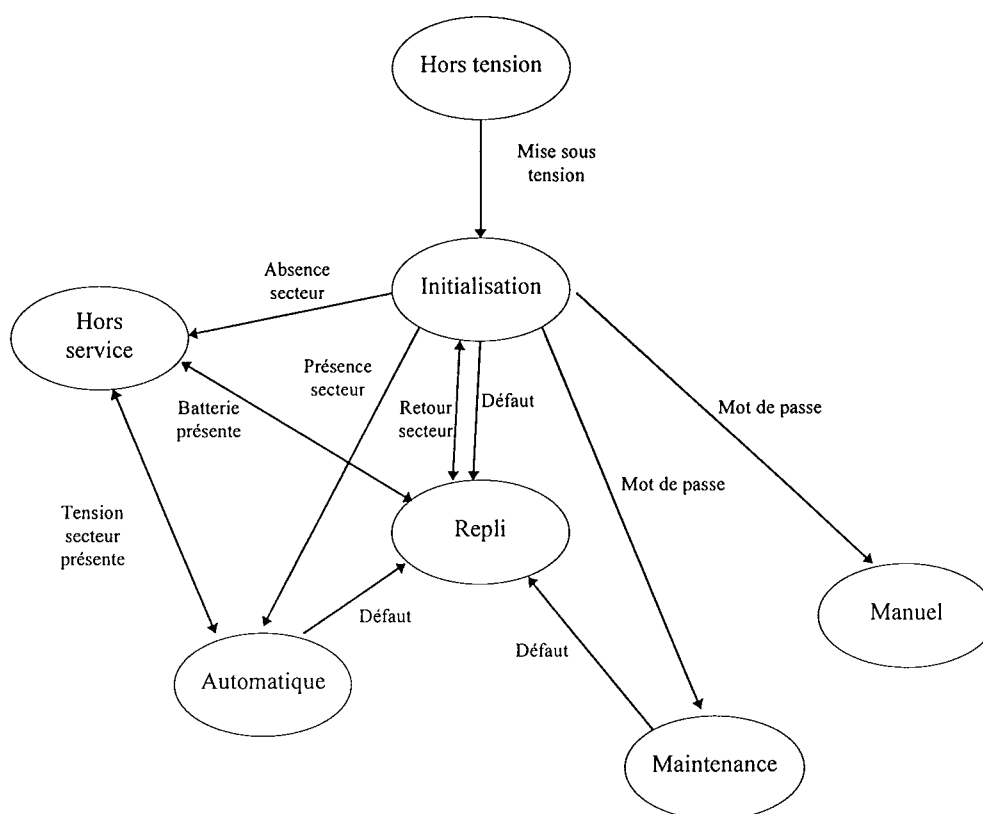
7.4.1 Le modèle externe

- **Les modes de fonctionnement**

Les modes présents sont :

- *Hors tension* : L'actionneur est privé de toute alimentation, il ne fournit aucun service.
- *Hors Service* : L'actionneur est privé de toute alimentation de puissance. Toutes les fonctions de consultation et de commande par le réseau de communication est possible.
- *Initialisation* : L'actionneur effectue les auto-tests et initialise les services.
- *Manuel* : Il permet au constructeur après l'entrée d'un mot de passe, d'utiliser un terminal pour piloter manuellement chaque fonction du chargeur.
- *Automatique* : Le chargeur est en régulation et charge l'accumulateur.
- *Repli* : Le chargeur a eu l'indication d'un défaut. Il attend la disparition de ce défaut et l'initialisation par une mise hors tension.
- *Maintenance* : L'utilisateur a accès après l'entrée d'un mot de passe à un écran lui présentant le contenu de la base de données interne de l'actionneur.

Figure 7-24 « Les modes de fonctionnement du chargeur »



La sortie du mode manuel s'effectue par une mise hors tension de l'équipement. La sortie du mode de repli passe le plus souvent par une tentative d'initialisation de l'équipement à chaque retour de la tension secteur.

• Les services

Ils peuvent se résumer aux fonctions :

- *Les régulations* : le chargeur effectue la charge de l'accumulateur en régulation tension ou courant.
- *L'interrogation à distance* : l'utilisateur peut, par la ligne de communication, prendre connaissance de l'état du chargeur et des mesures.
- *Le pilotage de la consigne en puissance* : L'utilisateur fixe par la ligne de communication la consigne de puissance maximum en sortie de l'accumulateur.
- *L'affichage d'un écran moniteur* : Cet écran envoie sur la ligne de communication un écran présentant la base de données interne de l'actionneur. Cet écran est mis en forme pour un terminal.
- *L'utilisation du mode manuel* : Il permet au constructeur de piloter le chargeur fonction par fonction à l'aide d'un terminal distant.

Figure 7-25 « Tableau de disponibilité des services »

Services	Hors tension	Hors service	Initialisation	Automatique	Repli	Manuel	Maintenance
Régulations	X	X	X	1	X	X	1
Fixer la consigne de puissance	X	1	X	1	1	X	X
interrogation à distance	X	1	1	1	1	1	X
affichage de l'écran moniteur	X	1	X	X	X	X	1
pilotage manuel	X	1	X	X	X	X	1

7.4.2 La base de données

Elle est réduite sur cette application car elle ne possède que de la mémoire fixe et volatile.

- *Les données fixes* : sont constituées d'informations constructeur (version, dates), des constantes spécifiques à l'application (calibre de mesures, coefficient des régulateurs, seuil, paramètre de configuration).
- *Les données volatiles* : correspondent aux variables d'état du système et aux mesures. Elle est complétée par un archivage des derniers défauts datés en temps système (compteur du noyau).

- **Visibilité des données de l'actionneur**

La base de données est accessible dans différents modes d'utilisation. Elle se présente sous trois formes :

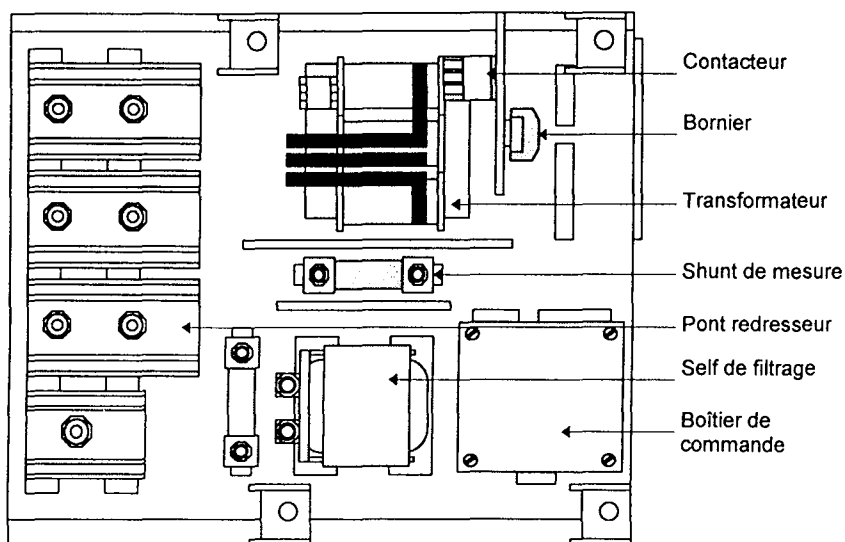
- *La fiche maintenance* : Elle est visible en mode maintenance et présente tous les états et mesures nécessaires pour diagnostiquer un dysfonctionnement de l'équipement.
- *La fiche constructeur* : Elle est visible en mode manuel et présente toutes les informations nécessaires au test et à la mise au point du chargeur.
- *La fiche d'exploitation* : Elle est visible par le réseaux de communication par l'automate local. Elle est constituée des données nécessaire à l'exploitation et la supervision de l'équipement :
 - un mot d'état du chargeur et indications des défauts (8bits)
 - mesure de température (16bits),
 - mesure de courant total (16bits),
 - mesure de courant batterie (16bits),
 - tension de consigne (16bits),
 - puissance de consigne (16bits).

Les mesures sont transcrites en Ampère, volt et degrés Celsius.

7.4.3 Présentation matérielle

Le chargeur se présente sous la forme d'un berceau en acier de 200Kg qui vient se fixer sous le châssis de la voiture. Il contient les éléments du circuit de puissance et le boîtier électronique de commande. Ce dernier contient les cartes électroniques.

Figure 7-26 « Vue de dessus du chargeur de batterie »



Le chargeur peut se décomposer en deux parties distinctes. La partie circuit d'électronique de puissance qui contient tous les composants nécessaires au pilotage la puissance et le boîtier de commande constitués des entrées sorties et de la carte à microprocesseur. Ces cartes d'entrées/sorties assurent la mise en forme des signaux à échanger entre le microprocesseur, le circuit de puissance et le reste de l'automatisme.

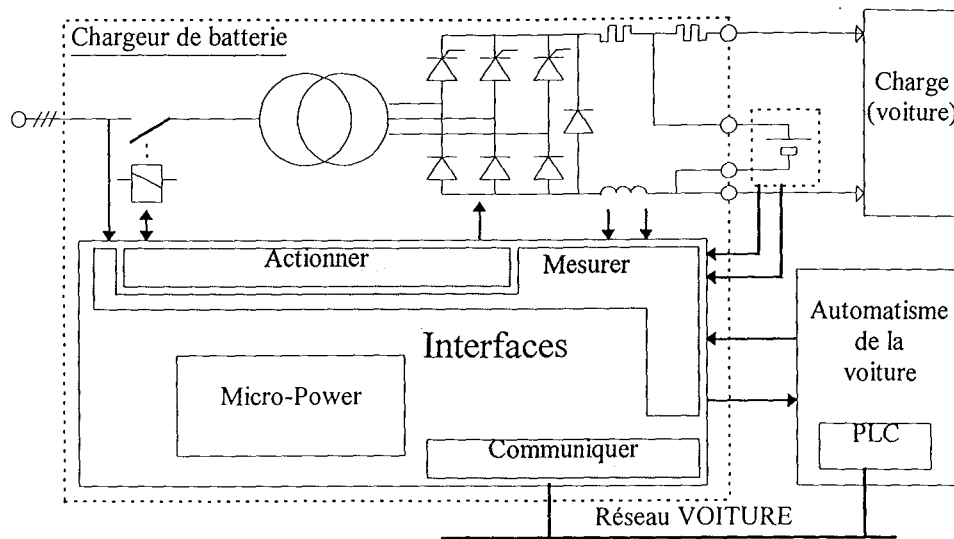
Les interconnexions avec ce boîtier s'effectuent avec des éléments interne au chargeur :

- mesures des courants,
- mesure de la tension,
- détection du réseau 380V,
- commande du contacteur marche,

ou avec des éléments externes par l'intermédiaire du bornier :

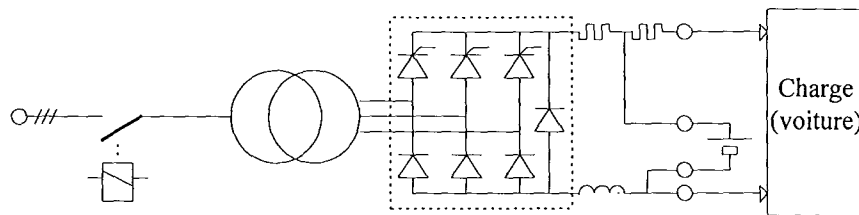
- mesure de température de la batterie,
- information présence de la batterie,
- contact d'arrêt (de sécurité),
- indication de la fourniture d'un 24V à l'automate,
- liaison du réseau informatique.

Figure 7-27 « Synoptique du chargeur de batterie »



Le circuit de puissance est constitué d'un contacteur de ligne (marche/arrêt), d'un transformateur abaisseur, d'un pont redresseur diodes/thyristors, d'une inductance de lissage et de deux shunts de mesure. Les protections des alimentations d'entrées et de sorties sont assurées à l'extérieur du chargeur.

Figure 7-28 « Le circuit de puissance »



7.4.4 Tests avant mise en exploitation

Le chargeur a suivi un programme de tests définis dans une procédure qualité. Les principales étapes ont été :

Chez le constructeur du chargeur

- Vérification des dimensions mécaniques et possibilité électrique sur un échantillon.
- Contrôle de l'homologation aux normes par un expert (client)
- Contrôle de la production : Chaque chargeur suit une procédure de tests définis en accord mutuel par le constructeur et le client. Ces tests visent à vérifier le bon fonctionnement de chaque fonction du chargeur et prévoit l'édition d'une fiche de contrôle dans laquelle figure de nombreuses mesures.

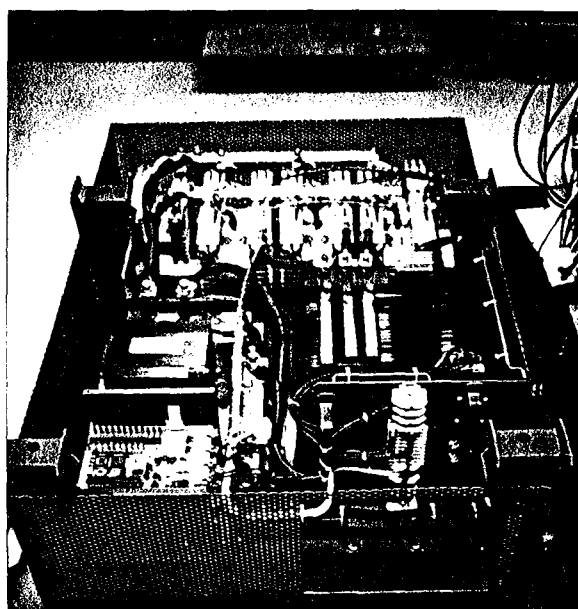
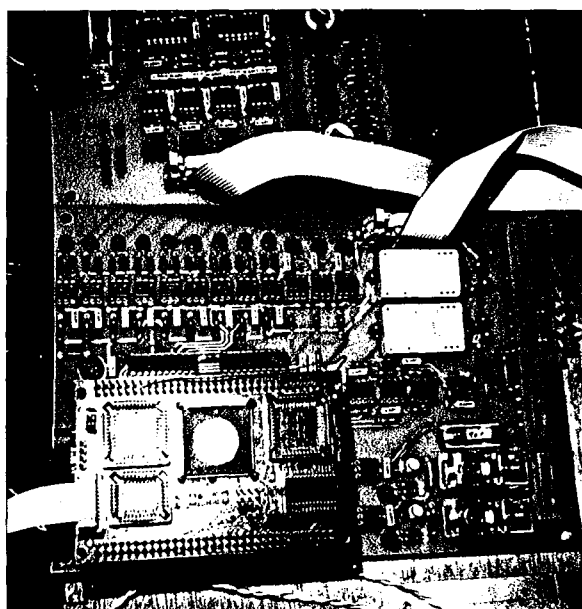
Chez le client :

- Etude d'un spécimen dans ses locaux sans le fournisseur dans diverses conditions d'utilisation.

- Suivi d'un programme d'investigation poussé de validation de la conception de l'ensemble des wagons
- Test comparatif des caractéristiques de chaque véhicule par rapport aux investigations précédentes.

Les 30 exemplaires sont aujourd'hui en exploitation sur les rames (mise en service en janvier 1997).

Photographies de l'application



Pont mixte triphasé
Diode/Thyristor

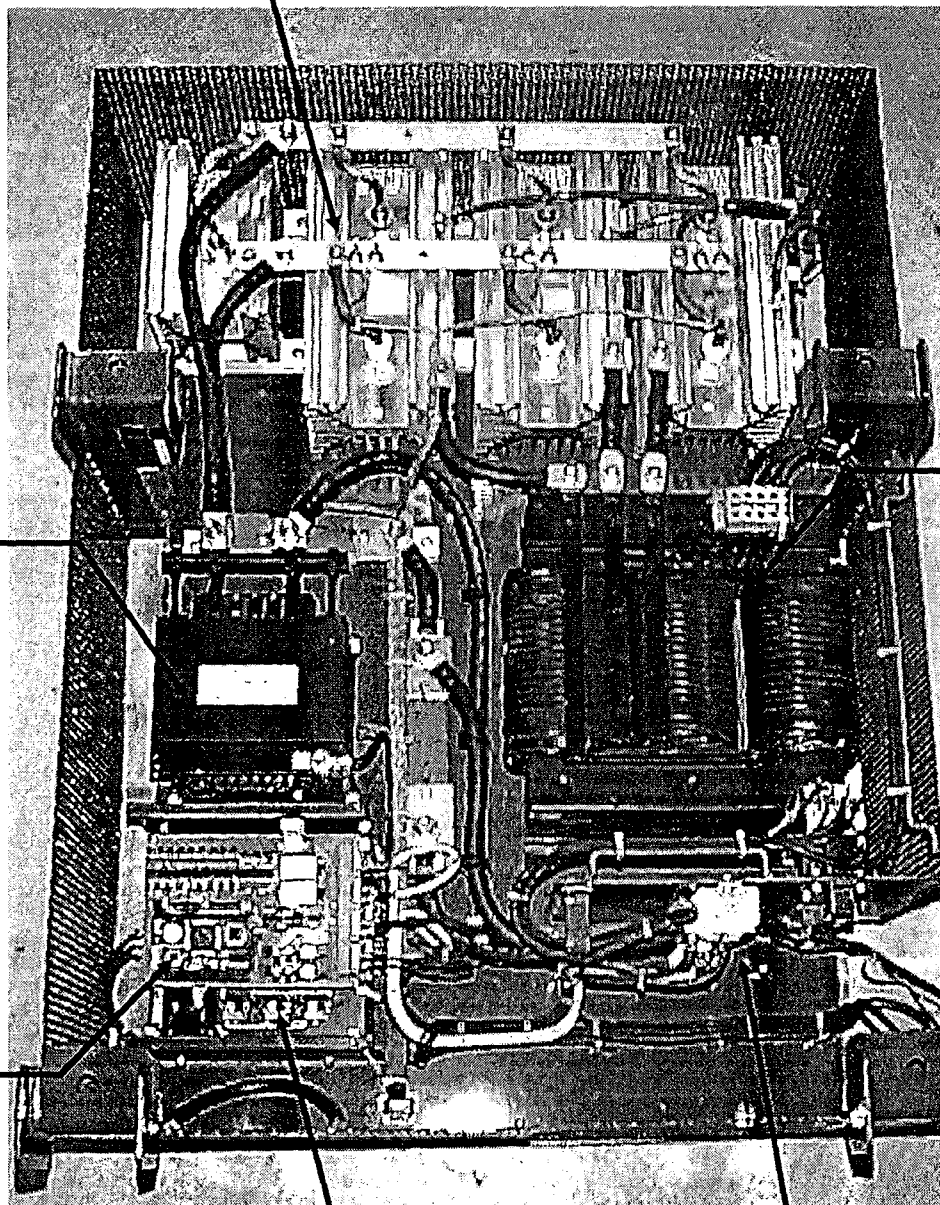
Inductance
de filtrage

Transformateur
triphase

Carte
Micro-Power

Boîtier de
commande

Bornier de
raccordement



Bibliographie du chapitre

NF-58311

Procédure d'essai de type des ensembles redresseurs-chargeurs-batteries d'accumulateur (12 pages).

NF F 62601

Matériel roulant ferroviaire - Chargeur de batteries d'accumulateurs - Règles d'aptitude à la fonction.
Octobre 1993

NF EN 60146

Convertisseurs à semi-conducteur -Spécifications communes et convertisseur commuté par le réseau.
Août 1993

NF EN 61204

Dispositif d'alimentation à basse tension à sortie en courant continu - Caractéristiques de fonctionnement et prescription de sécurité
équivalent CEI 1204, NF C 53-232

NF F 64-238

Matériel roulant ferroviaire - Accumulateur au plomb
Mars 1991

Conclusion

Conclusion

Dans cette thèse, nous nous sommes attachés à mettre en œuvre le concept de l'*actionneur intelligent* appliqué à un module de gestion de l'énergie électrique. Après avoir présenté ce concept, nous avons créé un support à l'intelligence sous la forme d'une carte à microprocesseur à haute sûreté de fonctionnement. Cette carte répond à l'attente de la société Arnatronic pour le pilotage numérique de ses équipements de puissance.

Elle a été entourée d'un environnement de développement de manière à faciliter l'utilisation des outils logiciels que nous avons volontairement choisis simples et fonctionnels. L'utilisation de logiciels modulaires, la création de bibliothèques, la souplesse d'utilisation et les performances de cette carte nous permettent la création rapide de nouvelles applications et répond aux impératifs de temps de développement des applications sur-mesures traitées par Arnatronic.

Les fonctionnalités de l'actionneur intelligent (gestion de la base de données, communications, gestion du temps), ont été réutilisées pour la création d'autres applications de communication, d'archivage de données et le traitement de signaux de codeurs incrémentaux.

L'application cible que nous avons retenue est une alimentation qui met en œuvre un accumulateur électrochimique. Nous avons donc approfondi le mécanisme du stockage électrochimique d'énergie afin de mieux comprendre le comportement des batteries au plomb étanches. Cette étude nous a montré que les accumulateurs ont un comportement non linéaire et évolutif dans le temps, difficile à décrire mathématiquement. C'est pourquoi nous avons envisagé l'utilisation de la logique floue.

Le modèle d'accumulateur que nous présentons nous permet d'obtenir des indicateurs sur le niveau de charge et l'usure de l'accumulateur en fonction de l'historique de ses variables de fonctionnement.

Nous avons obtenu des résultats encourageants sur nos simulations. Mais nous n'avions pas de données suffisantes pour balayer l'ensemble des cas de fonctionnement possibles, car nous avons utilisé les données (incomplètes) fournies par les constructeurs. Ce modèle ne peut donc prétendre à

une grande précision. Néanmoins, il apporte certaines corrections à la simple méthode de comptage des ampère-heures.

L'utilisation de la logique floue nous permet de travailler par *interpolation des connaissances* de l'expert.

Si un plan d'expérience suffisamment représentatif du fonctionnement de l'accumulateur était disponible, nous pensons que le modèle en logique floue serait avantageusement remplacé par des techniques utilisant un réseau neuronal.

Pour étendre les résultats obtenus à partir des données des constructeurs il serait nécessaire d'effectuer une campagne de mesure permettant de couvrir la durée de vie de la batterie (au moins 2 ans). Un tel programme est envisagé à la société ARNATRONIC. La première étape sera la création d'un produit de surveillance et d'archivage de données pour les accumulateurs au plomb stationnaires. Ce produit permettra de resserrer les contacts avec les utilisateurs possédant un parc important d'accumulateurs de manière à constituer une base de données complémentaire aux essais envisagés par la société.

Le produit a été réalisé à 30 exemplaires qui sont tous en exploitation.

Dans son état actuel, notre réalisation industrielle ne permet pas d'apprécier tous les apports du concept *actionneur intelligent* (elle n'intègre que les fonctions de validation de données, autosurveillances et communication). Dans une version future, nous envisageons d'y inclure une *gestion intelligente* de l'accumulateur (amélioration de la durée de vie, optimisation du rendement).

Annexes

Annexe A - Les normes

Les normes régissent notre monde industriel, elles suivent les produits tout au long de leurs cycles de vie, de leur naissance à leur mort [RAG93]. Leur rôle est principalement de définition (de limites, de méthode, de vocabulaire). Elles sont utiles et indispensables mais nous ne retenons généralement que leurs aspects restrictifs, leurs contraintes.

Mais avant d'aller plus loin, essayons de nous fixer les idées sur les normes et les organismes qui les publient.

Généralité

- ***Définition¹:***

Une norme est une donnée de référence résultant d'un choix collectif raisonné en vue de servir de base d'entente pour la solution de problèmes répétitifs. C'est un document qui contient des spécifications techniques établissant les caractéristiques d'un produit telles que le niveau de qualité, de performance, de sécurité ou les dimensions. Elle comprend les conditions applicables au produit en ce qui concerne les symboles, la terminologie, les tests et les méthodes de test, l'emballage, l'étiquetage ou les labels. Une norme pour être appliquée, doit être approuvée par un organisme certificateur. La conformité à une norme n'est pas obligatoire sauf si elle est imposée par un client à un fournisseur pour la fourniture d'un produit ou d'un service.

Les exemples actuels sont la qualité avec l'ISO9000 et la directive européenne sur le marquage CE, rendant du même coup applicables les normes sur la compatibilité électromagnétique [CEE93b].

Les organismes de normalisation

D'après [ANR94]

- ***Au niveau International***

¹D'après le progrès technique - 3 - 94

L'*Organisation Internationale de Normalisation* (ISO) est un organisme mondial de statut privé. Son but est de promouvoir, de coordonner et d'unifier les normes dans tous les domaines techniques à l'exclusion de l'électricité et de l'électrotechnique déjà traité par la *Commission Electrotechnique Internationale* (CEI) depuis 1906. L'ISO rassemble les intérêts de producteur, des utilisateurs, des administrations gouvernementales et de la communauté scientifique. Ses membres sont les organismes nationaux de normalisation des différents pays.

La CEI couvre les secteurs de l'électricité et de l'électrotechnique. Elle a pour objet de faciliter la coordination et l'unification des normes dans ce domaine électrique. Il inclut notamment les propriétés électriques des matériels, les méthodes d'essais. La CEI est affiliée à l'ISO dont elle constitue la division électricité. Elle est constituée de quatre-vingts comités d'études.

L'*Union Internationale des Télécommunications* (UIT) est une institution spécialisée de l'Organisation des Nations Unies dans le domaine des télécommunications et regroupe 66 états. Elle est constituée de deux organes essentiels :

- Le *Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique* (CCITT).
- Le *Comité Consultatif International des Radiocommunications* (CCIR).

Ces deux comités, implantés à Genève, établissent les recommandations qui n'ont pas tout à fait le statut de normes, car elles ne font pas l'objet d'enquêtes publiques.

• *Au niveau Européen*

Le *Comité Européen de Normalisation* (CEN), traite les mêmes domaines que l'ISO au niveau européen et le *Comité Européen de Normalisation Electrotechnique* (CENELEC) ceux de la CEI. Ils ont des procédures de fonctionnements communes. Ils regroupent 18 pays de la CEE et de l'*Association Européenne de Libre Echange* (AELE).

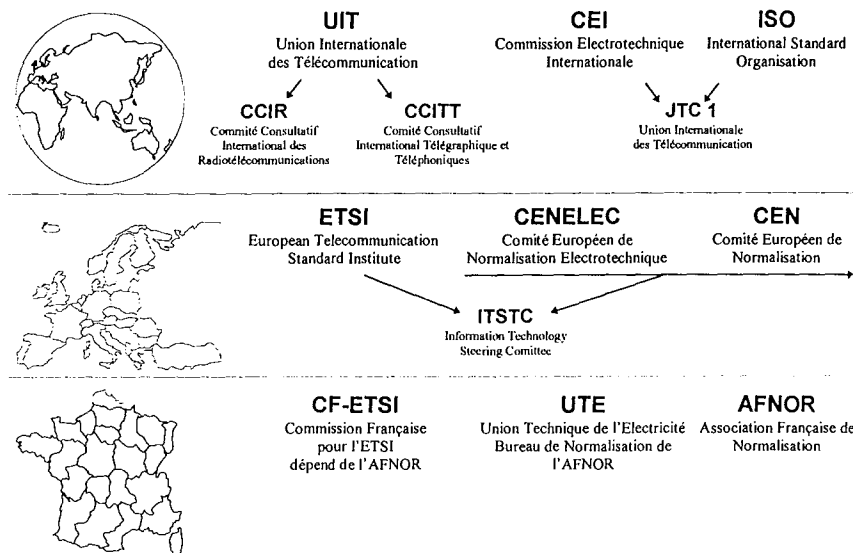
L'*European Telecommunication Standard Institute* (ESTI) est reconnu comme organisme normatif depuis 1992. Il reprend l'activité normative européenne de la Conférence Européenne des Postes et Télécommunication (CEPT), cercle fermé des administrations des différents pays excluant de fait les industriels. Les industriels, les opérateurs mais aussi les utilisateurs participent directement à l'élaboration des normes de l'ESTI. Son activité est comparable à celle du CCITT et du CCIR au niveau mondial.

• *Au niveau national*

L'*Association Française de Normalisation* (AFNOR) est depuis 1946 le seul organisme en France, chargé d'élaborer les normes et de les mettre en oeuvre. Membre français de l'ISO et du CEN, elle regroupe plus de 5000 entreprises et agit en étroite relation avec le ministère de l'industrie. La commission française pour l'ESTI travaille au sein de l'AFNOR. Quelques organisations à caractère professionnel qui avaient une vocation normative antérieure à la création de l'AFNOR, agissent par délégation de l'AFNOR et sous sa

tutelle, au niveau de leur procédure. Ce sont le *Comité Electrotechnique Français* (CEF) et l'*Union Technique de l'Electricité* (UTE).

Figure A-1 « Synoptiques des organismes de normalisation »



L'ISO 9000

• La qualité, définitions

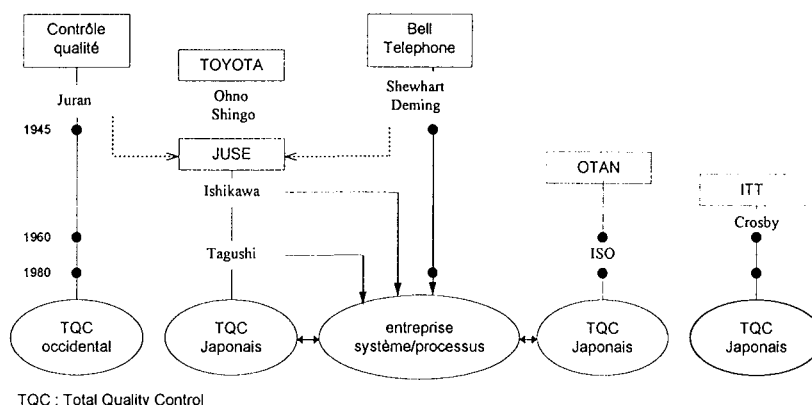
- La qualité est l'ensemble des caractéristiques d'une entité qui lui confère l'aptitude à satisfaire les besoins exprimés et implicites (Définition ISO 8402 ou NFX 50-120).
- La qualité est la conformité aux exigences (P.-B CROSBY).
- Qualité : n.f. (lat. qualitas, de qualis). Manière d'être, bonne ou mauvaise, de quelque chose, état caractéristique. (Larousse)

• Historique

Après le XVII^e siècle et les textes de COLBERT sur la qualité et les notions de tolérance du XVII^e siècle (Ingénieur GRIBEAUVAL), c'est le XX^e siècle qui a connu un grand développement des concepts, méthodes et outils en ce qui concerne la qualité. Avant la seconde guerre mondiale, F. TAYLOR énonce ses principes d'organisation. L'industrie se met à produire en masse, à la chaîne, notamment en ce qui concerne l'automobile et les biens d'équipement ménager. Le volume des équipements produit oblige à une certaine maîtrise du système de production ainsi qu'à la création de critère pour déterminer si un produit est bon ou mauvais. Au Japon, ce courant prend source chez TOYOTA avec M. OHNO, aux États-Unis avec M. JURAN. En 1930, la société *BELL Telephone Laboratories* est un centre de recherche et d'innovation dans

le management de la production. Dans cette entreprise se sont rencontrées trois figures fondatrices des théories sur la qualité : SHEWHART, JURAN et le Professeur DEMING. Après la seconde guerre mondiale, il existe aux États-Unis un premier ensemble de principes et de méthodes concernant la qualité. Après l'occupation américaine du Japon, les japonais fondent la *Japan Union of Scientist and Engineers* (JUSE) et le Keidanren afin de développer les concepts et l'application de la qualité.

Figure A-2 « Planisphère de la qualité »



• D'où vient l'ISO9000

Le courant ISO prend sa source dans le principe et les méthodes d'assurance qualité de l'OTAN appelée *Assurance Qualité Programme* (AQAP). Son objectif est de faire en sorte que les produits soient conformes aux exigences de l'OTAN. Pour atteindre cet objectif, on demande au fournisseur de mettre en place une certaine organisation appelée « système qualité » dont les exigences sont déterminées par l'OTAN. Des audits de cette organisation seront fait chez les fournisseurs par des auditeurs pour vérifier la mise en place effective des règles. Le client vérifie donc chez son fournisseur la mise en place effective des règles d'assurance qualité qu'il a défini.

Ce type de démarche est ensuite adopté par d'autres entreprises dans d'autres secteurs. L'aéronautique en France met au point ses normes de système qualité pour ses fournisseurs, ce sont les normes RGAéro40. La défense nationale développe ses *Règlements d'Assurance Qualité* (RAQ). L'automobile fait de même et chaque gros constructeur édicte ses propres règles vis-à-vis des fournisseurs.

• L'ISO9000

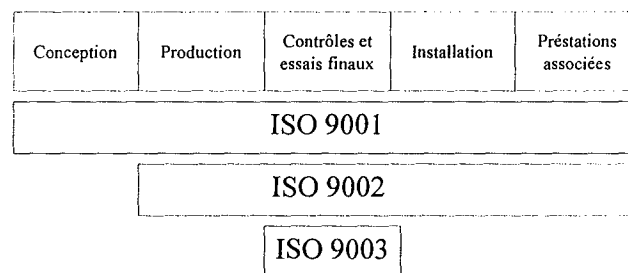
L'ISO s'est donc attaché à formaliser ses relations entre client et fournisseur en essayant de mettre au point un ensemble de normes de systèmes qualité qui puisse s'appliquer à toutes les entreprises dans tous les secteurs d'activités et qui remplace à terme les normes particulières d'un secteur ou d'une entreprise : les normes ISO9000.

Cet ensemble de normes a pour avantage d'harmoniser les échanges d'informations sur les systèmes qualité par la création d'un document qualité normalisé, les audits et les vérifications ne sont plus réalisés par les clients mais par des organismes spécialisés, dûment accrédités. Ces vérifications donnent lieu à l'attribution d'un certificat. En 1992 la Communauté Européenne adopte les normes ISO9000 comme normes qualité officielles. Depuis cette date, le mouvement d'adoption de ces normes par les entreprises s'amplifie de façon importante (en France de 500 en 1992 à plus de 3800 en mars 1995).

A l'origine, les normes ISO9000 ont été rédigées pour servir de référence dans les relations contractuelles bilatérales client-fournisseur. Elles sont aujourd'hui utilisées pour la certification des systèmes qualité d'entreprise.

L'ISO9000 se divise en trois catégories (voir figure suivante).

Figure A-3 « Décomposition de l'ISO9000 »

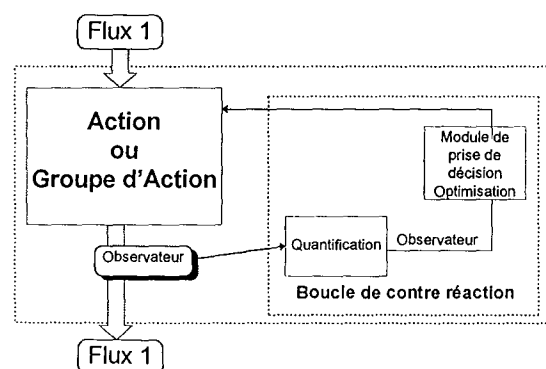


• **Principe [AFN92]**

Le principe de la norme est relativement simple. Il est basé sur l'identification des structures et des cycles internes de l'entreprise. Une fois les structures identifiées, il faut identifier les flux circulant dans ces structures en les associant à des observateurs représentatifs de leurs qualités. Il s'agit ensuite de créer ou d'identifier les boucles de contre réaction (principe d'une boucle fermée) permettant d'améliorer et d'optimiser les critères de qualité en suivant les procédures formalisées par écrit. Cette technique est applicable pour les personnes, les ordres, les documents et les produits.

La consignation de ces éléments dans un document aboutit au plan qualité. Celui-ci est consultable par les clients.

Figure A-4 « Schématisation du principe d'un plan qualité »



La conséquence de ce plan qualité est l'uniformisation des démarches, des corrections à effectuer au système. Les personnes savent ce qu'elles doivent faire et où le faire. De plus ce système permet de quantifier l'efficacité d'une intervention.

Le client peut au vu de ces procédures évaluer si la méthode de travail en matière de qualité du client est conforme à ses exigences.

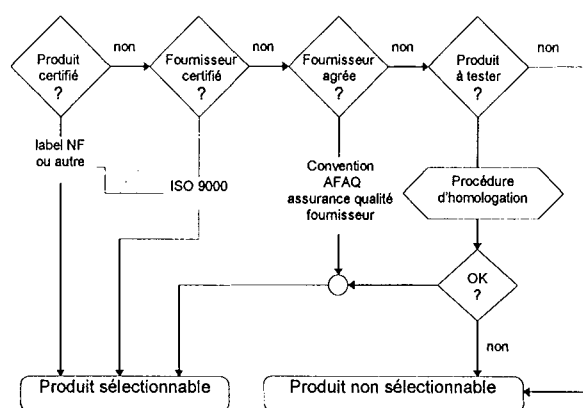
• La certification ISO9000

Elle est réalisée par des organismes indépendants, tels que l'AFAQ¹ en France. Elle est obtenue par des audits successifs et une analyse du document.

• Travailler avec l'ISO9000

La certification ISO9000 n'est pas une obligation, cependant lorsqu'une entreprise est classée, elle devrait normalement ne travailler qu'avec des fournisseurs du même niveau de qualité. Mais la plupart des entreprises et surtout les PME ne sont pas encore certifiées. Aussi existe-t-il la possibilité dans les plans qualités ISO9000 l'échappatoire de travailler avec des fournisseurs possédant un plan qualité non certifié ou avec des accords sur des critères très précis. Mais à terme, les grandes entreprises publiques et privées appliqueront le plan qualité comme une norme et obligeront leurs sous-traitants à être homologués.

Figure A-5 « Sélection produit/fournisseur dans une grande entreprise »



¹AFAQ : Association Française d'Assurance Qualité

La CEM¹

Le but des normes CEM est d'apporter un peu de rigueur à l'environnement électromagnétique et de sensibiliser les utilisateurs aux problèmes d'interactions entre les équipements qui peuvent apparaître par couplage électromagnétique. Ces normes fixent deux points [JOx93] :

- *Les limites des perturbations que peuvent émettre les équipements*, pour limiter la pollution de l'environnement à des valeurs raisonnables ou tout du moins connues par l'utilisateur.
- *Les valeurs des perturbations auxquelles les équipements peuvent être soumis* sans altération de leur fonctionnement et performance (sensibilité). Cet aspect des normes a pour objectif de pouvoir évaluer le comportement d'un système en fonction d'un environnement connu.

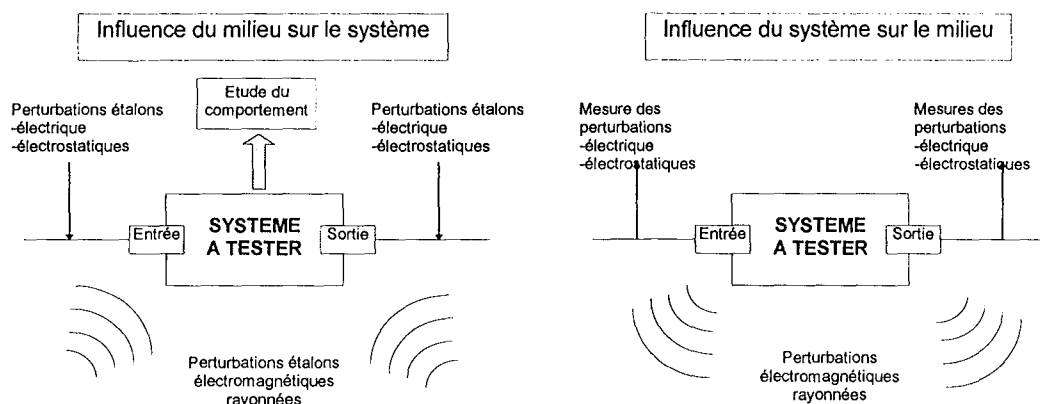
Ces grandeurs de perturbation sont données aussi bien pour les grandeurs électriques (courant et tension) que sur les grandeurs rayonnées (électromagnétisme). Elles sont définies dans les normes IEC 1000-1 à 4 et EN 50081 à 50082.

La conformité des équipements est effectuée par une batterie de tests normalisés. Cette conformité doit être certifiée par un organisme reconnu, documents et mesures à l'appui.

• Principes des tests CEM

Les tests CEM sont constitués des tests de perturbations et d'immunités [SYM95]. Les premiers servent à mesurer l'incidence de l'équipement sur le milieu, les seconds permettent de vérifier son comportement lorsqu'il est soumis à des perturbations de son environnement.

Figure A-6 « Principe des tests de perturbations et d'immunité »

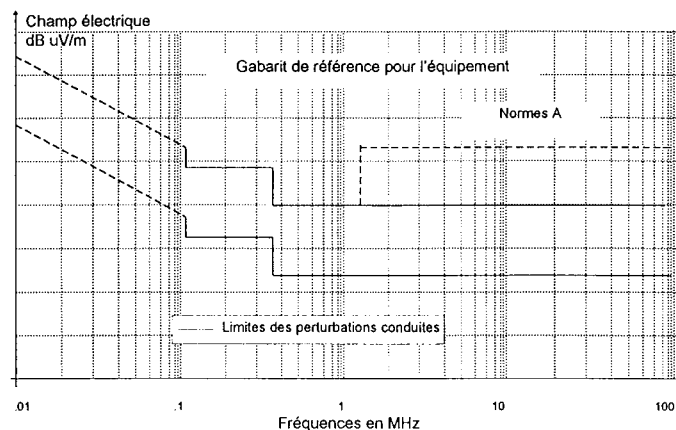


¹ CEM : Compatibilité Electro-Magnétique

- Les tests de perturbations

Ils sont constitués par un ensemble de mesures effectuées dans un milieu contrôlé (alimentations de laboratoire et chambre anéchoïde[SEE95]). Ces perturbations sont mesurées sur les conducteurs (conduites) et à l'aide d'antennes (rayonnées). Ces valeurs sont ensuite comparées aux valeurs limites fixées par les normes.

Figure A-7 « Exemple de gabarit pour les perturbations générées dans les conducteurs d'alimentation »



- Les tests d'immunités

Ils sont composés d'une série de perturbations induites et rayonnées sur l'environnement de l'équipement qui doit avoir un comportement prédéfini par la norme (fonctionnement correct de l'appareil ou de sécurité) ou identifié par le concepteur. Ces tests ont pour objet d'éviter qu'une perturbation induise un état inconnu (donc imprévisible) de l'équipement.

• Travailler avec les normes CEM

Le plus gros problème de ces normes est de faire référence à des grandeurs électromagnétiques difficilement quantifiables. Leurs mesures nécessitent des équipements très spécifiques au sein d'un environnement contrôlé. La mise en oeuvre de ces équipements nécessite un certain apprentissage ainsi qu'un savoir faire très spécifique. De plus la résolution des problèmes en cas de non-conformité reste le monopole de spécialistes. D'où l'apparition de nombreuses sociétés de services proposant tests et matériels CEM.

Le problème du coût supplémentaire de ces nouveaux tests sur un produit est donc important et peut rendre le prix d'un produit prohibitif, ainsi que son temps de développement (dans le cas de tests répétés). Aussi la tendance des industriels est de s'équiper, seuls ou en association, de petits laboratoires permettant l'évaluation de leurs équipements ainsi que la quantification de leurs actions en matière de solutions CEM.

Ces plates-formes de test permettent une auto-évaluation de leurs produits avant de dépenser temps et argent dans les organismes agréés. Mais ils permettent également de fournir les mesures et données techniques nécessaires à un intégrateur pour l'évaluation de la compatibilité globale de son équipement (car en cas de livraison d'un composant¹ d'un appareil au sein de la Communauté Européenne, le marquage CE n'est pas obligatoire).

Le marquage CE

Le marquage CE est une obligation pour les produits, appareils ou équipements électriques circulant dans la communauté [JOx92, JOx91]. Il est entré en application le 1.1.96.

• *Signification du marquage*

Par le sigle CE, le fabricant ou l'importateur confirme simplement la conformité de son produit aux normes de la Communauté Européenne. Il engage ainsi sa seule responsabilité. La conformité n'est donc pas vérifiée ni certifiée par un organisme officiel. L'utilisateur doit s'assurer que l'appareil ou le système porte le sigle CE et n'a le droit de le mettre en oeuvre que dans l'environnement spécifié, par exemple le secteur industriel, résidentiel.

Figure A-8 « Sigle CE »



Chaque fabricant appose le sigle sous sa propre responsabilité. Le sigle n'est pas délivré par un organisme officiel. Le sigle ne protège l'utilisateur qu'indirectement. Le sigle est appliqué principalement à l'attention de l'autorité de surveillance du marché [CEE93a].

Par apposition du sigle CE, le fabricant certifie que son produit est conforme aux normes européennes.

• *Les conséquences*

-Du point de vue fournisseur

Avant d'apposer le marquage CE, il doit classer son produit et vérifier sa conformité aux normes européennes en vigueur. Il doit tenir la liste des normes, les classifications obtenues, ainsi que les documents attestant cette liste à disposition des clients.

-Du point de vue utilisateur

L'utilisateur ne doit pas se contenter du marquage CE pour connaître les caractéristiques de son produit, il doit prendre connaissance de la liste de normes respectées par le produit. En cas de

¹ élément qui ne délivre pas de fonction directe et n'est pas destiné à être un produit commercial mais à être assemblé dans un appareil

problème, il peut demander les pièces justificatives de cette liste. Si un défaut de conformité par rapport à cette liste existe, il pourra alors se retourner contre le fournisseur pour apposition abusive du sigle CE.

En cas de non-conformité d'un produit, tous les produits peuvent être retirés du marché et accompagnés d'une lourde amende pour le fabricant ou l'importateur.

- **Remarque:**

Le marquage CE est trop souvent rattaché aux normes CEM. Ce sont deux normes indépendantes même si elles sont liées par leurs conséquences. En effet pour apposer le marquage CE à un appareil électrique ou électronique, il faut vérifier sa conformité aux diverses normes dont les nouvelles normes de CEM. Le marquage CE oblige à tenir à disposition les documents montrant la bonne classification du produit ou certifications, d'où la nécessité de passer par un organisme agréé.

Bibliographie du chapitre

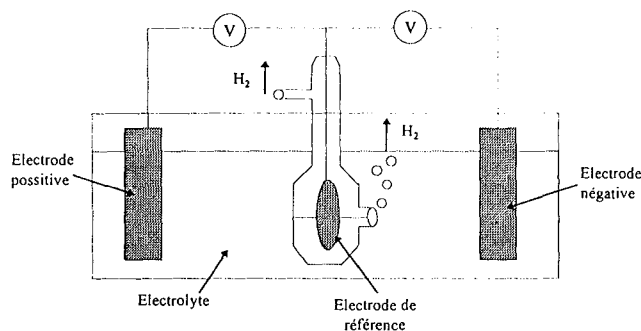
- [AFN92] AFNOR
Gérer et assurer la qualité - Tome 1 et 2 - 4ème édition
Recueil de norme française AFNOR Paris : AFNOR, 1992.
- [ANR94] ANRT
NORMES - 3 - 94
Le progrès technique, Edité par l'ANRT - ISSN 0397-8060
- [CAP89] CAPRON J.M.
Simulation de diode de puissance avec le logiciel SPICE
Journées SEE à Marseille, Juin 1989, p.11.1-11.4
- [CEE93a] CEE
Guide d'application de la directive 89/336/CEE du Conseil du 3 mai 1989
Concernant le rapprochement des législations des états membres relatives à la compatibilité électromagnétique.
Bruxelle : Commission des Communautés Européennes, 15 Février 1993
- [CEE93b] CEE
Guide d'application de la directive 89/336/CEE du Conseil du 3 mai 1989
Concernant le rapprochement des législations des états membres relatives à la compatibilité électromagnétique.
Bruxelle : Commission des Communautés Européennes, 15 Février 1993
- [JOx89] Journal officiel des communautés européennes
89/336/CEE
Directive du 3 mai 1989 concernant le rapprochement des législations des Etats membres relative à la compatibilité électromagnétique
- [JOx91] Journal officiel des communautés européennes
COM(91)145 final - SYN 336 du 20 Juin 1991
Proposition de règlement (CEE) du Conseil concernant l'apposition et l'utilisation de la marque CE de conformité pour les produits industriels. (91/C 460/07)
- [JOx92] Journal officiel des communautés européennes
COM(92) 293 final - SYN 336 du 10 Juillet 1992
Modification concernant l'apposition du marquage CE (92/C 195/11)
- [JOx93] Journal Officiel de la république française
Décret N° 92-587 du 26 juin 1992 relatif à la compatibilité électromagnétique des appareils électriques et électroniques. NOR: INDD9200429D
- [RAG93] RAGOT Bernadette
RD et qualité - 2 -93
Edité par l'ANRT ISSN 0397-8060
- [SEE95] SEE
Numéro spécial CEM
Revue SEE , N°5 Novembre 1995
- [SYM95] Compatibilité Electromagnétique
SYMECORA, Session d'information, 1995
(Syndicat de la Mesure, du Contrôle et de la Régulation Automatique)
92038 PARIS la Défense Cedex
-
- Normes générales
- NF X 50-120 (Ed. 87)
Qualité - Vocabulaire
- NF X 07-001 (Ed. 84)
Norme fondamentale: vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie.
- IEC 1000-1-1
Application et interprétation des termes et définitions fondamentaux
- IEC 1000-3-? CD ou prEN 50082-2
Normes générales sur l'immunité dans les environnements industriels
- IEC 1000-4-1
Généralités sur les tests d'immunité
- EN 50081-1 ou VDE 0839-81-1
Norme générale sur l'émission dans les environnements résidentiel, commercial et industrie légère
- EN 50081-2 ou VDE 0839-81-2
Norme générale sur l'émission dans les environnements industriels
- EN 50082-1 ou VDE 0839-81-1
Norme générale sur l'immunité dans les environnements résidentiel, commercial et industrie légère
- EN 50082-2 ou VDE 0839-81-2
Norme générale sur l'immunité dans les environnements industriels

Annexe B - Le diagramme de TAFEL

Technique de mesure et diagramme de TAFEL

Cette technique mise au point en 1907 par Julius TAFEL est utilisée pour comparer l'efficacité des électrodes. Elle consiste à mesurer les différences de potentiel de l'anode et de la cathode de la batterie par rapport à une électrode de référence la plus stable possible. La meilleure référence et la plus pure est l'électrode à hydrogène constituée d'un disque de platine contenu dans un récipient en verre comme sur la figure suivante. Le dégagement d'hydrogène force le liquide vers l'extérieur jusqu'à l'équilibre où le disque de platine est exposé moitié à l'hydrogène, moitié à l'électrolyte.

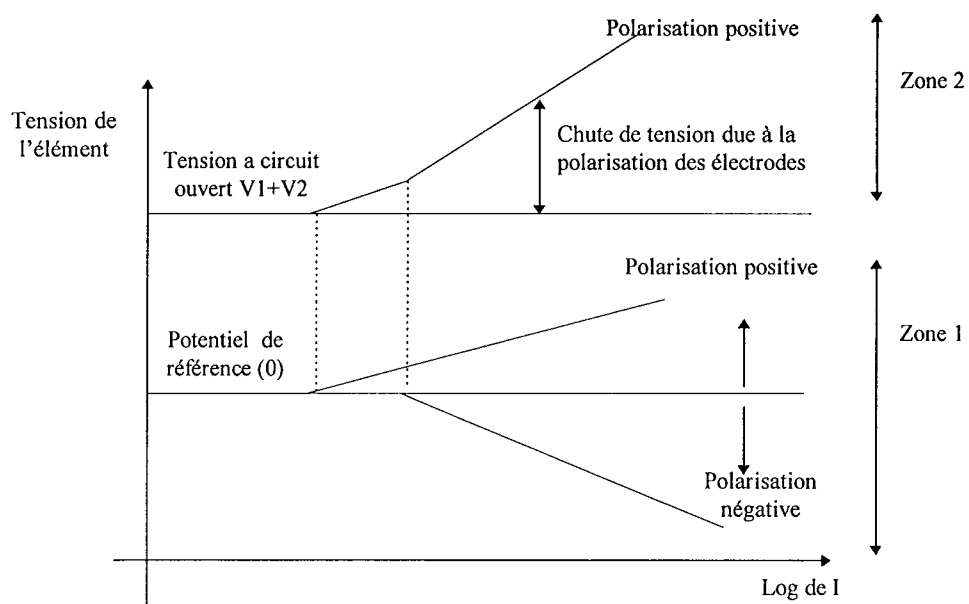
Figure 0-1 « Technique de mesure de la polarisation des électrodes » d'après [BRE96]



En général, la troisième électrode est du type métal/métal en utilisant des métaux les plus purs possible (argent, cadmium et mercure). La plus utilisée pour la recherche sur la batterie au plomb est l'électrode en cadmium ($\text{Cd} \rightarrow \text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^-$, $E_0 = 0,403\text{V}$), mais celle-ci souffre d'une dérive lors de son utilisation due à la réaction de celle-ci avec l'acide sulfurique qui cause une dissolution du cadmium dans l'électrolyte. Mais l'électrode la plus précise est l'électrode mercure/sulfate de mercure ou le sulfate est saturé en acide sulfurique. Elle offre l'avantage d'ajuster la concentration de son électrolyte avec celui de la batterie lors des variations de concentration (charge et décharge).

La zone 1 du diagramme utilise l'électrode de référence. La tension de polarisation des électrodes est tracée en fonction du logarithme de courant appliqué. La contribution de TAFEL a été de découvrir que la polarisation d'une électrode fait apparaître une droite caractérisée par la *pente de TAFEL*. Toutes les polarisations partent de zéro et sont positives ou négatives en fonction du sens du courant. La convention est de tracer la polarisation positive vers le haut et la polarisation négative vers le bas. L'addition algébrique des valeurs de polarisation négative et positive donne une tension de polarisation globale de l'élément. Cette chute de tension additionnée à la tension en circuit ouvert donne la tension aux bornes de l'élément (zone 2).

Figure 0-2 « Le diagramme de TAFEL »

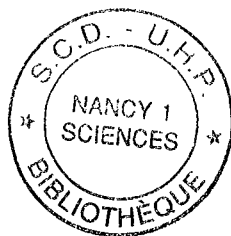


Cette technique est applicable pour l'étude de la polarisation des électrodes utilisées en floating ou en stockage prolongé.

[BRE96] BRECHT N.

Battery Science - Glowing references

11 Annual Battery conference, Long Beach, 1996



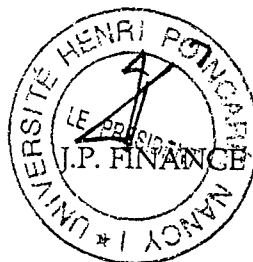
Nom: GOUNANT

Prénom: Serge

VU, APPROUVÉ ET PERMIS D'IMPRIMER

Nancy, le 2 JUIL 1997 UHP 59

Le Président de l'Université



Laboratoire CRAN ESSTIN

Rue Jean LAMOUR
54500 Vandoeuvre

Auteur : Serge GOUNANT

Directeur de mémoire : Mr. HUMBERT, Professeur à l'université Henri POINCARÉ de Nancy

Responsable scientifique : Mr. J.M. ORY, Maître de conférences à l'ESSTIN, Nancy

Intitulé : Conception et réalisation d'un module de gestion optimisée de l'énergie électrique
Application ferroviaire embarquée

Domaine : Automatique

Sujet : Création d'actionneurs intelligents en électronique de puissance avec application à un chargeur de batterie intelligent pour une application ferroviaire embarquée.

Mots clés : Actionneur intelligent - Electronique de puissance - Microprocesseur - Sûreté de fonctionnement - Accumulateur électrochimique - Batterie Plomb - Modèle - Logique floue

L'objectif de la société ARNATRONIC était mettre en oeuvre des commandes numériques et les fonctionnalités des actionneurs intelligents aux sein des produits de son département d'électronique de puissance. Pour débiter cette démarche *actionneur intelligent*, nous nous sommes livrés à une étude des techniques utilisées dans ce domaine et des différentes formes d'intelligences apportées au composant, à la commande et à la surveillance des circuits.

Nous nous sommes ensuite intéressés aux caractéristiques et fonctionnalités de l'actionneur intelligent et plus particulièrement à sa base de données et à sa sûreté de fonctionnement, cette dernière étant une caractéristique très importante lorsqu'il s'agit de piloter l'alimentation en énergie d'un équipement de forte puissance.

La mise en oeuvre du concept *actionneur intelligent* a mis en évidence le besoin de créer un outil à base de microprocesseur capable de servir de support privilégié aux notions d'intelligence et de permettre une commande sûre et correcte des circuits électroniques de puissance. Une étude des différentes solutions pour améliorer leur sûreté de fonctionnement nous a conduit à la création d'un produit : *Micro-Power*. Construite autour d'un microcontrôleur hautes performances orienté sûreté de fonctionnement, la carte *Micro-Power* possède une nette orientation sécurité et gestion de processus à temps critique. Pour faciliter sa programmation et l'utilisation des outils logiciels, nous avons créé en environnement de développement ergonomique.

Cet outil a été mis en oeuvre sur un chargeur de batterie embarqué.

Dans sa version industrielle, le comportement du chargeur est relativement simple et ne possède qu'un embryon de gestion de l'accumulateur. Nous avons alors envisagé d'améliorer les algorithmes dans le but de mieux gérer l'autonomie de la batterie. Pour ce faire, nous avons étudié la batterie plomb étanche, ses caractéristiques, ses non-linéarités et son vieillissement.

La création de cette base de connaissances autour de ce type d'accumulateur nous permet d'obtenir des modèles de comportement fonction de variables d'entrées accessibles (tension, courant et température). Ces modèles nous permettent d'estimer l'état de charge et d'usure de l'accumulateur à l'aide de la logique floue.