

M/531.6-17104

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAÏD - TLEMCEM
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
LABORATOIRE DE MATERIAUX ET ENERGIES RENOUVELABLES



Thèse de Magister
En
Physique Energétique et Matériaux

Thème

**Optimisation d'un système de pompage
photovoltaïque (PPV)
à base du microprocesseur 6809**

Présentée par : M^r Boussoukaia TAHAR

Soutenu devant le jury :

M^r N.E. CHABANE SARI
M^r B. BENYOUCEF
M^r M. BELHAMEL
M^r N.E. GHOUALI
M^r F. BRIXL. REGUIG
M^r F. BENYAROU

Professeur à l'Université de Tlemcen
Professeur à l'Université de Tlemcen
Directeur de recherche (C.D.E.R) Alger
Professeur à l'Université de Tlemcen
Professeur à l'Université de Tlemcen
Chargé de Cours à l'Université de Tlemcen

Président
Directeur de Thèse
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur

Année Universitaire: 2001-2002



2687
09 JUIN 2007

A la mémoire de mon chère frère

Aldellah

Dédicace

*Avec toute mon affection ,
Ma profonde reconnaissance,
Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui me sont très chères .*

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été effectué dans le Laboratoire de Matériaux et Energies Renouvelables du Département de Physique de la Faculté des Sciences de l'Université Abou Bakr BELKAÏD – Tlemcen.

J'exprime toute ma gratitude à Monsieur B. BENYOUCEF, Professeur à l'Université Abou Bakr BELKAÏD, de m'avoir dirigé au cours de ce travail. Ses critiques constructives, remarques et précieux conseils ont contribué à faire progresser mes recherches.

J'exprime toute ma reconnaissance et mes remerciements à Monsieur N. CHABANE SARI, Professeur à l'Université Abou Bakr BELKAÏD, qui a bien voulu me faire l'honneur de présider le jury de cette thèse.

Je remercie Monsieur M. BELHAMEL, Directeur de recherche au Centre de Développement des Energies Renouvelables (C.D.E.R) de Bouzaréah, pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail en acceptant de faire partie du jury.

Je remercie Monsieur N.GHOUALI , Professeur à l'Université Abou Bakr BELKAÏD, pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail en acceptant de faire partie du jury.

Je remercie Monsieur F.BREXIR, Professeur à l'Université Abou Bakr BELKAÏD, qui me fait l'honneur d'examiner cette thèse ; je le remercie vivement.

Je remercie Monsieur F. BENYAROU, Chargé de Cours à l'Université Abou Bakr BELKAÏD , qui me fait l'honneur de faire partie du jury.

Enfin, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont aidé et soutenu pendant cette période.

SOMMAIRE

	Pages
Travaux antécédents	
Résumé	I
Introduction	III
Problématique	01
	03
Chapitre I: Propos sur l'utilisation de l'énergie solaire	
I.1 Introduction.	04
I.2 Les essais d'utilisations industrielle de l'énergie solaire.	04
I.3 Le choix d'une installation solaire.	05
I.4 La rentabilité énergétique d'un processus solaire.	07
I.5 La rentabilité financière d'une option solaire.	09
I.6 Conclusion.	10
Chapitre II: Introduction au système de pompage photovoltaïque (PPV)	
II.1 Généralités.	11
II.2 Configuration générale d'un système (PPV).	11
II.3 Conception des circuits de réglage .	13
II.4 Modélisation .	14
II.5 Configuration des circuits de réglage .	15
II.6 Dimensionnement des régulateurs .	15
II.7 Simulation numérique .	15
II.8 Phénomènes transitoires .	16
Chapitre III: Conception hardware du système PPV	
Introduction	18
III.1 Générateur photovoltaïque (PV)	
III.1.1 Etude de la conversion photovoltaïque.	22
a. Cellule photovoltaïque idéale.	22
b. Circuit électrique équivalent.	24
c. Effets des résistances parasites sur la performance des cellules solaires.	27
III.1.2 La centrale d'acquisition de données et de gestion de processus.	29
a. La carte de mesure de tension.	29
b. Le BUS universel et la carte d'interface.	30
c. La carte de conversion numérique -analogique	30
d. La carte de mesure de puissance et énergie.	31
e. La carte de mesure de température.	32
III.1.3 Les voies du future : les modules en couches minces	33
a. Cellule aux silicium monocristallin en film mince .	33

b. Cellules organiques : vers le tout polymère .	34
III.2 Adaptateur d'impédance	35
III.3 Moteur asynchrone	
III.3.1 Choix d'un moteur électrique d'entraînement .	43
III.3.2 Couple moteur d'une machine asynchrone .	44
III.3.3 Caractéristiques mécaniques d'une machine asynchrone .	46
III.3.4 Pertes d'énergie et rendement des moteurs asynchrone .	48
III.3.5 Caractéristiques de fonctionnement et facteur de puissance des moteurs asynchrones .	50
III.4 Théorie des pompes	
III.4.1 Destination et domaine d'application des pompes.	54
III.4.2- Principaux types de pompe.	54
III.4.3- Définitions principales en usage dans la théorie des pompes.	55
III.4.4-Organisation et principe de fonctionnement des pompes centrifuges.	60
III.4.5- Caractéristique de la pompe .	62
III.4.6- Schéma du réglage du débit et la hauteur de la pompe .	64
III.4.7-Economie d'énergie pour un entraînement de pompe avec variateur triphasé.	67
III.5 Accumulateur	
III.5.1- Le stockage de l'électricité d'origine photovoltaïque	71
III.5.2- Divers types de batteries	71
III.5.3- Gestion de la vie des batteries.	72
III.6 Circuit de réglage	
III.6.1- Introduction.	74
III.6.2- Structure d'un réglage échantillonné .	74
a) Généralité.	74
b) Configuration d'un réglage par un système à microprocesseur	74
III.6.3- Modélisation des principaux organes d'un réglage digital.	76
III.6.4- Configuration d'un réglage échantillonné .	79
III.6.5- Architecture générale du dispositif .	80
• Unité centrale .	83
• Module DATA.	89
• Module actionneurs.	93
III.7 Conclusion	97

Chapitre IV: Conception software du système PPV	
IV.1 Introduction	98
IV.2 Structure de commande	98
IV.3 Principe de fonctionnement programmé	99
IV.4 Programme principal	104
IV.4.1 Bloc d'initialisation du système	107
IV.4.2 Réservoir	108
IV.4.3 Accumulateur	109
IV.4.4 Générateur Pv	110
IV.4.5 Adaptateur	111
IV.4.6 Moteur	112
IV.4.7 Pompe	113
IV.4.8 Réglage	115
IV.4.9 Affichage	116
IV.5 Organisation de la RAM et de l'EPROM	120
IV.6 Conclusion.	122
Chapitre V: Calcul économique d'un système (PPV)	
V.1 Introduction .	124
V.2 Investissement , Spécificité du problème .	124
V.3 L'analyse Financière.	127
a°- Un Modèle de gestion des stocks.	127
b°- Analyse Micro-économique du Stockage.	128
V.4 Calcul Actuariel .	129
Chapitre VI: Simulation par Matlab. Résultats et Discussions.	
VI.1 Introduction.	135
VI.2 Les opérateurs Bit à Bit.	135
VI.3 Fonctions de manipulations des heures.	136
VI.4 Résultats et Discussions.	136
• Réservoir	137
• Accumulateur	139
• GPV	142
• Adaptateur	145
• Moteur	147
• Pompe	149
Conclusion générale	151
Perspectives	153
Annexes	
Bibliographie	

TRAVAUX ANTECEDENTS

Travaux antécédents

Le rayonnement solaire a été fréquemment utilisé pour des expériences de laboratoire durant les 18^e et 19^e siècles. le musée du CNAM possède une très belle collection de miroir «Ardents» ou de lentilles de cette époque. **Lavoisier**[.] résume très bien l'avantage de l'énergie solaire dans l'obtention des hautes températures: *«le feu que les chimistes ont continue d'employer ne peut s'allumer ni subsister dans le vide; l'air est un agent nécessaire à sa conservation. le feu du verre ardent offre à cet égard un très grand avantage, il peut pénétrer sous le récipient de la machine pneumatique, et l'on peut par son moyen faire des calcinations et des combinaisons dans le vide....»*. **Lavoisier** rapporte sous forme d'un bref inventaire les expériences de fusion ou d'ébullition de 220 corps ou matériaux, expériences conduites en 1772 et 1773.

De Saussure a inventé en 1769 le premier capteur solaire qui lui permettait d'atteindre 160°C à l'intérieur de 5boites en verre et de cuivre des aliments; **Rumford** a lui même expérimenté sur le rayonnement solaire et dans son livre, il cite les travaux de **Leslie** et de **Pictet** sur le rayonnement thermique. **John.J.N, Herschel**, au cours de sa compagne d'observations astronomiques au cap de bonne espérance (1834-1848), avait éprouvé lui aussi en 1837 la possibilité de cuire les aliments à partir du rayonnement solaire qui, dans un capteur simple, permettait d'obtenir 120°C avec deux vitres en couvertures. En 1839 **Becquerel** a étudié le courant produit entre deux électrodes métalliques dans un électrolyte avec une électrode illuminée par le soleil. la photoconductivité dans le sélénium fut découverte par **Smith** en 1873. Peu après, **Adams** et **Day** ont étudié l'effet de la lumière sur les courants traversant le sélénium avec des contacts en platine. Ils ont trouvé ultérieurement qu'une force électromotrice pourrait être induite à travers les échantillons lorsqu'ils sont

illuminés. L'existence de cette F.E.M fut comprimée pour **Fritts** qui fabriqua une cellule en Se avec une contre électrode en or et par **Minchin** dont les cellules furent des structures Al / électrolyte /Se /Al ayant des photo tensions supérieures à 0,5 volt à la lumière du jour. Il semble aussi que **Minchin** soit la première personne à suggérer que les cellules photovoltaïques ou photopiles pourraient être utilisée pour produire de l'électricité avec la lumière solaire.

Et depuis, des études ont été poursuivies sur des cellules en Sélénium, Oxyde de cuivre et Sulfure de cuivre. Le développement de la technologie de diffusion du bore a produit des cellules stables au silicium à 6% en 1954. **Prince** a publié en 1955 la première étude analytique du rendement photovoltaïque et ensuite **Loferski** a montré qu'il existe une bande interdite optimale de l'ordre de 1,5 ev pour une photopile à homo-jonction P-n. Ces résultats ont stimulés des études sur d'autres matériaux tels que l'arséniure de gallium, le tellure de cadmium et le phosphore d'indium.

La force mobilisatrice derrière le développement intensif des cellules solaires jusqu'en 1970 fut les programmes spatiaux. Les premières cellules furent mises sur orbite en mars 1958 puisque, à cette époque, elles ont été utilisées pour fournir la puissance électrique dans les missions spatiales. L'année 1973 fut celle de la crise mondiale de l'énergie. Et on reconnaît depuis que les sources d'énergie renouvelables deviendraient primordiales dans les prochaines décennies et le développement des cellules solaires pour l'utilisation terrestre devient de plus en plus répondeu.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les procédés du photovoltaïque sont souvent multivariables et fortement non linéaires. Leur contrôle présente donc des difficultés. Or l'amélioration des performances d'un procédé va de pair avec l'amélioration de la qualité de son contrôle .

Les développements des microprocesseurs ont fait naître l'espoir de pouvoir implanter des algorithmes complexes pour des organes de contrôle sophistiqués . En effet , de plus en plus souvent on tend à remplacer l'ensemble de la logique câblée et électromécanique classique par des dispositifs à microprocesseur .

Notre but est de réaliser une carte programmable capable d'être utilisée en tant que contrôleur et permettant d'assurer le fonctionnement optimal d'un système de pompage photovoltaïque (PPV) . Cette carte peut fonctionner seule dans un environnement industriel ou être reliée à d'autre micro- et/ou micro-ordinateur pour constituer un réseau de contrôle.

Pour répondre à ces spécifications les caractéristiques générales de notre carte à base de microprocesseur doit être en plus de ses capacités de calcul :

- Acquisition des données de capteurs placés sur le procédé .
- Action sur le procédé à travers des éléments de contrôle .
- Communication avec un Miniordinateur .

A partir de là , nous avons adopté le plan suivant :

Après une brève introduction et la problématique, la présente thèse sera répartie selon six chapitres :

- **L**e premier chapitre est un exposé général sur l'utilisation de l'énergie solaire ainsi que les considérations développées sur les différents critères qui éclairent le choix d'un équipement photovoltaïque.
- **L**e deuxième chapitre a pour objet la présentation des différentes phases à parcourir lors d'une simulation d'un système de pompage photovoltaïque.
- **Q**uand au troisième chapitre, il donne une description de l'architecture du dispositif et l'étude détaillée de chacun de ces modules.
- **L**e chapitre quatre concerne la mise en exploitation du dispositif Software, C'est-à-dire la présentation et l'explication détaillée des programmes que nous avons mis au point pour optimiser le système PPV, à savoir, l'acquisition des paramètres ,leur traitement et leur asservissement (réglage) approprié aux consignes homologues.
- **L**e chapitre cinq est un préambule au calcul économique d'un système PPV. Un objectif secondaire était de poser clairement et de résoudre les questions qu'un agent économique, désireux de s'alimenter uniquement par énergie solaire, serait amené à se poser.
- **D**ans le dernier chapitre, on présentera les résultats relatifs au chapitre Software tout en s'appuyant sur la simulation par Matlab.

PROBLEMATIQUE

POSITION DU PROBLEME

Cette thèse est une contribution à la conception et la réalisation d'un dispositif programmable à base d'un microprocesseur permettant d'assurer le fonctionnement optimal d'un système de pompage photovoltaïque (PPV) en temps réel (c'est à dire en fonction de paramètres instantanés).

Notre système (PPV) se compose de plusieurs modules devant être adaptés l'un à l'autre dans leur totalité (unité de contrôle). Donc, une connaissance parfaite et minutieuse de chaque sous-système est recommandée afin d'aboutir au meilleur programme d'optimisation.

Par ailleurs, le dispositif de commande devra répondre aux exigences suivantes :

- Assurer le rendement maximum des divers modules en fonctionnement.
- Une autonomie de fonctionnement.
- Une excellente fiabilité.
- Présenter une simplicité d'intégration dans l'installation .

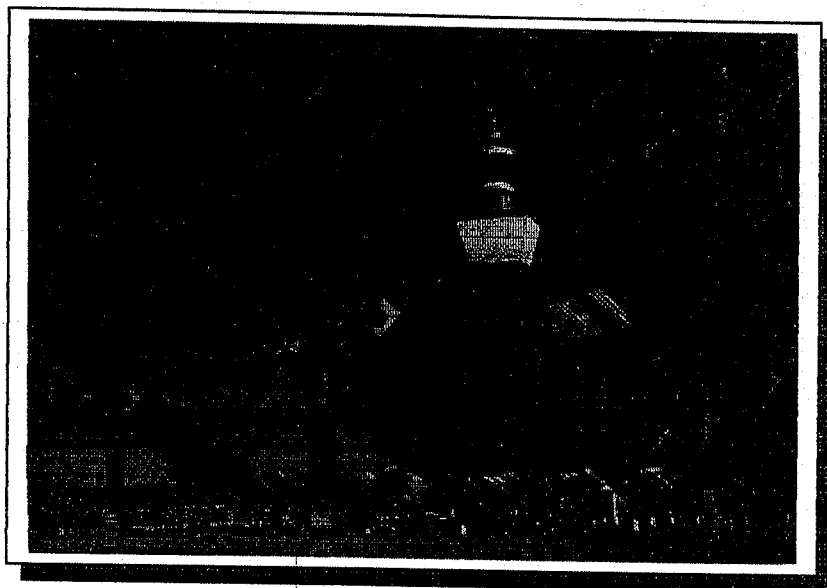
Trois problèmes se posent dans l'optimisation d'une chaîne à travers un dispositif à base d'un microprocesseur :

- Assurer en permanence l'adaptation statique (rechercher le point de fonctionnement assurant le transfert d'une puissance maximale entre le générateur et la charge) ainsi que l'adaptation dynamique qui doit assurer un comportement linéaire pour des petites variations autour d'un point de fonctionnement (contrôle des régimes transitoires).
- Choix des algorithmes de commande qui peuvent être:
 - La méthode du générateur et du récepteur
 - La méthode de recherche extrémale .
 - La méthode du compensateur d'état .
- La gestion des algorithmes et la commande des adaptateurs qui peut être réaliser à l'aide d'une centrale d'acquisition de données et de gestion de processus qui peut fonctionner en mode centralisé ou en mode hiérarchisé.

C H A P I T R E I

Propos sur l'utilisation de l'énergie solaire

- 1. Introduction.**
- 2. Les essais d'utilisations industrielle de l'énergie solaire.**
- 3. Le choix d'une installation solaire.**
- 4. La rentabilité énergétique d'un processus solaire.**
- 5. La rentabilité financière d'une option solaire.**
- 6. Conclusion**



1.1 Introduction

Les premières civilisations ont déifié le soleil car il ne pouvait échapper à l'observation que toute la vie sur ^{terre} ~~toute~~ était régie par lui. Le soleil entretient la vie mais il est aussi à l'origine des richesses énergétiques fossiles (actuellement fortement hypothéquées) puisque le charbon, le pétrole, la tourbe résultent de la photosynthèse contemporaine des ères géologiques passées. Le bois a été la seule ressource énergétique jusqu'au début du dix-neuvième siècle en Europe. Le soleil gère aussi le capital des richesses énergétiques renouvelables en lesquelles nous plaçons l'espoir d'une exploitation rationnelle et maximale:

Le cycle de l'eau alimente déjà depuis longtemps la production d'électricité par la voie hydraulique. Le soleil est le moteur des grands déplacements des masses atmosphériques: l'énergie éolienne pas trop sauvage nous est accessible. De même le réchauffement des couches superficielles des océans nous paraît exploitable pour en récupérer l'énergie thermique.

1.2 Les essais d'utilisation industrielle de l'énergie solaire

Dans un livre très agréable à lire [9], **A.Mouchot** (1825-1911) a fait l'historique complet des premières spéculations intellectuelles et des tentatives d'utilisation de l'énergie solaire, principalement par les *pompes solaires*. Il y a décrit ses premiers travaux sur la réalisation de chaudières solaires. Pour favoriser la pénétration de ses idées, il avait abandonné un brevet d'invention pris en 1961.

On trouve dans [10] un résumé de la contribution de **A.Mouchot** à la propagation de l'idée de l'utilisation de l'énergie solaire à des opérations industrielles. Il a réussi à distiller les alcools, à produire de la vapeur pour obtenir de l'énergie mécanique. La démonstration la plus spectaculaire fut donnée à l'exposition universelle de 1878 où un générateur de vapeur à 6 atmosphères actionne une presse typographique. Il avait été secondé par **A.Pifre** qui avait amélioré le réflecteur qui, tronc.cônique à l'origine avec un angle au sommet de 45° , avait pris la forme de trois troncs de cônes successifs, la partie centrale ayant le même angle que précédemment (un modèle est visible au CNAM). Des expériences faites à **Montpellier** en 1881 avaient montré que le rendement du capteur solaire avec ce type de concentration et récepteur au foyer pouvait varier entre 0.49 et 0.85 selon les conditions atmosphériques les pertes par convection étant responsables de l'affaiblissement du rendement. **Mouchot** doit être considéré comme le véritable précurseur dans le domaine de l'utilisation de l'énergie solaire. Ses travaux avaient suscité d'autres expériences, de par le monde. Comme toujours lorsqu'il s'agit d'un commencement, ce n'étaient que de très sérieuses preuves de faisabilité.

Pour faire image, on peut dire qu'il y a presque autant de distance entre ces expériences et ce qu'il serait souhaitable d'atteindre aujourd'hui, qu'entre les premiers avions et les avions de ligne actuels.

Cela choquera peut-être, mais risquons nous à dire que la technologie est aujourd'hui très capable de réaliser presque tout ce qui lui est demandé alors que le niveau de maturité de la pensée en matière d'utilisation de l'énergie solaire n'a guère progressé depuis la fin du 19^e siècle. Pour préciser, les acquis scientifiques et techniques dans les problèmes de l'aviation ou de l'aérospatiale ont avancé presque au même pas que la technologie. Le haut degré de technologie atteint ouvre des espoirs sans limite dans le domaine solaire.

Dans son livre, **Mouchot** écrivait : «une des causes qui nuisent le plus au succès des applications nouvelles, c'est la tendance à s'exagérer l'importance des résultats obtenus et par suite à en tirer des conclusions dont on ne se donne pas assez la peine de vérifier l'exactitude».

Constatons que les conquêtes passées de la technologie ne peuvent que nous rendre optimistes pour l'avenir. S'il est besoin de se comporter sur des cas précis, considérons deux réalisations particulièrement explicites et spectaculaires: l'avion solaire et les centrales solaire à tour.

Une autre raison d'être optimiste peut être trouvée dans le fait qu'entre Janvier 1978 et Juillet 1981, 760 brevets et demandes de brevets d'invention relatifs à l'énergie solaire ont été déposés en France [11].

I.3 Le choix d'une installation solaire

Dressons le tableau des différents critères de choix d'une installation. On peut dénombrer les critères d'ordre technique, civique, de confort, financier (**Tableau I.1**) :

-
- **Critères techniques :**
 - Disponibilité d'une énergie utile .
 - En débit et en qualité suffisants.
 - A l'endroit et au moment voulus.

 - **Critères civiques :**
 - Economie d'énergie importée.
 - Substitution des énergies renouvelables aux énergies fossiles.
 - Respect de la sécurité publique et privée.
 - Respect de la sauvegarde de l'environnement.

- **Critères de confort :**
 - Facilité d'exploitation.
 - Réduction de l'encombrement.

- **Critères de moindre coût :**
 - A l'acquisition et à l'installation.
 - A l'entretien.
 - Au fonctionnement.

Tableau (I.1) : Différents critères de choix d'un équipement quelconque [12].

- a) En ce qui concerne l'aspect technique, l'estimation de la quantité suffisante est floue : la part d'inconnu dans l'avenir conduit parfois à un surdimensionnement. L'utilisation de l'énergie au moment voulu conduit à des solutions de stockage et d'automatisation ; un arbitraire réside dans la valeur du volume à stoker.

- b) Les critères civiques sont soumis à une législation (sécurité, pollution chimique et sonore, respect de l'environnement) ou à une incitation d'ordre fiscal (politique de l'économie d'énergie et de la substitution des énergies nouvelles aux énergies fossiles).

- c) Les critères de confort sont subjectifs quant au degré de confort nécessaire à chaque utilisateur. Celui-ci lorsqu'il est exigeant demande que l'exploitation soit aisée, que l'entretien soit peu fréquent et simple et que l'approvisionnement soit facile. Selon l'utilisateur concerné, il s'agit de clauses impératives ou plus modestement d'un compromis entre les avantages souhaités et le coût résultant (précision qu'en matière de chauffage des bâtiments, le confort physiologique est dénombré dans les critères techniques).

- d) Les critères financiers sont évidemment fortement dépendants des précédents. En particulier, les coûts de fonctionnement sont allégés lorsqu'on utilise une énergie à bon marché, mais cette option peut s'accompagner d'un investissement important.

On constate ainsi que le choix d'un équipement est éclairé par l'examen de différents critères qui ne sont pas de même nature et dont le classement par leur priorité relative est très malaisé. Par dessus tout, le choix est rendu difficile par le fait que ces critères ne sont pas indépendants.

Ajoutons qu'un certain degré d'arbitraire est décelable à tous les niveaux énumérés, ce qui conduit à dire ironiquement qu'un bon responsable d'entreprise se doit de se méfier des experts pour ne se baser que sur son flair.

De plus, quand on parle de l'énergie solaire, les jugements se brouillent car les passions surgissent [12].

1.4 La rentabilité énergétique d'un processus solaire [12]

Dans l'état actuel des choses, l'énergie consommée par l'industrie, donc l'énergie investie dans la construction d'une unité, est l'origine fossile. Une unité quelconque peut être considérée comme un convertisseur d'énergie qui – au départ, a investi un capital énergétique dans l'élaboration des matériaux et dans la mise en œuvre des éléments constitutifs de l'équipement.

En terme d'énergie, on peut définir *le temps de retour sur investissement énergétique TRIE* par le rapport de l'énergie totale investie dans l'équipement à l'énergie utile produite annuellement. C'est ainsi que l'on estime à un an le temps de retour pour une centrale nucléaire et à cinq ans environ celui relatif à une centrale électro-solaire à tour. *Le ratio de retour sur investissement énergétique RRIE* est le rapport de l'énergie investie à l'énergie utile fournie pendant la durée de vie de l'installation, soit :

$$RRIE = \frac{\text{En. investie dans l'équipement}}{(\text{En. utile sortant /an}) \times \text{Durée de vie}} = \frac{TRIE}{\text{Durée de vie}} \quad (\text{I.4.1})$$

On peut encore définir un critère d'exploitation globale de l'énergie pour la durée de vie de l'installation. L'exploitation d'un capital énergétique investi, auquel s'ajoute la consommation énergétique pendant la durée de vie, est d'autant plus favorable que la production d'énergie utile est élevée. On recherchera à accroître :

$$\rho_E = \frac{\text{En. utile sortante}}{\text{En. investie} + \text{En. entrante}} \quad (\text{I.4.2})$$

il existe une relation simple entre RRIE et ρ_E :

$$\frac{1}{\rho_E} = RRIE + \left(\frac{1}{\eta_E}\right) \quad (\text{I.4.3})$$

η_E : le rendement classique de l'exploitation d'énergie.

$$\eta_E = \frac{\text{En. utile sortante}}{\text{En. entrante}} \quad (\text{I.4.4})$$

la définition de ρ_E est applicable à tout équipement énergétique qui transforme un type d'énergie en un autre utilisable pour des fins particulières.

Illustrons ceci par le cas d'une centrale thermique productive d'électricité; $\eta_E=1/3$ et $RRIE=0.06$; on constate que ρ_E est pratiquement égal au η_E [12].

Ne revenons pas ici sur le fait que l'exploitation de l'énergie solaire est financièrement coûteuse et considérons uniquement la rentabilité énergétique. Les énergies investies dans un équipement sont prises sur les réserves de notre planète. Par contre, l'énergie solaire est d'origine externe; toute consommation d'énergie solaire bien conduite accroît nos richesses terrestres énergétique. Se plaçant du point de vue du capital terrestre, on peut affecter les énergies fossiles du facteur unité, tandis que l'énergie solaire est affectée du facteur nul. Selon cette convention, dans l'expression (I.4.2), l'énergie utile sortante appartenant au capital terrestre est affectée du facteur unité comme l'énergie investie. On obtient pour le critère d'exploitation de l'énergie solaire:

$$\rho_{ES} = \frac{\text{En. utile sortante}}{\text{En. investie}} \quad (\text{I.4.5})$$

et par suite, l'équation (I.4.3) se réduit à :

$$\rho_{ES} = 1/(RRIE) \quad (\text{I.4.6})$$

Ainsi, dans le cas d'une conversion d'énergie solaire, le critère d'exploitation globale de l'énergie s'associe à celui du ratio de retour sur investissement énergétique, l'un étant l'inverse de l'autre.

•prenons l'exemple d'une centrale électro-solaire à tour pour laquelle la durée de vie serait de 15 ans et le temps de retour de 5 ans:

$$RRIE=5/15 \text{ et donc } \rho_{ES}=3 \text{ [12]}$$

Tandis que la centrale thermique ne peut fournir qu'une énergie électrique égale environ au tiers de l'énergie fossile consommée, la centrale solaire fournit trois fois plus d'énergie électrique que l'énergie fossile consommée.

Du point de vue de l'économie des ressources fossiles mondiales, la centrale à tour est plus intéressante qu'une centrale thermique, même si le temps de retour sur investissement énergétique ne semble pas favorable.

1.5 La rentabilité financière d'une option solaire [12]

Il est confortable de résonner sur des énergies (tout au moins quand elles sort de même nature) car le joule d'aujourd'hui reste encore égale à lui-même dans les années suivantes. Par contre, un franc ne garde pas la même valeur dans le temps et la discussions devient difficile, toute hypothèse sur son évolution

pendant la durée de vie d'une installation étant fragile. Tant au plus, obtient-on des repères économiques.

Quand bien même une option solaire serait réputée onéreuse (ce qu'elle est aujourd'hui), elle pourrait néanmoins être décidée par l'individu financièrement aisé et enthousiasmé par le symbole d'une nouvelle éthique; pour favoriser des intérêts nationaux, l'état pourrait définir des « instants d'actions » dont les éléments se trouvent dans [11] et [13] et fléchir les hésitations du citoyen par une aide incitative.

Compte tenu des données disponibles aujourd'hui, on peut considérer comme financièrement rentable le chauffage à basse température, principalement dans le domaine de l'horticulture forcée par les serres solaires. Le chauffage de fluides à haute température à l'aide de miroirs concentrateurs est grevé par le coût de ceux-ci, même dans le cas d'une fabrication en série. Fonction, la production d'électricité par conversion thermodynamique (centrales à tour ou à chaudières réparties) risque de ne jamais être compétitive. Les spécialistes estiment q'un avenir prometteur est largement ouvert à la production d'électricité par conversion photovoltaïque car des procédés nouveaux de fabrication en série des piles peuvent à la fois abaisser les coûts et accroître la durée de vie tout en réduisant l'énergie investie.

En tout état de cause, il se confirme que, dans le domaine de l'énergétique solaire, on aura grand besoin d'ingéniosité et de froide persévérance avant d'atteindre la commercialisation d'un produit fiable et rentable.

I.6 Conclusion

Les considérations générales développés sur les différents critères qui éclairent le choix d'un équipement montrent qu'il s'agit de trouver une solution de compromis la mieux adapter aux objectifs. En ce qui concerne l'utilisation de l'énergie solaire, on est capable d'évaluer et de comparer les rentabilités énergétiques par des approches spécifiques.

L'analyse montre que, lorsque le rendement de la conversion d'énergie solaire en énergie utile est proche, à quelques points près, de son optimum thermique, il est plus avantageux de réduire l'investissement énergétique en agissant sur les procédés de fabrication de l'équipement que de chercher à gagner péniblement ces quelques points sur le rendement. ?

L'exploitation de l'énergie solaire étant une option politique, il convient d'alléger les contraintes financières par le recours à des mesures d'ordre civique incitatives d'un progrès technique. Il semble que les critères tels que [11] ou [13] pourraient servir de base à la définition d'un «instrument d'action».

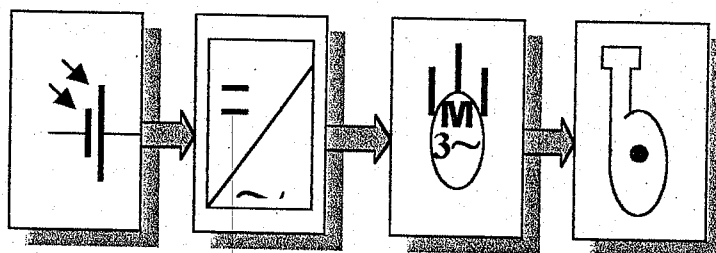
Dans le même temps, il conviendrait de dresser un tableau des rentabilités énergétiques obtenues dans les réalisations actuelles (chauffe-eau solaire, serre solaire, chauffage solaire des bâtiments, électricité solaire, biomasse, etc.) afin de dégager les actions nationales prioritaires.

CHAPITRE

II

Introduction au système de pompage photovoltaïque (PPV)

1. Généralités.
2. Configuration générale d'un système (PPV).
3. Conception des circuits de réglage .
4. Modélisation .
5. Configuration des circuits de réglage .
6. Dimensionnement des régulateurs .
7. Simulation numérique .
8. Phénomènes transitoires .



II.1 Généralités

Dans cette section introductive, on montrera d'abord la configuration générale d'un système de pompage photovoltaïque (PPV). On verra qu'un tel système comprend une installation électrique, une installation mécanique et des dispositifs de réglage et de commande, ainsi que des organes de mesures et des capteurs.

Dans ce niveau, il y a des liaisons avec la conception des systèmes automatiques, en particulier la conception des circuits de réglage. On rappellera les étapes principales à parcourir, les étapes importantes sont celles de la modélisation, du choix de la configuration des circuits de réglage, du dimensionnement des régulateurs et de la simulation numérique. On montrera que dans un système (PPV), il y a des phénomènes transitoires qui se déroulent dans des laps de temps très différents. Cela nécessite une adaptation de la modélisation selon le problème en question. [1]

II.2 Configuration générale d'un système PPV

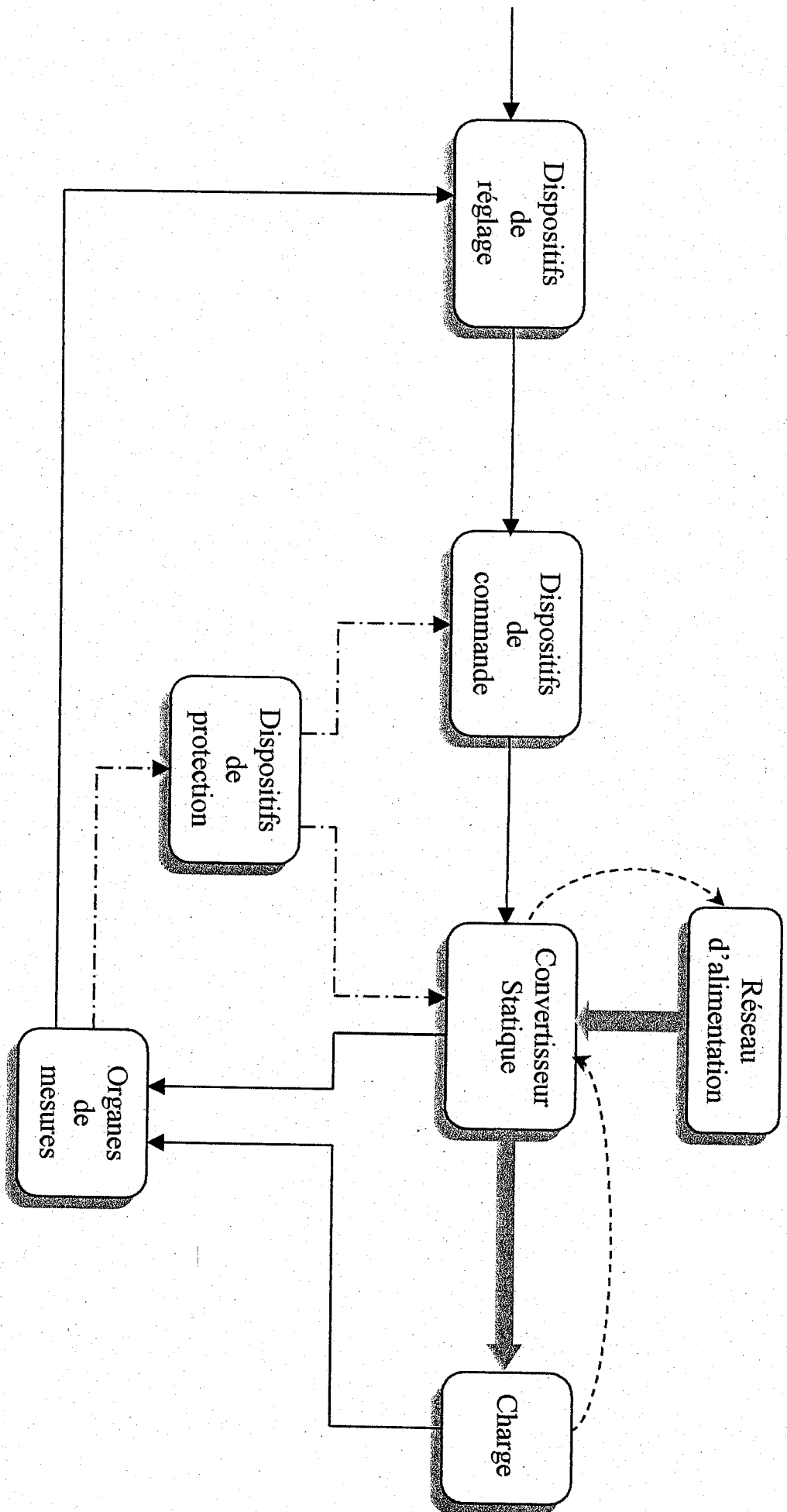
La figure (II.1) montre schématiquement la configuration générale d'un système PPV. Normalement, un tel système est assez complexe et se compose de plusieurs parties.

La partie centrale est constituée d'un convertisseur statique. Celui-ci est connecté à une source de tension continue (Accumulateur) où une source de puissance (Générateur photovoltaïque). Il s'établit *une fluence d'énergie* du réseau d'alimentation au travers du convertisseur statique vers la charge (flèches larges en noir). Cette dernière est le plus souvent constituée d'une machine électrique et d'une machine mécanique (moteur à courant alternatif entraînant une pompe, dans notre cas). Entre ces différentes parties, il existe *des rétroactions* (flèches en trait interrompu).

D'une part, la charge exerce une influence sur le convertisseur statique qui se manifeste par des chutes de tension ou d'autres effets. D'autre part, le convertisseur statique provoque des perturbations dans le réseau d'alimentation sous formes d'harmoniques en tension et en courant, de puissances réactives. [1]

Chaque système PPV a besoin de dispositifs de réglage appropriés, non seulement pour régler une certaine grandeur au niveau de la charge, mais aussi pour limiter des grandeurs internes et éviter des surcharges sur la charge et le convertisseur statique.

Par conséquent, il faut des circuits de réglage qui sont en général assez complexes. Ils ont besoin de signaux, fournis par des organes de mesure. De plus, il faut des dispositifs de commande afin de commander le convertisseur statique.



Figure(III.1): Représentation schématique d'un système (PPV).

On peut donc distinguer *une fluence de signaux* (flèches en trait continu) à partir du convertisseur statique, au travers de la charge, des organes de mesure vers les dispositifs de réglage, les dispositifs de commande et se terminant sur le convertisseur statique. Ici, il existe donc une boucle fermée : *le circuit de réglage*.

Il est indispensable de prévoir également des dispositifs de protection. Ils doivent déclencher rapidement une partie de l'installation en cas de dérangement grave, comme court-circuit, sur échauffement, désamorçage, etc. Les signaux correspondants sont fournis par des capteurs. La fluence des signaux pour l'intervention de la protection est représentée par des flèches en trait mixte. [1]

Comme on le voit, un système (PPV) présente toutes les caractéristiques d'un système automatique [2]. Par la suite, on s'occupera essentiellement des problèmes liés au réglage. Les montages et le fonctionnement des différents modules de l'installation et de leur commande sont décrits par la suite. Par contre, des indications en ce qui concerne la réalisation des dispositifs de réglage se trouvent dans [2].

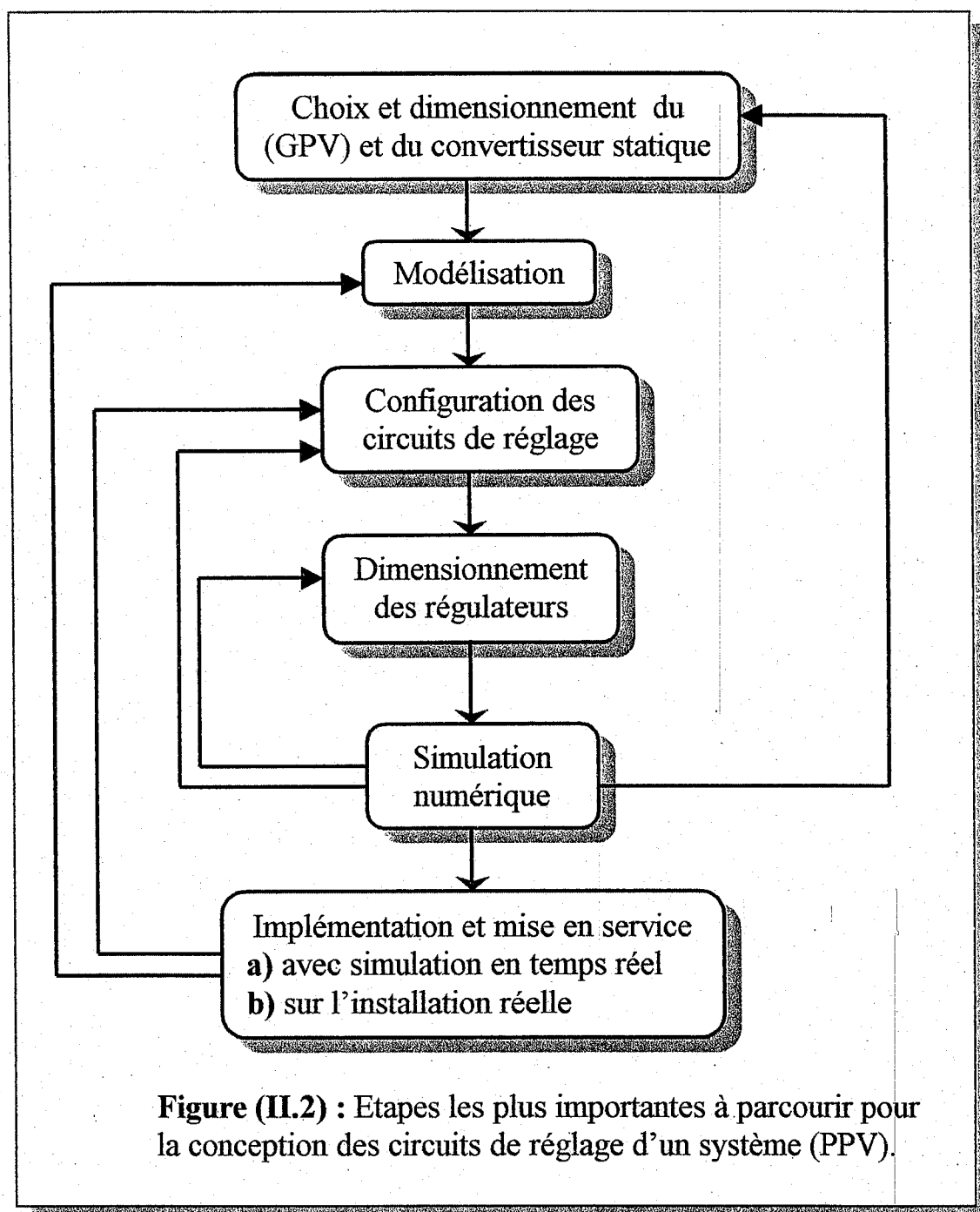
II.3 Conception des circuits de réglage

La *conception des circuits de réglage* d'un système PPV suit les mêmes démarches et étapes que pour n'importe quel système automatique ([2], chap.I). La figure (II.2) rappelle les étapes les plus importantes.

- La première étape, dans le cas présent, est le choix et le dimensionnement du générateur photovoltaïque ainsi que le convertisseur statique avec sa commande, adaptée à la charge. Evidemment, ce choix ne peut pas être fait indépendamment des exigences statiques et dynamiques posés au système global. Il doit être modifié lors de la simulation numérique lorsqu'il s'avère que les conditions posées aux circuits de réglage ne pouvant pas être respectées.

- Suit alors l'étape de la modélisation des différents modules de l'installation. Cette modélisation est indispensable pour les étapes de la configuration des circuits de réglage (choix de la structure), du dimensionnement des régulateurs et de la simulation numérique.

La dernière étape est alors l'implémentation par matériel et logiciel et la mise en service. Dans ce contexte, il est judicieux, si possible, de procéder d'abord à une simulation en temps réel ([2], sect. 14.5 et 14.6). Le générateur PV, le convertisseur statique et la charge sont remplacés par un simulateur. Les régulateurs réels (le plus souvent réalisés par des microprocesseurs) interviennent sur ce simulateur. Cela permet un test et une mise au point facile des circuits de réglage. Dans un deuxième temps seulement, on passe à la mise en service sur l'installation réelle.



II.4 Modélisation

L'étape de *la modélisation* est très importante. Il s'agit de la description mathématique du système à l'aide d'équation différentielles ou de fonction de transfert, mettant en évidence le comportement statique et dynamique et d'éventuels phénomènes non linéaires ([2], chap.3). Dans ce contexte, une représentation graphique par un diagramme structurel peut être utile.

Un problème particulier se pose avec le choix du degré de raffinement; si le modèle est trop simple, il est inutilisable et ne décrit pas suffisamment le

comportement réel. Si, par contre, le modèle est très complexe, il est également inutilisable, car il est surchargé de détails et ne permet pas de mettre en évidence le comportement dominant. En général, le degré de raffinement doit être adapté au phénomène à modéliser.

La modélisation du générateur PV, du convertisseur statique, celle des machines électriques et mécaniques (qui forment le plus souvent la charge), et celle des circuits de réglage fera l'objet du chapitre III.

II.5 Configuration des circuits de réglage

Dans le domaine des réglages, des structures particulières se sont imposées pour la *configuration des circuits de réglage*. Ainsi, pour limiter certaines grandeurs internes, on fait appel au principe du réglage en cascade. Il y a alors deux ou plusieurs superposés, chacun ayant la tâche de régler respectivement une grandeur interne ou la grandeur à régler principale.

Les régulateurs peuvent être des régulateurs classiques. Souvent, on obtient des prestations meilleurs avec des régulateurs d'état. Pour intervenir sur des variateurs de courant continu ou des onduleurs à pulsation, des régulateurs par mode de glissement peuvent être particulièrement favorable. La configuration des circuits de réglage sera présentée au chapitre III.

II.6 Dimensionnement des régulateurs

Avec le *dimensionnement des régulateurs*, on détermine les valeurs numériques des coefficients du régulateur de sorte que le circuit de réglage soit stable et bien amorti. Dans ce but, il est opportun de faire appel à un traitement pseudo-continu. Ainsi, malgré le fait que les régulateurs fonctionnent de manière échantillonnée, donc discontinue en fonction du temps, on n'a pas besoin d'utiliser la transformation en Z. Cela facilite beaucoup le problème du dimensionnement des régulateurs.

II.7 Simulation numérique

La *simulation numérique* revêt une importance primordiale lors de la conception des circuits de réglage. En effet, elle permet de vérifier si le choix de la configuration des circuits de réglage et le dimensionnement des coefficients des régulateurs ont été faits correctement. Si non, on doit revenir à une étape précédente et faire les corrections nécessaires.

Lors de cette simulation numérique, on calcule l'allure des phénomènes transitoires du système réglé, en se basant sur le modèle établi lors de l'étape de la modélisation. Dans ce contexte, le plus souvent, on doit tenir compte des non-

linéarités dues à des effets de limitation, de la quantification ou autres. Il est possible de résoudre le système d'équations différentielles global par une méthode numérique adéquate. Ce pendant, il est avantageux d'utiliser des programmes de simulation numérique existants. Dans certains cas, on peut partir directement d'un schéma bloc détaillé du système réglé, où chaque bloc représente une partie bien restreinte. Cela simplifier beaucoup la phase de préparation pour la simulation numérique .

Pour des considérations générales, on peut consulter la référence ([2], chapitre 14) et pour l'application des programmes de simulation aux manuels correspondants.

II.8 Phénomènes transitoires

Dans un système (PPV) apparaît une série de phénomènes transitoires qui se déroulent dans des laps de temps très différents. La figure (II.3) donne une indication grossière.

Les phénomènes de commutation dans les semiconducteurs de puissance modernes ont lieu dans un laps de temps situé entre quelques dizaines de ns et quelques μ s. Les commutations périodiques au niveau des convertisseurs statiques qui provoquent des harmoniques, ondulations et pulsations sont situées entre 10μ s et 10ms environ. Il y a alors les phénomènes de réglage qui durent typiquement entre 100μ s et 500ms. La poursuite de trajectoires, comme on la trouve dans des machines – outils, nécessite un laps de temps compris entre 100ms et 100s environ. Enfin, les phénomènes transitoires liés à l'échauffement vont de 10ms à plusieurs minutes pour les semiconducteurs de puissance et de quelques secondes à quelques heures pour les machines électriques.

Evidement, il est impossible d'établir un seul modèle qui couvre tous ces phénomènes. Ce modèle serait trop complexe et ne permettrait pas de mettre en évidence le comportement dominant en question. De plus, le temps pour une simulation numérique serait excessivement long. Il est donc opportun, voir même indispensable, de choisir un modèle adéquat selon le phénomène à étudier ([1], chapitre II et III) .

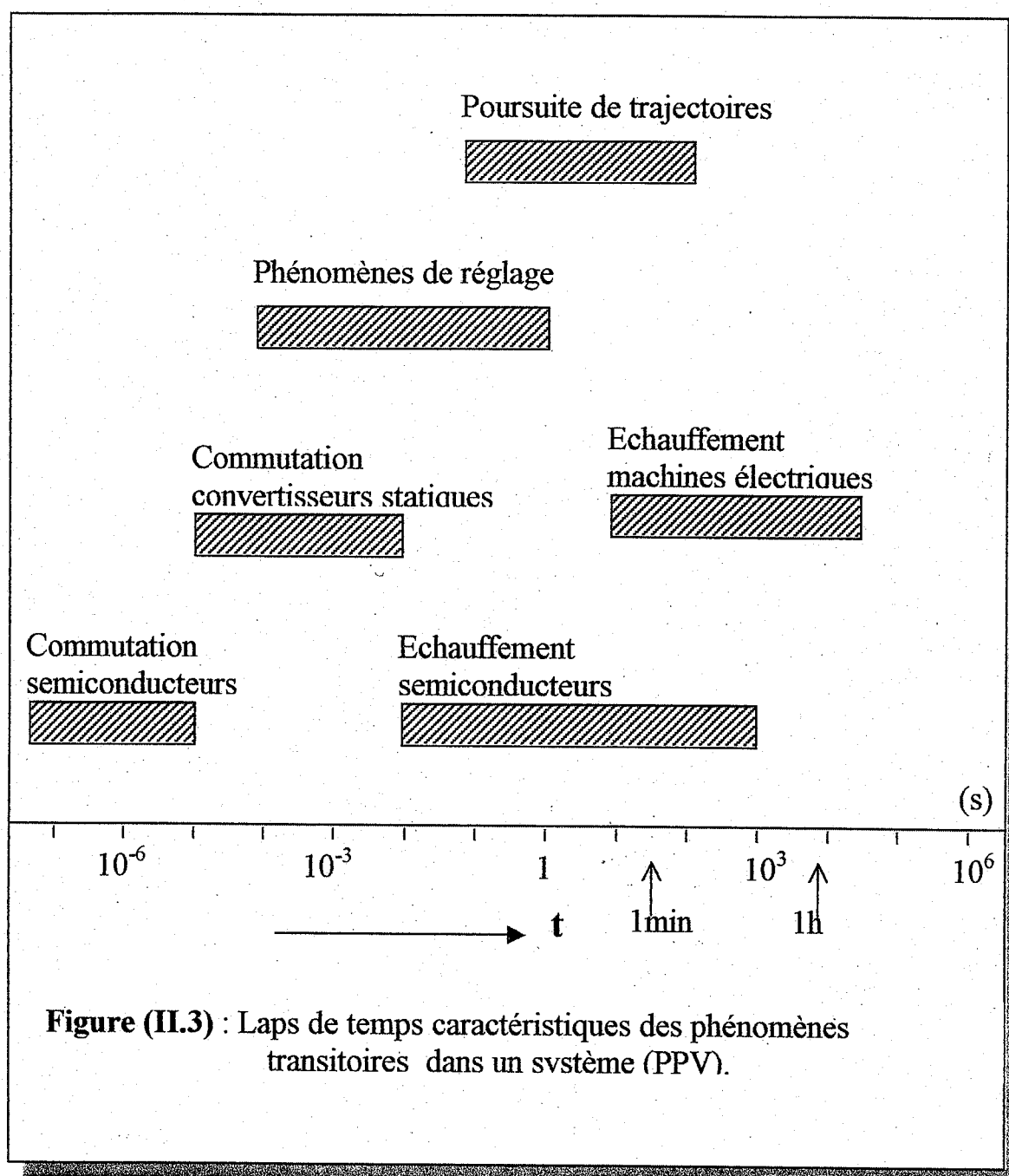


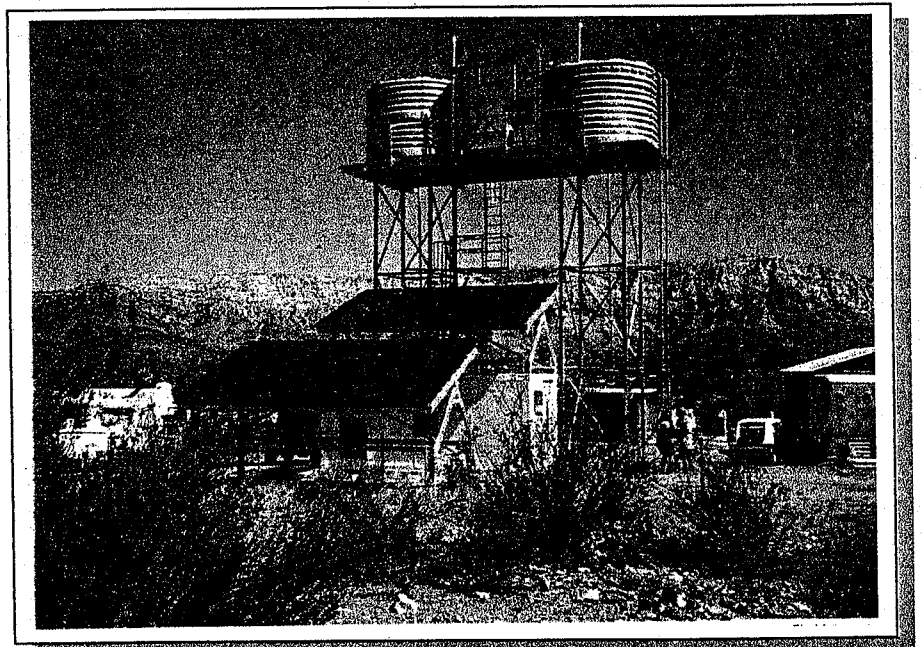
Figure (II.3) : Laps de temps caractéristiques des phénomènes transitoires dans un système (PPV).

C
H
A
P
I
T
R
E

III

CONCEPTION HARDWARE DU SYSTEME PPV

1. Générateur photovoltaïque (PV)
2. Adaptateur
3. Moteur asynchrone
4. Théorie des pompes
5. Accumulateur
6. Circuit de réglage
7. Conclusion générale



INTRODUCTION

Au-delà du module qui porte les cellules exposées au soleil, l'exploitation de l'électricité photovoltaïque passe par des systèmes dont le développement futur nécessite, pour chaque composant, un effort de recherche pour améliorer son économie et sa fiabilité. C'est particulièrement vrai du chaînon essentiel que constitue le stockage, la contrainte principale pesant sur la filière étant la nécessité de stocker l'électricité entre les périodes d'ensoleillement. On cherche entre autres à modéliser le fonctionnement des systèmes photovoltaïques en intégrant les évolutions des caractéristiques du stockage au fil du temps.

Le système photovoltaïque est l'interface entre l'utilisateur et la ressource, il met en forme l'énergie captée par les modules photovoltaïques selon les types d'applications. En plus d'une association de modules photovoltaïques, un onduleur permet de convertir le courant continu en courant alternatif pour une utilisation sur le réseau électrique. L'utilisateur peut alors consommer l'énergie qu'il produit ou la réinjecter dans le réseau électrique si, par exemple, les conditions de rachat par exploitant du réseau lui sont favorables. L'onduleur peut entraîner une pompe dans le cas d'un système de pompage dit « *au fil du soleil* »: de l'eau est alors refoulée dans un réservoir dimensionné selon les besoins du consommateur, pendant la journée, et restituée à la demande.

S'il est nécessaire de stocker l'énergie électrique produite, un parc de stockage sera introduit. La gestion de ce parc se fera alors via un régulateur: celui-ci se charge lorsque l'ensoleillement le permet, et alimente l'utilisation des que nécessaire. Un tel stockage permet, d'une part de pallier les alternances jour-nuit ainsi que plusieurs jours consécutifs de mauvaises conditions météorologiques, d'autre part de répondre à des besoins de puissance nettement supérieurs à ce que pourrait fournir instantanément le générateur photovoltaïque.

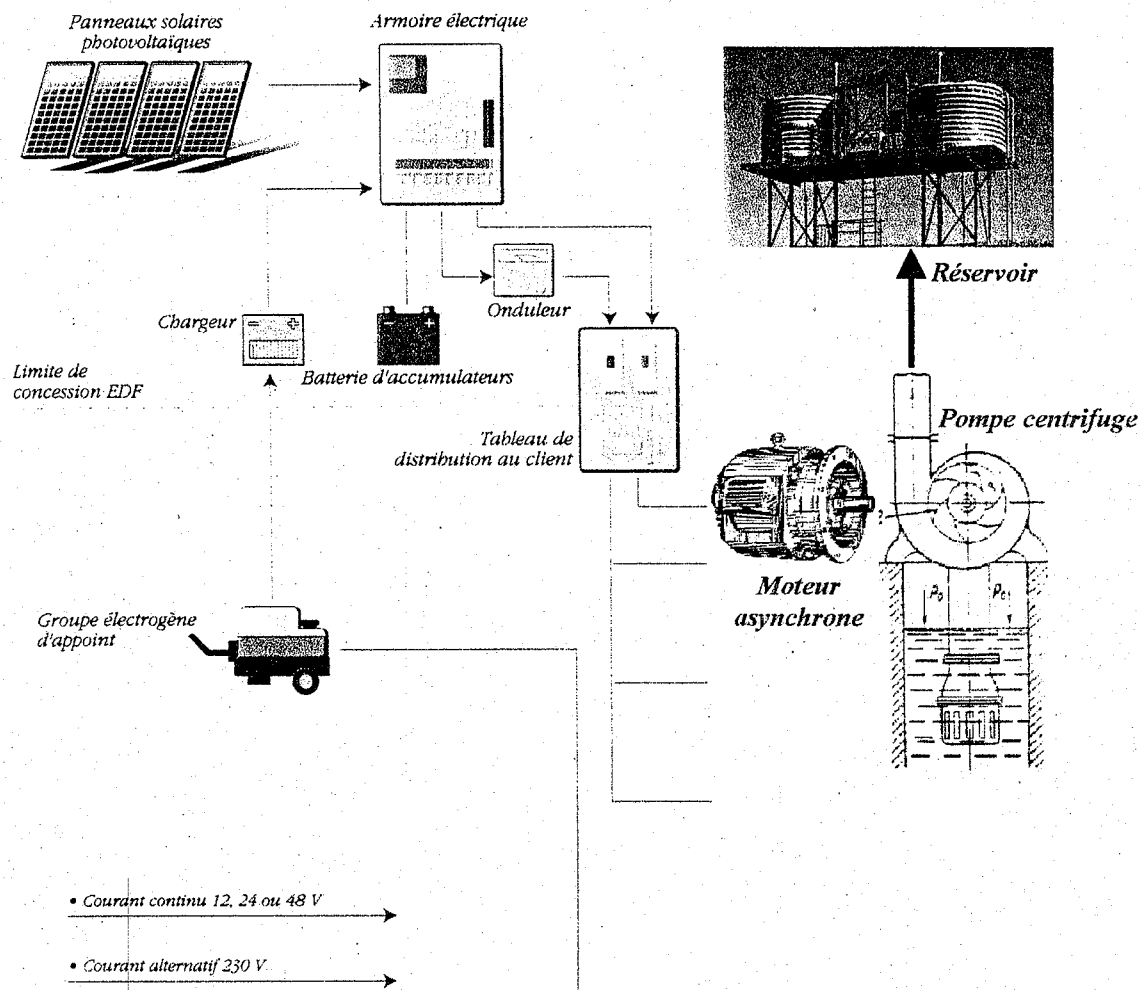
Ce type d'architecture se complexifie pour des applications plus importantes: afin d'éviter la mise en place d'un stockage trop imposant, et donc coûteux, un générateur auxiliaire tel qu'un groupe électrogène peut être retenu. Ce sera alors un système photovoltaïque dit « *hybride* », c'est à dire associant un générateur photovoltaïque à une source d'énergie, conventionnelle ou non. Si les conditions météorologiques sont favorables, l'association de plusieurs sources renouvelables « *photovoltaïque, éolienne ou micro-hydraulique* » est même envisageable.

Les axes de recherche et de développement sur tous ces systèmes visent principalement la baisse des prix de revient des services rendus. Cette baisse s'obtient en jouant sur les couples coûts/performances des composants constituant le système mais aussi sur des facteurs plus globaux de gestion et d'architecture du système.

Dans l'ordre d'importance des coûts d'investissement initiaux d'un système photovoltaïque hybride, par exemple le générateur photovoltaïque représente en moyenne 35%, le parc batterie 20%, les autres composants 20%, les sources d'énergie additionnelles « *groupe électrogène* » 10%, la logistique et l'installation 15%. L'intégration des coûts de maintenance, l'intervention et de remplacement de matériel « *parc de stockage par exemple* », bouleverse la ventilation des coûts dits de « *cycle de vie* »: le parc batterie en représente 50%, le générateur photovoltaïque 20% , les sources d'énergie additionnelles 15% et les autres composants 10% , la logistique de l'installation 5% .

La recherche sur les modules photovoltaïques à des retombées directe sur les coûts des systèmes tant en termes d'augmentation des performances et du rendement de conversion des cellules « *plus de puissances pour un prix constant* », qu'en termes de diminution des prix de production en travaillant sur les procédés de fabrication « *module photovoltaïque moins chère à puissance équivalente , voir les modules solaires photovoltaïque: du silicium cristallin aux couches minces* ». Il est raisonnable aujourd'hui d'estimer qu'une marge de gain existe qui permettrait de réduire de 30% le coût d'un système complet . les deux autres axes de recherche les plus importants ne sont pas à négliger. sur le parc de stockage, le gain potentielle est estimé à 50% s'il est, par exemple, possible de multiplier par deux la durée de vie de la batterie . sur les autres composants , il s'agit de minimiser les pertes de conversion: les onduleurs dits « *solaires* » sont bien plus performants que les onduleurs standards .leur rendement atteint 95% pour une consommation à vide de quelques pour-cent de leur puissance nominale alors que le rendement des onduleurs pour alimentation sans interruption dépasse à peine 80% avec une consommation à vide supérieur d'un ordre de grandeur. le prix est en conséquence.

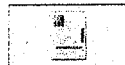
Principe de fonctionnement.



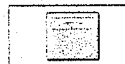
La production d'électricité est réalisée par des **panneaux solaires photovoltaïques** qui convertissent directement la lumière du soleil en électricité (courant continu).



Très souvent, il existe un décalage entre la période de production (ensoleillement) et les besoins de consommation. Il est donc indispensable de stocker l'électricité produite. Ce stockage s'effectue dans la **batterie d'accumulateurs**.



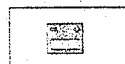
L'ensemble est dirigé par une **armoire électrique** qui comprend, en plus des systèmes de sécurité que doit comporter toute installation, un régulateur destiné à protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes.



Suivant le type d'installation, l'électricité pourra être délivrée en courant continu, en courant alternatif ou les deux simultanément. Le courant continu est transformé en courant alternatif par un **onduleur**.



Un **groupe électrogène** peut servir d'appoint pour recharger la batterie, ou fournir directement au 230 V pour alimenter des appareils grand consommateur d'électricité. Si nécessaire sa gestion sera précisée par convention.



Le **chargeur** permet la recharge de la batterie d'accumulateurs par le groupe électrogène en cas de mauvais temps prolongé.



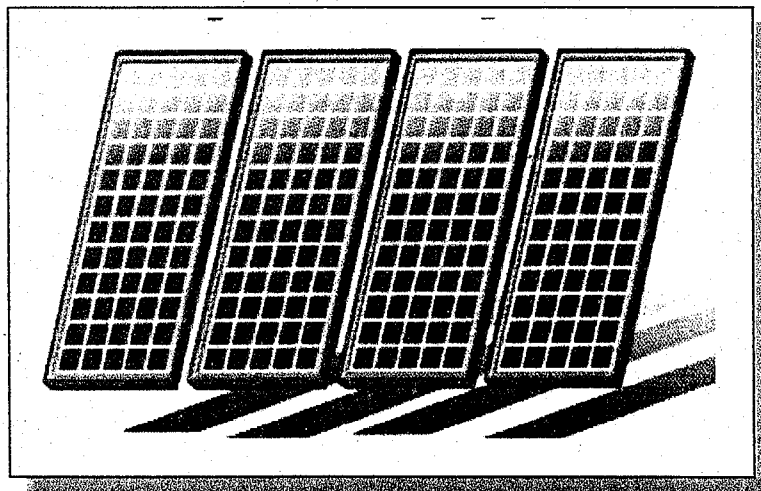
Pour l'installation intérieure, il est impératif d'utiliser des appareils économes en énergie : **lampe fluorescente compacte, réfrigérateur et conservateur performants**, etc.

III.1 GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

- 1- Etude de la conversion photovoltaïque.
 - a. *Cellule photovoltaïque idéale.*
 - b. *Circuit électrique équivalent.*
 - c. *Effets des résistances parasites sur la performance des cellules solaires.*

- 2- La centrale d'acquisition de données et de gestion de processus.
 - a. *La carte de mesure de tension.*
 - b. *Le BUS universel et la carte d'interface.*
 - c. *La carte de conversion numérique -analogique*
 - d. *La carte de mesure de puissance et énergie.*
 - e. *La carte de mesure de température.*

- 3- Les voies du future : les modules en couches minces .
 - a. *Cellule aux silicium monocristallin en film mince .*
 - b. *Cellules organiques : vers le tout polymère .*



Liste des symboles

- J_{sc} :Densité de courant –circuit .
- J_{s1} :Densité de courant de saturation à l'obscurité .
- V_{oc} :Tension de circuit-ouvert.
- P_{max} :Puissance maximale par unité de surface .
- f :Facteur de courbe .
- V_m :Tension maximale.
- J_m :Courant maximal.
- R_c^* :Charge optimale.
- S :Surface totale de la jonction.
- n_j :Facteur d'idéalité .
- R_s :Résistance série.
- G_{sh} :Conductance shunt.
- I_{ph} :Photocourant généré.
- I_{sc} :Courant de court-circuit.
- r :Résistance série réduite.
- g :Conductance shunt réduite.
- V_{oc0} :Tension en circuit ouvert du cas idéal.
- P_i :Flux lumineux incident.
- η_0 :Rendement idéal.
- f_0 :Facteur idéal.
- V_{mo} :Tension optimale du cas idéal.
- I_{mo} :Courant optimal du cas idéal.

III.1.1 Etude de la conversion photovoltaïque

a- Cellule photovoltaïque idéale

La première étape dans la conversion de la lumière solaire en énergie électrique est l'absorption de la lumière par le semi-conducteur. Lorsqu'un photon d'énergie supérieur à la bande interdite du semiconducteur est absorbé, un électron est excité et passe de la bande de valence à la bande de conduction. L'absorption de tels photons produit aussi une augmentation de la densité d'électrons dans la bande de conduction et une augmentation exactement égale de la densité de trous dans la bande de valence. Ces densités dépassent les valeurs des concentrations à l'équilibre, les électrons et les trous ont donc tendance à se recombiner. La présence de ces porteurs réduit simplement la résistivité du matériau mais ne peut créer une tension, autrement dit une puissance électrique en sortie, à moins qu'il y ait une non-homogénéité dans le système. Elle est due à une illumination non uniforme, à la présence de matériau hétérogène. Cette non-homogénéité implique la séparation de porteurs photogénérés et produit ainsi une phototension, alors que le déplacement de ces porteurs et leur recombinaison après séparation produit le photocourant.

Une cellule photovoltaïque est donc un dispositif optoélectronique à semiconducteur qui, sous une excitation optique, produit des paires électron-trous au voisinage d'une jonction dont le champ électrique interne collecte ces porteurs photogénérés. En effet, la conversion photovoltaïque est l'effet inverse de l'électroluminescence, laquelle convertit l'énergie électrique en radiation lumineuse. A l'obscurité, le comportement d'un tel dispositif peut être assimilé à la caractéristique : $J \sim \exp(qv / kT) - 1$ d'une jonction P-n idéale.

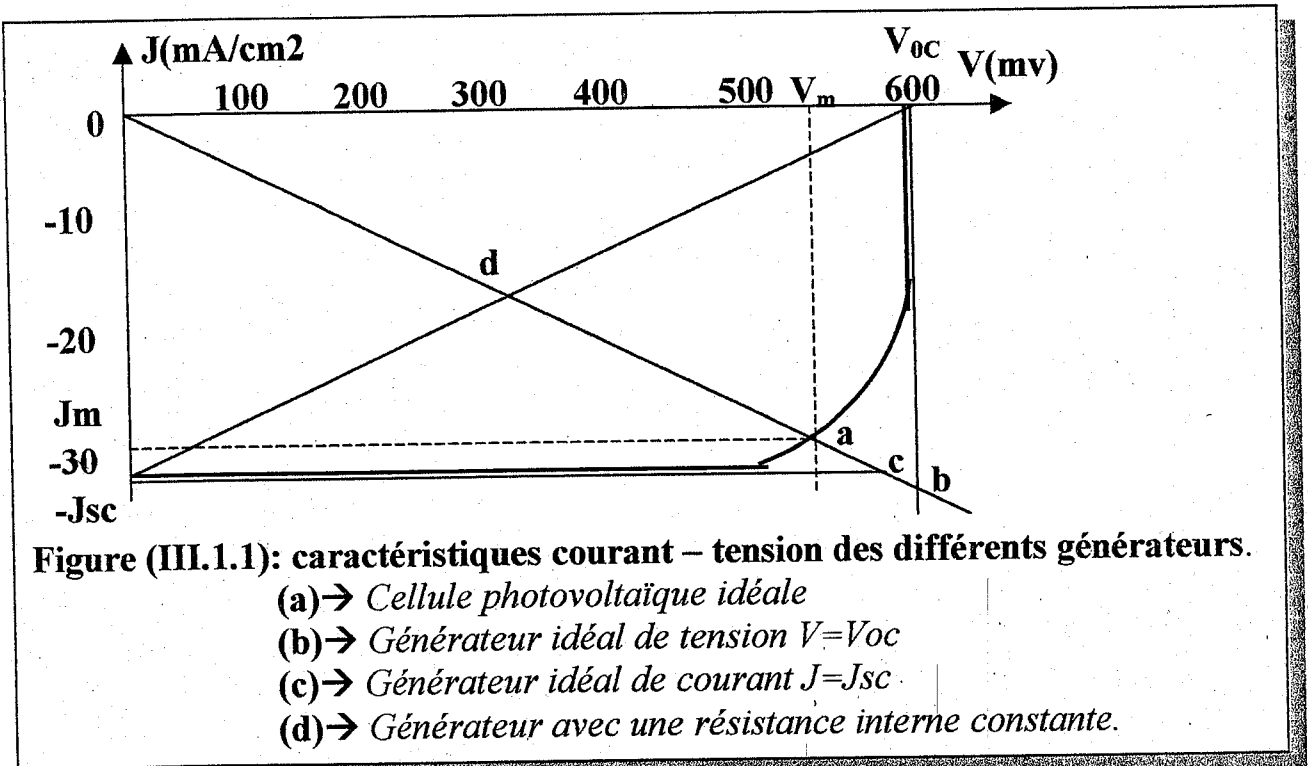
Sous illumination, une composante additionnelle de courant apparaît, ce qui provoque un décalage de la caractéristique le long de l'axe du courant par une quantité $-J_{sc}$ où J_{sc} est la densité de courant de court-circuit et est pratiquement indépendante de la tension. On prend habituellement le signe opposé pour le flux de courant alimentant une charge passive. La forme élémentaire de la caractéristique d'une photopile devient alors :

$$-J = J_{sc} - J_{s1} [\exp(qv/kT) - 1] \quad (III.1)$$

où J_{s1} : est la «densité du courant de saturation à l'obscurité».

Dans les dispositifs où le courant est contrôlé par le flux des porteurs minoritaires. J_{s1} est dû à la génération thermique de ces derniers dans le semiconducteur. On devrait le rendre minimal pour maximiser la tension de sortie

de la photopile. C'est le cas où la concentration des porteurs minoritaires dans la base est toujours faible devant celle des porteurs majoritaires.



Cette équation est illustrée par la figure (III.1). lorsqu'une charge est reliée à la cellule un courant est délivrée à la tension qui dépend de l'impédance de la charge. Si l'impédance est nulle la photopile génère une densité de courant de court-circuit J_{sc} proportionnelle à l'intensité lumineuse. Si la charge est déconnectée il apparaît une tension de circuit ouvert donnée par :

$$V_{oc} = (kT/q) \ln(J_{sc}/J_{s1} + 1) \quad (III.2)$$

La puissance maximale par unité de surface est délivrée lorsque l'impédance de charge est correctement adaptée, ce qui donne :

$$P_{max} = -J_m \cdot V_m = -f J_{sc} V_{oc} \quad (III.3)$$

Le facteur de courbe f , dépend de la forme de la caractéristique courant-tension.

Le point de puissance maximale est défini par : $(J, V) = (J_m, V_m)$. Pour un dispositif idéal c-à-d sans perte, le facteur f peut être exprimé par :

$$f = (V_m/V_{oc}) (1 - [\exp(qV_m/kT) - 1] / [\exp(qV_{oc}/kT) - 1]) \quad (III.4)$$

Enfin la charge optimale est donnée par :

$$R_C^* = -V_m / \delta J_m$$

(III.5)

Où δ est la surface totale de la jonction.

b- Circuit électrique équivalent

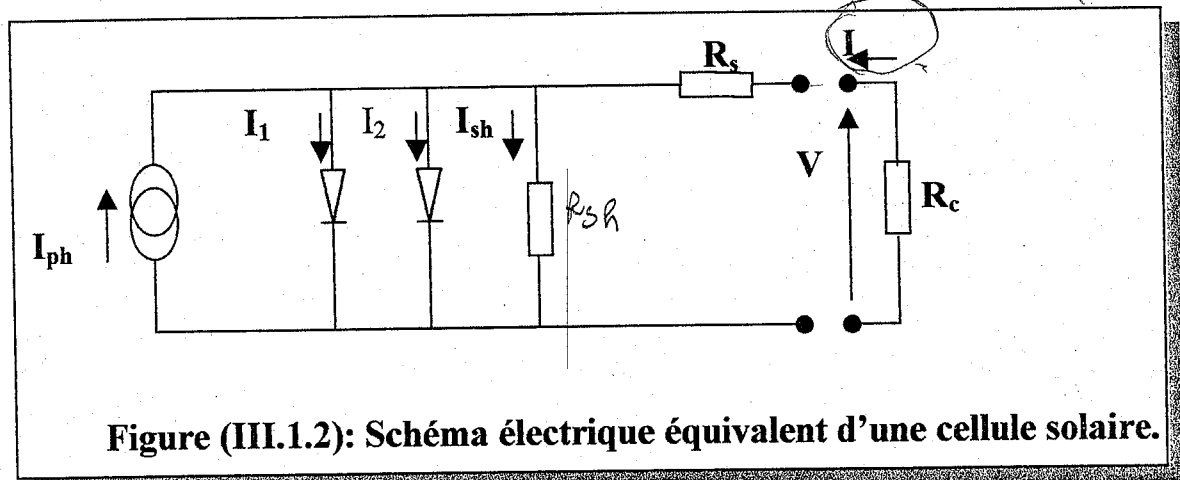


Figure (III.1.2): Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire.

Un dispositif photovoltaïque réel est généralement plus complexe et ne peut être représenté d'une façon convenable par l'équation (III.1). Une description plus précise est obtenue en tenant compte des caractéristiques additionnelles suivantes :

- a) Existence de composantes de courant non idéales de type $\exp(qV/kTn_j)$ où les facteurs d'idéalité sont $n_1 \cong 1$ et $n_2 \cong 2$ ou plus.
- b) Inclusion d'une résistance série R_s pour tenir compte de la différence entre la tension externe et celle qui apparaît à travers la jonction.
- c) Un terme de conductance shunt pour représenter le courant de fuite à travers la jonction.

Ceci peut être représenté par le circuit équivalent de la figure (III.1.2) naturellement, cette représentation n'est pas exacte car une cellule réelle est constitué d'un réseau réparti de cellules élémentaires connectées en parallèle sur une ligne de transmission. Néanmoins, il fournit une précision suffisante dans la plus part des cas et est largement utilisé comme schéma de référence dans l'analyse des performances photovoltaïques.

Les différentes composantes de courant sont définies par :

$$I_1 = I_{s1} [\exp\{B_1(V - R_s I)\} - 1] \tag{III.6}$$

$$I_2 = I_{s2} [\exp\{B_2(V - R_s I)\} - 1] \tag{III.7}$$

$$I_{SH} = G_{SH} (V - R_s I) \tag{III.8}$$

$$I = -I_{PH} + I_1 + I_2 + I_{SH} \tag{III.9}$$

Où I_{PH} est le générateur idéal de courant représentant le photocourant généré et les paramètres B_1 et B_2 ont leur signification habituelle :

$$B_1 = q/n_1kT \quad \text{et} \quad B_2 = q/n_2kT \quad \text{(III.10)}$$

Le courant de court-circuit devient sensiblement inférieur à I_{PH} en valeur absolue si les pertes résistives R_s et G_{SH} sont importantes.

- En faisant $V=0$ dans l'équation (III.9) nous obtenons :

$$I_{sc} = \left\{ -I_{PH} + \sum_{j=1,2} I_{s_j} [\exp(-B_j R_s I_{sc}) - 1] \right\} / (1 + R_s G_{SH}) \quad \text{(III.11)}$$

En pratique les termes impliquant I_{s_1} et I_{s_2} sont très inférieur à I_{PH} , le courant de court-circuit peut donc être approché par :

$$I_{sc} \cong -I_{PH} / (1 + R_s G_{SH}) \quad \text{(III.12)}$$

- En faisant $I=0$ dans l'équation (III.9), la tension de circuit ouvert est définie maintenant par :

$$I_{PH} = I_{s_1} [\exp\{B_1 V_{OC}\} - 1] + I_{s_2} [\exp\{B_2 V_{OC}\} - 1] + G_{SH} V_{OC} \quad \text{(III.13)}$$

La solution de l'équation (III.13) peut être évaluée par :

$$V_{OC} \leq \text{Min}(V_{OC1}, V_{OC2}, V_{SH}) \quad \text{(III.14)}$$

Où $V_{SH} = I_{PH}/G_{SH}$, $V_{OCj} = \{\ln(I_{PH}/I_{s_j} + 1)\}/B_j$, ($j=1,2$)

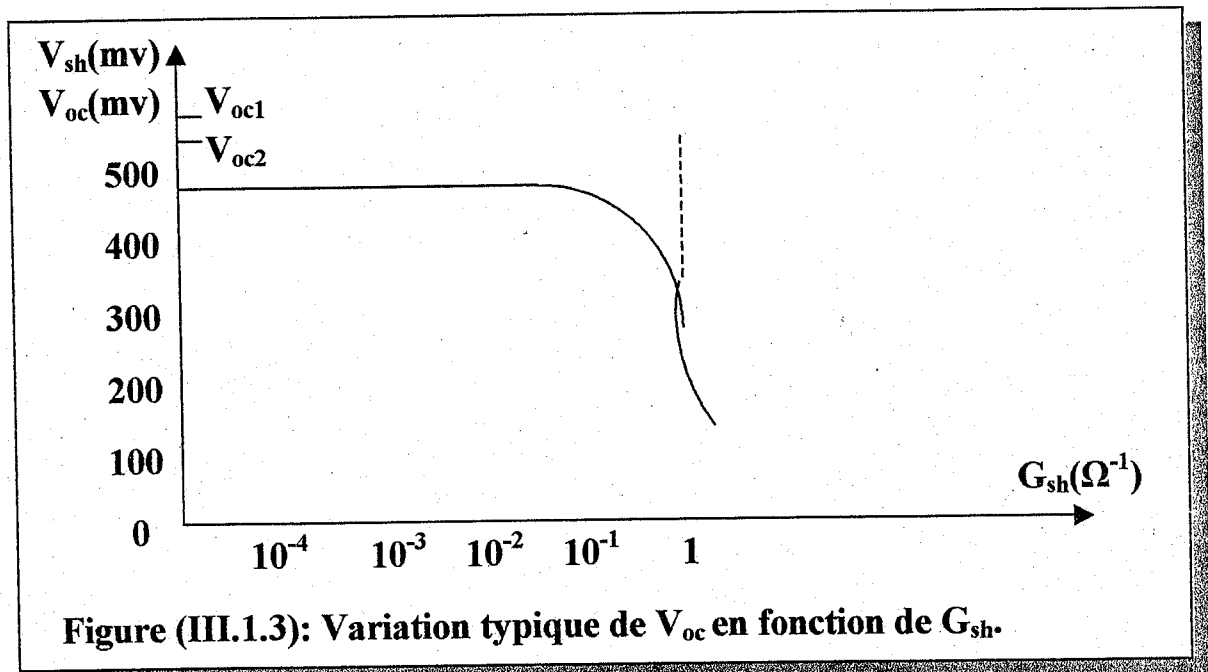
En supposant qu'une composante de courant est prédominante devant les deux autres. Prasad [3] a étudié l'influence du rapport I_{s_1}/I_{s_2} sur la tension de circuit ouvert. Ses conclusions sont :

- La réduction du V_{oc} est due à la présence d'une composante I_2 non nulle.
- Typiquement, pour $n_1=1$, $n_2=2$, $G_{SH}=0$ et $I_{s_1}=10^{-11}$, la valeur de V_{oc} tend vers V_{oc1} pour des rapports I_{s_1}/I_{s_2} supérieur à $8 \cdot 10^4$.
- La réduction de V_{oc} dépend aussi du mode de variation du courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace avec la tension appliquée, c-à-d cette réduction est nettement plus importante lorsque le courant de recombinaison est du type $[\exp\{qV/kT\}-1]$. ce qui correspond au cas où les

pièges superficiels sont présents au voisinage de la jonction [3] que lorsqu'il suit le cas idéal soit $[\exp\{qV/2kT\}-1]$.

Cependant Prasad n'a pas tenu compte de la composante I_{SH} dans ses calculs. Ceci nous amènes donc à la résolution numérique de l'équation (III.13) pour étudier l'influence de la conductance shunt sur la tension du circuit ouvert et sur le rendement global de la photopile.

La figure (III.3) montre la variation de G_{SH} avec V_{OC} ainsi que les bornes supérieures V_{OC1} , V_{OC2} et V_{SH} .



Typiquement, avec $n_1=1$, $I_{S1}=10^{-11}A$, $n_2=2$, $I_{S2}=10^{-6}A$, $I_{PH}=0.03A$ et $T=300^{\circ}k$, l'abaissement de la tension du circuit ouvert devient supérieur à 3.5% pour des conductances shunt supérieures à $0.02\Omega^{-1}$.

Finalement, on peut montrer, après un calcul différentiel simple, que la charge optimale dans le cas du schéma équivalent de la figure (III.2) devient :

$$R_C^* = \frac{V_m}{I_m} = R_s + 1/G_{SH} + \sum_{j=1}^2 I_{Sj} B_j \exp(B_j \{V_m - R_s I_m\}) \quad (III.15)$$

Resistance + Resistance + Courant

En effet la charge optimale est aussi définie par : (dV_m/dI_m) .

Kothari et al.[4] ont montré une expression analogue concernant le cas d'un seul mécanisme de transport mais en appliquant sur la relation courant-tension, une méthode relativement plus longue c-à-d celle des multiplicateurs de Lagrange.

c- Effet des résistances parasites sur la performance du C.S

Considérons la résistance série réduite et la conductance shunt réduite définies respectivement par :

$$r = -R_s I_{ph} / V_{oc0} \quad \text{et} \quad g = -G_{sh} V_{oc0} / I_{ph} \quad (\text{III.16})$$

où V_{oc0} est la tension en circuit ouvert du cas idéal. Soit $R_s=0$ et $G_{sh}=0$. En pratique, pour un fonctionnement normal des cellules solaires, ces paramètres sans dimension peuvent être approchés par :

$$r = R_s I_{sc} / V_{oc} \quad \text{et} \quad g = G_{sh} V_{oc} / I_{sc} \quad (\text{III.17})$$

Il semble que **Green[8]** ait été le premier à introduire ces dernières quantités pour étudier principalement leur effet sur le facteur de courbe. Cependant l'objectif de cette section est d'étudier l'effet de ces paramètres d'une part, sur le facteur de courbe et d'autre part sur le rendement (η) du dispositif qui est égal au rapport de la puissance maximale débitée (**Pmax**) et celle du flux lumineux incident (**Pi**). Les développements de **Taylor** limité au 1^{er} ordre autour du cas idéal sont :

$$\eta(r,g) = \eta_0 \left[1 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial r} \right)_0 \cdot \frac{r}{\eta_0} + \left(\frac{\partial \eta}{\partial g} \right)_0 \cdot \frac{g}{\eta_0} \right] \quad (\text{III.18})$$

$$f(r,g) = f_0 \left[1 + \left(\frac{\partial f}{\partial r} \right)_0 \cdot \frac{r}{f_0} + \left(\frac{\partial f}{\partial g} \right)_0 \cdot \frac{g}{f_0} \right] \quad (\text{III.19})$$

où η_0 et f_0 sont respectivement le rendement idéal et le facteur de courbe idéal. En effectuant les manipulations algébriques nécessaires, on peut montrer que les dérivées partielles relatives sont reliées par :

$$\left(\frac{\partial f}{\partial r} \right)_0 / f_0 = \left(\frac{\partial \eta}{\partial r} \right)_0 / \eta_0 - \left(\sum_{j=1}^2 I_{sj} B_j \right) r_{oc0} / I_{ph} \quad (\text{III.20})$$

$$\left(\frac{\partial f}{\partial g} \right)_0 / f_0 = \left(\frac{\partial \eta}{\partial g} \right)_0 / \eta_0 - \frac{I_{ph} / V_{oc0}}{\left[\sum_{j=1}^2 I_{sj} B_j \exp(B_j V_{oc0}) \right]} \quad (\text{III.21})$$

$$\left(\frac{\partial f}{\partial r} \right)_0 / \eta_0 = \left[\left(\frac{\partial \eta}{\partial g} \right)_0 / \eta_0 \right]^{-1} - \left(V_{oc0} / V_{m0} \right) \left(I_{m0} / I_{ph} \right) \quad (\text{III.22})$$

où V_{m0} et I_{m0} sont respectivement la tension et le courant du point de fonctionnement optimal du cas idéal.

Ces paramètres sont déterminés par les expressions suivantes :

$$I_{m0} = -I_{ph} + \sum_{j=1}^2 I_{sj} [\exp(B_j V_{m0}) - 1] \quad (III.23)$$

$$V_{m0} = -I_{m0} / \left(\sum_{j=1}^2 I_{sj} B_j \exp(B_j V_{m0}) - 1 \right) \quad (III.24)$$

Après un calcul numérique on aboutit aux résultats suivants :

- i- Le rapport $\left(\frac{\partial \eta}{\partial r} \right)_0 / \eta_0$ de la dérivée partielle du rendement en fonction de r sur le rendement idéal varie entre 1.06 à 1.13.
- ii- La somme $\left[\left(\frac{\partial \eta}{\partial r} \right)_0 / \eta_0 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial g} \right)_0 / \eta_0 \right]$ est pratiquement constante .

En effet elle varie entre 1.998 à 2.006. Nous pouvons ainsi déduire une expression semi-empirique simple pour le rendement η du types :

$$\eta = \eta_0 [1 + 1.10 r + 0.908] \quad (III.28)$$

Cette expression peut être évaluée à mieux de 6% près pour une résistance réduite $0 \geq r > -15\%$ et une conductance réduite $0 \geq g > -15\%$. Dans tous les cas, le programme calcule les valeurs de f et η avec une bonne précision pour un ensemble de paramètre d'entrée définis préalablement.

D'après les équations (III.20) et (III.21) et pour un fonctionnement normal sous illumination, une expression semi-empirique peut être déduite du facteur de courbe:

$$f = f_0 \left[1 + 1,1r \left\{ \left(0,9 - I_{PH} / V_{OC0} \right) / \left[\sum_{g=1}^2 I_{Sj} R_j \cdot \exp(B_j V_{OC0}) \right] \right\} \right] g \quad (III.26)$$

Hall[6] a présenté une expression empirique similaire mais n'a pas tenu compte de l'effet de la conductance Shunt. **Green[5]** a proposé une relation empirique entre f et la conductance réduite g en négligeant l'effet de la résistance série. L'expression (III.26) fait donc la synthèse des effets de r et g et elle correspond à un résonnement plus rigoureux en tenant compte des mécanismes de transport multiples[7].

III.1.2 La centrale d'acquisition de données et de gestion de processus [2].

Cette centrale est construite de manière modulaire de telle sorte que l'on peut choisir sa configuration pour chaque application.

Chaque carte est entièrement autonome et permet par multiplexage des mesures sur seize ou trente deux voies avec chargement de gamme automatique.

Toutes les cartes sont connectées à un BUS normalisé. Cette solution permet par l'adjonction d'une simple carte d'interface de piloter la centrale par des mini ou micro-ordinateurs aux performances très variées.

La conception modulaire de l'ensemble minimise les problèmes de maintenance.

L'emploi d'un mini-ordinateur pour piloter la centrale, permet d'en élargir l'utilisation au contrôle de processus : des calculs peuvent être effectués à partir des mesures relevées et des consignes peuvent être affichées par l'intermédiaire d'une carte de conversion numérique-analogique.

Dans la version utilisée pour notre application, la centrale comporte essentiellement :

❖ **La carte de mesure de tension.**

Cette carte dont le schéma synoptique est donné sur la figure (III.3.1) effectue des mesures dans une gamme allant de plus ou moins 1v à plus ou moins 1000v.

Le changement de gamme est automatique et des mesures peuvent être effectuées sur 8 ou 16 voies par multiplexage. Le temps d'adressage d'une voie et le temps de mesure sont de l'ordre de 100 microsecondes. L'impédance d'entrée est de $1M\Omega$, la précision de mesure est de 0,5% sur toute la gamme.

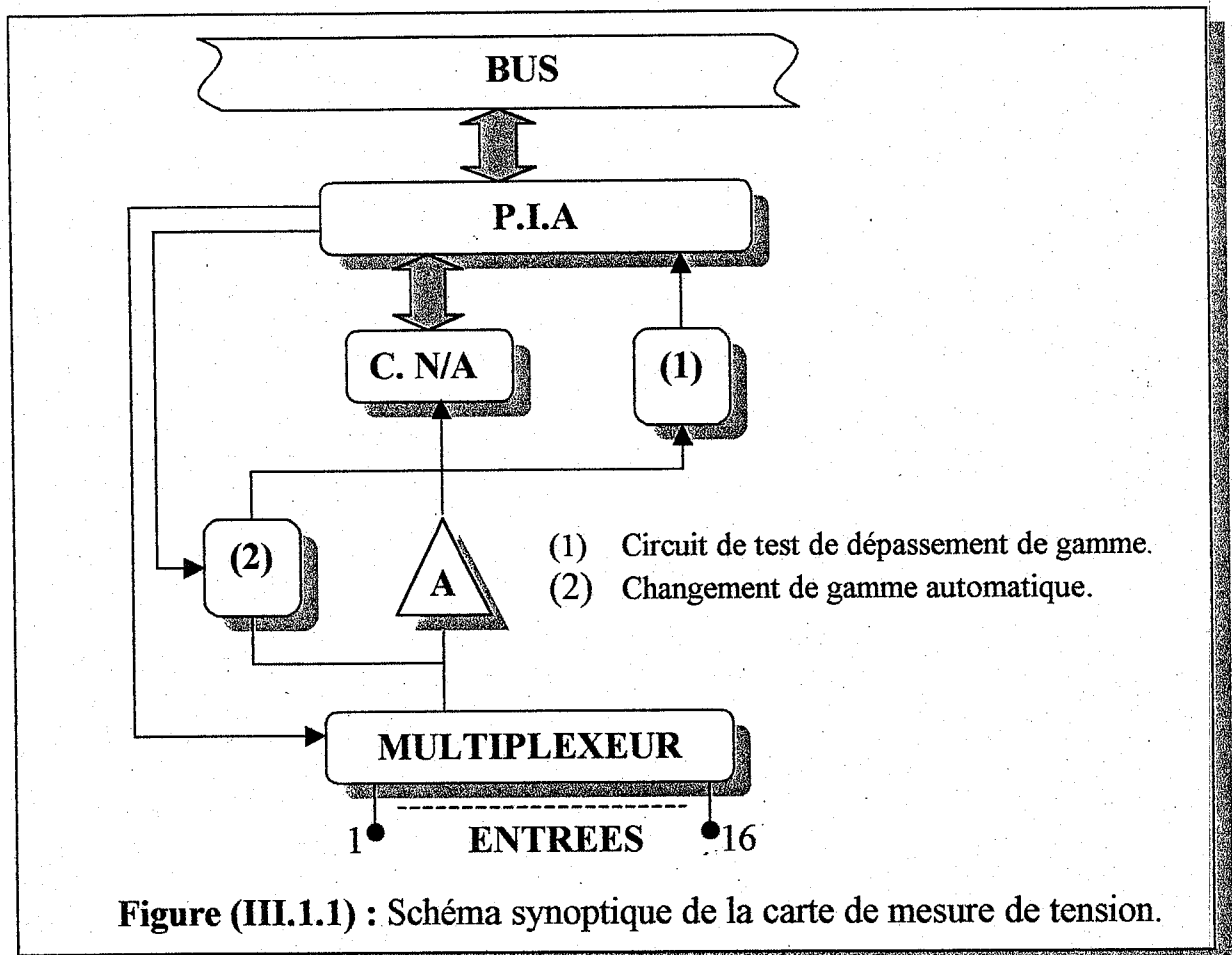
Les mesures effectuées sont celles de tension et de courant qui doivent être faites par rapport à des références quelconques (mesures flottantes). La mesure de tension est faite par l'intermédiaire d'un amplificateur différentiel et celle de courant par l'intermédiaire d'un amplificateur d'isolement ($V_{diff} \ll V_{ref}$).

❖ Le BUS universel et la carte d'interface.

Ce BUS permet l'inter connexion des différentes cartes. Son organisation est la suivante :

- 16 Lignes d'adresses (extensibles à 20 lignes).
- 8 Lignes de données (extensibles à 16 lignes).
- 8 Lignes pour les signaux de contrôle.
- 4 Lignes pour les alimentations.

La carte d'interface permet la liaison de la centrale avec différents types de calculateurs. Son but est de rendre les signaux de commande utilisés par les différents micro-ordinateurs compatibles avec ceux utilisés par la centrale.

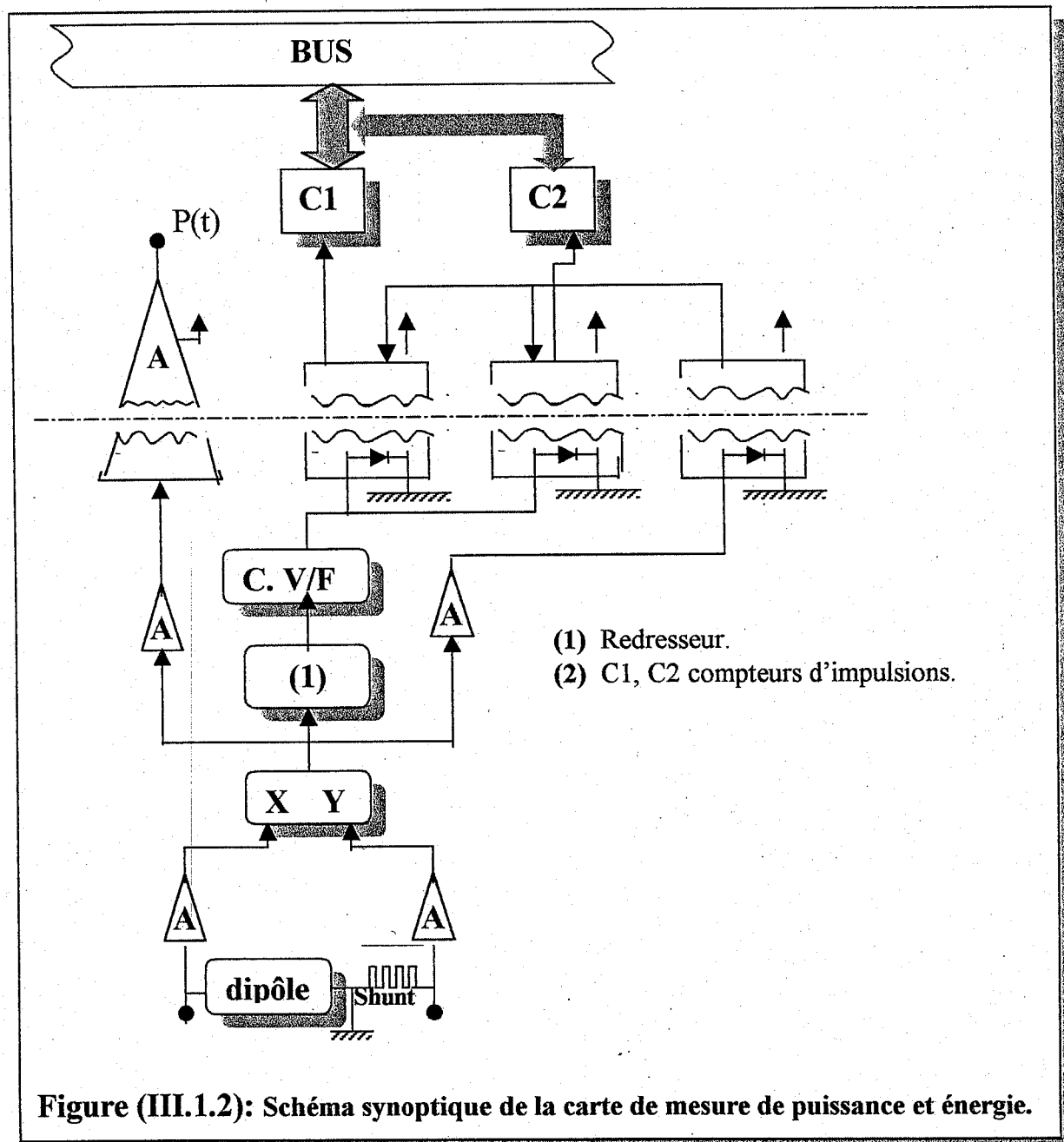


❖ La carte de conversion numérique -analogique

Elle communique avec le BUS universel par l'intermédiaire d'une porte d'entrée-sortie associée à un décodeur d'adresse. Pour une utilisation plus rationnelle de la porte (24 broches de sortie), deux convertisseurs 8 bits sont montés sur une même carte, leur commande étant multiplexée.

❖ La carte de mesure de puissance et énergie.

Utilisée pour la gestion globale de l'énergie, son schéma synoptique est représentée sur la figure (III.3.2).



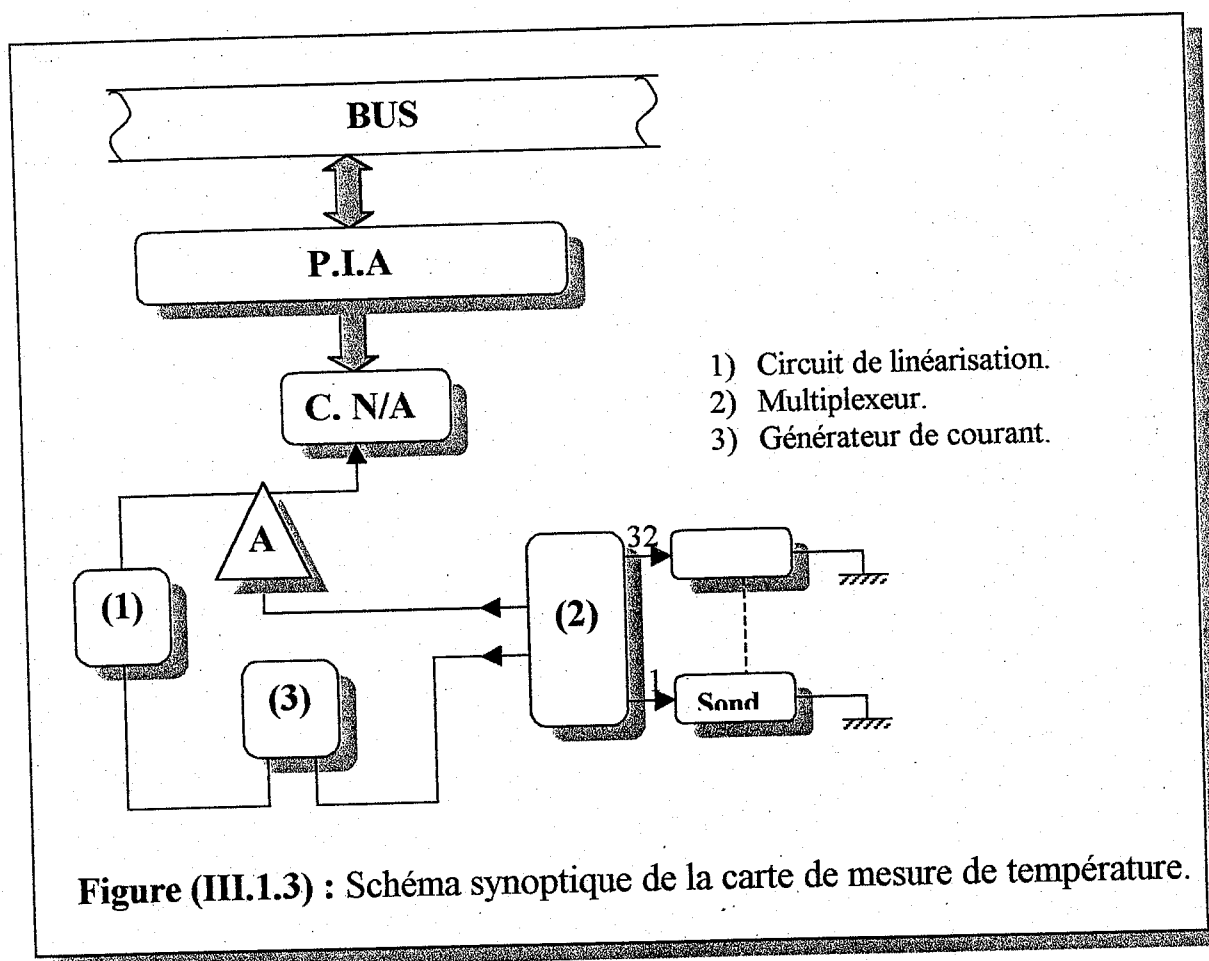
La gamme des puissances mesurées s'étend de quelques watts à plusieurs kilowatts. Les tensions appliquées peuvent varier de 1 à 1000v et les courants mesurés à l'aide d'un shunt de 1A à 100A.

Les grandeurs électriques mesurées peuvent avoir des fluctuations de fréquence maximale jusqu'à quelques dizaines de Hertz . Dans certains cas, le récepteur peut renvoyer de l'énergie sur le générateur et il est alors nécessaire de

pouvoir mesurer des puissances et des énergies négatives. Pour des campagnes de mesures, le calcul de l'énergie doit pouvoir se faire sur une période de plusieurs mois. Le dispositif de mesure de la tension et du courant ainsi que le système de calcul de la puissance sont isolés galvaniquement de la centrale de mesure. La précision des mesures est de 5%.

❖ La carte de mesure de température.

Outre son emploi lors de la transmission d'énergie, il est à noter que la centrale peut aussi être utilisée pour effectuer des mesures physiques. C'est dans cette perspective qu'a été développée une carte de mesure de température. Son schéma synoptique est donnée sur la figure (III.3.3) ci-dessous :



Elle permet des mesures sur 32 voies.

Les capteurs sont des sondes de platine qui, quoique d'un coût plus élevé, présentent l'avantage d'une grande fiabilité et d'une précision élevée. L'interchangeabilité est facilement assurée car les caractéristiques de ces capteurs sont constantes.

- La gamme de température utilisée est de -100°C à $+300^{\circ}\text{C}$.
- Le temps d'adressage et de mesure d'une voie est de $100\mu\text{s}$ environ
- La précision sur toute la gamme est de $0,2^{\circ}\text{C}$.

Son utilisation peut être la mesure de température sur des boucles thermiques, des capteurs plans, des panneaux photovoltaïques.

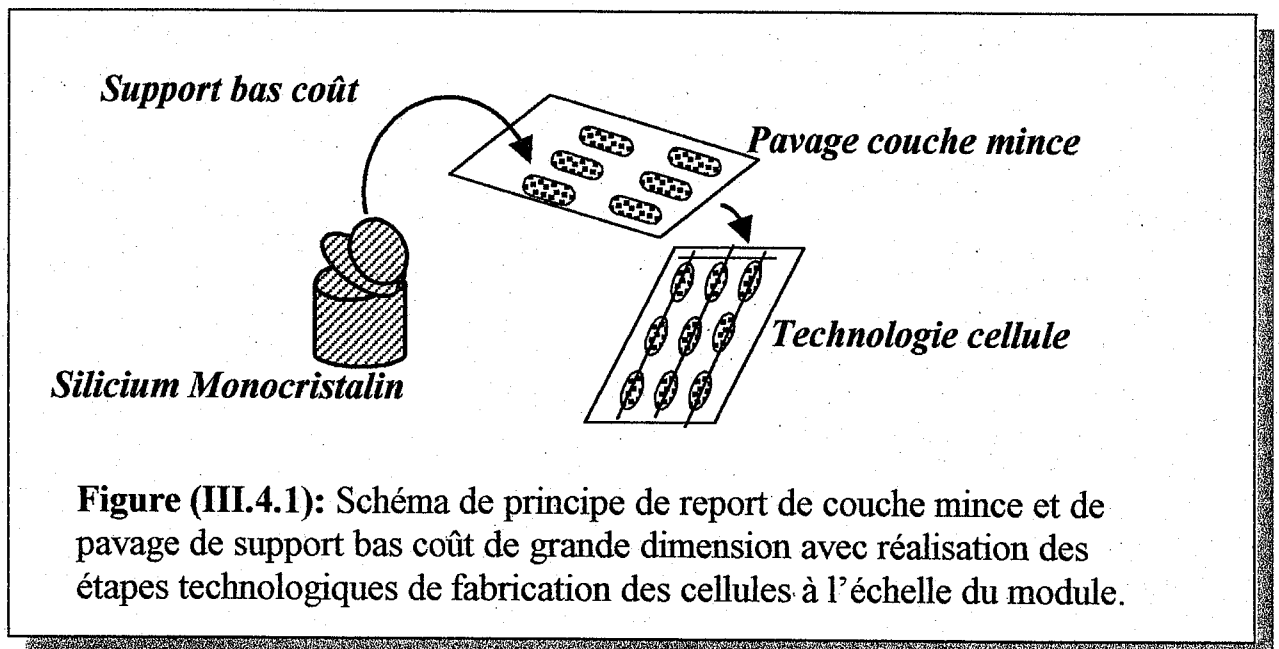
III.1.3 Les voies du future: Les modules en couches minces

a- Les cellules au silicium monocristalin en film mince. [8]

Même si, comme nous l'avons vu, le silicium nécessite des épaisseurs de plus de 10 microns pour espérer un rendement de conversion suffisant, une solution très attractive pour réaliser à faible coût des cellules photovoltaïques est de prélever dans une plaquette de silicium monocristaline un film épais de quelques dizaines de microns et de le rapporter sur un support à faible coût tel le verre ou la céramique. Ceci permettrait de n'utiliser que la quantité de silicium strictement nécessaire au bon fonctionnement de la cellule et d'éviter les pertes liées au sciage, tout en gardant un matériau et une filière particulièrement fiable et éprouvés. Plusieurs procédés sont en cours d'étude dans plusieurs laboratoires au Japon, en Allemagne, en Australie et en France.

Tout ont en commun la fragilisation du silicium en profondeur de manière à pouvoir ensuite détacher le film de surface situé au-dessus de cette zone fragile et de le reporter sur le support à bas coût de grande dimension figure (III.4.1).

Avantage supplémentaire : La réalisation des étapes technologiques des cellules se fait à l'échelle d'un module de grande surface et non plus au niveau de chaque tranche de silicium, ce qui permet de réduire de façon significatif le coût ramener à l'unité de surface.



b- Les cellules organiques : vers le tout polymère. [8]

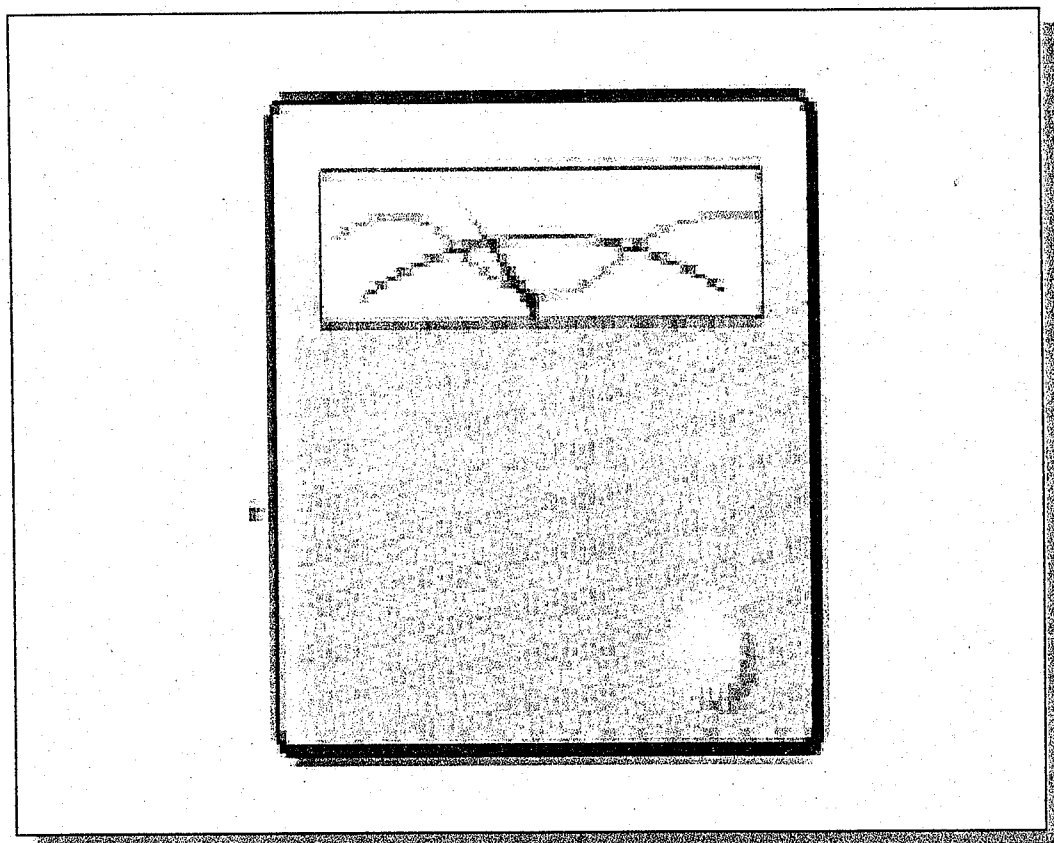
La recherche et développement de cellule solaires à base de matériaux : faible coût, matière première illimitée, facilité de mise en œuvre, technologies basse température, grandes surfaces, dispositifs souples ... Cette solution permettrait de plus de traiter selon une même technologie le substrat (support mécanique), le matériau actif où à lieu la conversion photovoltaïque et l'encapsulation.

Il existe aujourd'hui des cellules photovoltaïques organiques dont le rendement de conversion dépasse la barre des 10%. Elles reposent sur la technologie dite de **Gratzel** qui consiste en une jonction entre un polymère organique et un électrolyte liquide .

La génération photovoltaïque se situe dans le polymère et l'électrolyte permet d'assurer le transfert de charge et la différence de potentiel (force électromotrice) par sa jonction avec le polymère. Ce type de cellule est développé en Suisse par **Solaronix** pour les applications basse puissance et en Allemagne par l'**INAP** pour les applications haute puissance. La présence de l'électrolyte liquide constitue l'inconvénient majeur de cette technologie avec une faible stabilité en temps (évaporation) et une plage de température de fonctionnement limitée.

La recherche s'oriente donc vers une solution tout polymère. dans cette filière, les meilleurs performances actuelles sont un rendement de conversion de 3,6%. Le nombre de laboratoires travaillant dans ce domaine , à un stade encore relativement amont, reste limité, mais les publications, brevets et conférences illustrent l'émergence de cette voie qui pourrait entrer en phase de 2010. Le **CEA/Leti** a acquis une expérience significative dans ce domaine suite à un contrat européenne le premier sur le sujet. Il a proposé une voie originale pour améliorer les performances de collecte des porteurs de charge dans ce type de structure. Il s'agit dans un premier temps d'une activité de recherche amont.

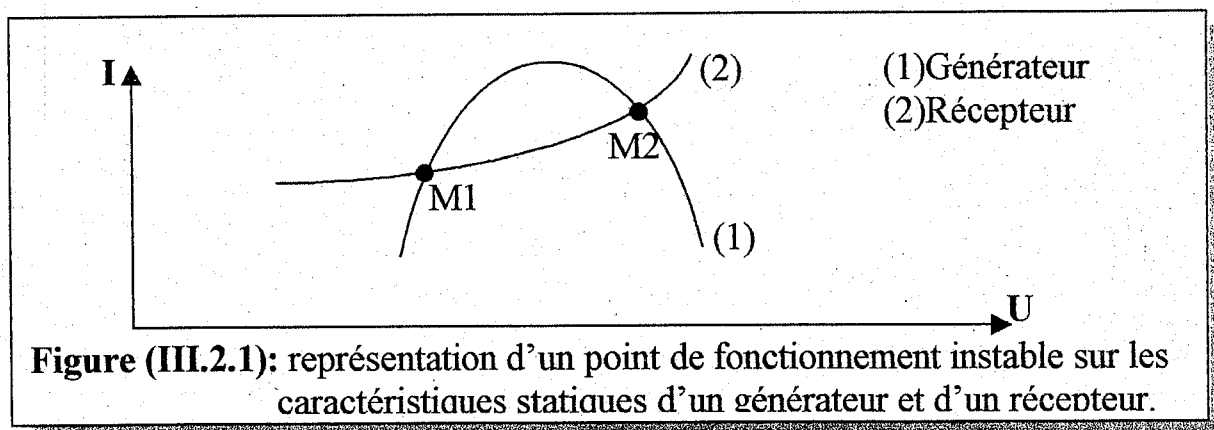
III.2 ADAPTATEUR D'IMPEDANCE.



III.2 Adaptateur d'impédance [8],[9],[10].

Si le couplage direct entre un générateur et une charge présente l'avantage de la plus grande simplicité, ce mode de couplage a un certain nombre d'inconvénient :

- La puissance transmise du générateur au récepteur n'est maximale que s'il y a adaptation des caractéristiques statiques du générateur et du récepteur. Cette contrainte implique la construction de machines particulières spécifiques pour chaque application. Outre qu'elle n'est pas toujours techniquement possible, il est évident que cette solution n'est pas toujours économiquement rentable.
- Des problèmes de stabilité statique et dynamique peuvent apparaître dans certaines condition de fonctionnement.



Si le point M_2 est un point de fonctionnement stable, il n'en est pas de même du point M_1 . Dans le cas où une perturbation déplace le point de fonctionnement à gauche du point M_1 , le système se bloque.

Une amélioration possible consiste à réaliser le couplage par l'intermédiaire d'un adaptateur d'impédance.

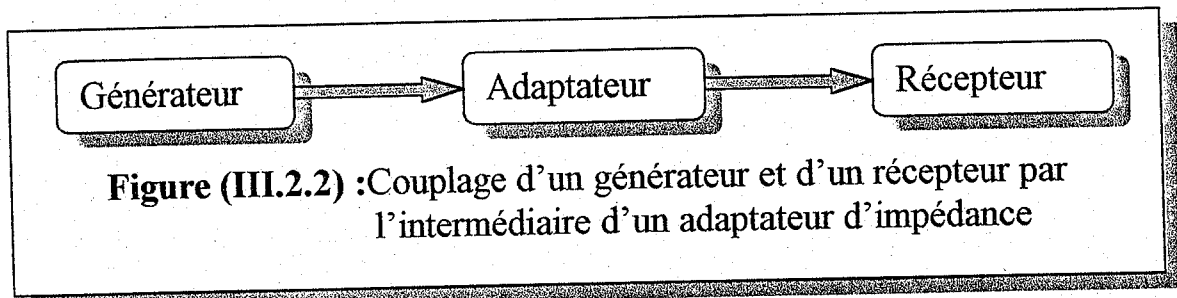
En mode de fonctionnement linéaire et quelles que soient les sources énergétiques considérées (mécanique, électrique, hydraulique), la puissance transmise est maximale lorsque l'impédance de sortie du générateur est égale à la valeur conjuguée de l'impédance d'entrée d'un récepteur.

Le rôle de l'adaptateur est de présenter à chacune de ces extrémités, les impédances images respectives de celles du générateur et du récepteur.

Si la réalisation d'un tel adaptateur est relativement simple lorsque les conditions de fonctionnement du générateur sont constantes, il n'en est

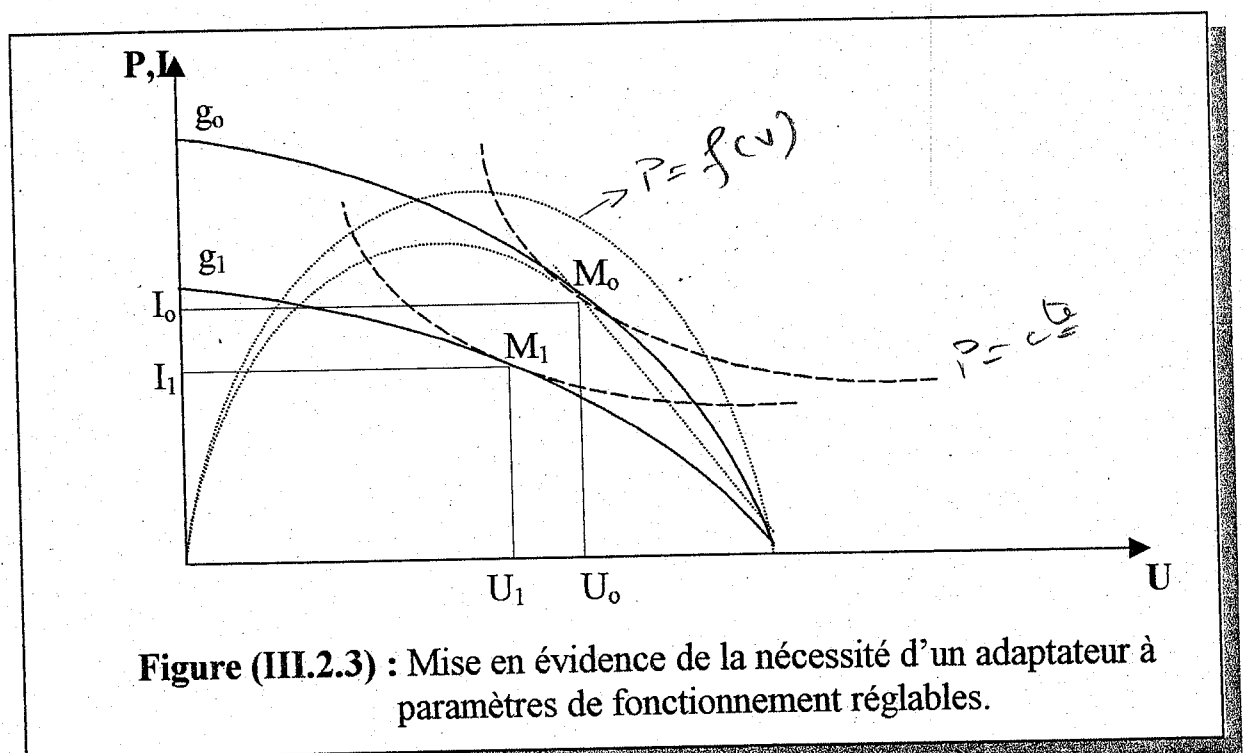
généralement pas de même avec les générateurs à puissance finie et à régime de fonctionnement variable suivant des caractéristiques statiques non linéaires qui nous intéressent :

Dans ce cas, deux problèmes sont à résoudre simultanément :



- *L'adaptation statique* qui revient ici à rechercher le point de fonctionnement assurant le transfert d'une puissance maximale entre le générateur et le récepteur.
- *L'adaptation dynamique* qui doit assurer un comportement linéaire pour des petites variations autour d'un point de fonctionnement. Cette adaptation dynamique est nécessaire pour le contrôle des régimes transitoires qui apparaissent lors des évolutions entre points de fonctionnement. Elle implique l'utilisation d'adaptateurs ayant une structure particulière pour donner une réponse optimale suivant un critère donné.

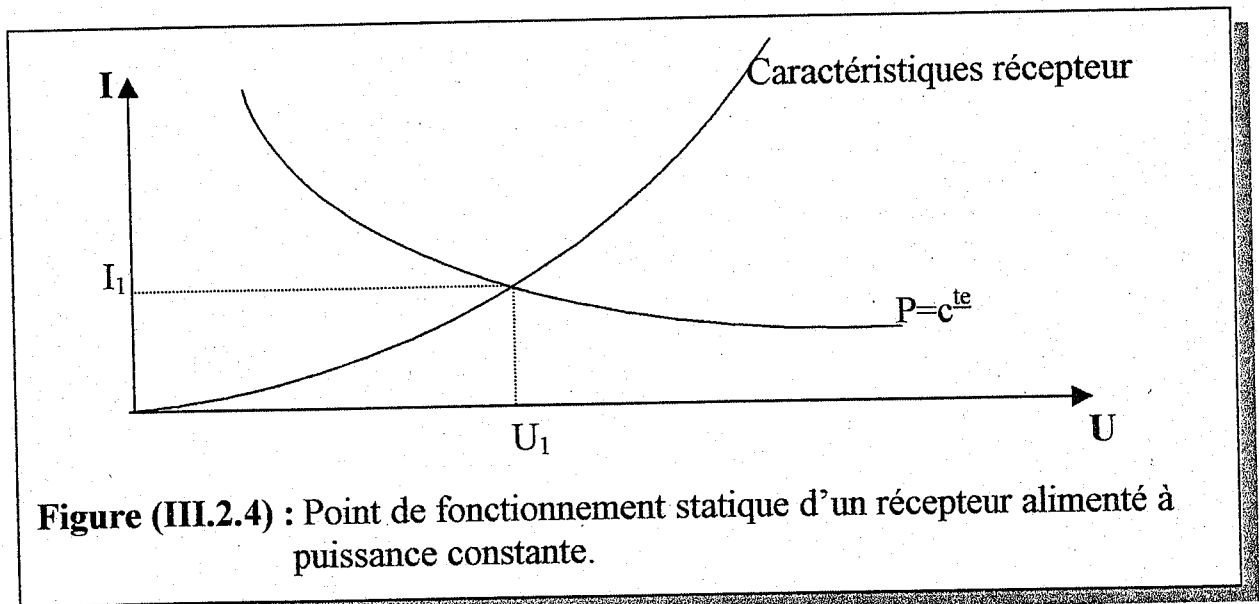
Soit donc un générateur à caractéristique non linéaire et fluctuante en fonction d'un paramètre g (ici, un générateur photovoltaïque), figure (III.2.3).



Pour un régime donné g_0 , il est possible de travailler à l'optimum M_0 en contrôlant le rapport $a_0=I_0/U_0$ à l'aide d'un adaptateur. Pendant une perturbation (régime g_1), pour obtenir le point de fonctionnement optimal M_1 , il est nécessaire d'imposer le rapport $a_1=I_1/U_1$ différent de a_0 .

Ainsi pour un tel générateur, il faut pouvoir modifier les caractéristiques de l'adaptateur à l'aide d'une procédure de commande.

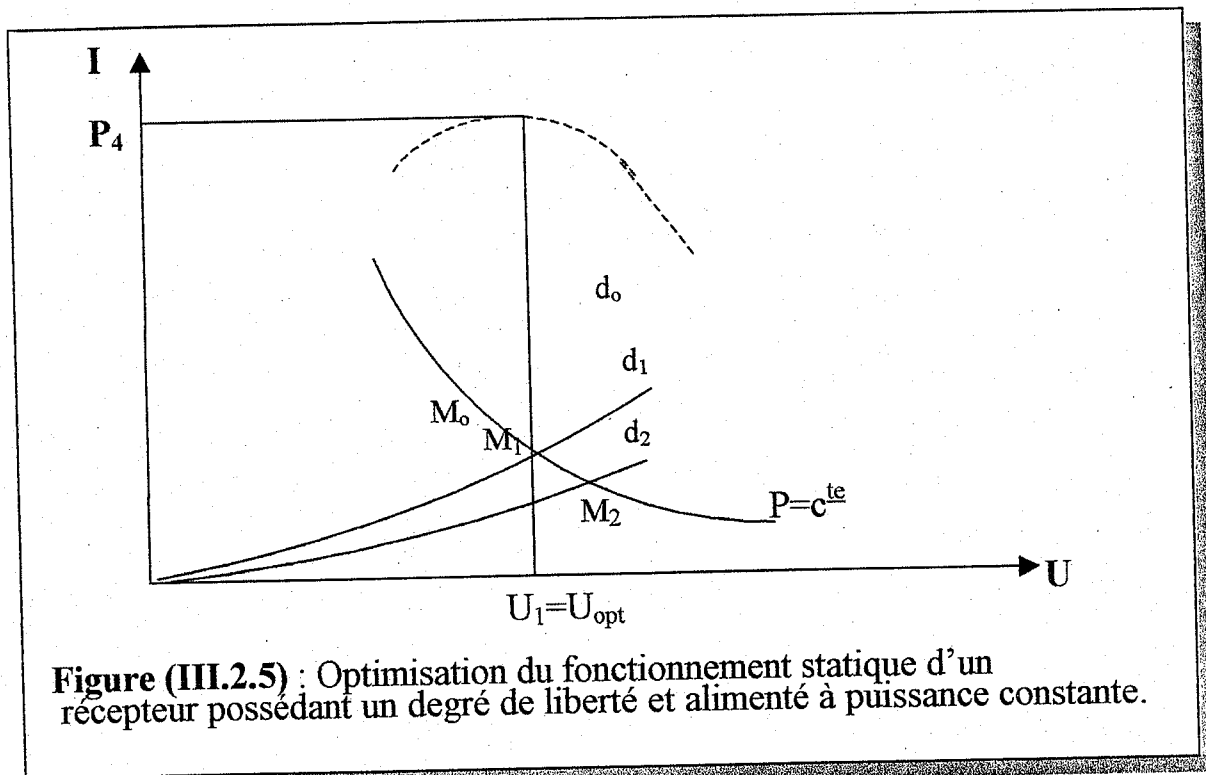
En admettant que l'adaptateur transmette la puissance sans retard, le récepteur doit pouvoir l'absorber sans provoquer de régimes transitoires intempestifs. En fonctionnement statique, on peut alors admettre que l'on a une alimentation à puissance constante.



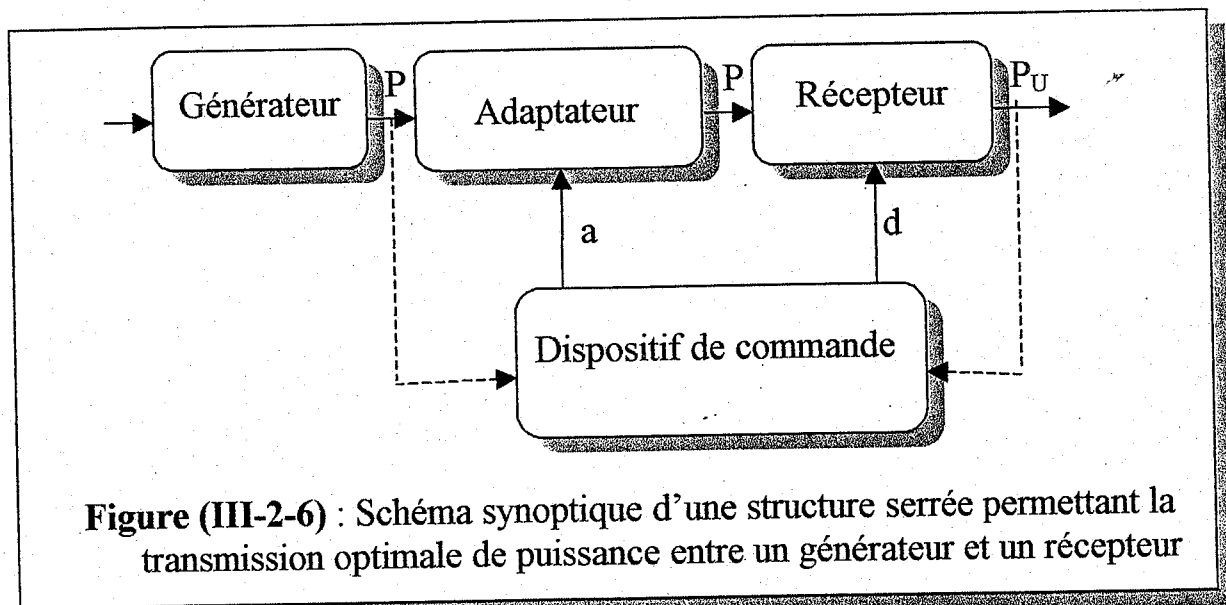
Sur la figure ci-dessus est représentée la caractéristique non linéaire d'un récepteur ainsi qu'une hyperbole $P=U_0.I_0=c^{te}$ représentant une alimentation à puissance constante.

Si le récepteur n'a pas de degré de liberté, il y a un point de fonctionnement unique. Dans le cas contraire, l'action sur un degré de liberté d peut permettre au récepteur d'avoir plusieurs points de fonctionnement sur l'hyperbole P (figure (III.2.5)).

Dans ce cas, l'optimisation consiste à régler d afin d'obtenir la puissance utile P_u maximale pour une alimentation du récepteur par la puissance P donnée.



Les structures à mettre en œuvre pour pouvoir réaliser simultanément toutes les conditions de l'optimisation du transport de puissance entre générateur et un récepteur ont l'allure générale de structure en série présentée sur la figure (III.2.6) ci- dessous .



Le dispositif de commande de l'adaptation peut être analogique ou numérique.

Nous avons choisi un dispositif microprogrammé pour les nombreux avantages qu'il présente lors de la mise en œuvre de générateurs et de récepteurs variés .

Il faut néanmoins noter que si le récepteur n'a pas de degré de liberté, on obtient un point de fonctionnement sous-optimal: c'est le cas d'un moteur à courant continu à excitation entraînant une pompe centrifuge.

Dans ce cas, le dispositif adaptateur peut être:

- *Un hacheur* à haut rendement et à rapport cyclique réglable pour transmission continu-continu.
- *Un onduleur triphasé* à haut rendement et à fréquence et amplitude réglables pour les transformations continu-alternatif.

Les algorithmes de commande peuvent être:

- *La méthode du générateur et du récepteur programmables.*
- *La méthode de recherche extrême* pour la détermination du point de fonctionnement statique optimal.
- *La méthode du compensateur d'état* pour le contrôle des évolutions dynamiques entre les différents points de fonctionnement.

La gestion des algorithmes et la commande des adaptateurs est faite à l'aide d'une centrale d'acquisition de données et de gestion de processus qui peut fonctionner en mode centralisé ou en mode hiérarchisé avec des modules microprogrammés secondaire.

Dans notre cas, le dispositif adaptateur sélectionné était un onduleur triphasé. Ce dernier conçu et réalisé suivant la technologie (association MOSFET de puissance bipolaire en Darlington), ses principales caractéristiques sont les suivantes:

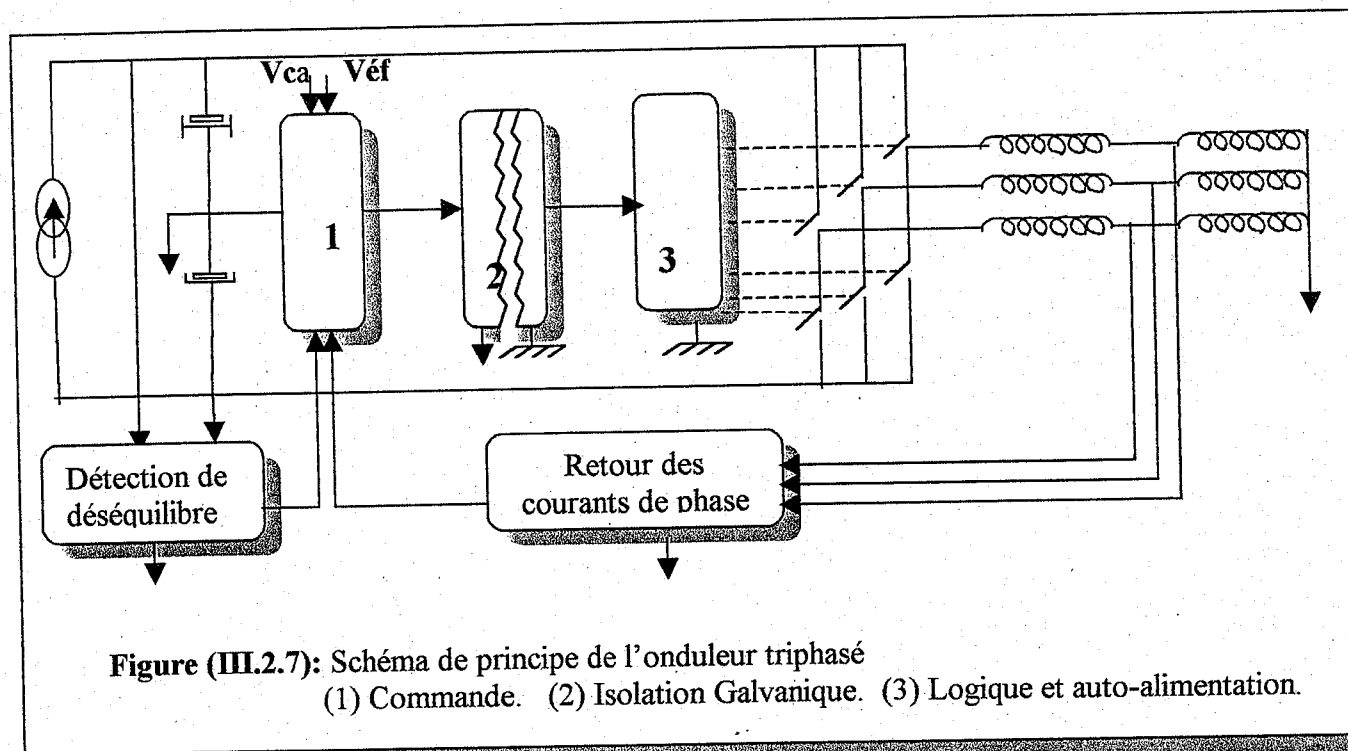
- *Systèmes triphasés* de référence sur mémoire EPROM.
- *Commandes indépendantes de l'amplitude du courant et de la fréquence* entre 10 et 100 Hz.
- *Asservissement du courant* qui assure une forme sinusoïdale de ce dernier ainsi qu'un fonctionnement équilibré du système triphasé.

Les six commutateurs du dispositif disposent chacun d'une protection individuelle contre les défauts de saturation et sont auto-alimentés.

Le schéma de l'onduleur est donné sur la figure (III.2.7).

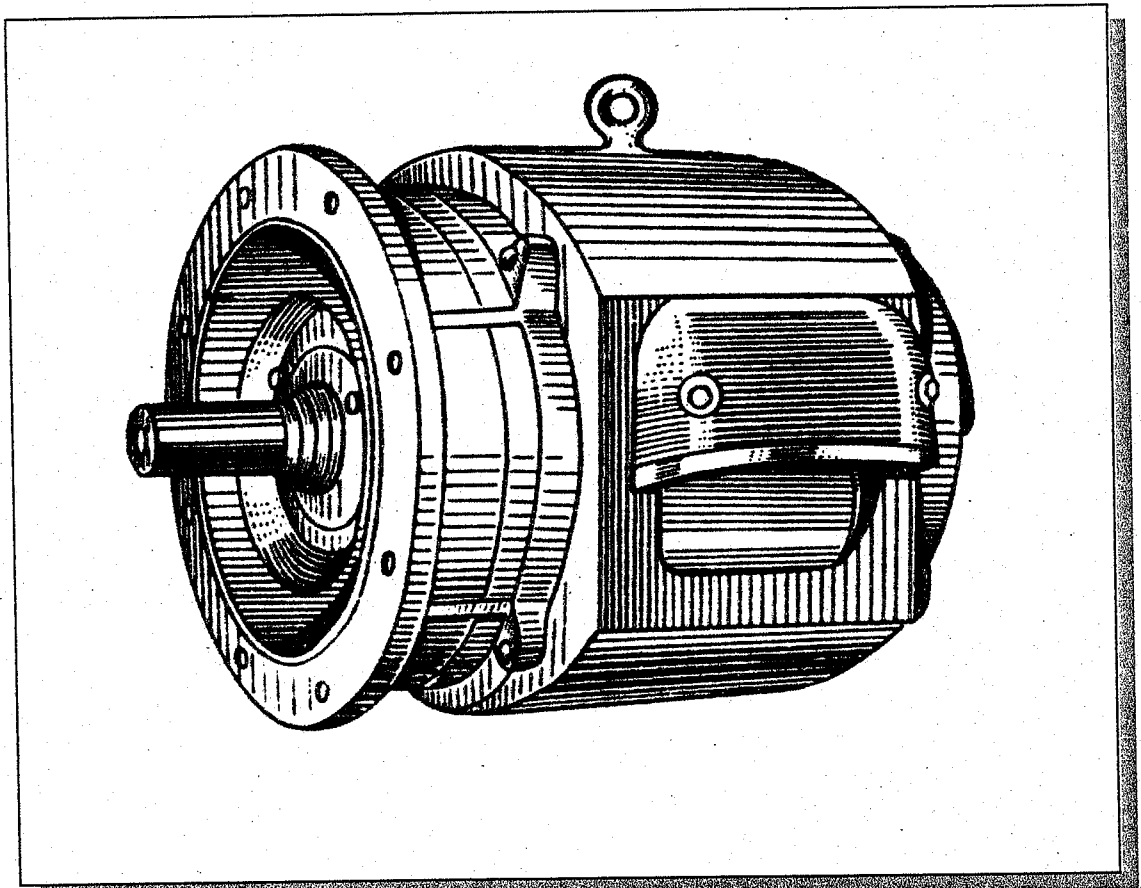
L'onduleur permet de résoudre les différents cas d'adaptation rencontrés lors du couplage avec un générateur à courant continu, d'une machine à courant continu ou à courant alternatif.

L'onduleur permet également les expérimentations nécessaires à l'étude de la stabilité de fonctionnement des machines à courant alternatif couplées avec les générateurs qui nous intéressent. Les possibilités de réglage de l'onduleur permettant d'explorer les différentes zones de stabilité et de valider ainsi les résultats de simulation.



III.3 MOTEURS ASYNCHRONES

1. Choix d'un moteur électrique d'entraînement .
2. Couple moteur d'une machine asynchrone .
3. Caractéristiques mécaniques d'une machine asynchrone .
4. Pertes d'énergie et rendement des moteurs asynchrone .
5. Caractéristiques de fonctionnement et facteur de puissance des moteurs asynchrones .



Liste des symboles

$M_{r.au}$:Couple résistant sur l'arbre de sortie de transmission .
M	:Couple développé par le moteur .
P	:Puissance sur l'arbre.
M_r	:Couple résistant ramené à l'arbre du moteur.
M_{dyn}	:Couple résistant dynamique .
M_k	:rendement de transmission .
i	:Rapport de transmission .
J_m	:Moment d'inertie du moteur.
J_{tr}	:Moment d'inertie de la transmission .
J_{au}	:Moment d'inertie de l'appareil d'utilisation .
n	:Vitesse de rotation.
P_n	:Puissance minimale.
N_2	:Nombre de conducteur du rotor .
K_2	:Coefficient d'enroulement du rotor .
\emptyset	:Flux magnétique émanant d'un pôle .
φ_2	:Angle de déphasage du courant par rapport à la F.E.M.
$Co\varphi_2$:Facteur de puissance .
S	:Glissement .
f	:Fréquence du réseau d'alimentation .
I_2	:Courant du rotor .
M_{max}	:Couple maximale du moteur (couple de décrochage).
S_{cr}	:Valeur critique du glissement .
M_n	:Couple moteur nominal.
K_m	:Coefficient de stabilité du moteur asynchrone .
M_d	:Couple au décollage ($n=0$).
K_d	:Coefficient de décollage .
P_1	:Puissance reçue par le stator.
P_{em}	:Puissance électromotrice .
P_{enr}	:Perte de puissance dans l'enroulement .
P_f	:Perte de puissance dans le fer.
n_e	:Vitesse avec laquelle le flux magnétique tourne/stator.
n_e-n	:Vitesse avec laquelle le flux magnétique tourne/rotor.
$P_{méc}$:Puissance mécanique développé sur l'arbre du rotor.
$P_{méc}$:Puissance de pertes mécaniques .
W_o	:Vitesse de synchronisation .
W	:Vitesse de rotation du rotor .
r	:Résistance d'une phase de l'enroulement .
M	:Rendement d'un moteur asynchrone .
P_{sup}	:Puissance de pertes supplémentaires .

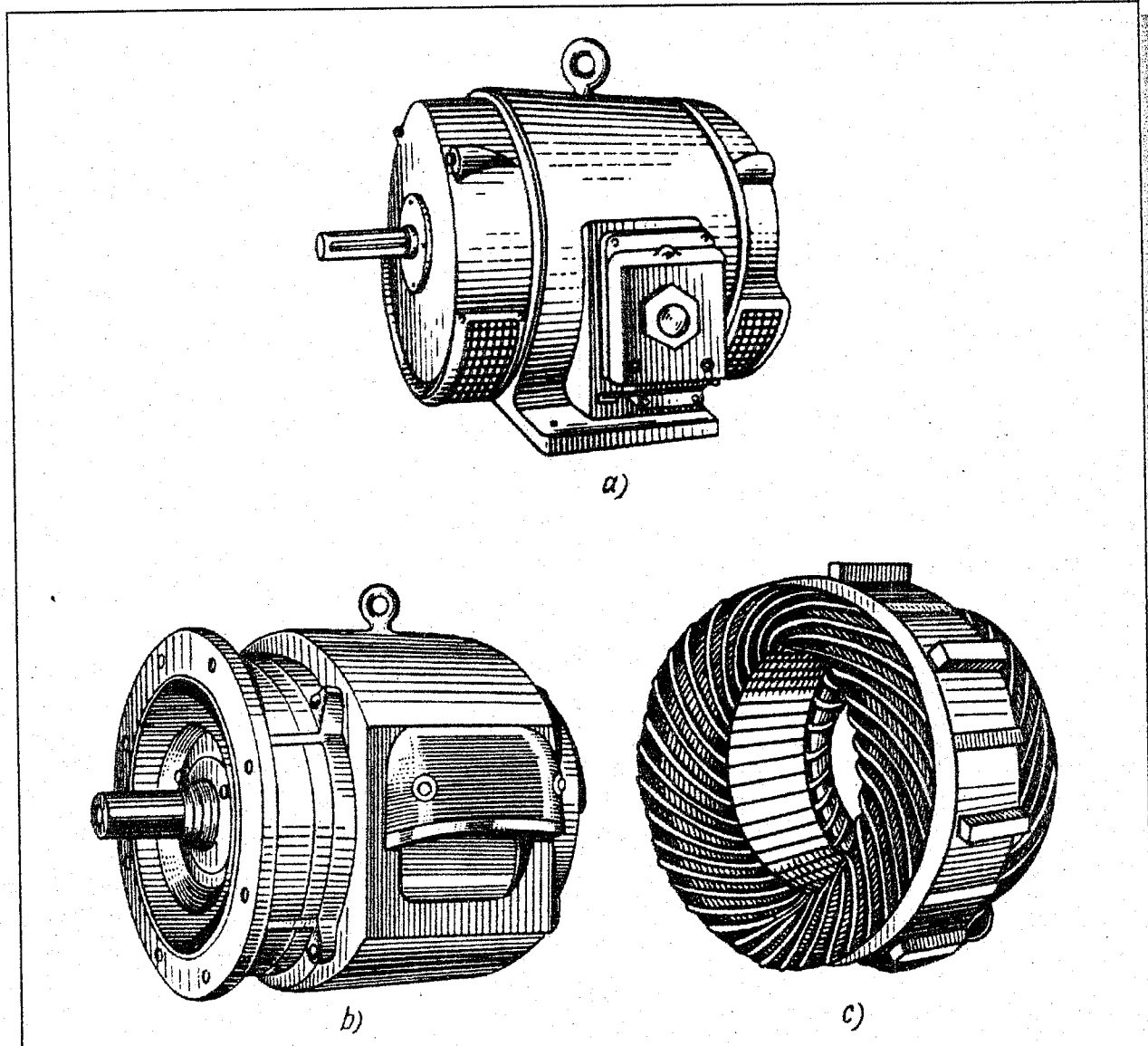


Fig. 12-37. Aspect extérieur des moteurs asynchrones de différents types

Usine de moteurs électriques de Vladimir		VEMZ (sigle du constructeur)
Moteur triphasé à rotor en court-circuit		
Type	A0 52-6	N° 80622
Δ/λ	220/380 V	17,5/10,1 A
4,5 kW	950 tr/mn	50 Hz
Rendement (η)	84,5 %	$\cos\phi$ 0,80
GOST		Poids 98 kg
Année de fabrication		

$P = U \cdot I \cdot \cos\phi$
 $P = 3,08 \text{ kW}$

Figure : Plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé

III.3.1 Choix d'un moteur électrique d'entraînement

Le choix d'un moteur électrique pour l'entraînement d'un organe donné commence généralement par la détermination de la puissance nominale nécessaire.

Cette puissance est déterminée à l'aide des diagrammes de charge des machines d'utilisation et des diagrammes de charge des moteurs. On appelle *diagramme de charge d'un appareil d'utilisation la variation du couple résistant de cet appareil en fonction du temps*: $M_{r,au} = f(t)$.

Le couple $M_{r,au}$ est généralement déterminé en tant que couple résistant sur l'arbre de sortie de transmission. Ce couple peut être déterminé à l'aide des mesures sur une installation analogue en marche ou par des calculs. Pour un schéma cinématique donné et un régime de fonctionnement déterminé, on calcule les diagrammes $M_{r,au} = f(t)$ à partir des diagrammes de charge.

A la différence des diagrammes $M_{r,au} = f(t)$ construits pour des appareils d'utilisation, le diagramme de charge des moteurs traduit la variation du couple M développé par le moteur, de la puissance P sur l'arbre ou du courant I en fonction du temps. Le plus souvent on a recours au diagramme de couples:

$$M = M_r + M \cdot \delta y_n = \frac{M_{r,au}}{\eta_{Gv}} + M \delta y_n = f(t) \quad (\text{III.3.1})$$

ou $M_r = \frac{M_{r,au}}{\eta_{tr} \cdot i}$ est le couple résistant ramené à l'arbre du moteur ;

η_{tr} : le rendement de la transmission ;

ε : le rapport de transmission ;

$$M_{dyn} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = J \frac{dw}{dt} \quad \text{le couple résistant dynamique ;}$$

$J = J_m + J_{tr} + J_{au}/i^2$ sont les moments d'inertie du moteur, de la transmission et de l'appareil d'utilisation ramenés à l'arbre du moteur.

Si le moteur électrique fonctionne à vitesse n constante et à couple résistant M_r constant durant tout le temps de travail, on a : $M_{dyn} = 0$ et la puissance du moteur d'enchaînement a pour valeur :

$$P = \frac{w \cdot M_r}{102} = \frac{2\lambda}{60 \cdot 102} \cdot M_r \cdot n = 1,025 \cdot M_r \cdot n \cdot 10^{-3} (kw) \quad (\text{III.3.2})$$

La puissance nominale P_n du moteur doit être choisie avec une certaine marge dont la valeur est fonction de la précision du calcul.

Dans ces conditions, l'échauffement des divers organes du moteur ne dépassera la valeur admissible quelle que soit la durée de fonctionnement ininterrompu du moteur.

La détermination de la puissance du moteur pour un couple résistant et une vitesse qui varient dans le temps se ramène au calcul d'une certaine charge invariable pour laquelle l'échauffement du moteur sera le même, à quelques écarts près, que celui en régime de fonctionnement donné.

Pour déterminer la puissance, on utilise différentes méthodes. La méthode la plus simple et commode est celle du *couple équivalent*. Elle est basée sur les suppositions que le couple développé par le moteur est proportionnel au courant consommé et que les pertes dans le moteur se composent des pertes invariables indépendantes de la charge et des pertes dans les enroulements, dont la valeur est proportionnelle au carré du courant de charge. Grâce à sa simplicité, cette méthode est largement utilisée pour le calcul approché de la puissance des moteurs de tous les types.

La nature du courant du moteur d'entraînement dépend de la source d'alimentation qu'on envisage d'utiliser. On utilise d'ordinaire le courant alternatif triphasé à la fréquence industrielle.

La tension nominale du moteur est, en règle générale, une tension standard déterminée par la source d'alimentation. Pour l'alimentation des moteurs de faible puissance on peut utiliser les tensions de 24, 36 et 60v.

La vitesse nominale du moteur est déterminée d'après la vitesse de l'appareil à entraîner par un rapport donné de la transmission mécanique qui est d'habitude du type démultiplicateur. La transmission mécanique est choisie à partir d'une analyse technique et économique et, par des moteurs à deux sens de rotation, le plus souvent à partir de la condition permettant d'obtenir un minimum de couples dynamiques.

Suivant le degré de protection requise contre les agents extérieurs, on construit des *moteurs semi-protégés*, les *moteurs fermés* et les *moteurs antidéflagrants*.

III.3.2 Couple moteur d'une machine asynchrone

L'interaction du flux magnétique tournant avec les courants qu'il induit dans les conducteurs de l'enroulement du rotor donne naissance aux forces agissant sur ces conducteurs dans le sens tangentiel.

Selon [20] le couple moteur de la machine s'exprime par :

$$M = C \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \quad (\text{III.3.3})$$

Avec $C = P \frac{N_2 K_2}{2\sqrt{2}}$, N_2 : est le nombre de conducteurs du rotor.

K_2 : le coefficient d'enroulement du rotor.

$\Phi = B_{\text{moy}} / \tau$, étant le flux magnétique émanant d'un pôle.

φ_2 : exprime l'angle de déphasage du courant/ F.E.M.

Le couple moteur de la machine asynchrone dépend des Φ , I_2 et $\cos \varphi_2$ qui varient en fonction de la charge; on peut également représenter le couple moteur comme étant fonction d'une seule variable. Par un moteur asynchrone, il est commode de prendre le glissement s en qualité de cette variable.

En supposant que la fréquence f du réseau d'alimentation est constante et en introduisant un coefficient constant : $C_m = c / 4,44 k_1 k w_1 f$

$$\text{Nous obtenons [20] : } M = C_m U_1^2 \frac{s r_2}{r_2^2 + (s x_2)^2} \quad (\text{III.3.4})$$

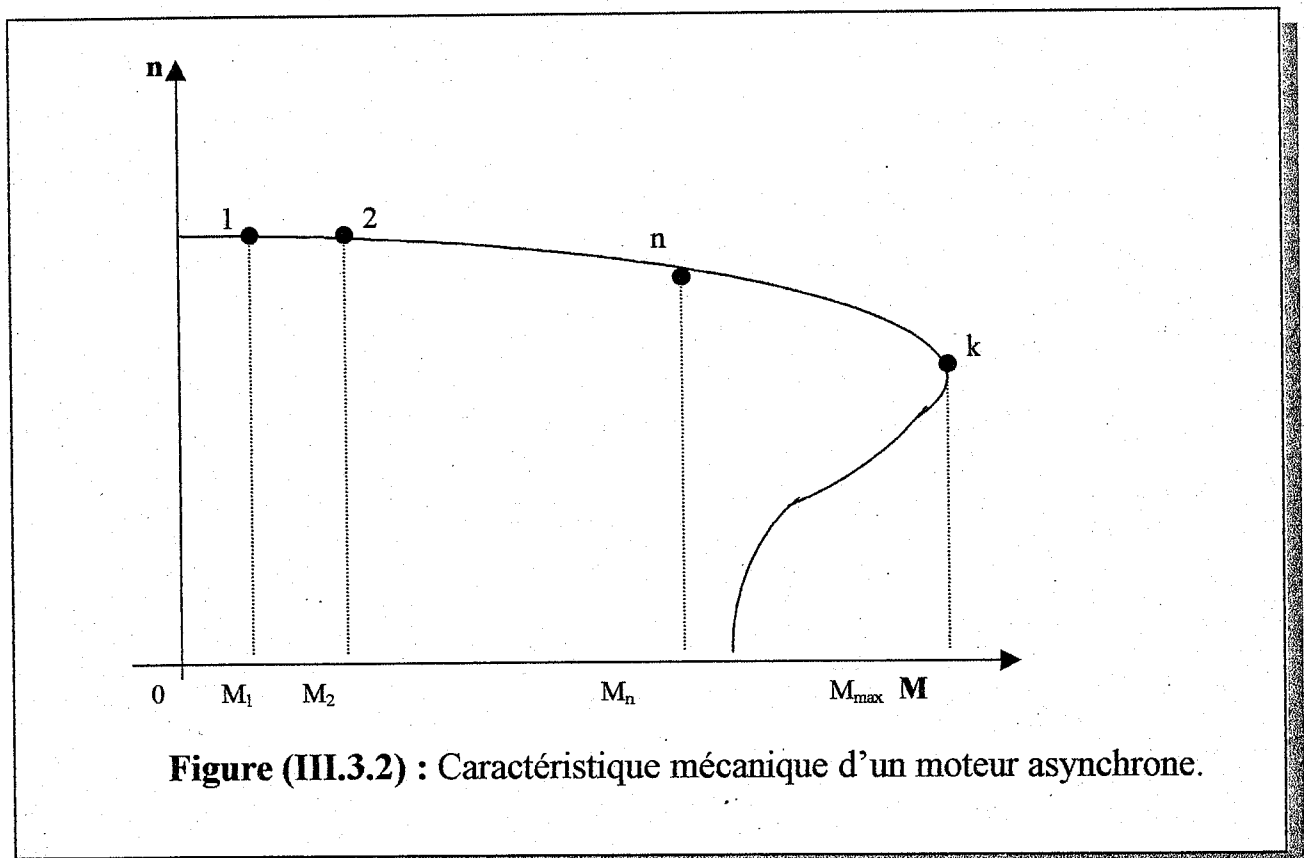
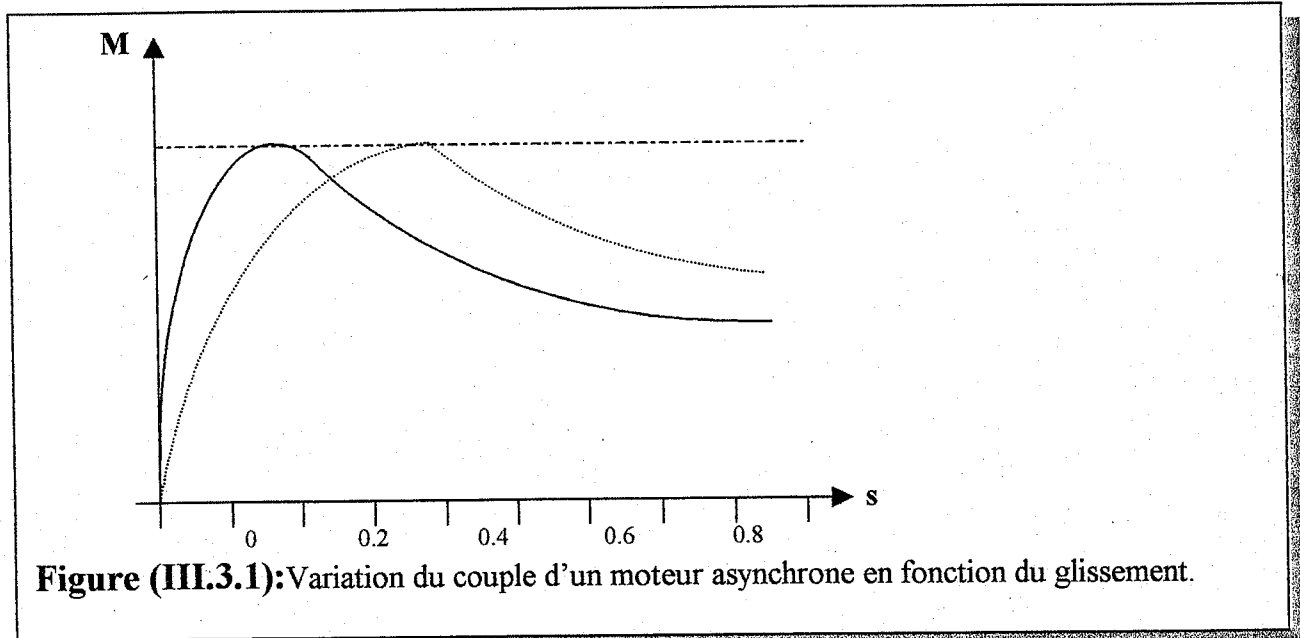
La seule variable intervenant dans cette formule est le glissement s . Le graphique de la fonction $M(s)$ pour un moteur, c'est-à-dire lorsque la machine asynchrone fonctionne avec $0 \leq s \leq 1$, est représenté entrainé plein sur la figure (III.3.1). Cette dernière montre que lorsque le glissement croît, le courant I_2 du rotor croît aussi, mais en même temps $\cos \varphi_2$ décroît, ce que signifie une augmentation de l'angle φ_2 renfermant les conducteurs qui freinent le mouvement du rotor. C'est pourquoi pour des valeurs suffisamment grandes de l'angle φ_2 le couple moteur peut décroître malgré la croissance du courant I_2 du rotor.

Parfois, pour construire la courbe traduisant la variation du couple d'un moteur asynchrone en fonction du glissement, on a recours à la formule de Closs[20] :

$$M = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}} \quad (\text{III.3.5})$$

avec : $M_{\text{max}} = C_m U_1^2 / 2x_2$ étant le couple maximal du moteur .

$s_{cr} \approx \pm r_2 / x_2$ est la valeur critique du glissement pour laquelle le couple moteur M passe par un maximum.



III.3.3 Caractéristiques mécaniques d'une machine asynchrone

La figure (III.3.2) montre une courbe traduisant la relation entre deux grandeurs mécaniques qui sont le couple développé par le moteur et sa vitesse de rotation. On désigne cette courbe sous le nom de *caractéristique mécanique du moteur asynchrone*. La caractéristique mécanique, c'est-à-dire une relation de la forme $n(M)$, est la caractéristique fondamentale de tout moteur électrique, qui détermine ses possibilités d'emploi.

Pour chaque moteur asynchrone on peut déterminer son *régime normal ou nominal*, c'est-à-dire un régime de fonctionnement ininterrompu de longue durée ou cours duquel le moteur ne s'échauffe pas au-dessus d'une température fixée. Le couple moteur M_n correspondant au régime normal s'appelle *couple normal*.

Pour les moteurs asynchrones de puissance moyenne le glissement normal s_n correspondant à ce couple est compris entre 0,02 et 0,06 ce qui signifie que la vitesse normale n_n varie dans les limites suivantes: $n_n = n_0(1 - s_n) = (0,94 \text{ à } 0,98)n_0$.

Le rapport $K_m = M_{\max} / M_n$ du couple maximal au couple normal est appelé *coefficient de stabilité du moteur asynchrone*. Il caractérise la capacité de surcharge de cette machine. Généralement, $K_m = 1,8 \text{ à } 2,5$.

Au point de vue du démarrage, on caractérise un moteur par le rapport du couple au décollage, c'est-à-dire du couple correspondant à $n=0$, au couple normal (pleine charge): $K_d = M_d / M_n$. Pour les moteurs à rotor en court-circuit, par exemple, on a : $K_d = 1,1 \text{ à } 1,8$.

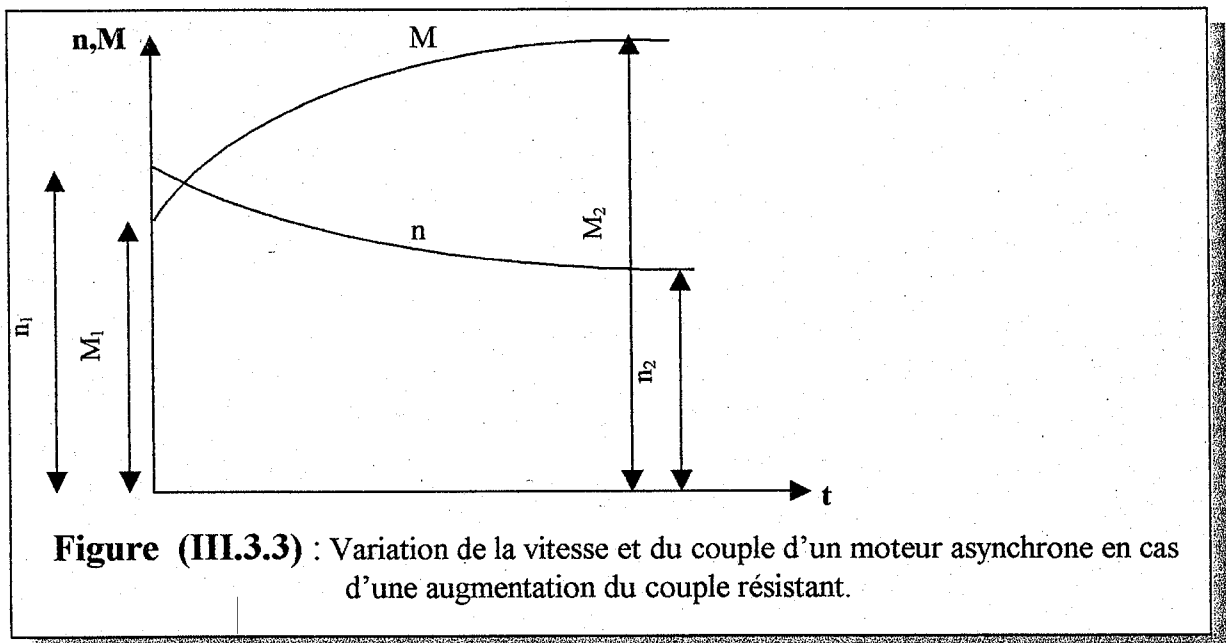
L'aptitude à établir automatiquement un équilibre entre le couple résistant et le couple développé par le moteur est connue sous le nom *d'autorégulation*. La figure (III.3.3) montre l'allure de la variation en fonction du temps de la vitesse et du couple d'un moteur asynchrone en cas d'une augmentation brusque du couple résistant. La durée de ce processus transitoire ne dépasse pas généralement quelques dixièmes ou même quelques centièmes de seconde.

On vérifie aisément que l'autorégulation et la marche stable du moteur sont assurées lors du fonctionnement dans toute la portion supérieure de la caractéristique mécanique (figure (III.3.2.)), c'est-à-dire entre le fonctionnement à vide pour $M=0$ et le fonctionnement à un couple voisin du couple maximal. La pente de cette portion de la caractéristique est peu importante, ce qui signifie que la vitesse varie faiblement lors de la variation du couple résistant. Une telle caractéristique mécanique s'appelle *caractéristique shunt*.

Le point k de la caractéristique mécanique correspond à un état d'équilibre instable parce que toute baisse de vitesse, si petite qu'elle soit, due à une légère augmentation du couple résistant, entraîne une décroissance et non une croissance du couple moteur de sorte que le moteur s'arrête. Toute la partie inférieure de la caractéristique mécanique, se trouvant au-dessous du point k, correspond au domaine de fonctionnement instable. Le couple maximal M_{\max} s'appelle aussi *couple de décrochage* d'une machine asynchrone.

Le fonctionnement de la machine dans la portion supérieure stable de la caractéristique mécanique avec un couple supérieur au couple normal n'est

admissible que pendant une courte durée, si non on risque de déduire la durée de vie de la machine à cause de son échauffement excessif.



III.3.4 Pertes d'énergie et rendement des moteurs asynchrones

Dans une machine électrique, la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique s'accompagne toujours d'une perte d'énergie qui est désignée sous forme calorifique dans les différentes parties de la machine .

Dans les machines électriques tournantes, les pertes d'énergie se répartissent en trois catégories : les pertes dans les enroulements, les pertes dans le fer et les pertes mécaniques. En dehors de certains catégories, il existe aussi des pertes supplémentaires, d'ailleurs peu importantes.

Pour examiner les pertes dans un moteur asynchrone, nous utiliserons son diagramme énergétique (figure (III.3.4)). Dans ce diagramme P_1 est la puissance reçue par le stator de la part du réseau d'alimentation. La majeure partie P_{em} de cette puissance, déduction faite des pertes dans le stator, est transmise au rotor par la voie électromagnétique à travers l'entrefer; P_{em} s'appelle *puissance électromagnétique*.

Les pertes de puissances dans le stator sont composées des pertes dans son enroulement $P_{enr.1} = m_1 r_1 I_1^2$ et des pertes P_{f1} dans le fer; la puissance P_{f1} est égale à la somme des pertes par courants de **Foucault** et des pertes par hystérésis.

Il existe également des pertes dans le fer du rotor mais elles sont peu importantes et peuvent donc être négligées, cela tient à ce que la vitesse n_0 , avec laquelle le flux magnétique tourne par rapport au stator est plusieurs fois supérieur

à la vitesse $n_0 - n$ de rotation du flux magnétique par rapport au rotor, si la vitesse n du rotor correspond à la portion stable de la caractéristique mécanique naturelle.

La puissance mécanique $P_{méc}$ développée sur l'arbre du rotor est inférieure à la puissance électromagnétique $P_{ém}$, la différence étant égale aux pertes $P_{enr.2}$ dans l'enroulement du rotor :

$$P_{méc} = P_{ém} - P_{enr.2} \quad (III.3.6)$$

La puissance P_2 développée sur l'arbre du moteur a pour expression :

$P_2 = P_{méc} - p_{méc}$, où $p_{méc}$ est la puissance de pertes mécaniques égale à la somme des pertes par frottement des tourillons dans les paliers, des pertes par frottement dans l'air (pertes de ventilation) et des pertes par frottement des balais sur les bagues (pour les moteurs à rotor bobiné).

La puissance électromagnétique et la puissance mécanique ont pour valeur :

$$\left. \begin{aligned} P_{ém} &= w_0 \cdot M \\ P_{méc} &= w \cdot M \end{aligned} \right\} \quad (III.3.7)$$

Où w_0 et w sont respectivement la vitesse de synchronisme et la vitesse de rotation du rotor.

M est le couple développé par le moteur, c'est-à-dire le couple exercé sur le rotor par le champ magnétique tournant.

La puissance de pertes dans l'enroulement du rotor a pour expression :

$$P_{enr.2} = P_{ém} - p_{méc} = \frac{w_0 - w}{w_0} \cdot P_{ém} = \frac{\eta_0 - \eta}{\eta_0} \cdot P_{ém}$$

$$\text{Ou encore } P_{enr.2} = s \cdot P_{ém}$$

Si l'on connaît la résistance r_2 d'une phase de l'enroulement rotorique, on peut calculer les pertes dans cet enroulement à partir de l'expression suivante :

$$P_{enr.2} = m_2 r_2 I^2.$$

Les machines asynchrones donnent également lieu à des pertes supplémentaires dues à la surface dentée du rotor et du stator, aux courants de Foucault dans les différents organes de la machine et d'autres causes. Pour la marche à pleine charge du moteur, la valeur de ces pertes est prise égale à 0,8% de sa puissance nominale.

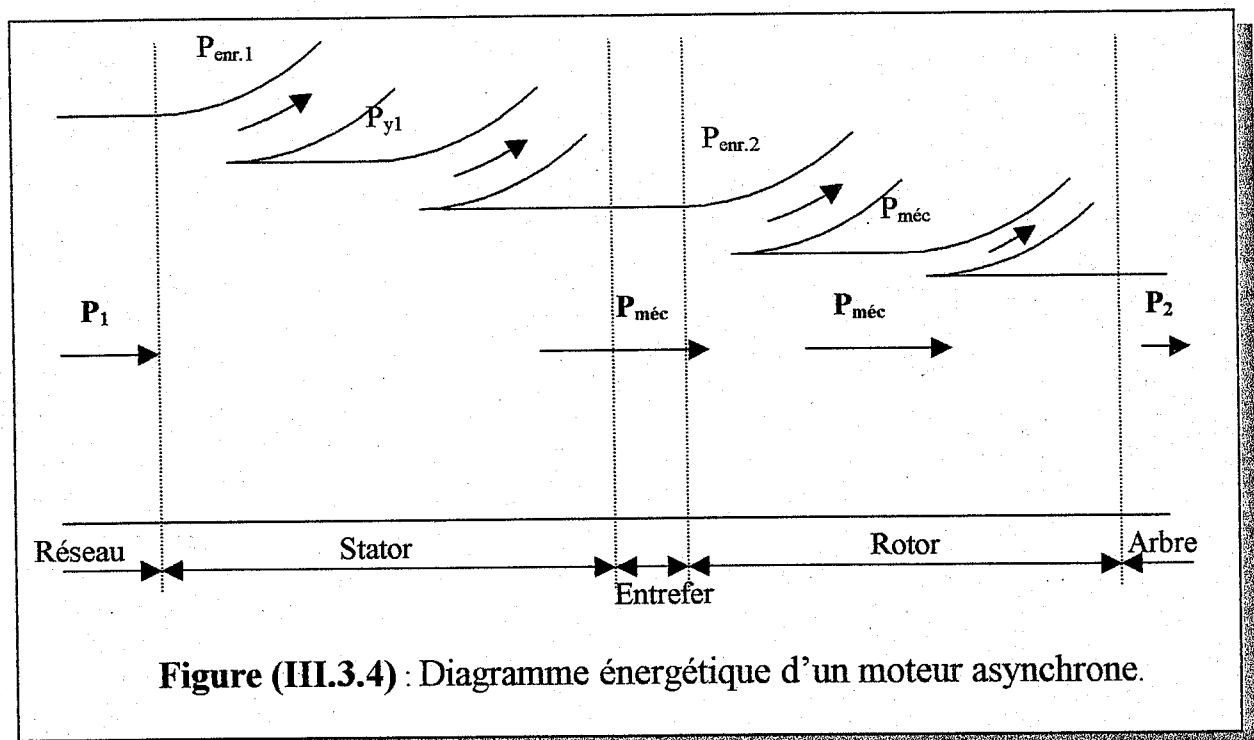
Le rendement d'un moteur asynchrone a pour expression :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - (P_{enr} + P_{st} + P_{méc} + P_{sup})}{P_1}$$

Où $P_{\text{enr}} = P_{\text{enr.1}} + P_{\text{enr.2}}$ est la puissance totale de pertes dans les enroulements du stator et rotor ;

P_{sup} sont les pertes supplémentaires .

Puisque la valeur des pertes totales dépend de la charge du moteur, son rendement est aussi fonction de la charge. La figure (III.3.5a) représente une courbe $\eta = f(P/p_n)$. P/p_n étant la puissance relative. Généralement, la machine est construite de manière que le maximum η_{max} de son rendement ait lieu à une charge légèrement inférieure à sa valeur nominale. Le rendement des moteurs asynchrones est assez élevé dans de larges limites de variation de la charge (figure (III.3.5a)). A charge normale, le rendement de la plus part des moteurs asynchrones modernes est compris entre 80 et 90% pour les petites et moyennes puissances .



III.3.5 Caractéristiques de fonctionnement et facteur de puissance des moteurs asynchrones .

Le facteur de puissance présente une grande importance pour l'économie nationale dont l'élévation est nécessaire pour améliorer l'utilisation des installations productrices et distributrices d'énergie .

Les moteurs asynchrones, qui sont les plus répandus dans l'industrie, constituent les consommateurs principaux d'énergie électrique. Ils peuvent compromettre fortement $\cos \varphi$ des systèmes énergétiques .

En marche à vide, l'angle φ est grand parce que le moteur absorbe au réseau presque uniquement le courant réactif, nécessaire à la production du flux magnétique principal de la machine .

Au fur et à mesure que la charge s'élève et s'approche de sa valeur nominale, la composante active du courant s'accroît car la puissance mécanique sur l'arbre du moteur augmente, quant à la composante réactive du courant , elle ne varie que très peu puisque le flux principal de la machine est sensiblement constant. Ainsi, l'angle φ diminue lorsque la charge augmente .

Si la charge du moteur continue à augmenter et devient supérieure à sa valeur nominale, les flux magnétiques de fuite croissent rapidement de sorte que la composante réactive du courant devient plus forte et l'angle φ accuse une nouvelle augmentation .

La figure (III.3.5b), illustre l'allure type de la courbe de facteur de puissance $\cos \varphi$ en fonction de la puissance réactive P/P_n du moteur, les valeurs maximales de $\cos \varphi$, de l'ordre de 0,8 à 0,9 sont obtenues pour des charges voisines de la charge nominale .Aux faible charges , le facteur de puissance est très mauvais .Ainsi , la puissance d'un moteur asynchrone doit – elle être choisie de manière que le moteur soit suffisamment chargé .

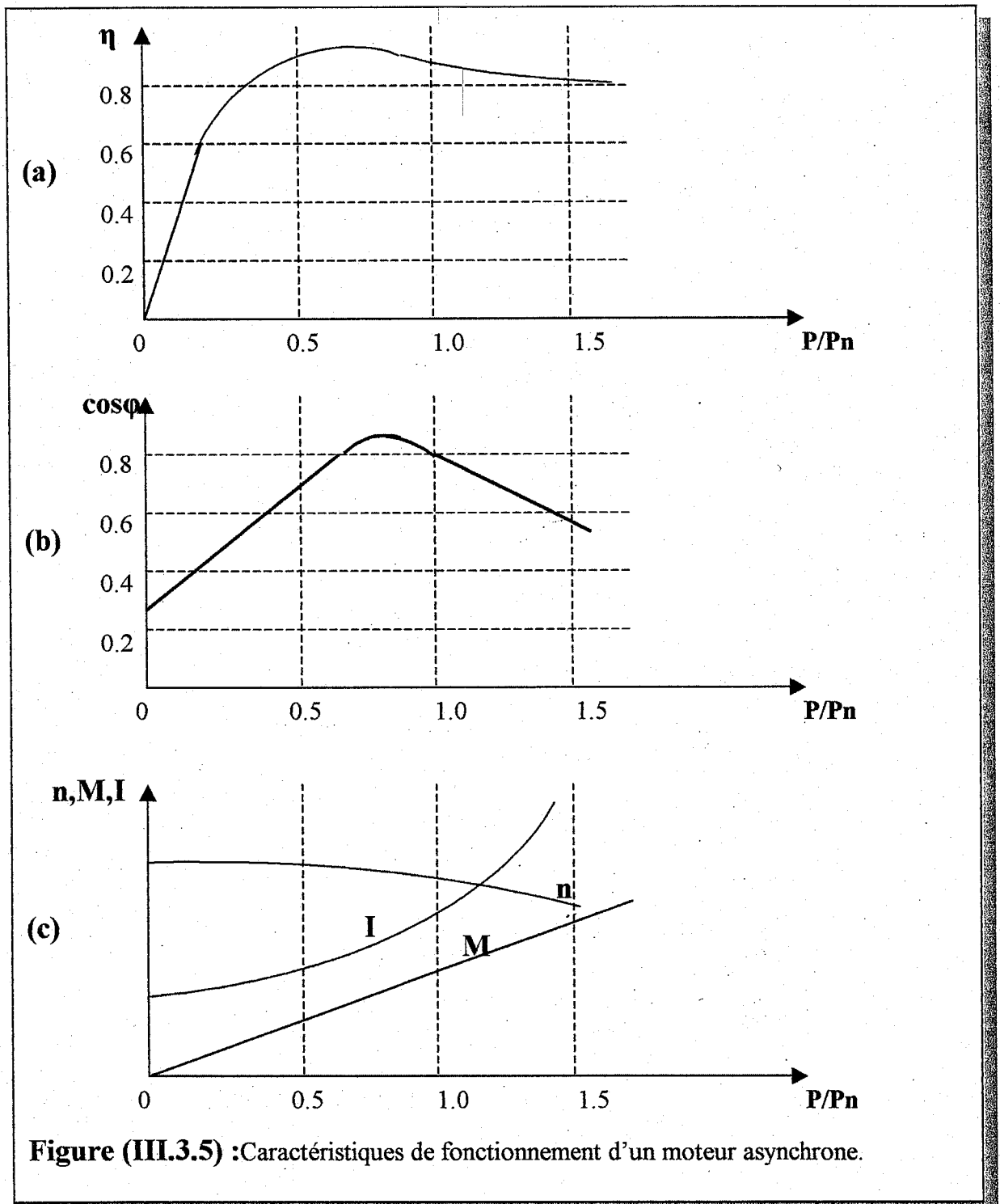
Parfois, pour améliorer le facteur de puissance on passe au couplage en étoile. Un tel procédé est employé dans le cas où le moteur construit pour fonctionner normalement avec ses enroulements statoriques couplés en triangle, est relativement peu chargé pour une certaine période .

Dans ces conditions, les enroulements du moteur, qui sont couplés en triangle pour le fonctionnement en charge nominale, sont groupés en étoile lorsque la charge se trouve réduite au tiers (pour la même tension du réseau). Chacun des enroulements statoriques est dès lors sous une tension simple qui est $\sqrt{3}$ fois moins grande que la tension entre phase du réseau. Les F.E.M et le flux principal de la machine sont réduits sensiblement dans le même rapport. Il en résulte une diminution du courant magnétisant et de la composante réactive du courant absorbé au réseau. Quant à la puissance active, elle demeure égale à la puissance absorbée par l'organe entraîné, déduction faite des pertes. Par conséquent, l'angle φ diminue et le facteur de puissance $\cos \varphi$ s'améliore. Le couple maximal de la machine varie dans ce cas en raison directe du carré de la tension simple, c'est à dire qu'il est réduit dans le rapport 1:3.

Les courbes traduisant la variation de la vitesse , du courant, du couple moteur, du rendement et du facteur de puissance $\cos \varphi$ en fonction de la puissance utile en marche industrielle du moteur, c'est à dire pour des valeurs nominales maintenues constante de la tension et de la fréquence du réseau d'alimentation,

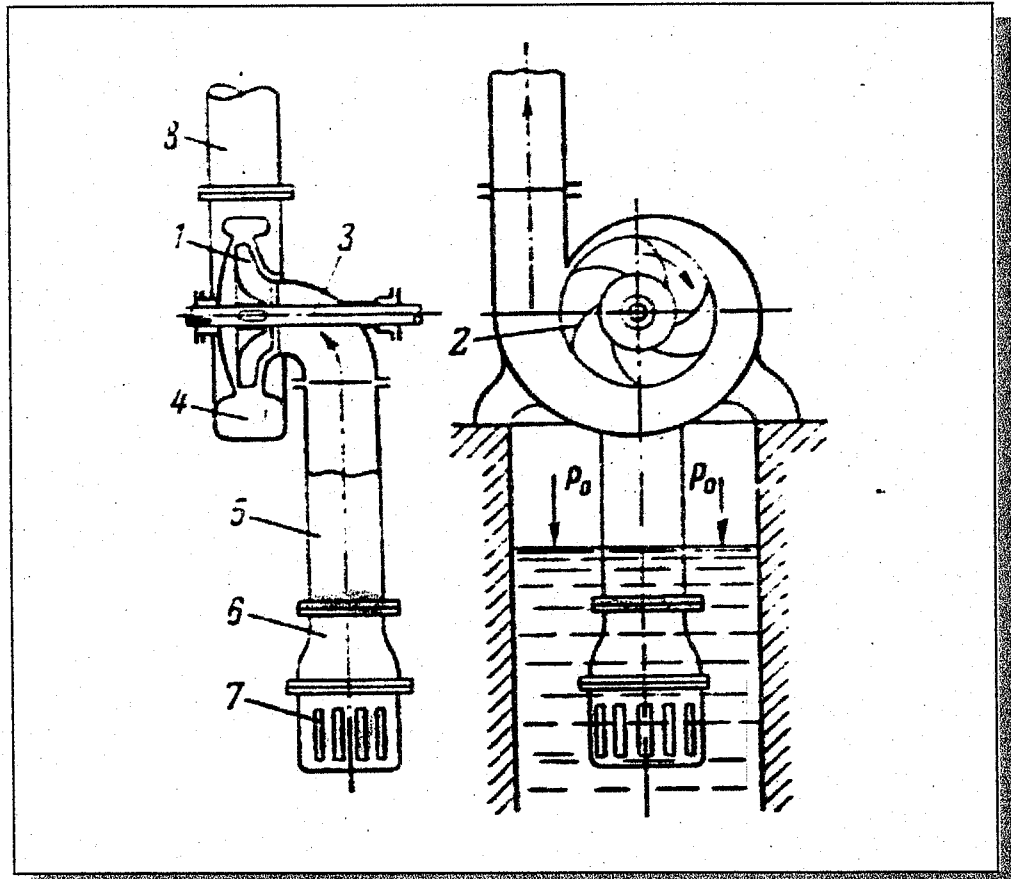
portent le nom de *caractéristiques naturelles* ou de *caractéristiques de fonctionnement du moteur*. De telles caractéristiques typiques d'un moteur asynchrone sont donnée sur la figure (III.3.5c) .

Le couple moteur est sensiblement proportionnel à la puissance étant donné que la baisse de vitesse avec l'augmentation de la charge est peu importante .



III.4 THEORIE DES POMPES

1. Destination et domaine d'application des pompes.
2. Principaux types de pompe.
3. Définitions principales en usage dans la théorie des pompes.
4. Organisation et principe de fonctionnement des pompes centrifuges.
5. Caractéristique de la pompe .
6. Schéma du réglage du débit et la hauteur de la pompe .
7. Economie d'énergie pour un entraînement de pompe avec variation triphasé.



Liste des symboles

h_{as}	:Hauteur de charge à l'aspiration (hauteur d'installation de la pompe).
h_{w-as}	:Pertes d'énergies sur le parcours d'aspiration.
P_o	:Pression sur la surface libre du liquide dans réservoir.
P_{en}	:Pression à la section d'entrée de la pompe.
V_{en}	:Vitesse de liquide dans le tube d'aspiration.
P_v	:Pression de vaporisation.
h_{ref}	:Hauteur géodésique de refoulement .
h_{w-ref}	:Pertes au refoulement .
H	:Hauteur totale de la pompe
E_v	:Energie spécifique du flux de liquide dans la section d'aspiration.
E_p	:Energie spécifique du flux de liquide dans la section de refoulement.
Z_v	:Distance verticale entre le manomètre de vide et l'axe de la pompe.
Z_p	: Distance verticale entre le manomètre de pression et l'axe de la pompe.
P_p	:Pression indiqué par le manomètre de pression .
P_v	:Pression indiqué par le manomètre de vide.
V_{as}	:Vitesse dans le tube d'aspiration .
V_{ref}	: Vitesse dans le tube de refoulement.
H_p	:Hauteur manométrique de la pompe .
L	:Travail utile produit par la pompe.
τ	:Temps dépensé pour produire le travail L .
N_u	:Puissance utile de la pompe.
Q	:Débit de liquide.
η_h	:Rendement hydraulique.
η_v	:Rendement volumétrique.
η_m	:Rendement mécanique.
η_T	:Rendement total de la pompe.
N_a	:Puissance à l'arbre de la pompe.
H_g	:Hauteur géométrique d'élévation du liquide.
h_l	:Hauteur libre dont la valeur est déterminé par l'ensemble à desservir.
d	:Diamètre de la tuyauterie .
l	:Longueur de la tuyauterie .
ρ, γ	:Densité de liquide.

$$\Delta h = Z_p - Z_v$$

III.4.1 Destination et domaine d'application des pompes

On désigne par pompe les machines hydrauliques conçues pour l'élévation, le refoulement et la véhiculation des liquides.

Pendant son fonctionnement la pompe transforme l'énergie mécanique qui est retransmise à son arbre par un moteur, en énergie potentielle et cinétique de la veine de liquide.

Les pompes sont des machines que l'on peut considérer comme les plus répandues. Elles sont largement utilisées dans différents domaines de l'économie, pour la production de l'énergie, dans l'agriculture, le transport, le génie civil, etc.

III.4.2 Principaux types de pompe

Les différentes exigences imposées aux pompes dans différents domaines de la technique ont nécessité l'élaboration de pompes des types les plus variés se distinguant les unes des autres par leur principe de fonctionnement ainsi que par leurs particularités constructives.

D'après le principe de fonctionnement les pompes sont groupées de la façon suivante :

- *Les pompes à piston et à piston plongeur* dans lesquelles le liquide est véhiculé sous l'action d'un piston se mouvant dans un mouvement rectiligne alternatif. Ces pompes sont surtout utilisées à l'heure actuelle dans les cas où il est nécessaire d'engendrer des pressions élevées à un faible débit.

- *Les pompes à hélice.* On distingue les pompes centrifuges et axiales (hélicoïdes).

Dans les *pompes centrifuges* le débit du liquide s'opère sous l'action de la force centrifuge engendrée par une rotation rapide de la turbine. Dans les *pompes axiales* le liquide est véhiculé par rotation d'une roue en hélice; le liquide se déplace alors le long de l'axe de rotation de la roue. Les pompes à hélice fournissent un grand débit et leur rendement est évalué grâce à la simplicité de leur exploitation elles sont largement appliquées.

- *Les pompes rotatives.* Dans lesquelles la véhiculation du liquide s'opère par aspiration et refoulement de celui-ci à l'aide de corps solide (plaquettes ou dentures se mouvant dans les enceintes de travail). Parmi celles-ci, on notera les *pompes à vis, à engrenages, à barillet, à palettes.* Les pompes de ce groupe sont

largement utilisées dans la construction mécanique (équipement des conduites à huile, transmission hydrauliques, etc).

• Les autres types de pompes :

a) *Les pompes à jet*, dans les quelles le débit du liquide est réalisé par l'énergie d'un autre flux de liquide, de vapeur ou de gaz ;

b) *Les béliers hydrauliques*, dans lequel l'élévation du liquide est produite par l'énergie du coup de bélier.

c) *Les hydro-élévateurs à air*, dans lesquels l'élévation du liquide est réalisée par l'énergie de l'air comprimé.

III.4.3 Définitions principales en usage dans la théorie des pompes

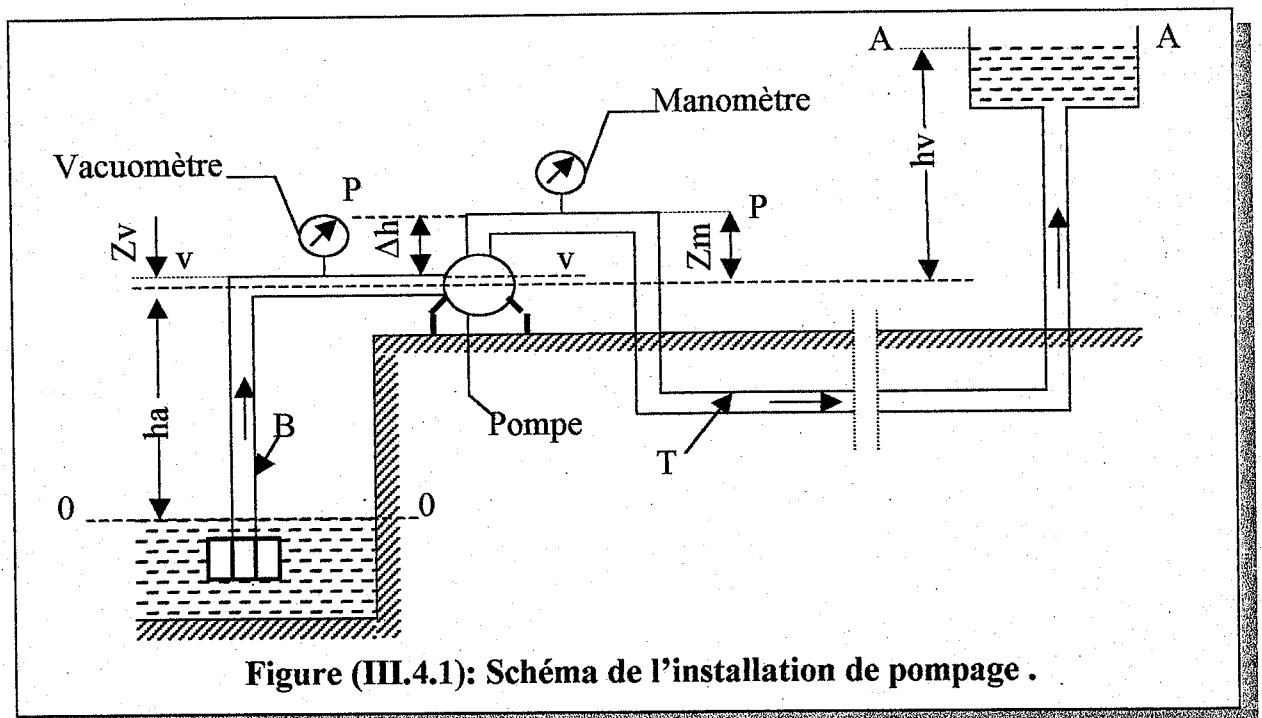


Figure (III.4.1): Schéma de l'installation de pompage .

Une installation de pompage quelconque figure (III.4.1) est constituée par une pompe, un tube d'aspiration (8) et une tuyauterie de refoulement **T** qui amène le liquide véhiculé par la pompe au lieu de destination. A la partie inférieure du tube d'aspiration, il est prévu une crépine s'opposant au passage des corps étrangers dans le tube d'aspiration, et un clapet de retenue indispensable au remplissage de la pompe en liquide avant son démarrage (dans les pompes à hélice) et prévenant le retour du liquide dans le cas d'arrêt de la pompe.

Dans la théorie des pompes il est usité un certain nombre de termes et de définitions concernant les pompes de tous types.

• *Hauteur d'aspiration*, pendant le fonctionnement de la pompe dans son tube d'aspiration il est engendré une dépression qui doit assurer l'élévation du liquide de son plan dans le réservoir de prélèvement jusqu'à l'axe de la pompe sur une hauteur h_{as} , la récupération des pertes d'énergies sur ce parcours h_{was} , l'obtention du mouvement de liquide dans le tube.

La distance verticale h_{as} est appelée hauteur de charge à l'aspiration ou hauteur d'installation de la pompe.

La hauteur de charge à l'aspiration sera :

$$h_{as} = \frac{P_o - P_{en}}{\rho g} - h_{was} - \frac{V_{en}^2}{2g} \quad (III.4.1)$$

Où : P_o : est la pression sur la surface libre du liquide dans le réservoir .

P_{en} : la pression à la section d'entrée de la pompe .

V_{en} : la vitesse du liquide en mouvement dans le tube d'aspiration.

L'on sait qu'avec la réduction de la pression, la température d'ébullition du liquide s'abaisse. Si la pression P_{en} est inférieure à la pression de vaporisation P_v , il se produira un début de vaporisation et le fonctionnement de la pompe sera enfreint.

C'est pourquoi, afin que le liquide ne se transforme pas en vapeur, la pression dans la pompe doit être supérieure à la pression de vaporisation du liquide aspiré à une température donnée. Etant donnée que pendant la marche de la pompe, dans sa conduite d'aspiration il s'opère une réduction de pression jusqu'à la valeur $P_{en} < P_o$, la condition indispensable au fonctionnement continu peut être écrite sous la forme suivante : $P_v < P_{en} < P_o$.

La pression minimale P_{en} de l'eau en fonction de la température ne doit pas être inférieure aux valeurs données dans le tableau (III.4.2).

t°C	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
P_v , m d'eau	0.09	0.12	0.24	0.43	0.75	1.20	2.03	3.18	4.83	7.15	10.33
P_v , KN/m ²	0.88	1.18	2.31	4.22	7.36	12.30	19.80	31.10	47.30	70.30	101.30

Tableau (III-4-2): Pression des vapeurs d'eau P_v en fonction de la température.

Dans le cas contraire, il se produira ce que l'on nomme le *phénomène de cavitation*: le liquide se vaporise en dégageant des bulles de vapeurs qui sont entraînées par le flux en mouvement, puis entrent en collision avec les parois solides de la pompe où elles se condensent. Les particules de liquide cherchent alors à combler à une vitesse élevée les vides ainsi formés, et il se produit des coups de bélier. Aux point de collision on a alors une élévation brusque de la pression (jusqu'à 100MN/m^2) [25], ce qui provoque l'érosion du métal dans la zone de cavitation. La cavitation est accompagnée d'un bruit intense et de craquements à l'intérieur de la pompe; la cavitation provoque la destruction de certaines pièces des pompes dont les surfaces prendront une structure spongieuse. Le phénomène de cavitation est particulièrement néfaste aux pompes centrifuges. La hauteur d'installation de la pompe, à laquelle la cavitation est exclue, est limitée par le type de pompe, la valeur des résistances locales et la température de l'eau, ainsi que par la pression atmosphérique ambiante. La hauteur réelle d'aspiration de l'eau froide ne dépasse pas 6–7m. Lorsque la température de l'eau est supérieur à 70°C , elle est débitée à la pompe sous charge, car la hauteur d'aspiration devient négative.

En général, la hauteur d'aspiration $(P_o - P_{en})/\rho g$ est indiquée par le constructeur dans la fiche technique de la pompe. Cette hauteur, comme on le voit d'après l'équation(III.4.1) est supérieur à la hauteur d'installation de la pompe.

• *Hauteur totale de la pompe*. Dans la pompe en marche le liquide reçoit une énergie complémentaire qui est dépensée pour surmonter la résistance dans la conduite de refoulement et pour son élévation jusqu'au réservoir. La distance verticale h_{ref} entre le centre de la pompe et le niveau de l'eau dans le réservoir récepteur est appelée *hauteur géodésique de refoulement*.

Les pertes d'énergie dans la conduite de refoulement sont appelées *pertes au refoulement* h_{wref} .

La somme des hauteurs géodésique ($h_{as} + h_{ref}$), additionnée à la somme des pertes d'énergie dans le système, est appelée hauteur totale de la pompe H . De cette façon. $H = h_{as} + h_{ref} + h_{was} + h_{wref}$.

La hauteur totale de la pompe exprime la quantité d'énergie que la pompe communique à une unité de masse du liquide véhiculé. La hauteur est mesurée en mètres de la colonne H du liquide pompé ou en unités de pression p . Elle peut être déterminée comme la différence des énergies spécifiques du flux de liquide dans les sections correspondant au début du tube de refoulement et à la fin de celui d'aspiration. Dans ces sections il est à l'ordinaire monté les manomètres de pression et de vide.

Si l'on prend comme plan de comparaison la surface libre du liquide dans le réservoir de prélèvement figure (III.4.1), les énergies spécifiques du flux dans les

sections e-e (à l'endroit où est monté le manomètre de vide) et p-p (à l'endroit où est monté le manomètre de pression) sont déterminées à l'aide de la formule de **Bernoulli** et s'expriment ainsi :

$$E_v = h_{as} + Z_v + \frac{P_v}{\rho g} + \frac{V_{as}^2}{2g}$$

$$E_p = h_{ref} + Z_p + \frac{P_p}{\rho g} + \frac{V_{ref}^2}{2g}$$

où Z_v et Z_p sont respectivement les distances verticales entre les points de montage des manomètres de vide et de pression et l'axe de la pompe ;

P_p et P_v les pressions aux points de montage des manomètres de vide et de pression ;

V_{as} et V_{ref} les vitesses dans le tube d'aspiration et celui de refoulement.

Donc, la hauteur totale de la pompe sera :

$$H = E_p - E_v = h_{as} + Z_p + \frac{P_p}{\rho g} + \frac{V_{ref}^2}{2g} - h_{as} - Z_v - \frac{P_v}{\rho g} - \frac{V_{as}^2}{2g}$$

et , étant donné que $Z_p - Z_v = \Delta h$, la formule de la hauteur totale prend la forme suivante :

$$H = \frac{P_p}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} + \Delta h + \frac{V_{ref}^2 - V_{as}^2}{2g} \quad \text{(III.4.2)}$$

Le manomètre de vide affiche la valeur de la dépression (du vide) dans le tube d'aspiration:

$$h_v = \frac{P_a}{\rho g} - \frac{P_{en}}{\rho g} \Rightarrow \frac{P_{en}}{\rho g} = \frac{P_a}{\rho g} - h_v$$

Le manomètre de pression indique la pression effective dans le tube de refoulement :

$$h_p = \frac{P_p}{\rho g} + \frac{P_a}{\rho g} \Rightarrow \frac{P_p}{\rho g} = h_p - \frac{P_a}{\rho g}$$

En introduisant les valeurs obtenues dans la formule (III.4.2), on obtient :

$$H = h_p + h_v + \Delta h + \frac{V_{ref}^2 - V_{as}^2}{2g} \quad \text{(III.4.3)}$$

La somme des trois valeurs : celles affichées par les manomètres de vide et de pression, exprimées en mètres de la colonne de liquide, et la distance verticale

entre les points de raccordements des appareils, est appelée *hauteur manométrique de la pompe*. Sa valeur sera :

$$H_p = h_p + h_v + \Delta h$$

La hauteur totale de la pompe peut alors être exprimée par l'équation suivante :

$$H = H_p + \frac{V_{ref}^2 - V_{as}^2}{2g} \quad (\text{III.4.4})$$

Dans le cas d'égalité des diamètres des tuyauteries d'aspiration et de refoulement, les vitesses de déplacement du liquide dans les conduites d'aspiration et de refoulement seront identiques ($V_{ref} = V_{as}$), et la hauteur totale de la pompe sera égale à sa hauteur manométrique: $H = H_p$.

• Puissance de la pompe et rendement hydraulique

Le travail utile L produit par la pompe, lorsqu'elle débite à la hauteur $H(m)$ une certaine quantité de liquide, exprimée en unités de masse (kg), sera:

$$L(J) = mgH \quad (\text{III.4.5})$$

Mais $mg = \rho gv$, où v est le volume du liquide au débit, en m^3 .

L'expression (III.4.5) peut alors être écrite sous la forme suivante :

$$L = \rho gvH \quad (\text{III.4.6})$$

D'où la puissance utile de la pompe, c'est-à-dire son travail à la seconde, sera :

$$Nu(kw) = \frac{1}{\tau} = \rho \frac{gvH}{\tau} = \rho gQH \quad (\text{III.4.7})$$

τ étant le temps dépensé pour produire le travail L , ou encore :

$$Nu(kw) = \rho \frac{QH}{102} \quad (\text{III.4.8})$$

Ici $Q = v/\tau$, (m^3/s), est le débit du liquide, c'est-à-dire le volume du liquide de la pompe en une unité de temps.

Lors de la transmission de l'énergie de la pompe au liquide véhiculé, les pertes d'énergies ont des origines suivantes : hydrauliques, volumiques et mécaniques.

▪ *Les pertes hydrauliques* sont les pertes de charge dues au frottement et aux résistances locales; elles sont prises en considération par le rendement hydraulique η_h .

▪ *Les pertes volumiques* sont dues aux fuites de liquide; elles sont prises en considération par le rendement volumétrique η_v .

▪ *Les pertes mécaniques*, c'est-à-dire les pertes de puissance par suite du frottement dans les paliers, etc., sont prises en considération par le rendement mécanique η_m .

L'efficacité d'utilisation de l'énergie par la pompe est évaluée par le rendement total de la pompe: $\eta_T = \eta_h + \eta_v + \eta_m$, qui se détermine comme le rapport entre la puissance utile N_u et la puissance à l'arbre de la pompe N_a , c'est-à-dire

$$\eta_T = \frac{N_u}{N_a} \quad (III.4.9)$$

Pour les pompes centrifuges $\eta_T = 0,77$ à $0,68$.

III.4.4 Organisation et principe de fonctionnement des pompes centrifuges

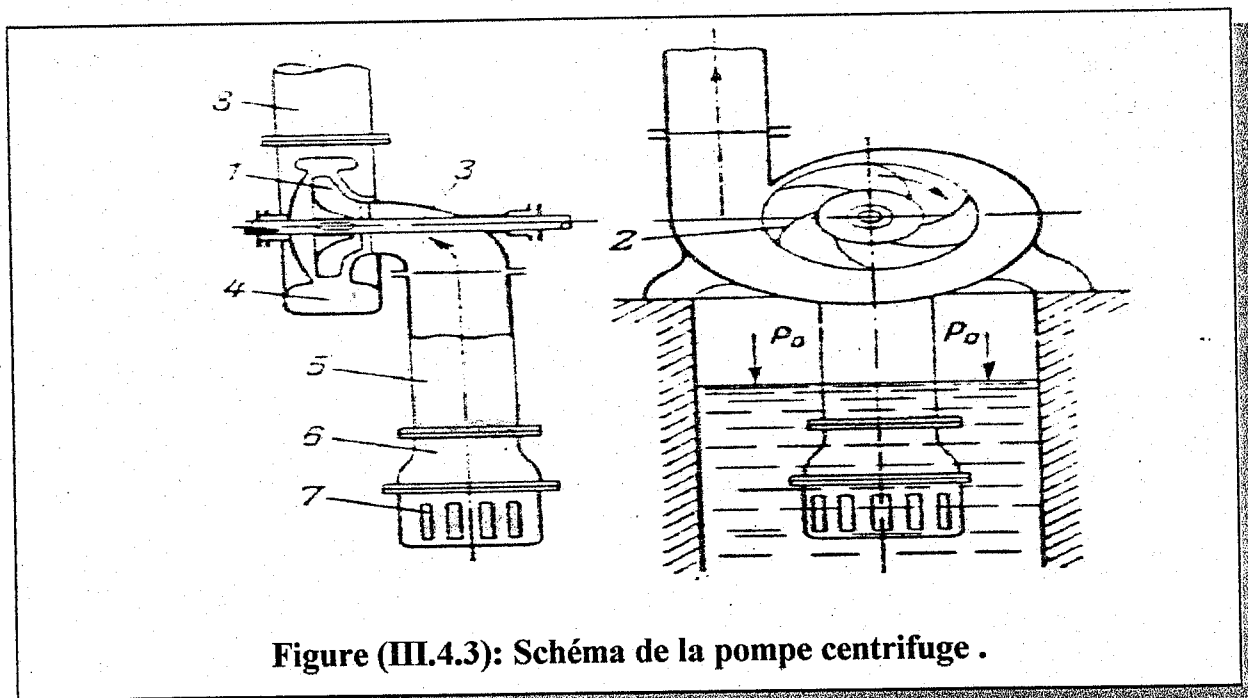


Figure (III.4.3): Schéma de la pompe centrifuge .

A l'heure actuelle, les pompes centrifuges sont les plus répondues grâce à la simplicité de leur construction et la facilité de leur exploitation.

La pompe élémentaire à un étage figure (III.4.3) est constitué par la turbine 1 avec aubes , calée sur l'arbre 3 à l'intérieur d'une bêche fixe 4 en forme de volute. La turbine est constitué par deux disques: le disque avant et le disque arrière; entre

les disques sont disposées les aubes 2 courbées du côté opposé au sens de rotation de la roue.

La bache de la pompe est raccordée par des tubulures aux conduites d'aspiration 5 et de refoulement 8. Au bout du tube d'aspiration sont montés la crépine 7 et le clapet de retenue 6.

Avant la mise en marche, la pompe et l'ensemble de la tuyauterie d'aspiration sont remplis de liquide; le clapet de retenue 6 du tube d'aspiration est alors fermé. Par suite de la rotation rapide de la turbine 1, entraînée par un moteur, il est engendré des forces centrifuges sous l'action desquelles le liquide se trouvant entre les aubes de la roue est refoulé vers le pourtour, et en s'échappant de la roue s'engage dans la bache spirale de la pompe pour passer ensuite dans la tuyauterie de refoulement. Il se produit alors simultanément un abaissement de la pression dans la pompe et dans le tube d'aspiration, le clapet de retenue 6 s'ouvre et le liquide, en passant par le tube d'aspiration 5, débouche dans la pompe sous l'action de la pression extérieure P_0 exercée sur la surface libre de la source de prélèvement. Pendant la rotation ininterrompue de la roue dans la pompe il se forme un flux continu de liquide qui est véhiculé jusqu'à l'emplacement où le liquide doit être débité.

La construction des pompes centrifuges est très variée. Les indices essentiels de classification des pompes sont:

- La hauteur engendrée ;
- Le nombre de turbines ;
- La disposition de l'arbre ;
- Le mode d'amenée de l'eau à la turbine et le mode d'évacuation de l'eau issue de la turbine.

1) D'après la hauteur engendrée l'on distingue les pompes basses pression (jusqu'à 20m), moyenne pression (de 20 à 60m) et haute pression (au-dessus de 60m).

2) D'après le nombre de turbines, les pompes sont à une roue (monocellulaires) et à plusieurs roues (multicellulaires). La pompe centrifuge à une roue peut engendrer une pression ne dépassant pas 50m d'eau ($P=491\text{kN/m}^2$).

Pour obtenir de fortes pressions, les pompes centrifuges sont exécutées avec plusieurs turbines. Dans ces pompes le liquide de la première roue passe à la deuxième. Puis à la troisième et ainsi de suite, grâce à quoi on obtient un accroissement de la pression. Le nombre de roues atteint 10 et parfois même 12.

3) D'après la disposition de l'arbre l'on distingue les pompes horizontales et verticales.

4) D'après le mode d'amenée de l'eau à la turbine l'on distingue les pompes :

- à entrée (aspiration) unilatérale du liquide .
- à entrée bilatérale du liquide ; dans ce dernier cas, le liquide s'engage sur la roue des deux côtés, grâce à quoi on obtient une augmentation du débit de la pompe.

5) D'après le mode d'évacuation du liquide de la turbine l'on distingue les pompes :

- à volute, dans lesquelles le liquide issu de la roue débouche directement dans la bêche spirale ;
- à turbine, dans lesquelles entre la roue et la bêche spirale il est interposé un aubage redresseur.

L'aubage redresseur est constitué par un diffuseur conçu sous forme de roue fixe avec aubes.

III.4.5 Caractéristiques de la pompe

Après leur fabrication, les pompes centrifuges sont soumises à des essais dans les laboratoires du constructeur où l'on détermine la hauteur engendrée par la pompe, son débit, la puissance absorbée et le rendement; on y détermine également la relation entre la hauteur, la puissance absorbée et le rendement et le débit de l'appareil.

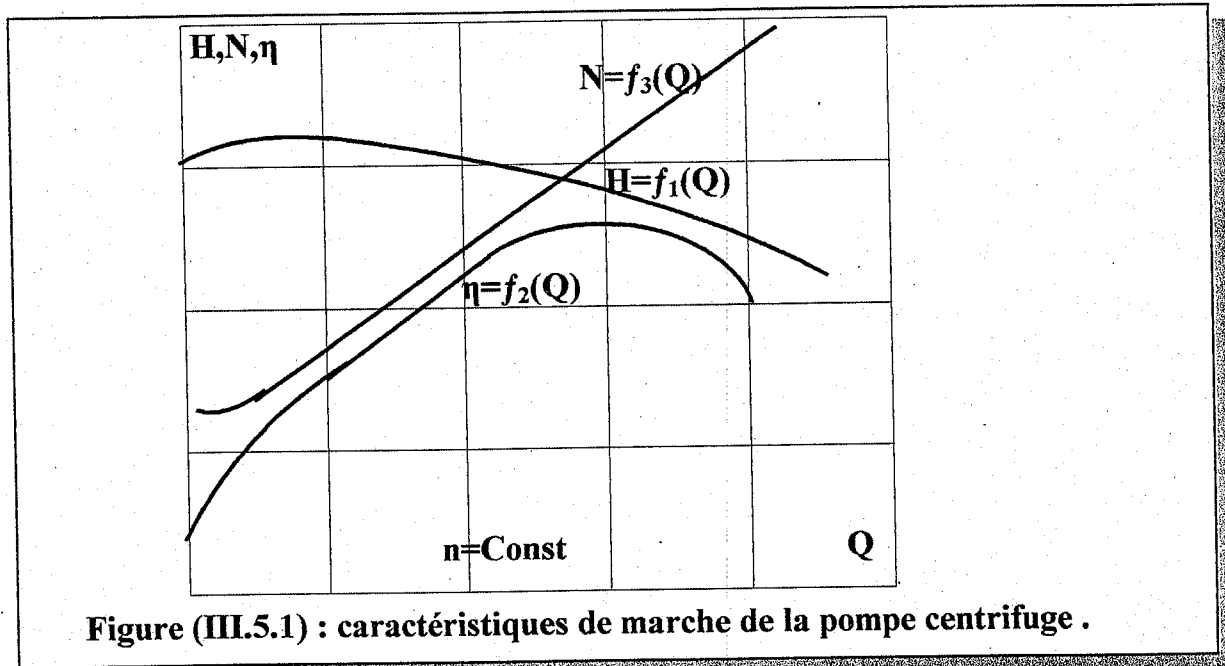
On appelle *caractéristique de marche de la pompe* la représentation graphique de la hauteur H , de la puissance consommée N et du rendement η en fonction du débit Q à une vitesse de rotation constante. Afin de relever les caractéristiques de la pompe, au cours des essais de celle-ci l'on modifie progressivement le degré d'ouverture de la vanne sur la tuyauterie de refoulement et l'on obtient différents débits, ainsi que les pressions qui leur correspondent, à une vitesse de rotation constante, et les valeurs des puissances absorbées et du rendement. Les résultats des essais sont rapportés sur un graphique qui constitue la caractéristique de la pompe.

Sur la figure (III.5.1) à titre d'exemple il est donné les caractéristiques de marche d'une pompe sous forme de courbes:

$H=f_1(Q)$, $\eta=f_2(Q)$ et $N=f_3(Q)$, tracées sur un même graphique, la courbe $H=f_1(Q)$ étant alors dénommée *caractéristique principale de la pompe centrifuge*. La courbe de la caractéristique principale dépend de la construction de la pompe et peut être normale, plate et plongeante.

Si, en présence d'une variation importante du débit, la hauteur se modifie d'une façon peu considérable, la courbe caractéristique principale de la pompe est

plate. Si pour de faibles variations de débit il se produit une variation considérable de la hauteur. La courbe caractéristique principale de cette pompe s'abaisse brusquement (courbe plongeante). Les pompes à caractéristique normale conviendront pour les conditions où pendant la marche la hauteur et le débit varient.



Le régime de marche de la pompe donnant le meilleur rendement est appelé *régime optimal*. La pompe doit fonctionner dans les zones des régimes auxquels le rendement est assez élevé et constitue environ 93-95 % de sa valeur maximale (sur la figure (III.5.1) c'est-à-dire la courbe η).

A l'aide des caractéristiques de marche l'on résout pratiquement les problèmes concernant la convenance de la pompe pour le travail dans un réseau donné et l'on choisit le régime optimal de fonctionnement de l'appareil. Le choix du régime de marche de la pompe est facilité par les caractéristiques universelles figure (III.5.2).

En utilisant les caractéristiques universelles l'on peut déterminer :

- a- La vitesse de rotation qu'il faut pour l'obtention des valeurs requises de Q et H ;
- b- La hauteur que peut fournir la pompe à la vitesse de rotation prescrite et à un débit donné ;
- c- Le débit de la pompe pour des valeurs données de la hauteur H et de la vitesse de rotation n.

Le débit , la hauteur et la puissance de la pompe dépendent de la vitesse de rotation de la roue de pompe de la façon suivante :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} ; \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 ; \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (\text{III.4.10})$$

où Q_1 , H_1 , N_1 sont le débit, la hauteur et la puissance absorbée par la pompe à la vitesse de rotation n_1 ;

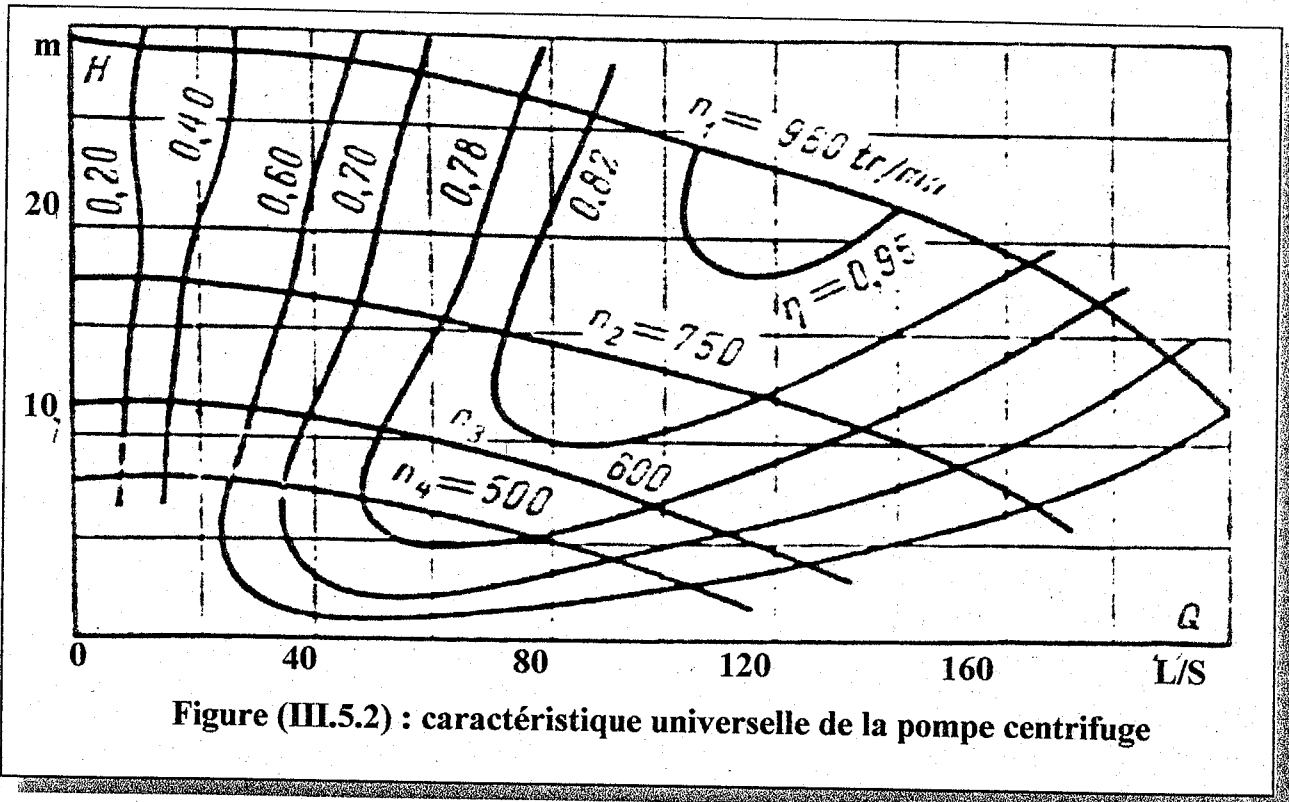


Figure (III.5.2) : caractéristique universelle de la pompe centrifuge

Q_2 , H_2 , N_2 le débit, la hauteur et la puissance absorbée par la pompe à la vitesse de rotation n_2 .

Les relations citées ci-dessus expriment les lois de proportionnalité des pompes centrifuges. Ces lois conviendront également dans le cas où la vitesse de rotation ne varie pas plus de 20% [25].

III.4.6 Schéma de réglage du débit et de la hauteur de la pompe

La pompe fonctionne en régime normal, c'est-à-dire au débit Q , à la hauteur H et à la vitesse de rotation n donnés, quand la charge (hauteur) extérieure qu'elle surmonte est égale à la valeur prescrite.

La hauteur extérieure H que la pompe surmonte dans la tuyauterie (dans le réseau de canalisation) est déterminée par calcul hydraulique.

$$\text{Soit : } H = H_g + h_1 + h_w = H_g + h_1 + a \frac{lQ^2}{d^5} \quad (\text{III.4.11})$$

Où H_g est la hauteur géométrique d'élévation du liquide;

h_1 : la hauteur libre dont la valeur est déterminée par l'ensemble à desservir;

d : le diamètre de la tuyauterie ;

l : la longueur de la tuyauterie ;

Q : le débit de liquide par la tuyauterie.

$a = d^5/k^2$ (k est la caractéristique de débit de la section).

Pour les conditions données les valeurs de H_g , h_1 , a , l , d sont connues c'est pourquoi la hauteur H peut être représentée par la relation:

$$H = A + B.Q^2 \quad (\text{III.4.12})$$

Où $A = H_g + h_1$ et $B = a.l/d^5$ sont des grandeurs constantes.

L'expression (III.4.12) est appelée caractéristique de la tuyauterie et représente la relation entre la hauteur H et le débit Q , c'est-à-dire $H = f_0(Q)$, qui peut être graphiquement représentée par une courbe de forme parabolique.

Si la caractéristique de la tuyauterie (courbe 1) est rapportée à la même échelle sur la caractéristique de fonctionnement de la pompe (courbe 2), l'intersection des courbes $H = f_0(Q)$ et $H = f_1(Q)$ donne ce qu'on appelle *le point de fonctionnement A de la pompe* (figure III.4.3). La marche de la pompe au régime du point de fonctionnement est la plus économique.

Cependant, la quantité d'eau consommée par la canalisation se modifie dans le temps, et c'est pourquoi le point de fonctionnement doit modifier sa position sur la courbe caractéristique de la pompe.

La variation artificielle de la caractéristique de la tuyauterie ou de la pompe dans le but d'assurer les valeurs prescrites du débit et de la hauteur de la pompe est appelée *réglage*.

La variation des caractéristiques de la tuyauterie est obtenue par étranglement à l'aide d'une vanne, la modification de la caractéristique de la pompe par changement de la vitesse de rotation de la pompe tenant compte de la relation (III.4.10).

Les pompes centrifuges sont le plus souvent montées sur un arbre commun avec des moteurs asynchrones triphasés tournant à des vitesses constantes de 720, 960, 1450 et 2900 tr/mn..

C'est pourquoi le réglage du débit de la pompe et de la hauteur est le plus souvent réalisé en manœuvrant la vanne sur la tuyauterie de refoulement (réglage par étranglement).

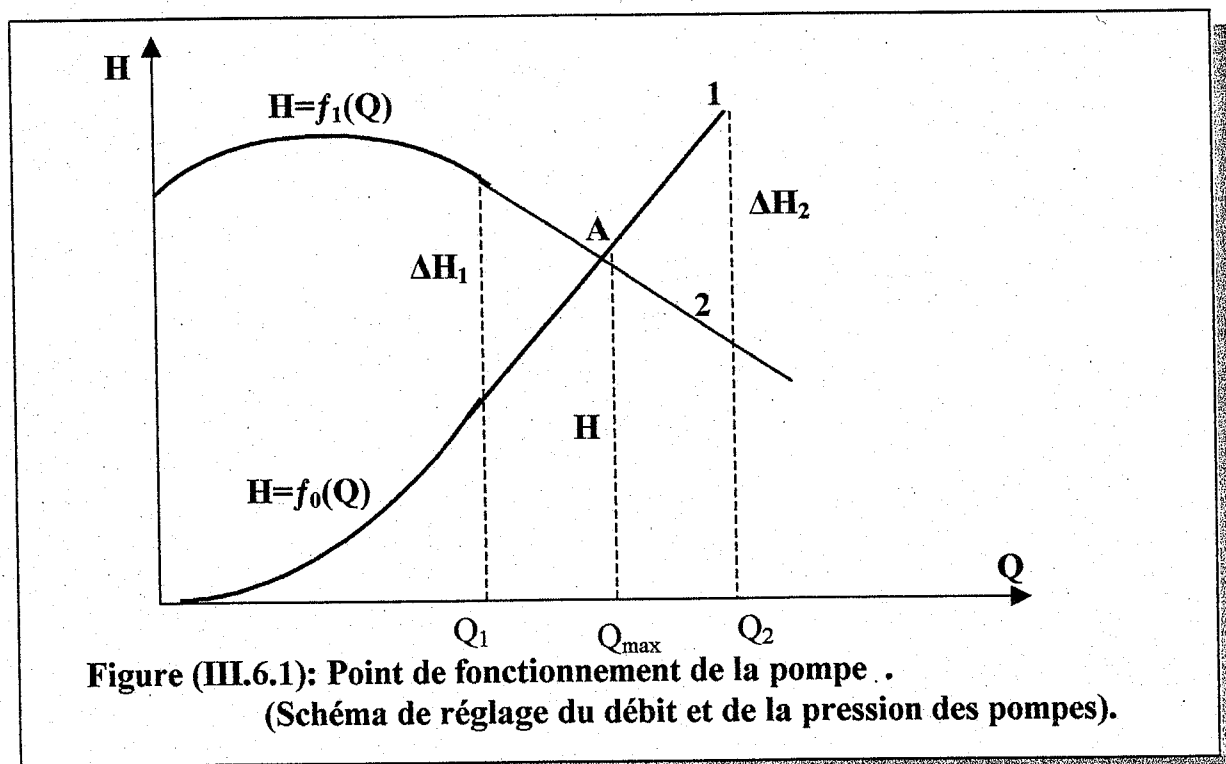


Figure (III.6.1): Point de fonctionnement de la pompe .
(Schéma de réglage du débit et de la pression des pompes).

Chaque degré d'ouverture de la vanne correspond, par suite de la résistance complémentaire obtenue, à une caractéristique donnée de la tuyauterie figure(III.6.1). par variation du degré d'ouverture de la vanne, c'est-à-dire par variation des pertes de charge dans la vanne $h_w=a.l.Q^2/d^5$, l'on peut obtenir un débit quelconque compris entre Q_{max} , lorsque la vanne est complètement ouverte, et le débit nul, lorsque la vanne est fermée.

Ainsi, par exemple si $Q_1 < Q_{max}$, l'énergie du moteur est dépensée pour engendrer une hauteur supplémentaire ΔH_1 qui doit être absorbée par la vanne.

Si $Q_2 > Q_{max}$, comme on le voit d'après la figure (III.6.1), la hauteur développée par la pompe ne peut suffire à ce débit.

Pour obtenir un débit supérieur à Q_{max} correspondant au point de fonctionnement de la pompe, le réglage par vanne n'est pas appliqué.

Dans ce cas, il faudra choisir une autre caractéristique de la pompe ou utiliser une nouvelle pompe. Il est alors recommandé de se rapporter au catalogue de référence.

Afin de pouvoir régler la vitesse de rotation, certains moteurs asynchrones sont dotés d'un bobinage statorique spécial permettant par commutation des

enroulements sur un nombre différents de paires de pôles, d'obtenir différents schémas de couplage du moteur. Les pompes entraînées par de tel moteurs peuvent modifier leur hauteur, leur rendement et leur puissance conformément aux relations (III.4.10) par changement de leur vitesse de rotation. Ces derniers temps, il est utilisé à cet effet le réglage par changement de la vitesse de rotation du moteur à l'aide d'accouplements électromagnétiques.

III.4.7 Economie d'énergie pour un entraînement de pompe avec variateur triphasé

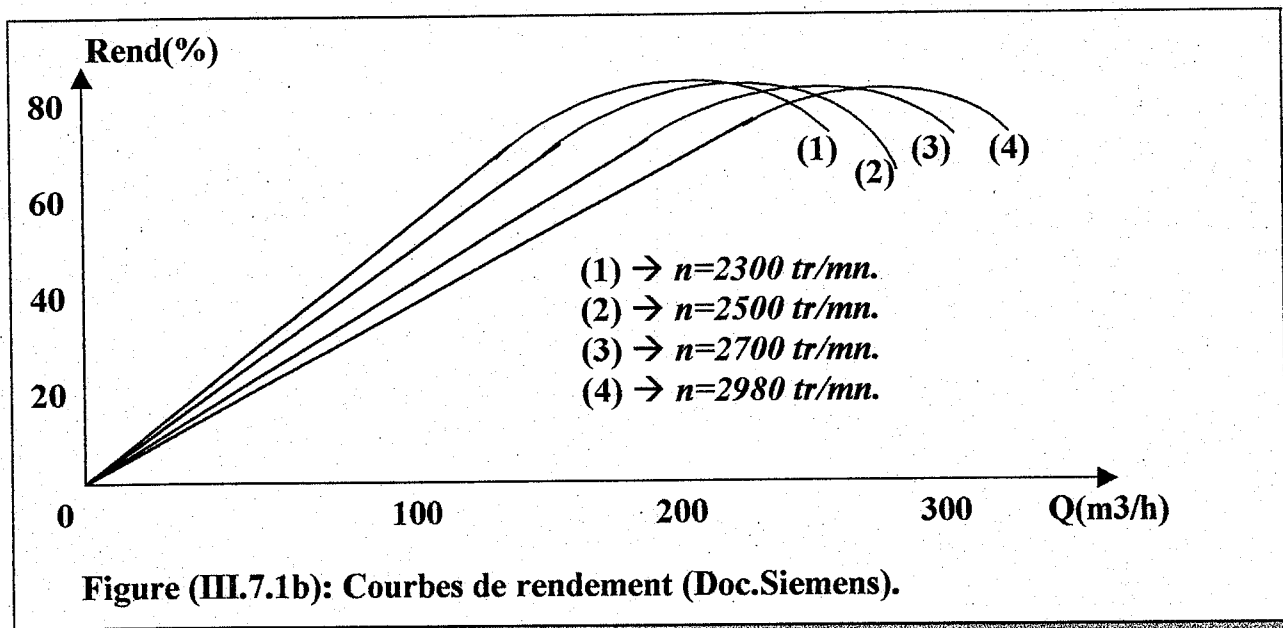
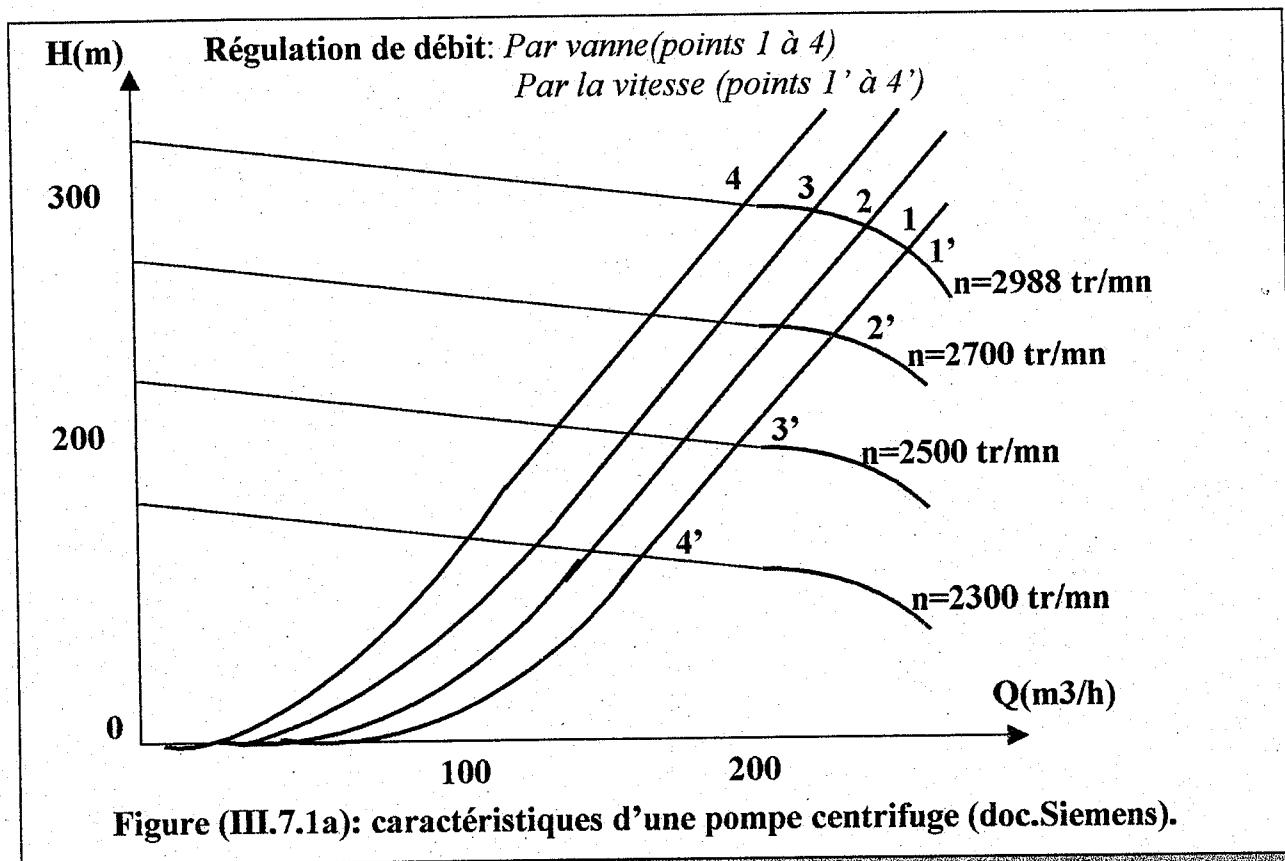
Actuellement avec les nouveaux types d'entraînement à vitesse variable, on a des solutions intéressante qui malgré les coûts d'investissement élevés amènent des avantages déterminants.

Jusqu'à présent, la solution avec moteur à courant continu alimenté par thyristors a donné satisfaction dans de nombreux cas. Toutefois, pour les applications où l'on demandait un entraînement sans entretien, où les conditions d'environnement sont difficiles (atmosphère acide, poussiéreuse, vibrations, etc.) où les vitesses et puissance demandées sont inadmissibles pour les collections du moteur à courant continu, il a fallu trouver de nouvelles solutions.

Jusqu'à une époque récente, bien que les solutions en triphasé étaient connues, elles étaient difficilement applicable à cause des coûts de fabrication des convertisseurs dû en grande partie au manque de composants adaptés. Actuellement avec les progrès de la technique et les nouveaux composants existants sur le marché, il est possible de fabriquer des convertisseurs à des prix d'autant plus acceptables qu'ils permettent souvent d'économiser de l'énergie chère.

Il est intéressant de voir par exemple, dans le cas de pompes centrifuges, ce qu'apporte un entraînement à vitesse variable pour faire varier le débit d'une pompe. Suivant la méthode de réglage employée, il y a de fortes différences de consommation d'énergie. Pour faire varier le débit, il y a deux solutions: *entraînement à vitesse fixe avec vanne de réglage* ou *entraînement à vitesse variable* avec par exemple moteur à bagues avec résistances de glissement ou convertisseur triphasé d'alimentation.

Pour des pompes entraînées par des moteurs à vitesse variable les figures (III.7.1a) et (III.7.1b) représentent les courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge : *les courbes débit-pression* ainsi que *les courbes de rendement de la pompe en fonction de la vitesse*.



En cas de vitesse fixe et de réglage de débit par vanne, on a les points 1 à 4, en cas de vitesse variable, les points 1' à 4'.

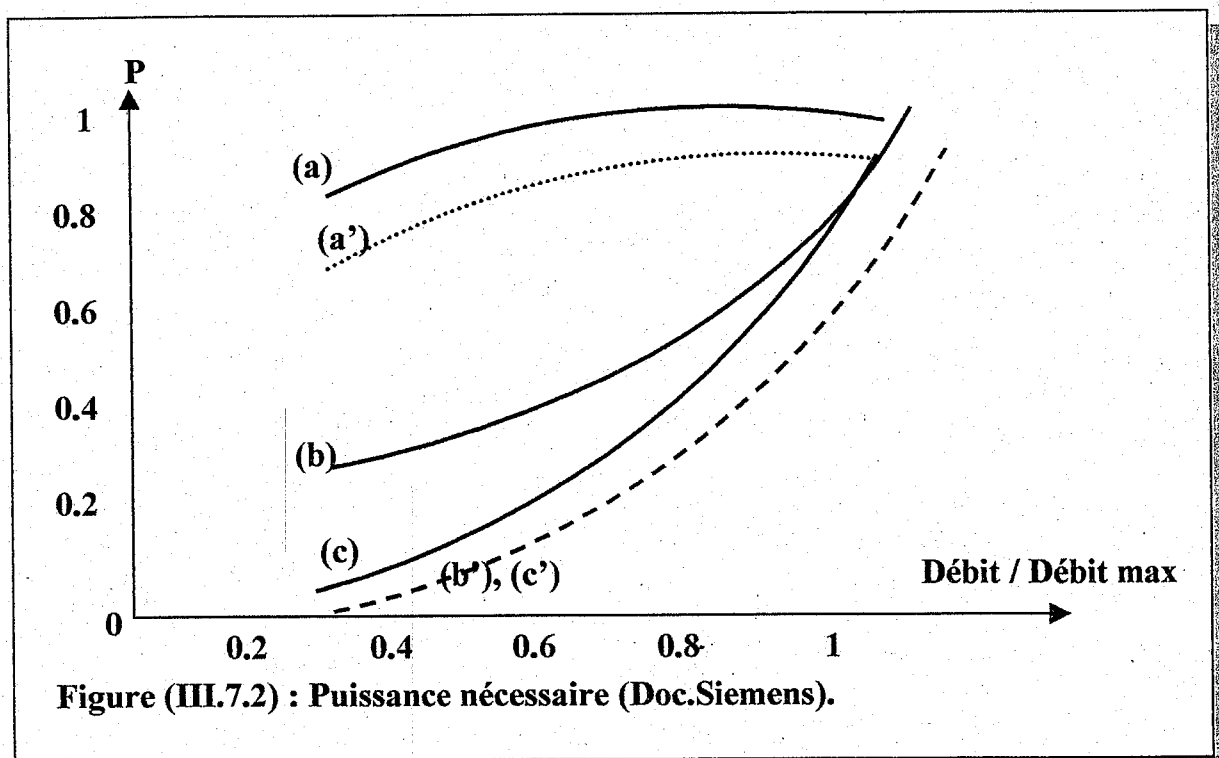
La puissance nécessaire sur l'arbre d'une pompe est donnée par la formule:

$$P = 9.81 \frac{H \cdot Q \cdot \gamma}{\eta}$$

P : puissance mécanique nécessaire en watts.
H : hauteur manométrique en mètres.

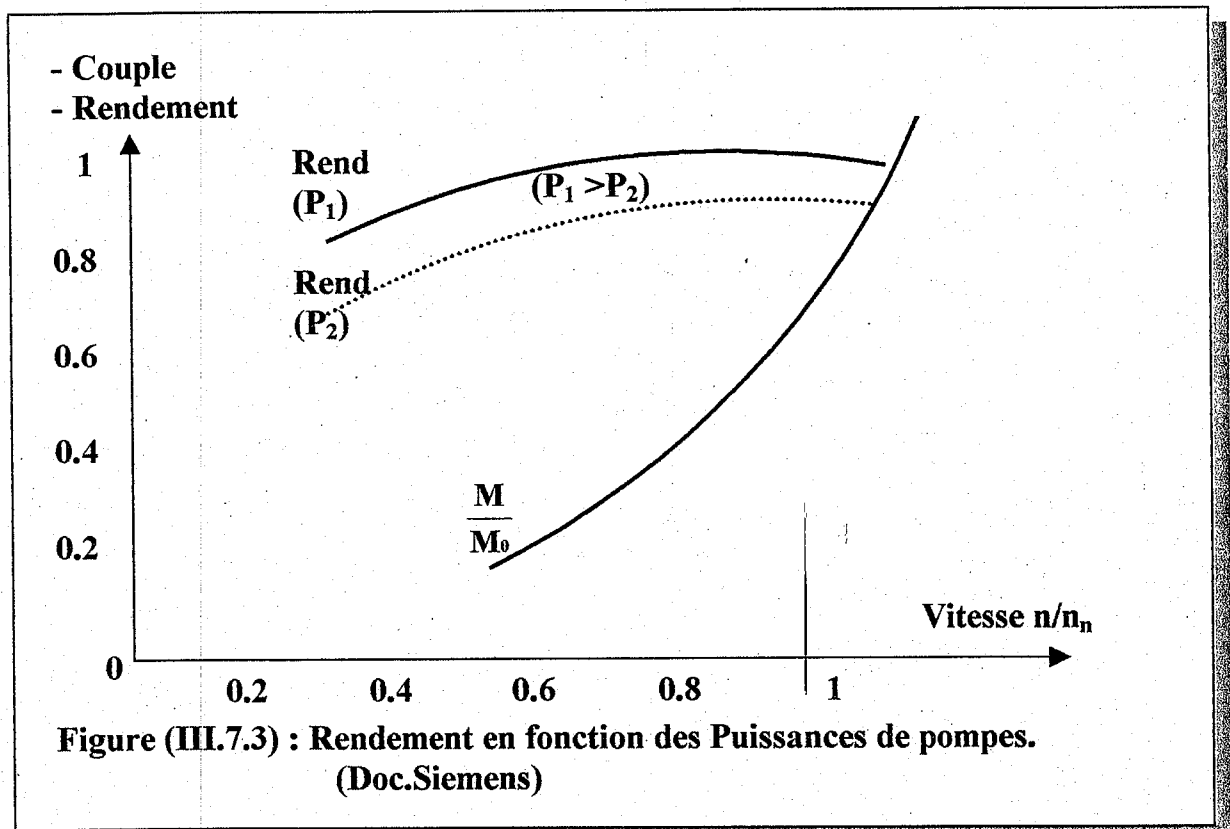
Q : débit de la pompe en m^3/sec
 γ : densité du liquide en Kg/m^3
 η : Rendement de la pompe.

Au point de vue énergétique, ce que intéresse l'utilisateur, c'est la puissance prise au réseau pour les différents points de fonctionnement. La figure (III.7.2) donne les courbes de puissance en fonction des débits pour les différentes méthodes de réglage de ces débits. A l'aide de ces courbes, on peut donc calculer l'énergie épargnée en fonction du système choisis et du programme de marche de la pompe on voit de suite l'économie d'énergie non négligeable amenée par un système à vitesse variable. Les coûts d'investissement supplémentaires s'amortiront rapidement.



Pour le point de débit maximum, la puissance prise au réseau par le système à thyristors (courbe c) est supérieure à celle de chacune des deux autres solutions (courbe a et b) cela tient aux pertes dans le convertisseur. Toutefois pour un débit égal à environ 97% du débit maximum on a déjà des valeurs équivalentes.

La figure (III.7.3) donne des valeurs approximatives du rendement total pour deux puissance différentes. Elle permet de faire une évaluation rapide de l'économie d'énergie.

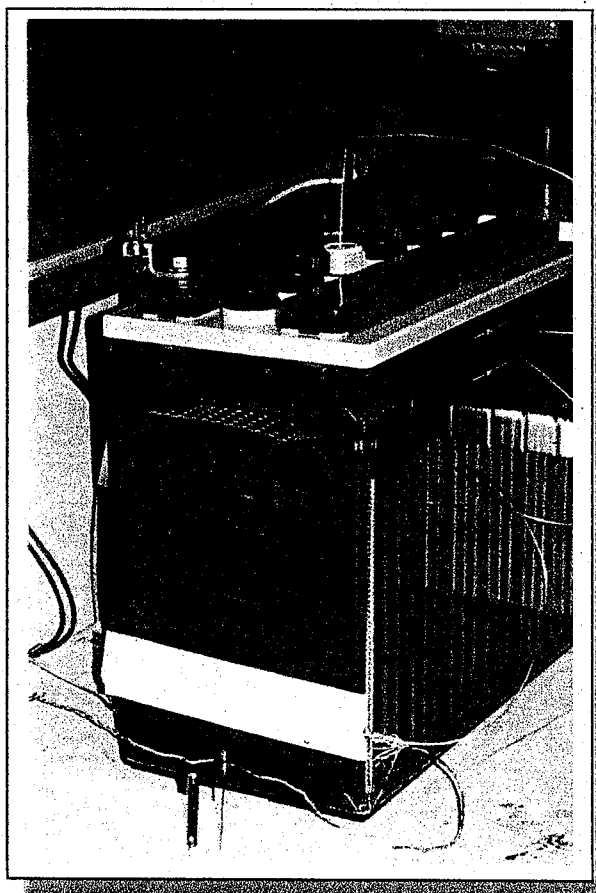


III.5 ACCUMULATEUR

1- Le stockage de l'électricité d'origine photovoltaïque

2- Divers types de batteries

3- Gestion de la vie des batteries.



III.5.1 Le stockage de l'électricité d'origine photovoltaïque

Les générateurs photovoltaïques autonomes ont besoin d'un stockage électrique pour assurer une fourniture d'énergie quasi permanente quelles que soient les séquences d'ensoleillement. Suivant les applications, cette fourniture sera assurée par exemple pendant deux à trois jours pour certains petits systèmes domestiques et pendant une quinzaine de jours pour les applications professionnelles comme les phares et balises maritimes.

III.5.2 Divers types de batteries

Les différentes applications font appel à des batteries de technologie différente afin de garantir le service rendu. Parmi ces technologies, la batterie au plomb, bien que connue depuis plus de cent ans, offre actuellement, et pour de longues années encore, la meilleure réponse en termes de prix et de durée de vie. Certains sites ou les contraintes d'exploitation et d'environnement climatique sont particulièrement sévères peuvent être équipés de batteries au nickel-cadmium mais leur coût prohibitif ne permet pas la généralisation de leur utilisation. Les nouveaux couples (lithium-ion, lithium métal hydrure) présentent des solutions intéressantes pour les applications portables de faible capacité mais sont également trop chers.

Des expériences sont menées dans certains pays du nord (Allemagne, Finlande) pour utiliser *la pile à combustible* comme générateur associé à un stockage conventionnel. Dans ce cas le stockage est assuré par des réserves d'hydrogène produit par des électrolyseurs alimentés à partir de générateurs photovoltaïques. Cette forme de stockage inter-saisonnier ne présente pas d'autodécharge. Si les prix étaient suffisamment compétitifs pour compenser le faible rendement actuel de cette technologie, celle-ci permettrait de résoudre sous nos latitudes les problèmes liés à la variation de production électrique entre été et hiver.

Les systèmes autonomes utiliseront des batteries au plomb à plaques planes de type démarrage pour les installations d'une puissance crête installée proche de la centaine de watts. Les installations plus importantes seront équipées de batteries à plaques tubulaires plus adaptées au cyclage journalier mais d'un coût du kilowattheure stocké de 1,5 à 2 fois plus élevé. Ce type de batterie équipe les installations de plusieurs centaines de watts à plusieurs kilowatts crête et toutes les applications professionnelles pour des raisons de fiabilité et de sécurité (relais hertziens de télévision et de télécommunication, phares maritimes). La batterie au plomb "étanche" est utilisée essentiellement dans des environnements contraignants ne permettant qu'une maintenance très espacée comme l'équipement de balises maritimes ou dans des installations confinées.

Le stockage dans un système photovoltaïque contribue pour une part non négligeable au coût total d'exploitation par ses remplacements successifs durant la durée de vie d'un système. En effet suivant la technologie et l'utilisation des batteries au plomb, leur durée de vie peut varier entre 2 et 15 ans. En outre, le coût total du stockage ne suit pas la même baisse que celle obtenue sur les autres composants d'un système photovoltaïque. Un des objectifs actuels est de doubler la durée de vie des batteries bon marché de conception proche des batteries de démarrages et de prolonger à 20 ans les batteries industrielles de type stationnaire à plaques positives tubulaires. Pour ce faire, la recherche au niveau des industriels porte sur la conception de nouveaux produits plus adaptés aux contraintes des applications photovoltaïques.

III.5.3 Gestion de la vie des batteries

Un deuxième axe de travail concerne l'amélioration des systèmes de gestion de la batterie; il s'agit de préserver celle-ci en la faisant travailler dans les domaines d'état de charge les moins contraignants. Ces améliorations nécessitent une meilleure connaissance des dégradations observées sur site. Les travaux menés actuellement permettant d'identifier et d'étudier les paramètres influents qui sont à l'origine des mécanismes de dégradation.

Les dommages observés, sur des batteries de retour de terrain, sont essentiellement la sulfatation dure, la décohésion de la matière active et, dans une moindre mesure, la corrosion des grilles. Pour mener à bien ces travaux le laboratoire dispose de moyens en cyclage charge-décharge, en étude électrochimique, en caractérisation optique et chimique. Les connaissances acquises permettront la modélisation de ces mécanismes et leurs intégrations dans des algorithmes de gestion adaptatives qui évoluera en fonction des contraintes réellement subies par la batterie soumise aux conditions particulières d'exploitation. Celle-ci sera alors gérée suivant son propre état, son propre comportement et non plus en fonction de paramètres préétablis lors de son installation, ce que contribuera fortement à l'amélioration du service rendu et à terme de la durée de vie du stockage.

III.6 CIRCUITS DE REGLAGE

1. Introduction.

2. Structure d'un réglage échantillonné .

a) Généralité.

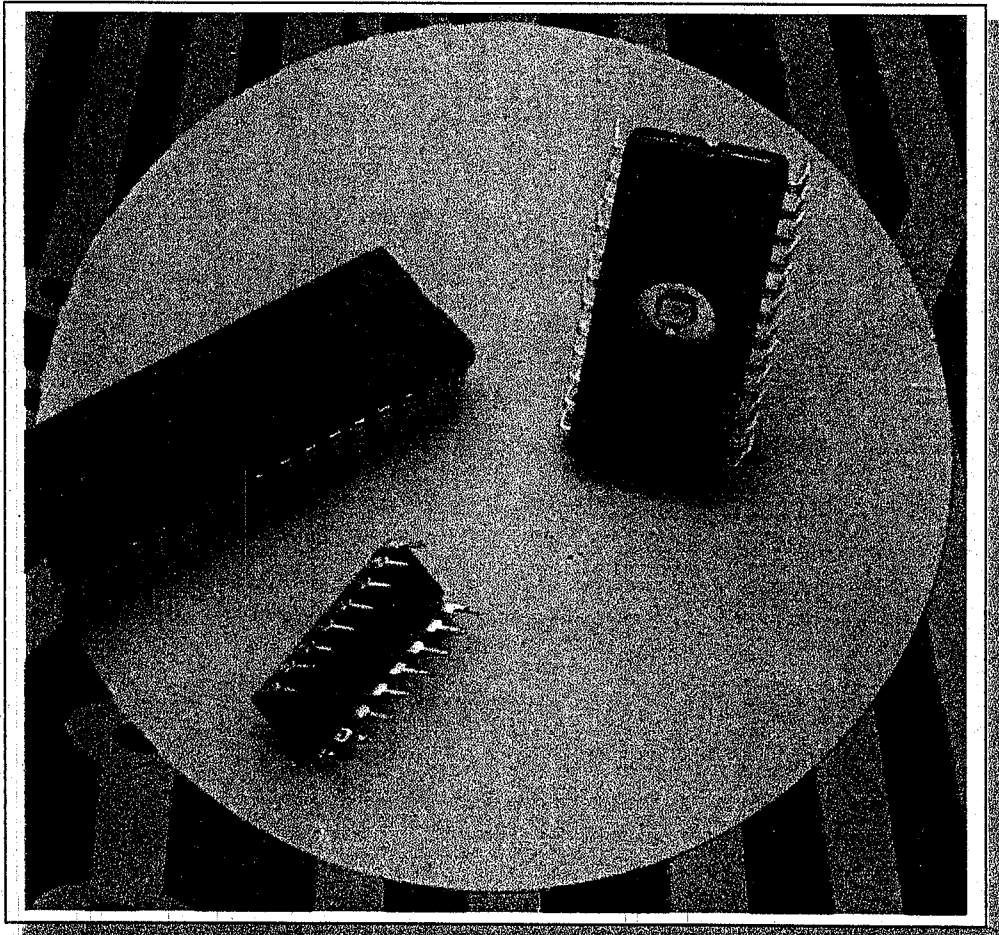
b) Configuration d'un réglage par un système à microprocesseur

3. Modélisation des principaux organes d'un réglage digital.

4. Configuration d'un réglage échantillonné .

5. Architecture générale du dispositif .

- Unité centrale .
- Module DATA.
- Module actionneurs.



Liste des symboles

μP	:Microprocesseur.
T_E	:Période d'échantillonnage
y	:Grandeur à régler .
U_{cm}	:Signal de commande .
T_r	:Temps de retard.
S_h	: Signal d'horloge.
#	: Numérique (discret).
\cap	: Analogique.
A/D	:Convertisseur Analogique – digital .
$X_e^\#$:Signal discret à l'entrée.
$U_{cm}^\#$:Signal de commande discret.
R	:Registre tampon.
D/A	:Convertisseur Digital – Analogique.
w	:Grandeur de consigne.
e^*	:Ecart de réglage.
S	:Système à régler.
OCM	:Organe de commande.
RAM	:Mémoire à lecture et écriture.
PIA	:Interface d'adaptation des périphériques .
ACIA	:Interface parallèle – série .
EPROM	: Interface programmable effaçable.
MUX	:Multiplexeur Analogique – Digital.
H	: Niveau haut (5v).
L	: Niveau bas (0v).
Vcc	:Tension d'alimentation.
$D_0...D_7$:Bus de données.
$A_0...A_{15}$:Bus d'adresses.
CS	:Sélection du boîtier.
OE	:Validation de la sortie.
R/W	:Lecture – Ecriture

III.5.1 Introduction

Comme on l'a mentionné, un système (PPV) combinant plusieurs dispositifs il sera réalisé à chaque instant de fonctionnement, c'est-à-dire en fonction de paramètres instantanés, une optimisation de la chaîne.

Aujourd'hui, les réglages sont réalisés presque exclusivement à l'aide de microprocesseurs ou de processeurs de signal, donc par du matériel informatique. Une description assez détaillée d'un système informatique pour la conduite de processus et des problèmes liés à la programmation en temps réel se trouve dans ([2] Chap 4 et 5). Pour un approfondissement ultérieur des systèmes informatiques (matériel et logiciel), on peut consulter [21] et [22].

Compte tenu du fonctionnement discontinu (échantillonné) de ces réglages par microprocesseurs, on devrait appliquer en toute rigueur des méthodes de traitement inhérent aux systèmes échantillonnés [23], [24].

III.5.2 Structure d'un réglage échantillonné

a) Généralité

Dans cette section, on présentera la structure de base d'un réglage échantillonné à partir de la configuration d'un réglage par microprocesseur et de son fonctionnement discret. Après définition de quelques notions utilisées dans ce contexte, on montrera la modélisation des principaux organes d'un tel réglage. Enfin, on aboutira à la configuration de base d'un réglage échantillonné, configuration qui permettra un traitement analytique. Cette problématique sera alors abordée dans les sections suivantes.

b) Configuration d'un réglage par un système à microprocesseur

la figure (III.1) montre la configuration de base d'un réglage par un système à microprocesseur. Il possède comme partie centrale un microprocesseur ou un processus de signal. Ce dernier doit être utilisé pour des réglages rapides et complexes, comme on les trouve très souvent en relation avec des systèmes d'électronique de puissance. Il y a ensuite une entrée analogique et une sortie analogique, ainsi qu'un périphérique de contrôle. Ce dernier permet de dialoguer avec un opérateur. Celui-ci peut introduire des commandes (démarrage, arrêt, grandeurs de consigne) et obtenir des informations (par instruments de mesure ou affichage graphique ou numérique). Par l'intermédiaire de l'entrée et de la sortie analogiques, qui effectuent la conversion analogique/digitale et vice-versa, le système à microprocesseur est connecté avec l'installation à régler. Cette dernière

est composée d'un organe de commande, d'un système à régler et d'un organe de mesure.

Etant donné que ce réglage est réalisé matériellement par des moyens digitaux (numériques), on parle aussi de *réglage digital* ou de *réglage numérique*.

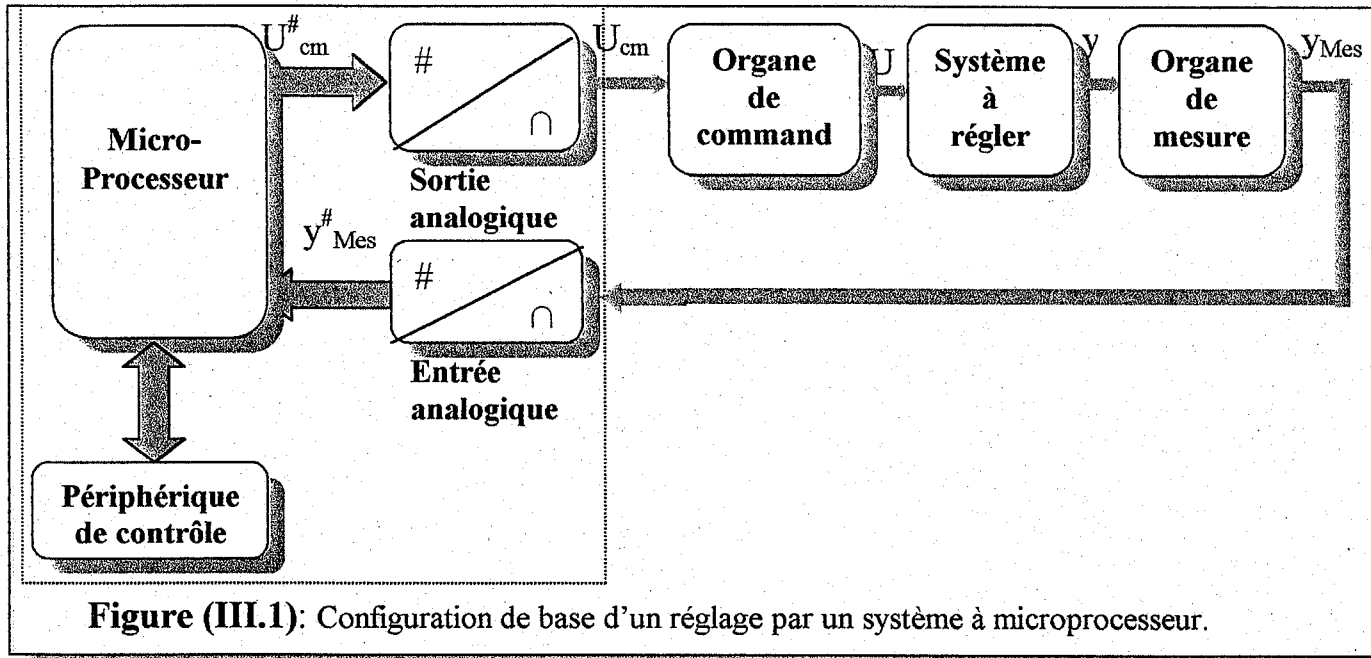


Figure (III.1): Configuration de base d'un réglage par un système à microprocesseur.

Un tel réglage fonctionne de manière discontinue (ou échantillonnée), comme représenté à la figure (III.2). On y voit le traitement périodique avec la période d'échantillonnage T_E . Entre l'acquisition des données (grandeur à régler y) par l'intermédiaire de l'organe de mesure et de l'entrée analogique et l'intervention sur l'organe de commande (signal de commande U_{cm}) par l'intermédiaire de la sortie analogique, il existe le retard t_r , celui-ci est dû au temps de traitement de l'algorithme de réglage par le microprocesseur.

Les instants d'échantillonnage sont synchronisés avec le signal d'horloge S_R .

- Si l'organe de mesure fournit l'information sous forme digitale, on n'a pas besoin de la conversion analogique/digitale et l'entrée analogique est remplacée par une entrée digitale. De même, si l'organe de commande peut être commandé digitalement, la sortie analogique est à remplacer par une sortie digitale. Cela ne change évidemment rien au fonctionnement échantillonné.

Le plus souvent, le système à microprocesseur traite plusieurs réglage, en particulier lors d'un réglage en cascade. L'entrée analogique doit alors être munie d'un multiplexeur. Celui-ci permet de connecter le convertisseur analogique/digital successivement à plusieurs organes de mesures. Pour un réglage multivariable, il y a plusieurs organes de commande. La sortie analogique doit alors être équipée de

plusieurs convertisseurs digitaux/analogiques qui interviennent en parallèle sur les différents organes de commande.

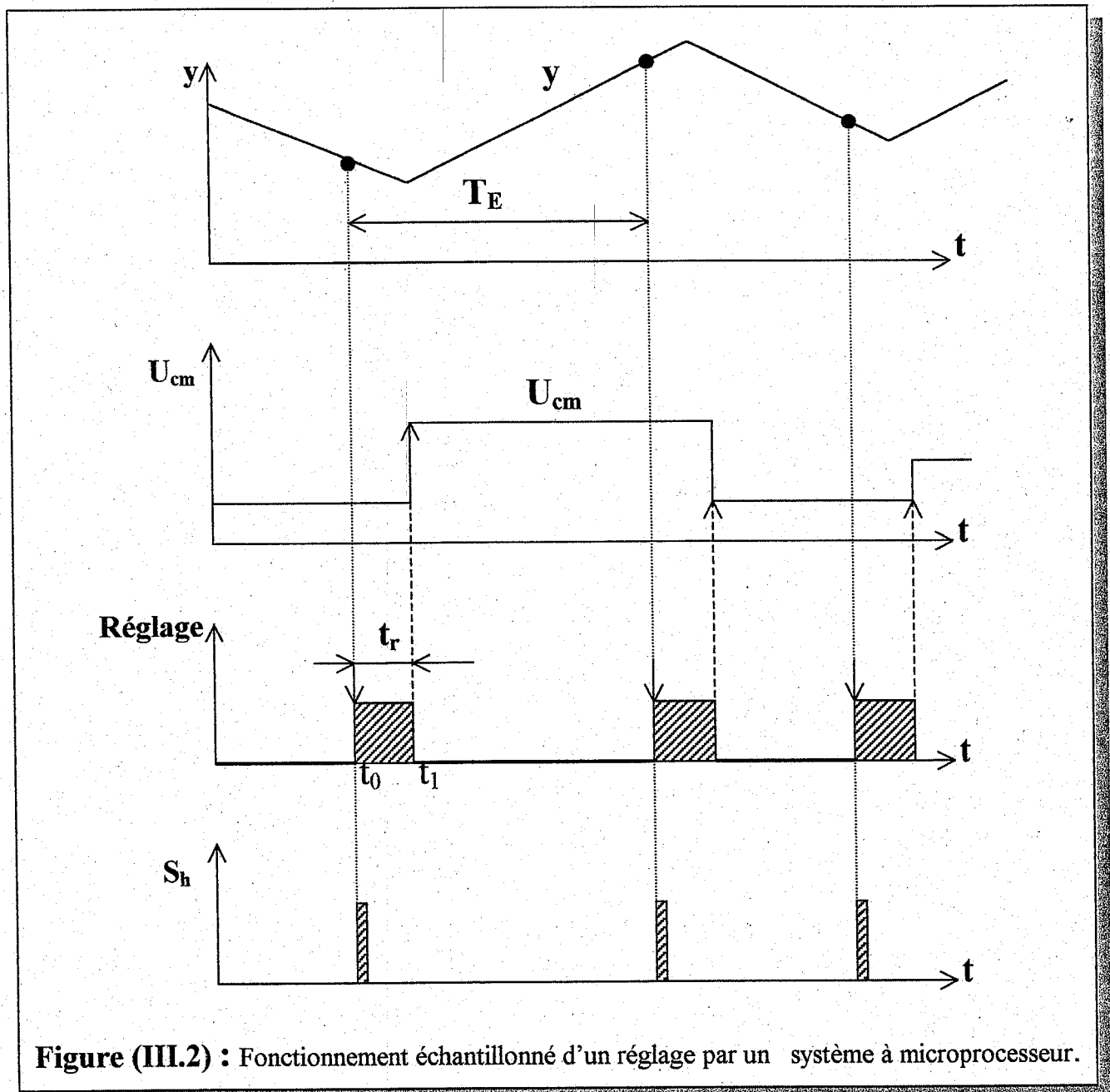


Figure (III.2) : Fonctionnement échantillonné d'un réglage par un système à microprocesseur.

III.5.3 Modélisation des principaux organes d'un réglage digital

Il s'agit maintenant de *modéliser les différents organes d'un réglage digital* par les éléments de base en les complétant, le cas échéant, avec des éléments ou systèmes supplémentaires. Par la suite, on présentera les modèles les plus importants, en premier lieu ceux pour l'entrée analogique, le microprocesseur et la sortie analogique.

• *L'entrée analogique*, comprenant un multiplexeur **M** et un convertisseur **A/D**, peut être modéliser par un échantillonneur idéal Figure (III.3). Dans ce cas, on néglige le temps de conversion et la quantification.

• *Le microprocesseur*, traitant *l'algorithme de réglage* par des grandeurs digitales peut être modélisé par un système discret, comme le montre la figure(III.4). *Un système discret* est un modèle mathématique qui donne une relation entre le signal discret $X_e^{\#}$ à l'entrée et le signal discret $U_{cm}^{\#}$ à la sortie, modélisant ainsi l'algorithme de réglage.

Ce modèle ne tient pas compte du retard t_r , introduit par le traitement de l'algorithme de réglage. Le cas échéant, ce retard peut être pris en considération au niveau de la sortie analogique Figure (III.6).

La figure (III.5) montre que *la sortie analogique*, composé d'un registre tampon **R** et d'un convertisseur **D/A**, peut être modélisé par un échantillonneur à pulsation, suivi d'un élément de maintien. Dans ce cas aussi, on néglige la quantification.

Selon ce modèle, il n'y a aucun retard entre l'instant d'échantillonnage au niveau de l'entrée analogique et celui de la sortie analogique les deux échantillonneurs échantillonnent donc au même instant. Cela est admissible lorsque le retard t_r introduit par le traitement de l'algorithme de réglage ainsi que la conversion **A/D** et **D/A** est très faible par rapport a la période d'échantillonnage T_E . Si ce n'est pas le cas, on doit retarder de $\varepsilon_r = t_r/T_E$ l'impulsion de Dirac dans l'échantillonneur à pulsation, comme le montre la figure (III.6).

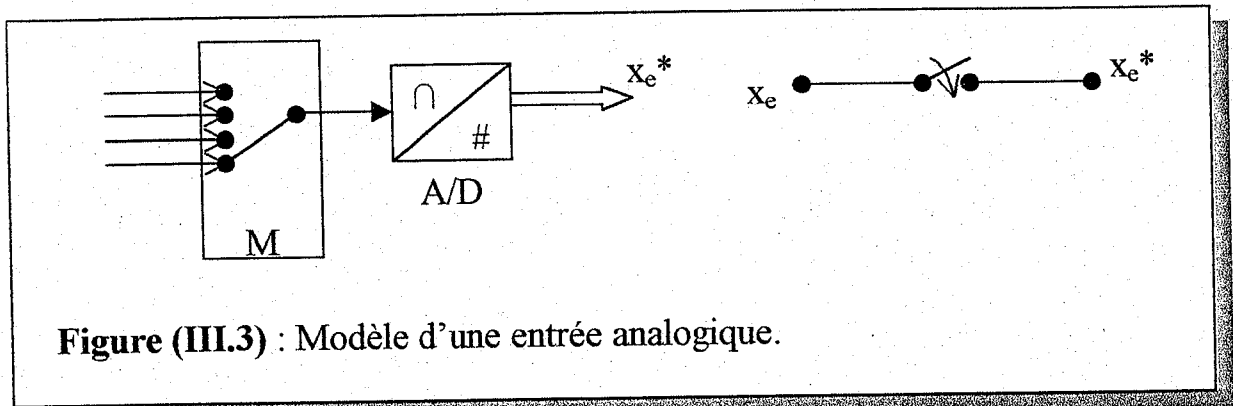


Figure (III.3) : Modèle d'une entrée analogique.

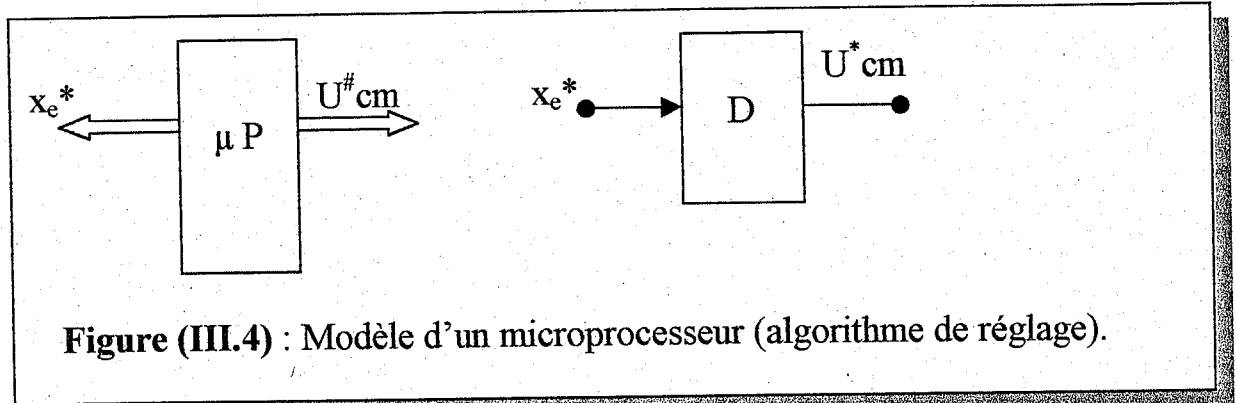


Figure (III.4) : Modèle d'un microprocesseur (algorithme de réglage).

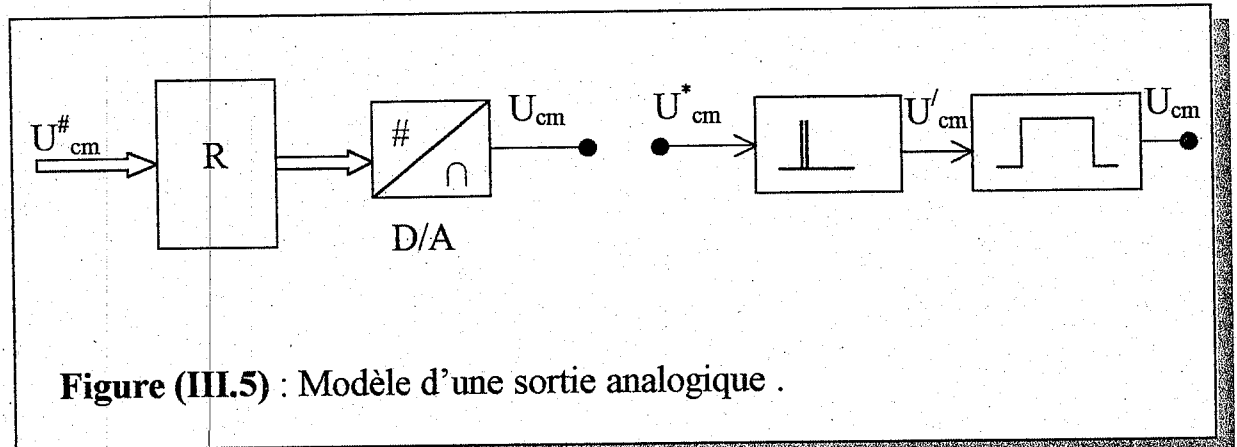


Figure (III.5) : Modèle d'une sortie analogique .

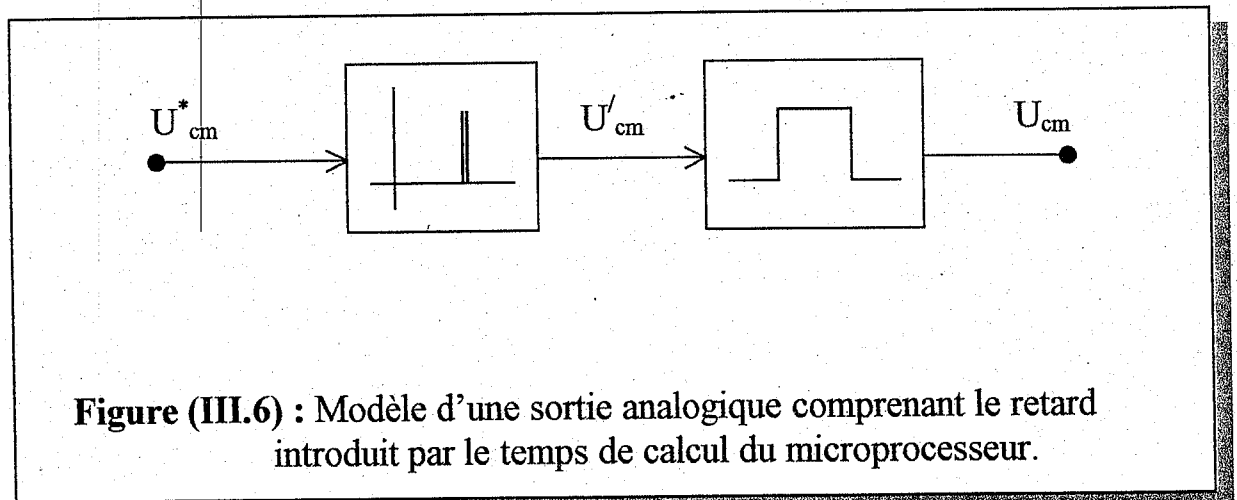


Figure (III.6) : Modèle d'une sortie analogique comprenant le retard introduit par le temps de calcul du microprocesseur.

III.5.4 Configuration d'un réglage échantillonné

La figure (III.7) montre la configuration de base d'un circuit de réglage échantillonné classique. Cette figure est composée des éléments introduits au paragraphe précédent. Il s'agit du modèle mathématique de la configuration matérielle d'un réglage par un système à microprocesseur représenté à la figure (III.1).

La grandeur de consigne w est échantillonnée par l'échantillonneur idéal (1a), de même, la grandeur à régler y par l'échantillonneur idéal (1b). la différence entre w^* et y^* , l'écart de réglage e^* , apparaît à l'entrée du bloc (2). Il s'agit du microprocesseur avec l'algorithme de réglage. Le signal de commande U_{cm}^* passe au travers d'un échantillonneur à pulsation (3) et d'un élément de maintien (4). Enfin, le bloc (5) modélise l'organe de commande OCM, le système à régler S . Ces derniers sont des systèmes continus.

Dans ce cas, on suppose que les deux échantillonneurs idéaux (1a) et (1b) ainsi que l'échantillonneur à pulsation (3) échantillonnent au même instant. Le cas échéant, on doit prévoir un retard ε_T au niveau de l'échantillonneur à pulsation pour tenir compte du temps de calcul du microprocesseur.

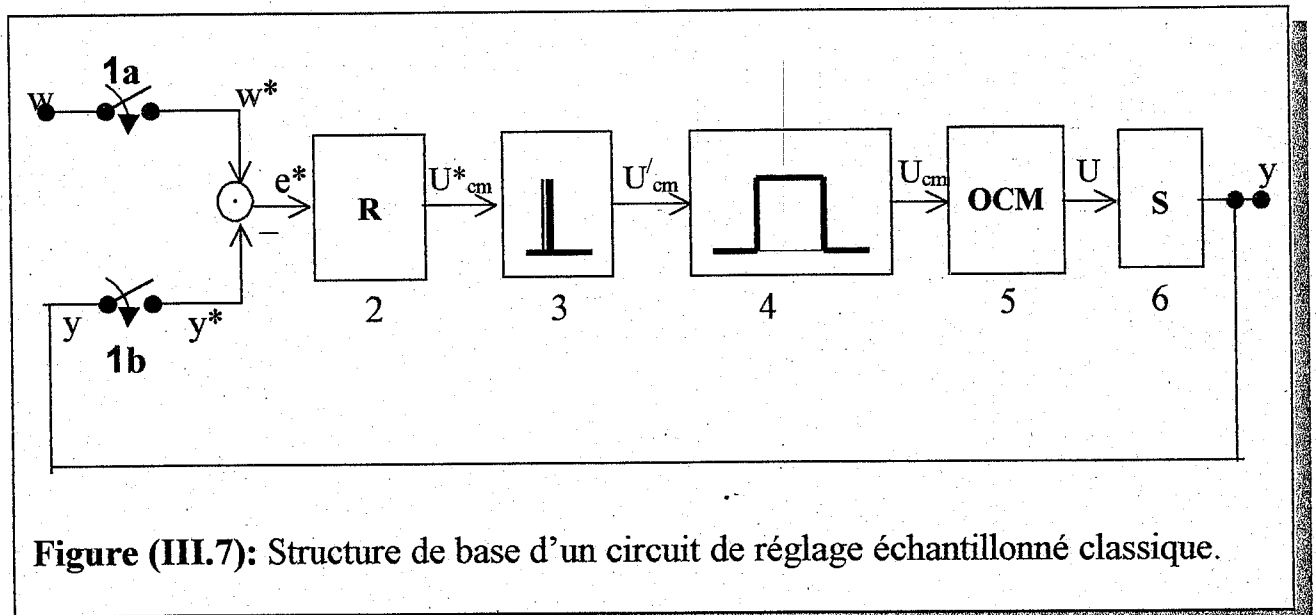


Figure (III.7): Structure de base d'un circuit de réglage échantillonné classique.

III.5.5 Architecture générale du dispositif

Le diagramme fonctionnel du dispositif est représenté dans la figure (III.6.1). Il est bâti autour d'une unité centrale, composé d'un processeur, d'un ensemble de mémoires et d'interfaces assurant les liaisons vers l'extérieur, ainsi que du circuit d'adressage.

On y distingue quatre sous-ensembles :

- a) les entrées.
- b) Les sorties
- c) La mémoire où sont enregistrées les instructions du programme de commande ainsi que des données en cours de traitement.
- d) Le processeur qui exécute les instructions.

La figure (III.6.2) montre une structure plus détaillée du même dispositif. Deux modules entourent l'unité centrale. Un module **DATA** comportant un capteur de température et son amplificateur, un capteur du flux solaire incident, le courant délivré par le **GPV**, la tension aux bornes du **GPV**, la température au niveau de la surface de prélèvement, la pression d'entrée au niveau de la pompe, le niveau de stockage d'eau, la vitesse de rotation du moteur et les paramètres courant - tensions à la sortie des accumulateurs et l'adaptateur.

Les huit (08) signaux analogiques sont appliqués à l'entrée d'un multiplexeur analogique dont le signal de commande de sélection provient du processeur. Le signal analogique sélectionné à la sortie du multiplexeur est converti en numérique au moyen d'un convertisseur **A/N**, dont les ordres de déclenchement de la conversion et de la lecture de la donnée numérisée proviennent du processeur.

Le deuxième module de ce dispositif est constitué d'un ensemble d'actionneurs qui reçoit à ces entrées le signal issu du processeur.

Le fonctionnement général du système, géré par un programme comprend essentiellement deux (02) phases. Une phase dans laquelle les huit (08) données de l'installation sont recueillies, traitées et mémorisées et une deuxième phase dans laquelle ces données préparées sont émises vers les actionneurs au moment opportun, grâce à la reconnaissance des signaux de comparaison entre les valeurs de consigne et celles des données traitées. Le programme de gestion sera analysé dans le prochain chapitre.

Nous allons maintenant procéder à une description plus détaillée des différents éléments.

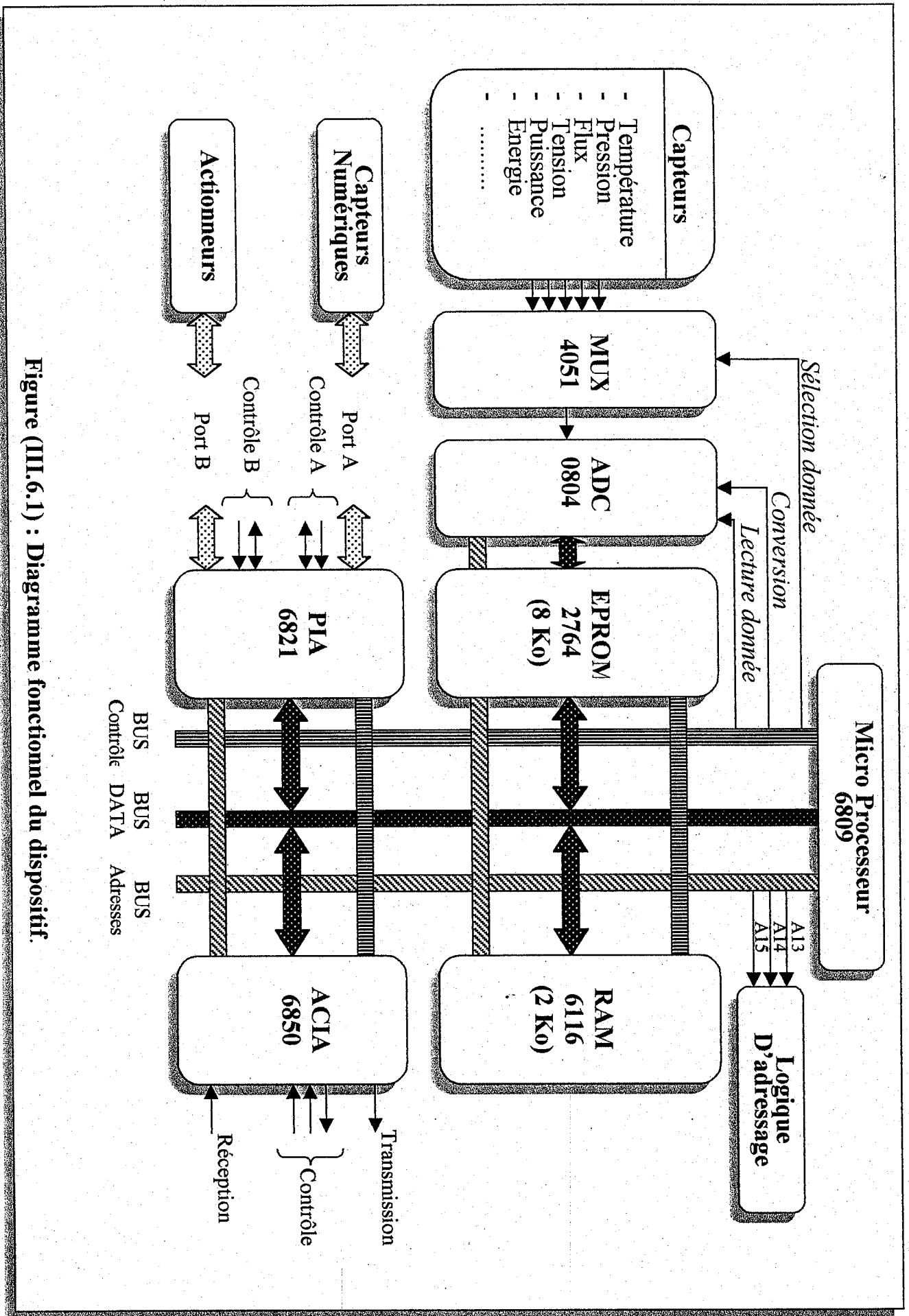


Figure (III.6.1) : Diagramme fonctionnel du dispositif.

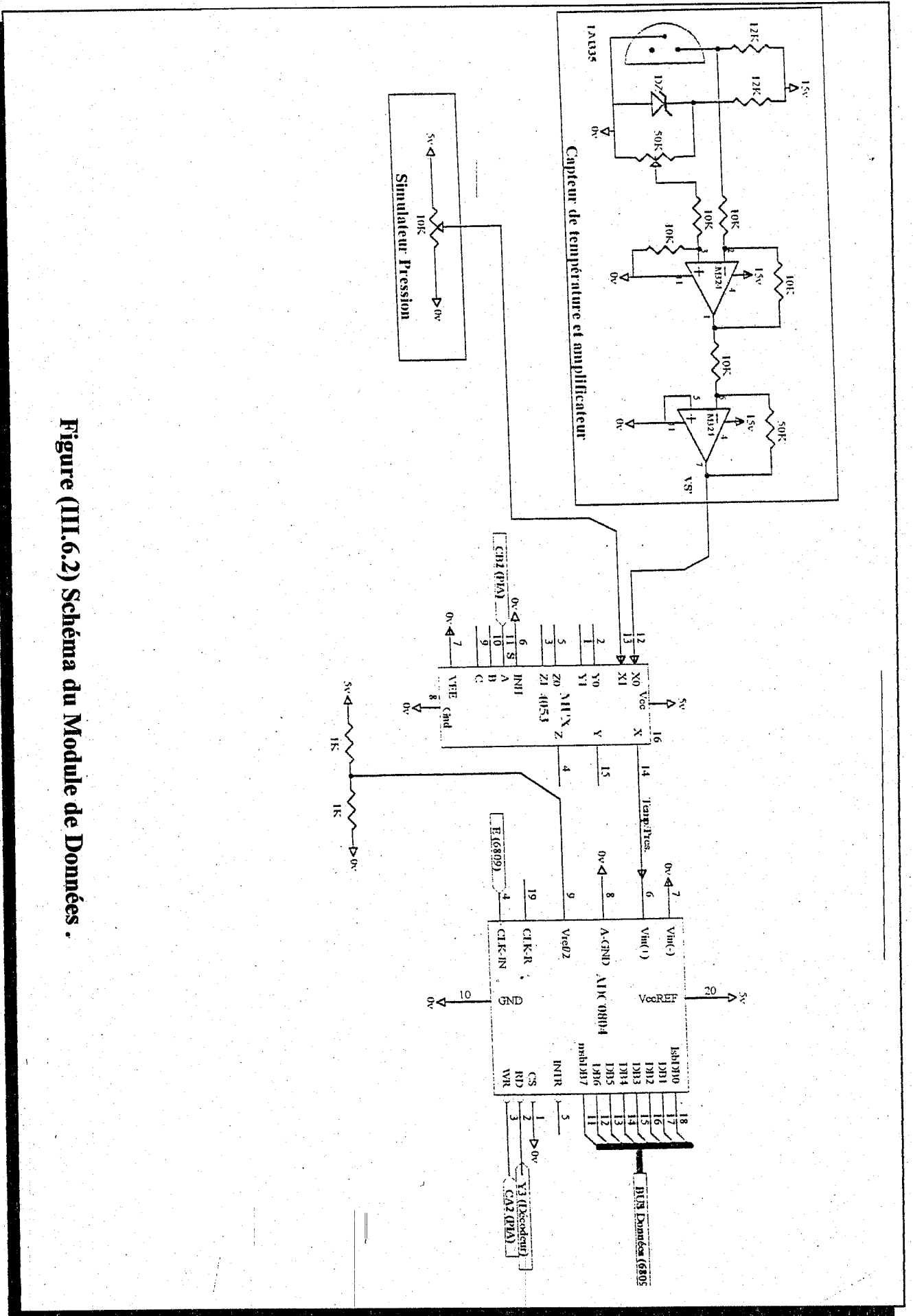
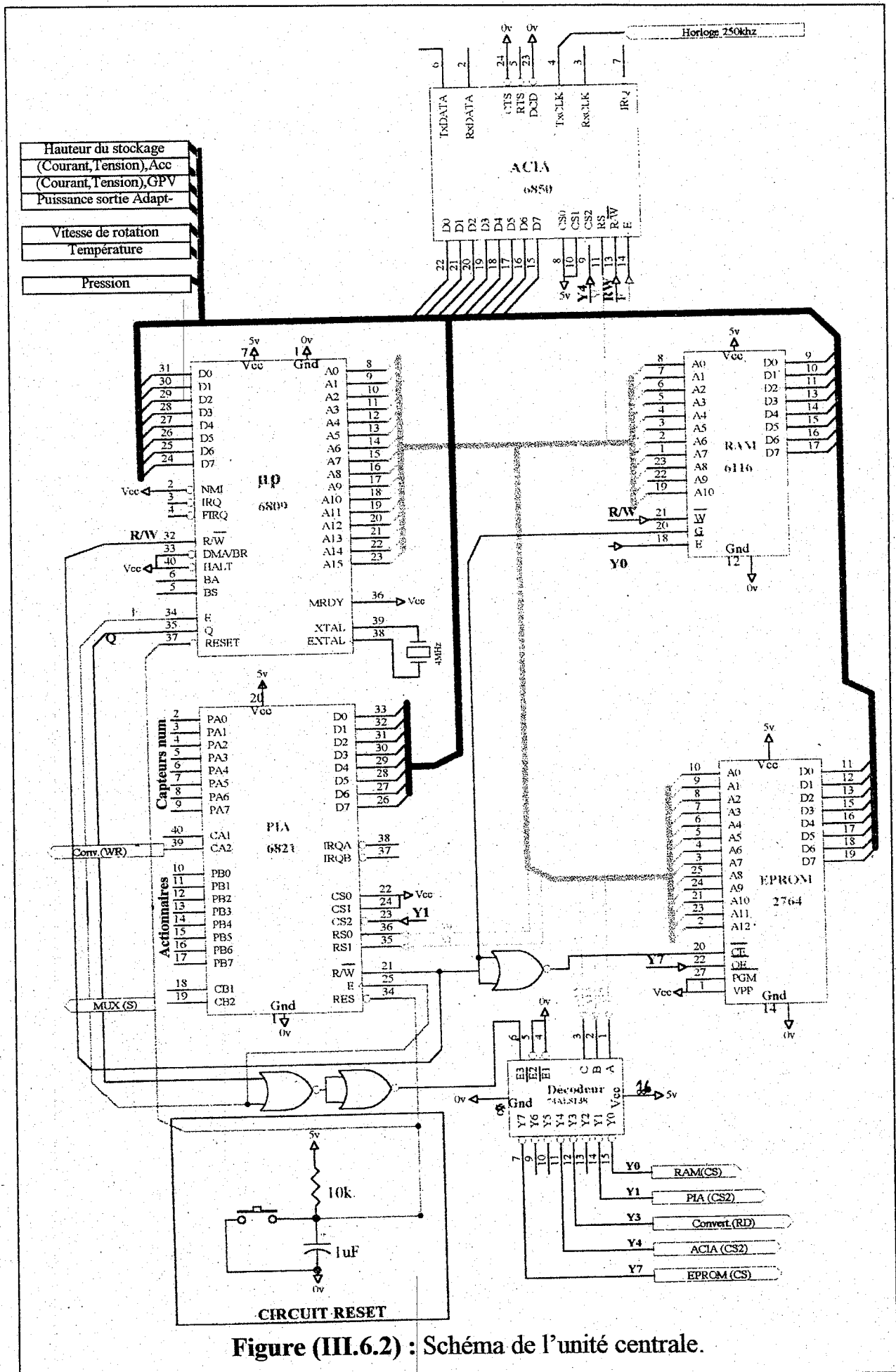


Figure (III.6.2) Schéma du Module de Données .

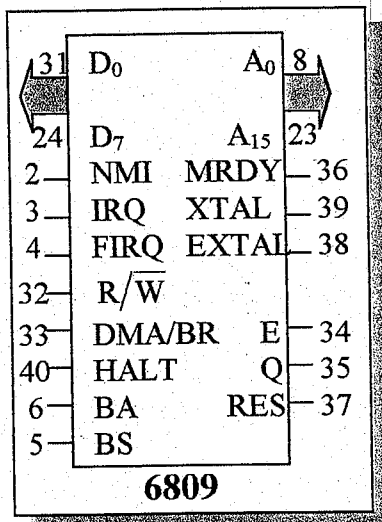


III.5.6 L'unité centrale

Il existe sur le marché des processeurs très puissants capables de remplacer l'unité centrale que nous venons de décrire avec en plus, la fonction de conversion A/N, mais d'un pris prohibitif. C'est la raison pour laquelle, nous avons réfléchi et proposé la solution d'un processeur disponible le (6809) et d'une interface parallèle-série (l'ACIA) qui possède une vitesse de transmission assez élevée, car le paramètre vitesse est primordiale dans notre application en cas d'affichage.

Le schéma de l'unité centrale est donné dans la figure (III.6.2). La description de ce schéma est la suivante :

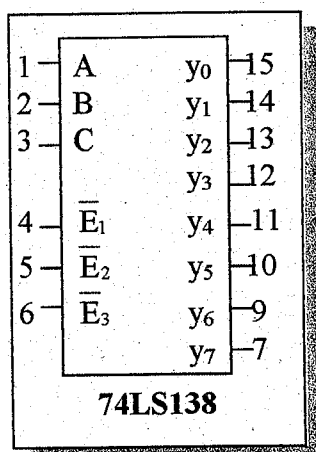
a- Microprocesseur 6809



C'est un composant de 40 broches fonctionnant avec une alimentation de 8volts. Un quartz de 4 MHz permet d'obtenir aux sorties horloge E et Q, deux (02) signaux de 1MHz en quadratique de phase. L'entrée RESET est connectée à un circuit RC de réinitialisation du processeur et qui est muni d'un bouton poussoir qui met RESET à zéro. Les valeurs de la résistance et du condensateur ont été choisies de façons à permettre une charge du condensateur rapide.

Les entrées DMA, HALT et NMI non utilisées sont forcées à 5 volts. Les entrées FIRQ et IRQ reçoivent les signaux d'interruption.

b- Logique d'adressage



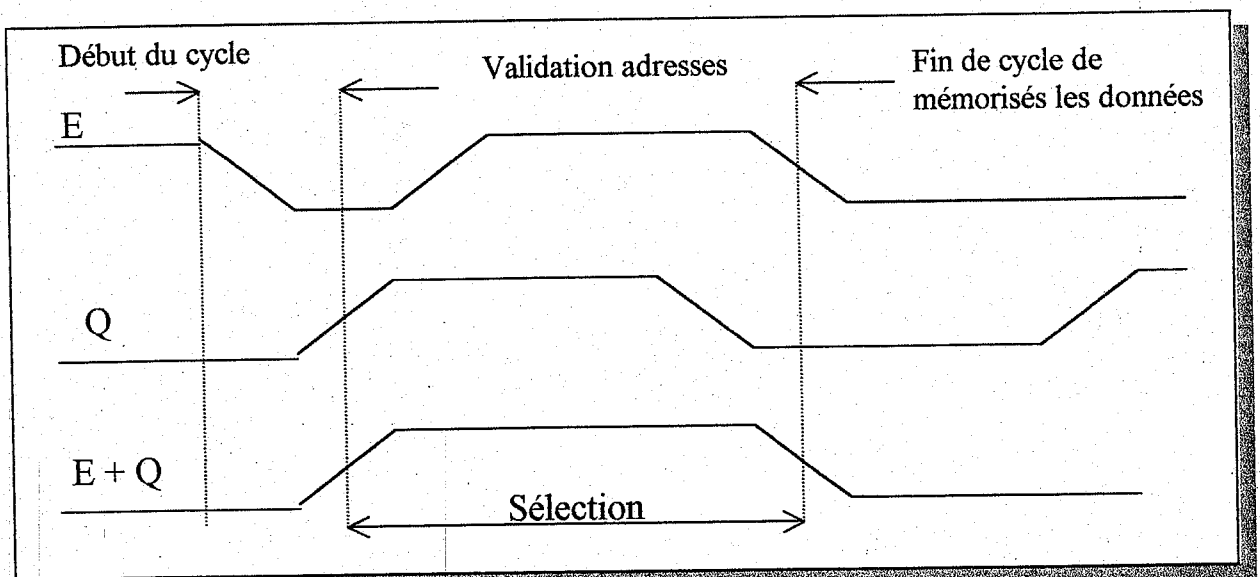
Nous avons choisi le décodeur TTL 74LS138 pour remplir cette fonction de sélection des différents boîtiers par le processeur.

Ce décodeur est capable d'adresser 8 boîtiers grâce à ses huit (08) sorties y sélectionnées grâce aux entrées C, B et A reliées aux trois (03) lignes d'adresses de poids fort A15, A14 et A13 du bus d'adresses du 6809. la sortie y sélectionnée par le processeur n'est activée (niveau BAS) que lorsque le signal horloge (E+Q) appliqué à l'entrée E₃ est au niveau HAUT.

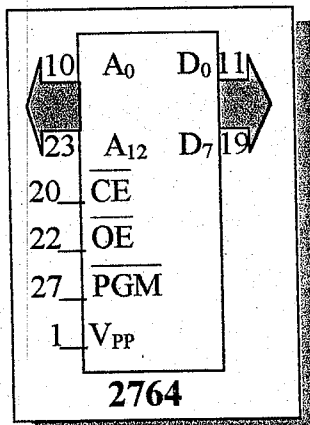
Six (06) sorties du décodeurs seulement sont utilisées avec l'affectation indiquée dans le tableau suivant :

E + Q	C B A	Sortie y	Sélection
L	x x x	H	Aucun
H	0 0 0	$y_0=L$	RAM
H	0 0 1	$Y_1=L$	PIA
H	0 1 1	$y_3=L$	Convertisseur A/N
H	1 0 0	$y_4=L$	ACIA
H	1 1 1	$y_7=L$	EPROM

Le fait d'activer les sorties y du décodeur uniquement lorsque (E + Q) est au niveau HAUT, permet d'avoir des lignes du bus d'adresses stables assurant ainsi une bonne sélection, comme le montre la figure suivante :



c- Mémoire EPROM



C'est la mémoire effaçable à lecture seule où sera implanté le programme. Nous avons retenu dans notre application l'EPROM de référence 2764 de capacité 8 kilo octets ce qui est largement suffisant.

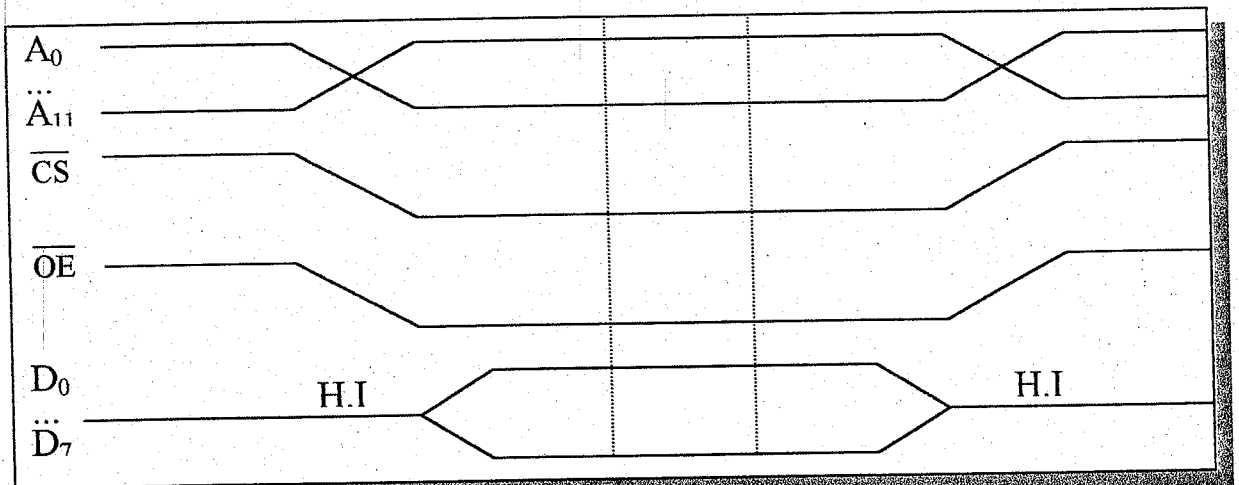
C'est un boîtier de vingt huit (28) broches fonctionnant avec une alimentation de 5 volts (V_{cc}), les entrées V_{pp} et PGM sont aussi portées à ce potentiel. Les treize (13) lignes d'adresses de l'EPROM sont reliées aux lignes d'adresses correspondantes du 6809 ainsi que pour les lignes de données.

La sortie y_7 du décodeur est connectée à l'entrée CE de sélection de l'EPROM. La combinaison choisie étant $A_{15}A_{14}A_{13}=111$, les adresses des octets-mémoires de l'EPROM s'échelonnent donc, entre les adresses hexadécimales E000 à FFFF.

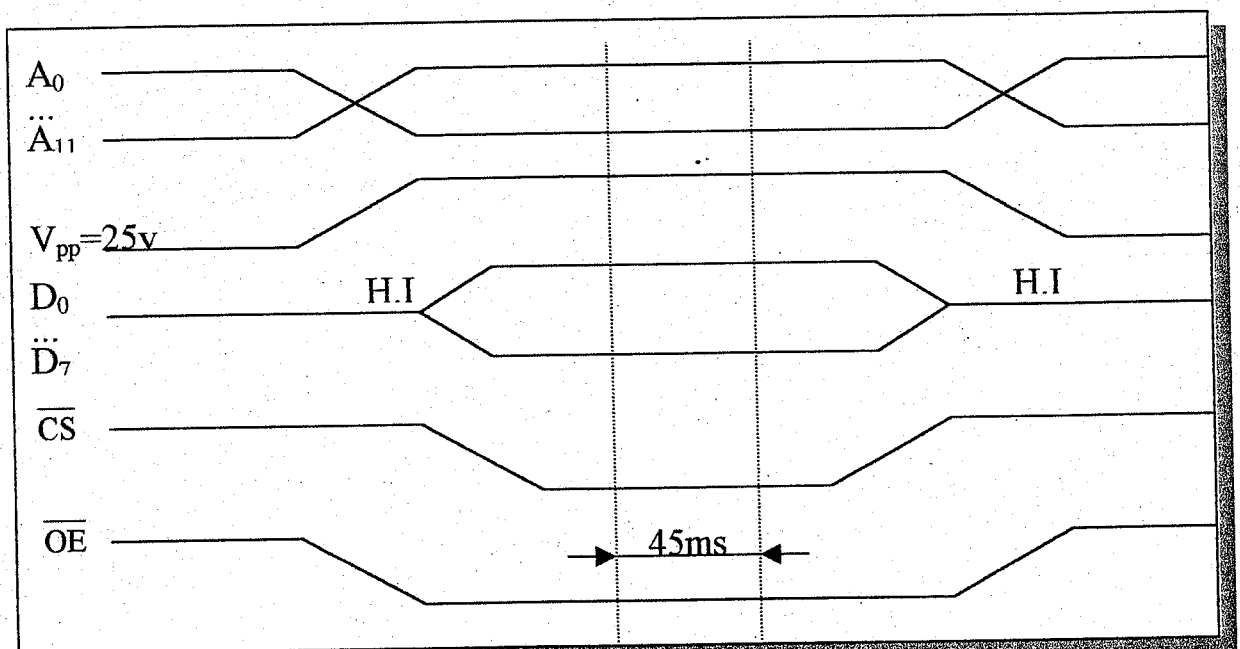
La commande (R/W) au microprocesseur inversée par une porte NOR est reliée à l'entrée OC de l'EPROM.

- **Le chronogramme de lecture de L'EPROM**

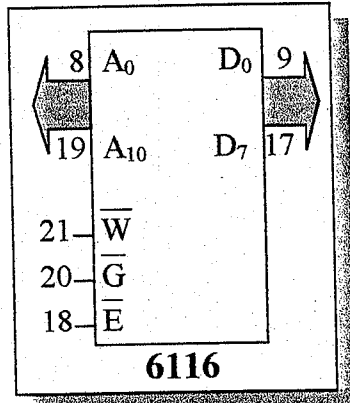
- 1° On présente la valeur de l'adresse sur les fils.
- 2° On sélectionne le circuit. L'adressage commence, pour être prêt environ 100ns plus tard.
- 3° $\overline{\text{Int}}$, la donnée voulue est présente sur les broches $D_0 \dots D_7$.



- **Le chronogramme d'écriture de l'EPROM.**



d- Mémoire RAM

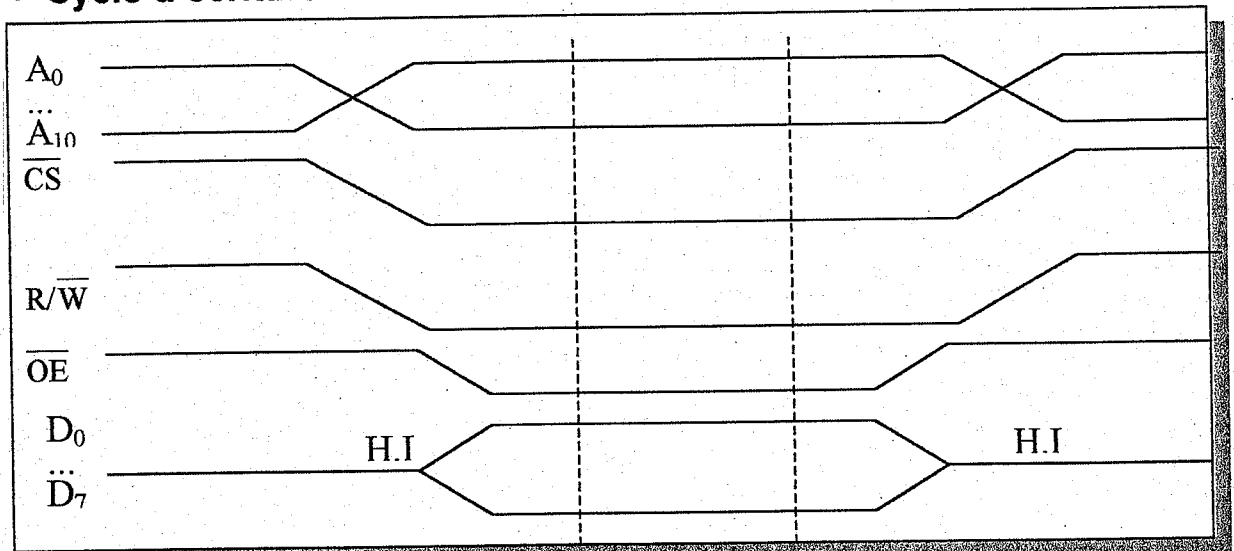


C'est une mémoire à lecture et écriture utilisée pour le traitement des données et la sauvegarde des registres du processeur. Nous avons optés pour la référence **6116** de capacité de deux (02) kilo octets se présentant comme un boîtier de 24 broches fonctionnant avec une alimentation de 5 volts (Vcc). Elle possède onze (11) lignes d'adresses. Son interfaçage avec le 6809 est identique à celui de l'EPROM. Elle reçoit à son entrée de sélection E, la sortie y_0 du décodeur, la combinaison choisie pour sa

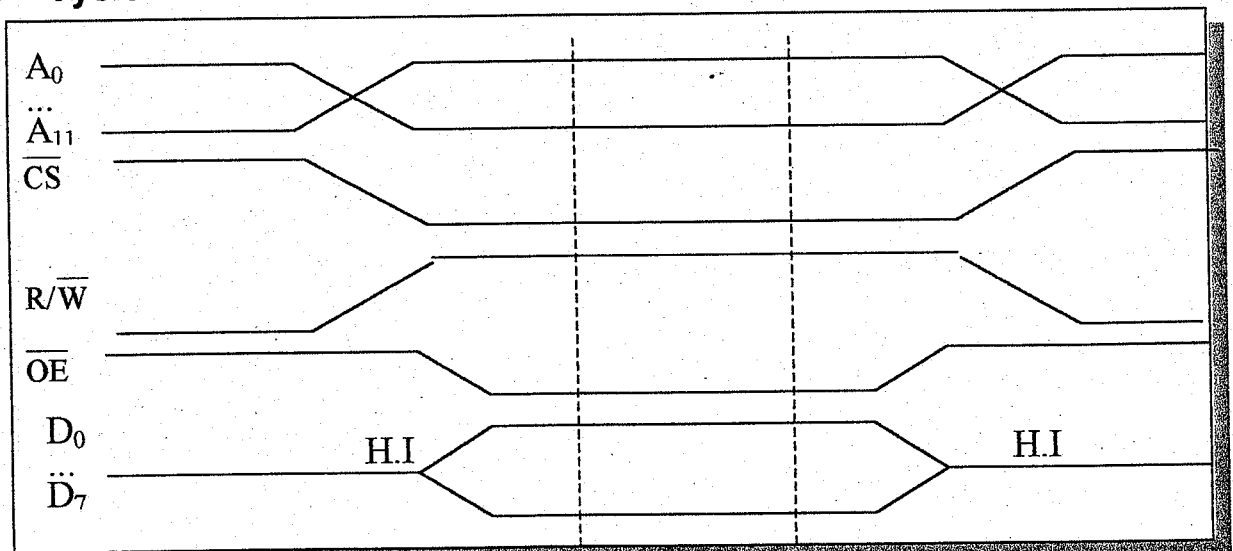
sélection étant $A_{15}A_{14}A_{13}=000$, les adresses hexadécimales 0000 à 07FF (les bits non utilisés étant fixés à zéro).

La commande de (R/W) du microprocesseur est reliée directement à l'entrée (R/W) de la RAM.

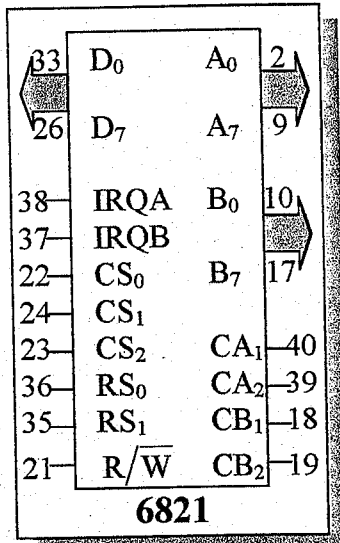
• Cycle d'écriture RAM



• Cycle de lecture RAM



e- Interface parallèle – parallèle (PIA)



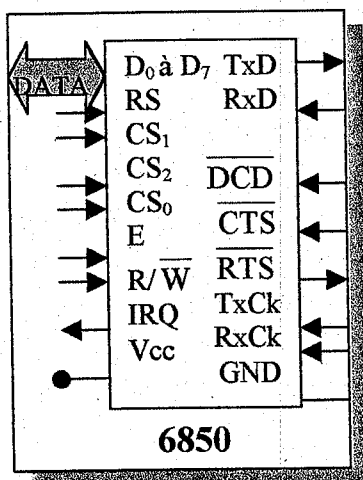
Le rôle de cette interface est de mettre le transfert de l'information numérique vers le 6809. cette interface est le PIA de référence 6821 qui se présente comme un boîtier de quarante (40) broches comprenant deux (02) ports (le port A et le port B) d'un octet chacun. La disponibilité des sorties CA2 et CB2 qui peuvent être programmées à un niveau BAS ou HAUT, nous a permis de les utiliser pour commander la conversion du convertisseur A/N et la sélection du multiplexeur. Le port A est programmé en entrée et le port B en sortie.

L'entrée de sélection CS2 du PIA reçoit la sortie y₁ du décodeur qui sera activée par la combinaison A15A14A13=001, d'où le tableau suivant qui donne les adresses hexadécimales des différents registres internes du PIA (les bits non utilisés sont fixés à zéro).

A15A14A13	C ₅₂ =y	RS ₁ =A ₁	RS ₀ =A ₀	Registre PIA	Adresses hexadécimales
0010	L	0	1	CRA	2001
0010	L	0	0	DDRA / ORA	2000
0010	L	1	1	CRB	2003
0010	L	1	0	DDRB / ORB	2002

Pour accéder aux registres DDRX et ORX (X=A ou B), le processeur tient compte de l'état du bit 2 de CRX qui peut être fixé à la programmation de ce registre.

f- Interface parallèle – série (ACIA)



S'agissant de transmettre à un périphérique des séries de bits (ou de les recevoir de lui), les bornes de sorties seront donc limitées à deux (02) fils : l'un pour la sortie vers le périphérique (TxDATA), l'autre pour l'entrée des informations venant du périphérique (RxDATA).

Du côté microprocesseur on trouvera les huit bornes correspondant au bus de données, une borne d'adresse RS permettant d'adresser deux registres différents et

trois bornes CS(Chip select) comme pour le PIA. En outre on trouvera les bornes R/\overline{W} , «Enable» ainsi que l'alimentation.

Trois bornes appelées \overline{DCD} , \overline{CTS} et \overline{RTS} sont destinées à la connexion avec un modem, voir figure (III.8).

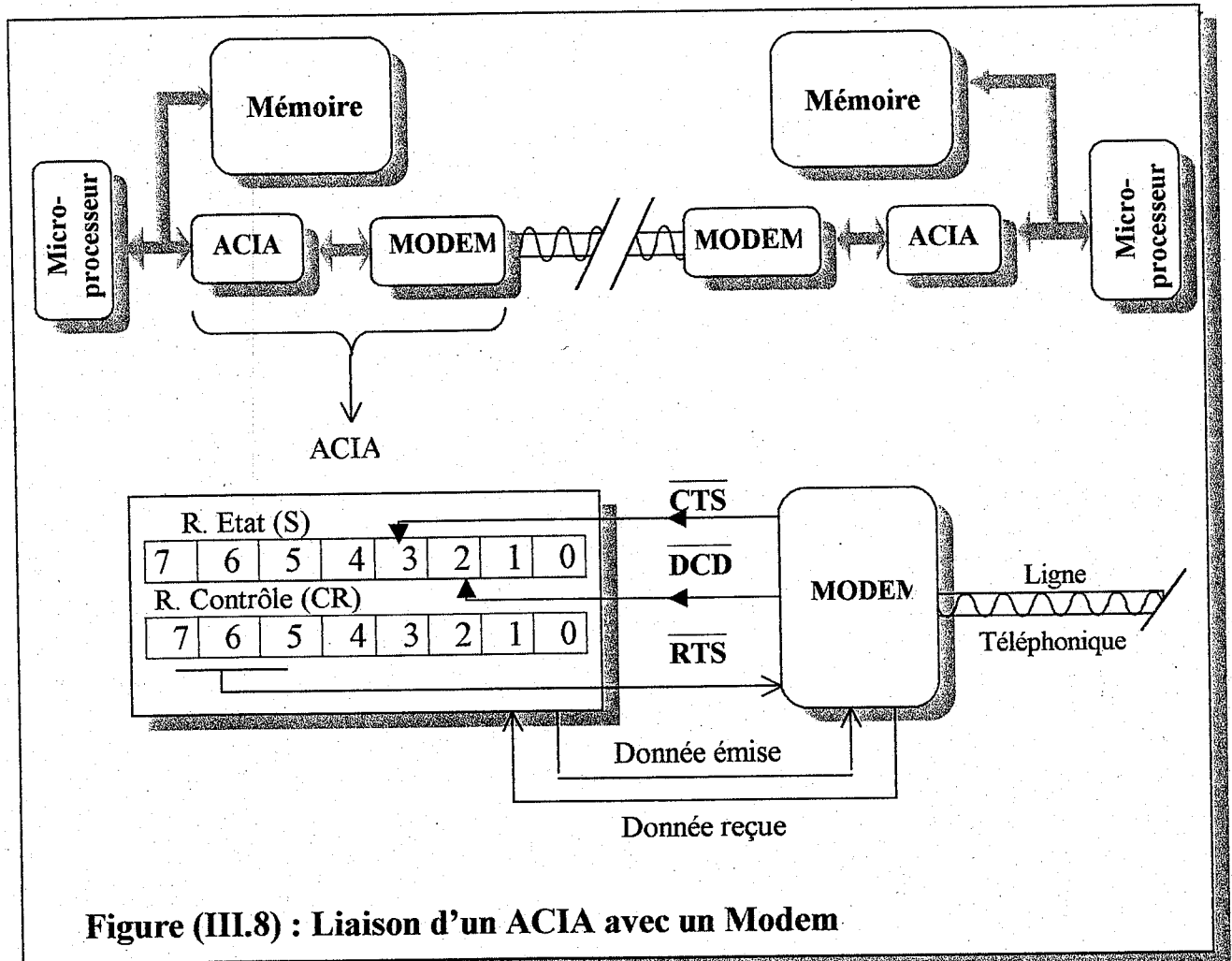


Figure (III.8) : Liaison d'un ACIA avec un Modem

Enfin deux bornes TxCk et RxCk correspondent à des entrées d'horloge. Du côté microprocesseur, les données transmises par le bus des données aboutissent dans un registre tampon appelé TDR (Transmitter Data Register).

On imagine assez bien que la sortie série se fera grâce à un registre à décalage commandé par une horloge. Ce registre est distinct du TDR. On l'appelle TSR (Transmitter Shift Register). L'horloge provoquant le décalage est fournie par l'entrée TxCk et la sortie des données en série s'effectue par la borne Tx Data (ou TxD).

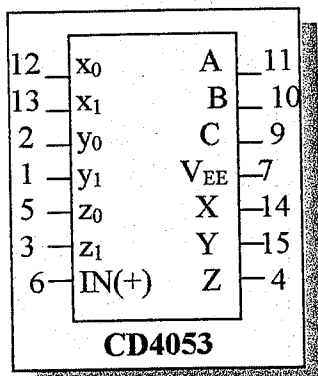
L'adressage de l'ACIA s'effectue grâce à la sortie Y_4 du décodeur appliquée à l'entrée de sélection CS2 de l'ACIA qui est activé par la combinaison $A15A14A13=100$, d'où le tableau suivant qui indique les adresses des registres internes utilisés (les bits non utilisés sont fixés à zéro).

A ₁₅ A ₁₄ A ₁₃	CS2=Y	A ₀	R/W	Registre ACIA	Adresse Hexadécimal
1 0 0	L	0	0	CR	8 000
1 0 0	L	1	0	TDR	8 001

III.5.6 Module DATA

Nous avons regroupé dans ce module tous les capteurs installés dans notre système, ainsi que le multiplexeur analogique et le convertisseur A/N.

a) Le multiplexeur analogique

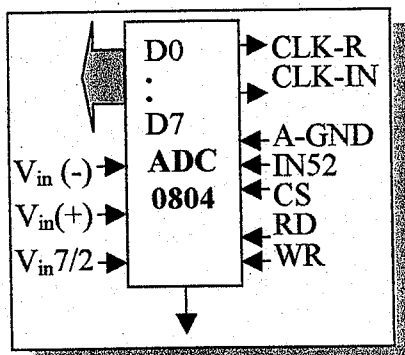


Etant donné que les signaux "DATA" sont disponibles, sous forme analogique et que du point de vue économique, il est plus intéressant d'utiliser un seul convertisseur A/N, pour les numériser, on a donc été amené à introduire un multiplexeur analogique pour la sélection de ces signaux. On a choisi un multiplexeur analogique CMOS 4053.

Les signaux analogiques "DATA" de niveaux compris entre 0 et 5 volts, sont appliqués respectivement aux entrées $x_0 \rightarrow x_7$ du multiplexeur.

Sa sortie Z est dirigée vers l'entrée $V_{in}(+)$ du convertisseur A/N.

b) Le convertisseur Analogique – Numérique (A/N)



le rôle de ce circuit est d'effectuer le codage de la tension analogique comprise entre 0 et 5volts délivrée par le multiplexeur et représentant un des signaux "DATA".

Il existe principalement deux (02) types de convertisseurs analogique – Numérique :

- les convertisseurs "Parallèles" qui comportent plusieurs comparateurs, un réseau de résistances et un logique de codage. Le codage se fait par comparaison simultanée de la tension inconnue aux tensions du réseau de résistances d'où un temps de conversion très court de l'ordre de quelques μs .

- Les convertisseurs à approximations successives qui comportent un seul comparateur, un réseau de résistances et une logique de contrôle. La tension inconnue est comparée successivement aux tensions du réseau de résistances d'où un temps de conversion assez long de l'ordre de quelques μs .

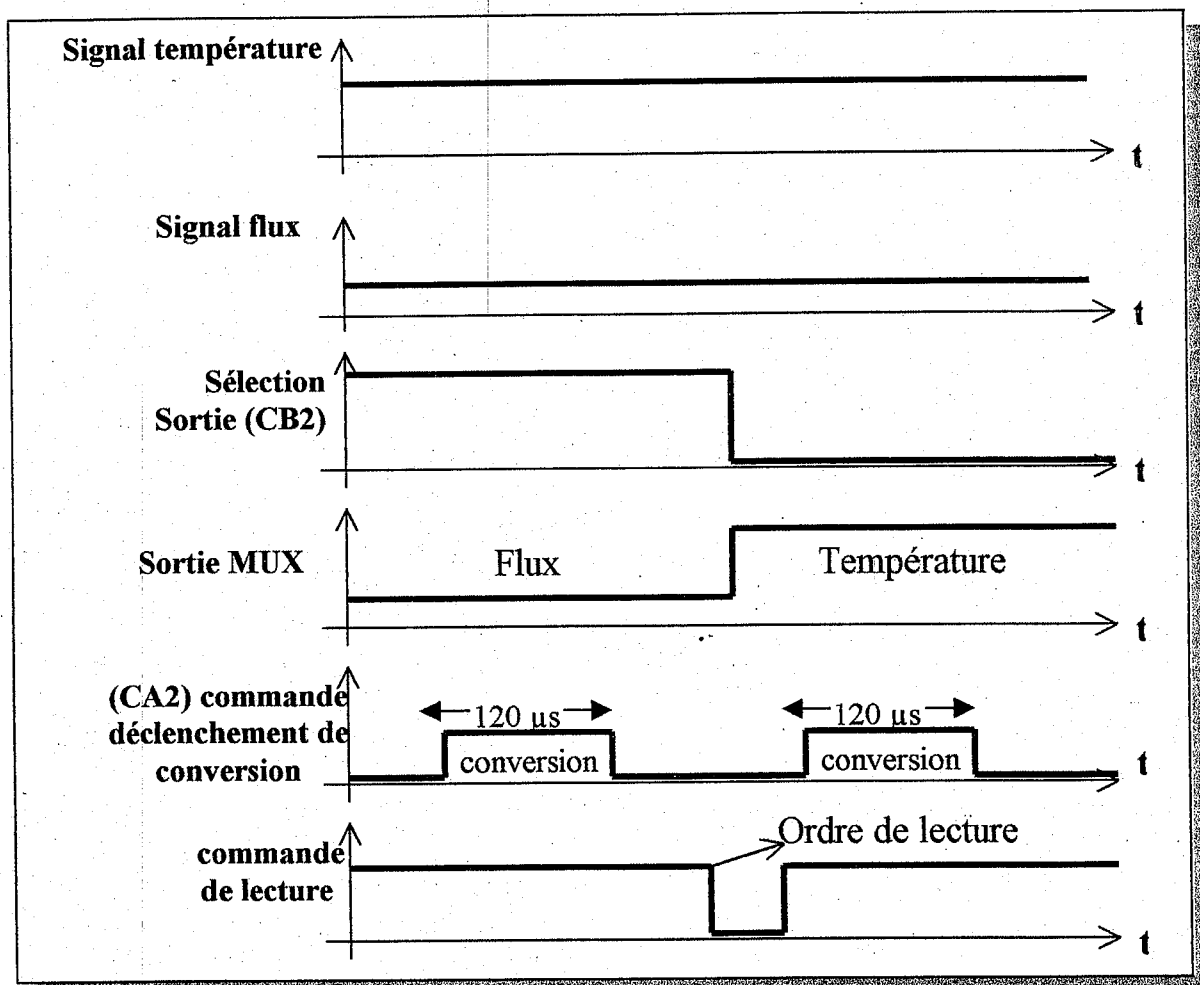
En ce qui concerne, le temps de conversion n'étant pas crucial, nous avons choisi, un convertisseur A/N 8 bits qui est l'ADC 0804 à 20 broches dont les sorties binaires sont du type 03 états pour être compatible Bus microprocesseur.

Nos signaux analogiques étant positifs et compris entre 0 et 5 volts, nous utiliserons une seule alimentation de 5 volts, branchée à l'entrée (20).

L'entrée $V_{ref}/2$ est portée au potentiel 2.5 volts grâce à un pont de résistances identiques.

On force l'entrée CS1 à la masse pour conserver la sélection permanente du convertisseur.

Le chronogramme suivant résume le fonctionnement du multiplexeur et du convertisseur.



Le passage de la commande d'écriture WR(3) de l'état BAS à l'état HAUT, autorise le début de conversion. Cet état est maintenu par une temporisation

effectué par programmation d'une durée de 120 μ s, supérieure au temps de conversion de l'ADC, elle est appliquée à l'entrée WR(3) par l'entremise de la sortie CA2(39) de l'interface PIA.

Le passage de WR(3) au niveau BAS, entraîne l'apparition d'une impulsion sur la sortie INTR(5) indiquant la fin de conversion et la disponibilité de la donnée numérisée, mais nous ne l'avons pas utilisée, car on est sûr qu'au bout de 120 μ s, la conversion s'est bien effectué.

Il faut noter que l'ordre de lecture est fournit par la sortie y_3 du décodeur, appliqué à l'entrée RD du convertisseur.

c) Capteur

• Capteur de température et amplificateur

A défaut d'un capteur réellement utilisé aux applications solaire nous avons été contraint d'utiliser un capteur classique pouvant mesurer des températures entre 0° et 100°c.

Il existe plusieurs types de capteur de températures, nous citons à titre d'exemple quelques uns :

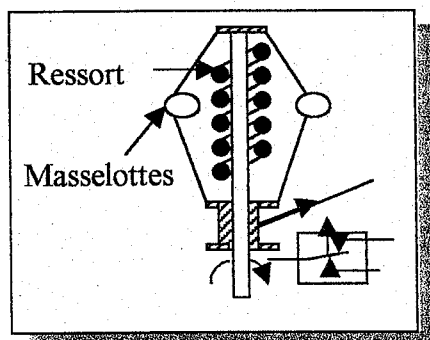
- les thermistances (CTN, CTP).
- Les thermocouples.
- Les jonctions PN(Transistor, Circuit intégré Thyristor) .

• Capteur de vitesse

Il est difficile de contrôler directement une vitesse de translation . On a recours à des capteurs de déplacement d'une part et à une horloge d'autre part. la vitesse sera obtenue en divisant le déplacement par le temps.

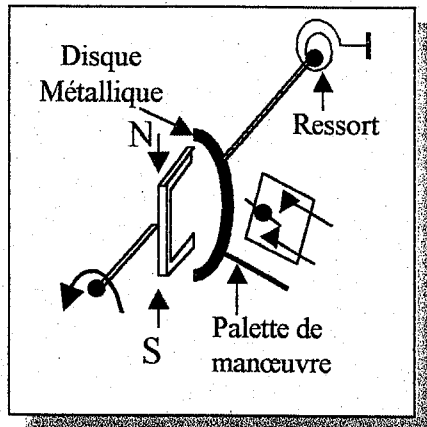
En revanche on peut contrôler directement les vitesses de rotation (d'un moteur par exemple) grâce aux systèmes suivants :

a) Utilisation de la force centrifuge (principe des régulateurs de watt)



A une certaine vitesse les masselottes s'écartent, entraînées par la force centrifuge ; elles agissent alors sur le contact, provoquant son ouverture ou sa fermeture.

b) Entraînement d'un disque tachymétrique



L'arbre en rotation comporte un aimant situé à très faible distance d'un disque métallique.

Ce disque est entraîné par l'aimant et retenu par un ressort en spirale. La manoeuvre du contact se produit à partir d'une vitesse donnée de l'arbre.

c) Emploi d'une dynamo tachymétrique

Une dynamo tachymétrique est un moteur à courant continu que l'on fait fonctionner en génératrice. Plus le rotor tourne vite dans le stator plus la tension aux bornes de la dynamo est élevée, cette tension étant proportionnelle à la vitesse. Là encore pour exploiter cette information il faudra avoir recours à un convertisseur analogique – digital.

d) Emploi d'un générateur d'impulsions

- **Capteur de débit**

A orifice ou venturi (le débit est proportionnel à la racine carrée de la perte de charge), à turbine, anémométrie à fil chaud, débitmètres sismiques, magnétiques, à vortex, tubes de pitot. Les capteurs de débit ont une dynamique très rapide et sont en général modélisés par une équation de la forme : $\text{débit} = \alpha\sqrt{\Delta P}$

Où la constante de proportionnalité α est caractéristique du capteur et ΔP est la perte de charge entre le point de restriction de la section et la sortie. Ces signaux sont souvent bruités à cause des fluctuations des écoulements et doivent être filtrés avant d'être utilisés.

- **Capteur de niveau**

Flotteurs (plus léger que le fluide), à déplacement (mesure des poids apparent d'un cylindre semi-immergé), par mesure d'une différence de pression.

III.5.7 Module "Actionneurs"

Recevant des informations du système par l'intermédiaire des capteurs, le processeur va traiter ces informations ce qui est affaire de programme, puis il intervient sur ce même système pour déclencher un certain nombre d'actions. Il faut donc qu'il dispose d'«actionneurs». Il s'agira par exemple d'ouvrir une vanne, de commander la vitesse de rotation du moteur, de déclencher l'ouverture ou la fermeture d'un relais, etc...

La plus part de ces actionneurs seront dotés d'un moteur réalisant la manœuvre recherchée.

Le courant délivré par le processeur n'étant pas suffisant pour actionner directement ces moteurs, il faudra donc disposer de contacte – relais.

Dans un très grand nombre de cas, le processeur enverra donc ses ordres à un relais. Il suffira pour cela d'une seule information binaire.

On pourra alors distinguer différents cas suivant la puissance nécessaire à l'actionneur proprement dit, c'est-à-dire au moteur. Dans d'autres cas l'actionneur peut requérir différents niveaux de commande. Nous allons voir quelques exemples de ces différents commandes.

a) Commande d'actionneur directe ou par interrupteur à relais

Si l'actionneur est un voyant lumineux, on peut imaginer une commande directe en utilisant une porte inverseuse à collecteur ouvert. Ce principe est classique

On peut utiliser également le même principe pour fermer un relais. Certains relais en effet fonctionnent sous 5 volts et n'absorbent que quelques milliampères. Or une porte TTL de puissance peut, lorsqu'elle est au niveau bas, absorber un courant de 30 mA.

On notera la diode de protection contre les surtensions inverses provoquées par la coupure du contact.

En dehors de ces quelques cas il faudra opter pour une interface de puissance, c'est-à-dire un étage amplificateur de tension et de courant permettant de délivrer la puissance nécessaire à la bobine d'un relais de puissance.

On a recours soit à des transistors soit à des thyristors ou des triacs. Dans ces deux derniers cas on prendra soin d'assurer le déclenchement au passage à la tension nulle pour éviter de perturber la logique de commande par des parasites.

b) Commandes quantifiées

Des actionneurs plus «subtils» doivent être commandés soit par un certain nombre d'impulsions soit par des niveaux exprimés par des nombres binaires. Le moteur pas à pas est le type même d'actionneur à commande par impulsions.

On peut aussi avoir à faire à des actionneurs fonctionnant en courant continu et sensibles à une tension ou à un courant délivré par la commande. Dans ce cas, comme la logique du processeur ne peut délivrer que des nombres digitaux, on aura recours à un convertisseur digital – analogique capable de convertir des nombres binaires (en général de 8, 10 ou 12 bits) en un courant proportionnel au nombre binaire affiché en entrée.

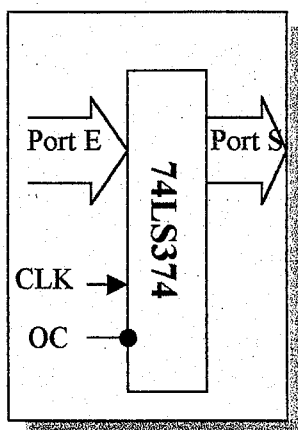
Un convertisseur courant – tension est alors souvent nécessaire avant l'interface de puissance. On fait appel pour cela à un amplificateur opérationnel.

- **Cartes de conversion Numérique – Analogique**

La carte convertisseur numérique – analogique est à base du **DAC 0808**, elle permet la génération d'une tension soit mono polaire (0v à 10v), soit bipolaire par la conversion d'un octet qui lui sera envoyé par la carte C.A.N.

Cette carte se compose principalement d'un circuit registre **74LS374**, huit bascules D à sorties trois (03) états, d'un **DAC 0808** qui effectue la conversion numérique – analogique, ainsi qu'un **LF353** circuit double amplificateur opérationnel figure (III.9).

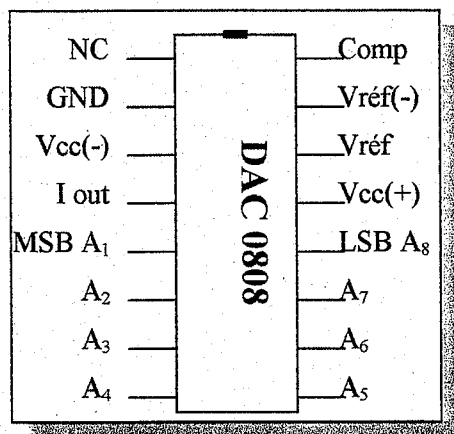
- **Le registre SN 74LS374**



Le circuit intégré **SN 74LS374** est un registre à huit (08) bits constitué de huit (08) bascules de type D destinées à mémoriser l'octet qui lui est envoyé par le bus du microprocesseur.

Au niveau haut de l'impulsion horloge, les sorties Q seront placées au niveau logique auquel est les entrées des bascules D.

- Convertisseur Numérique – Analogique DAC 0808



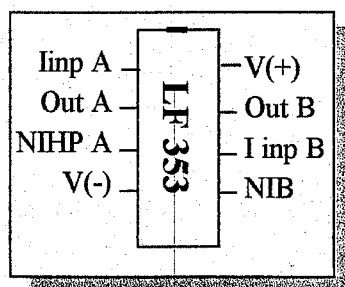
Le circuit intégré **DAC 0808** est un convertisseur digital – analogique à huit (08) bits, son schéma interne repose sur le principe de conversion numériques – analogiques à réseau R-2R qui n'utilise que deux valeurs de résistance R et 2R.

Le DAC 0808 peut être relié directement aux niveaux logiques connus TTL, DTL et CMOS.

Contrairement à beaucoup d'autres circuits convertisseurs, le DAC 0808 ne contient pas de bascules destinées à mémoriser l'octet envoyé par le microprocesseur. Pour cela on doit lui adjoindre un registre (74LS374).

Pour qu'il puisse fonctionner, le DAC 0808 nécessite une tension de référence de 10volts. Celle-ci est fournie par une diode Zéner de référence TL431CU. Sa tension est ajustable par une résistance variable. Cette tension est filtrée et ensuite appliquée à la broche Vref(+) du convertisseur.

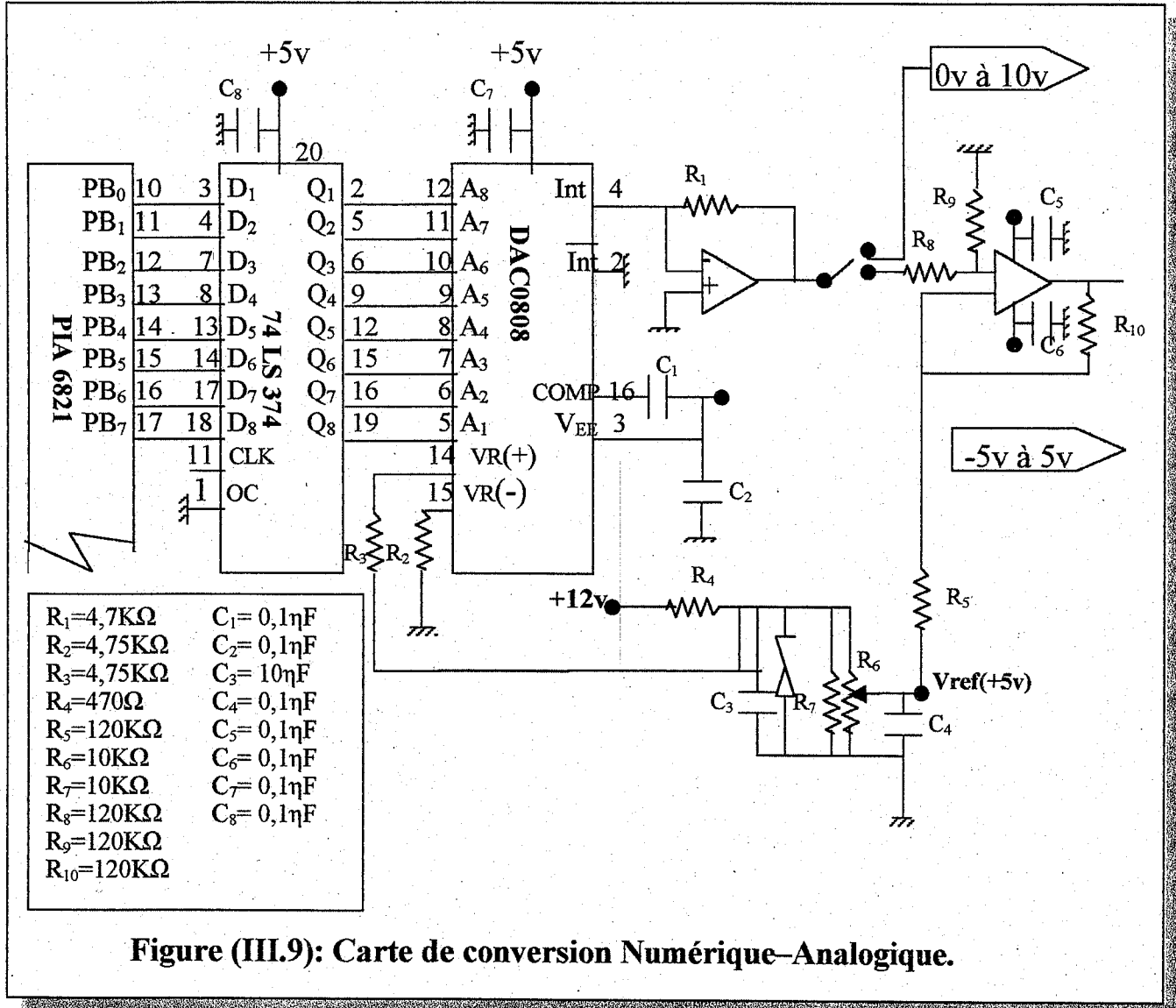
- Le circuit d'amplification LF353 :



Le circuit **LF353** est un double amplificateur opérationnel à large bande passante. Configuré dans notre cas comme suit :

. Convertisseur courant-tension : assurant l'amplification et la conversion du courant d'entrée en une tension à la sortie.

. Amplificateur inverseur de gain unitaire.



CONCLUSION

Nous avons décrit dans ce chapitre l'organisation Hardware générale du système PPV. Le principe de fonctionnement des modules est explicité afin d'extraire les paramètres primordiaux régissant la zone optimale de la caractéristique mécanique de chaque module. Le bloc d'acquisition et le traitement des données indiquées par les sondes installées dans le dispositif est présenté en détail ainsi que l'interconnexion entre les différents éléments.

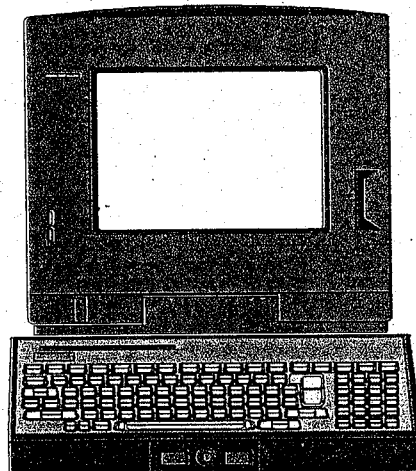
Le fonctionnement global du dispositif est géré par un programme, lequel sera décrit dans le prochain chapitre.

CONCEPTION SOFTWARE DU SYSTEME PPV

C H A P I T R E

IV

- 1- Introduction
- 2- Structure de commande
- 3- Principe de fonctionnement programmé
- 4- Programme principal
- 5- Sous programmes :
 - *Réservoir*
 - *Accumulateur*
 - *Générateur Pv*
 - *Adaptateur*
 - *Moteur*
 - *Pompe*
 - *Affichage*
- 6- Organisation de la RAM et de l'EPROM
- 7- Conclusion.



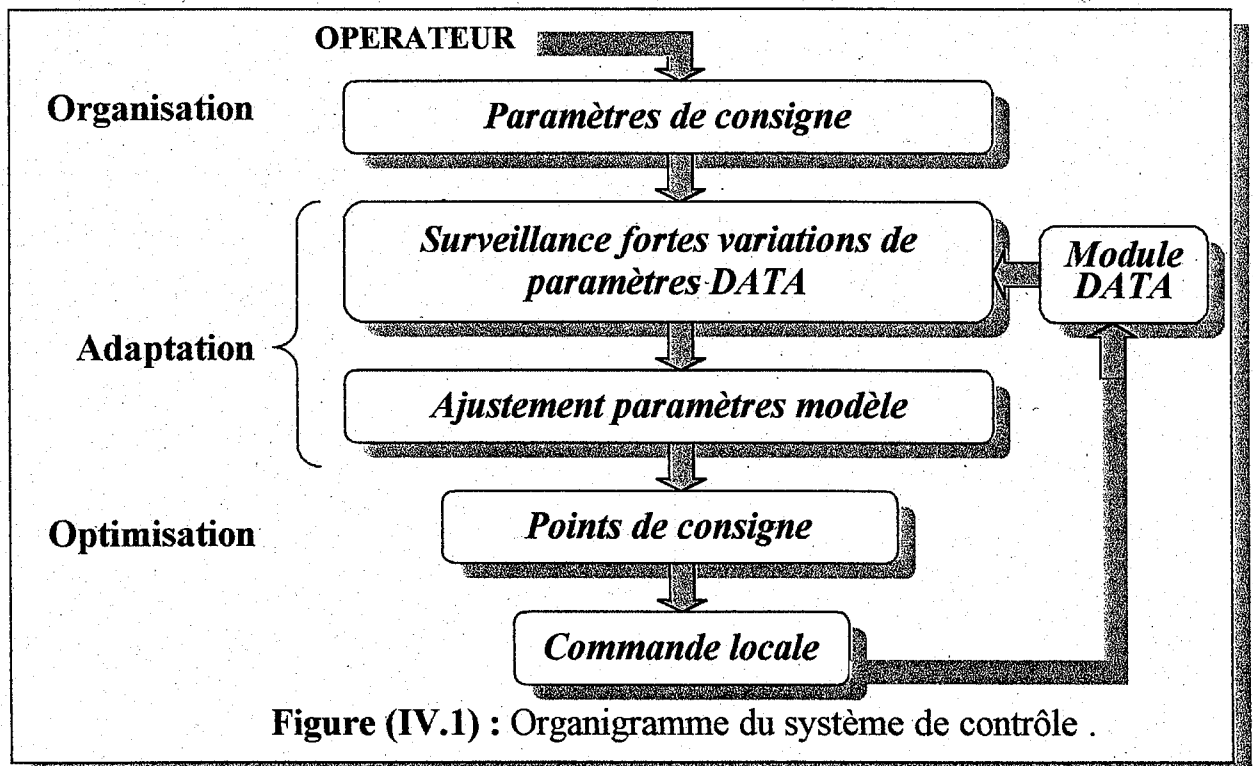
IV.1 Introduction

Après avoir étudié l'architecture du système (PPV) et préciser les rôles des différents modules, le choix des circuits et le mode de leur installation et de leur utilisation, nous allons présenter ici, le programme qui sera implanté en mémoire et destiné à assurer l'exploitation du dispositif en vue de contrôler les divers paramètres (**DATA, Action**) et optimiser le fonctionnement du système.

IV.2 Structure de commande

Pour assurer la conduite optimale de ce procédé, nous avons choisi une décomposition verticale en 4 niveaux : figure (IV.1).

- «*Commande locale*» de la puissance délivrée par la source d'alimentation (générateur PV, batteries, moteur électrogène);
- «*Optimisation*» calcul des points de consigne permettant le fonctionnement optimal de notre application ;
- «*Adaptation*» permet d'ajuster des paramètres du modèle nécessaire au niveau «optimisation» et surveille les fortes variations du module DATA qui exige un nouveau calcul des points de consigne ;
- «*Organisation*» permet à l'opérateur de dialoguer avec la structure de contrôle.



* Structure informatique

La hiérarchie informatique qui correspond à cette hiérarchie de commande comprend deux niveaux :

- Le premier niveau est réservé à des actionneurs qui ont la charge de la commande locale ;
- Le second niveau confié à un microprocesseur temps réel multitâche s'occupe de toutes les autres tâches (optimisation – adaptation – organisation).

Les actionneurs surveillent les signaux provenant de l'unité centrale et agit sur les modules correspondants. Le matériel a été convenablement interfacé par nos soins pour répondre aux spécifications 0-5v des différents convertisseurs.

Pour élaborer un fonctionnement optimal correct, le microprocesseur a besoin de connaître les valeurs moyennes au cours du temps des différents paramètres DATA. Ces éléments d'information rassemblés dans la mémoire et réactualisés toutes un laps de temps prédéterminé par l'opérateur sont envoyés au microprocesseur lorsqu'il les demande. Il compare ces valeurs expérimentales aux valeurs théoriques fournies par un modèle physique du procédé, ajuste éventuellement les paramètres de ce modèle et redéfinit de nouveaux points de consigne qui sont alors transmis à la mémoire.

L'emploi de cette hiérarchie informatique permet de décharger le microprocesseur de la tâche routinière du contrôle local pour lui réserver les tâches supérieures du contrôle, plus complexes et le dialogue avec l'opérateur (définition du point de consigne à la sortie du procédé).

IV.3 Principe de fonctionnement programmé

Le programme nécessaire à notre type d'application peut être divisé en quatre parties : figure (IV.1).

- Le programme d'optimisation proprement dit (*OPTIMISATION*) qui contient l'algorithme d'optimisation ;
- Le programme d'initialisation(*INITI*) sélectionne les ports d'entrée et de sortie, initialise les horloges, l'interface de communication et le traitement des signaux d'interruption ;
- Un programme de conversion analogique-digitale (*CONV A-N*). Un seul convertisseur 8 bits, 5volts est utilisé avec un multiplexeur à 8canaux ;

□ Un groupe de huit (08) programmes est nécessaire pour la communication avec le microprocesseur. Ce dernier est le maître du dialogue. Deux sortes de données peuvent être transmises:

Cas1 :données élaborées par le microprocesseur qui sont essentiellement de nouveaux points de consigne en opération normale et divers constantes (caractéristiques de contrôleur, bornes limites sur certaines variables de contrôle) modifiables par l'opérateur en début d'expérience ;

Cas2 : données qui sont collectées par le dispositif au niveau de la mémoire au cours du temps et qui sont nécessaires au microprocesseur pour élaborer les stratégies de contrôle.

Les sous programmes cités ci-dessous sont combinés pour former le logiciel nécessaire à notre application :

□ Un sous programme "**Réservoir**" qui nous renseigne sur le niveau d'eau stocké. Cette profondeur est induit de l'expression suivante : $\Delta P/\rho g$.

□ Dans le cas où le niveau de l'eau passe par sa crête, le produit final sera du stockage de l'électricité dans les accumulateurs. Pour cela, en fait appel au sous programme "**Accumulateur**".

□ Dans le but de suivre le fonctionnement nominal de la source d'alimentation et de contrôler sa puissance de sortie, on fait recours à un sous programme "**Générateur PV**".

□ Afin d'éviter le phénomène de cavitation et le désamorçage de la pompe, on fait appel au sous programme "**Pompe**" qui se scinde en deux subroutines:

- Sous programme "**Température**" qui permet d'acquérir la donnée température au niveau de la surface de prélèvement et d'extraire la pression de vapeur d'eau en fonction de cette température.

- Sous programme "**Pression**" qui sert à prélever la pression d'entrée afficher par le vacuomètre et la comparer avec la pression de vapeur d'eau (déjà trouver) ainsi que la pression qui règne à la surface de prélèvement.

□ Pour un fonctionnement nominal et stable et afin d'éviter le risque de réduire la durée de vie de la machine à cause de son échauffement excessif, on fait appel au sous programme "**Moteur**".

□ Pour un transfert de puissance fiable entre le générateur PV et la charge, on a recours à un module qui fonctionne en transparence. Cette fonction est réalisé a travers le sous programme "**Adaptateur**".

□ Un sous programme "**Décimal**" dont le rôle est de convertir les données mémorisées dans la RAM en des données BCD et leurs mémorisations dans la table des données en attendant l'ordre d'affichage.

□ Après l'exécution du bloc sous programmes d'acquisition et de traitement des données et leurs stockages dans la RAM, le programme exécute la deuxième phase qui consiste l'asservissement des valeurs indiquées par le détecteur par rapport aux consignes homologues.

Cette phase débute par l'apparition de l'instruction **CWAY** qui donne l'ordre à une interruption non masquable $\overline{\text{FIRQ}}$ qui provoque l'exécution du sous programme "**Interruption Réglage**".

Ce sous programme débute par la lecture de la donnée indiquée dans la table. Le programme se poursuit par un test sur l'écart entre la valeur indiquée et sa consigne homologue. Si l'écart est admissible pour un fonctionnement normal, le processeur reprend sa tâche ordinaire. Si non, on fait appel aux actionnaires correspondant pour agir sur les modules présélectionnés dans le but d'améliorer leurs paramètres. Le processus s'achève au moment où la valeur réglée donne un écart favorable pour le fonctionnement optimal.

□ La troisième phase est celle d'affichage. Pour que les paramètres déjà détectés et réglés au niveau du processeur soient visibles, et dans le but de fournir à l'opérateur un bloc de résultat dans sa langue courante, on a recours à un sous programme "**Affichage**" qui fait appel à son tour à un bloc de temporisation et deux sous-routines: "**Décimale**" et "**Interruption Affichage**".

- Bloc de temporisation sert à valider l'entrée d'interruption $\overline{\text{IRQ}}$ en délivrant un niveau bas ($\overline{\text{V}}\overline{\text{A}}$) sur cette dernière dans des laps de temps prédéterminés par l'opérateur. (Dans notre cas on a fixé notre laps à $T=1h$).

- Sous programme "**Décimal**" déjà mentionné ci-dessus.

- Sous programme "**Interruption Affichage**". Ce dernier débute par la lecture des données à transmettre en format BCD dans la table RAM. Le processus sera poursuivi par une transmission des octets vers le support d'affichage via l'ACIA. La tâche se termine par un test sur les mots transmis, si la réponse est favorable on fait un `come back` au programme principal, si non on boucle le sous programme.

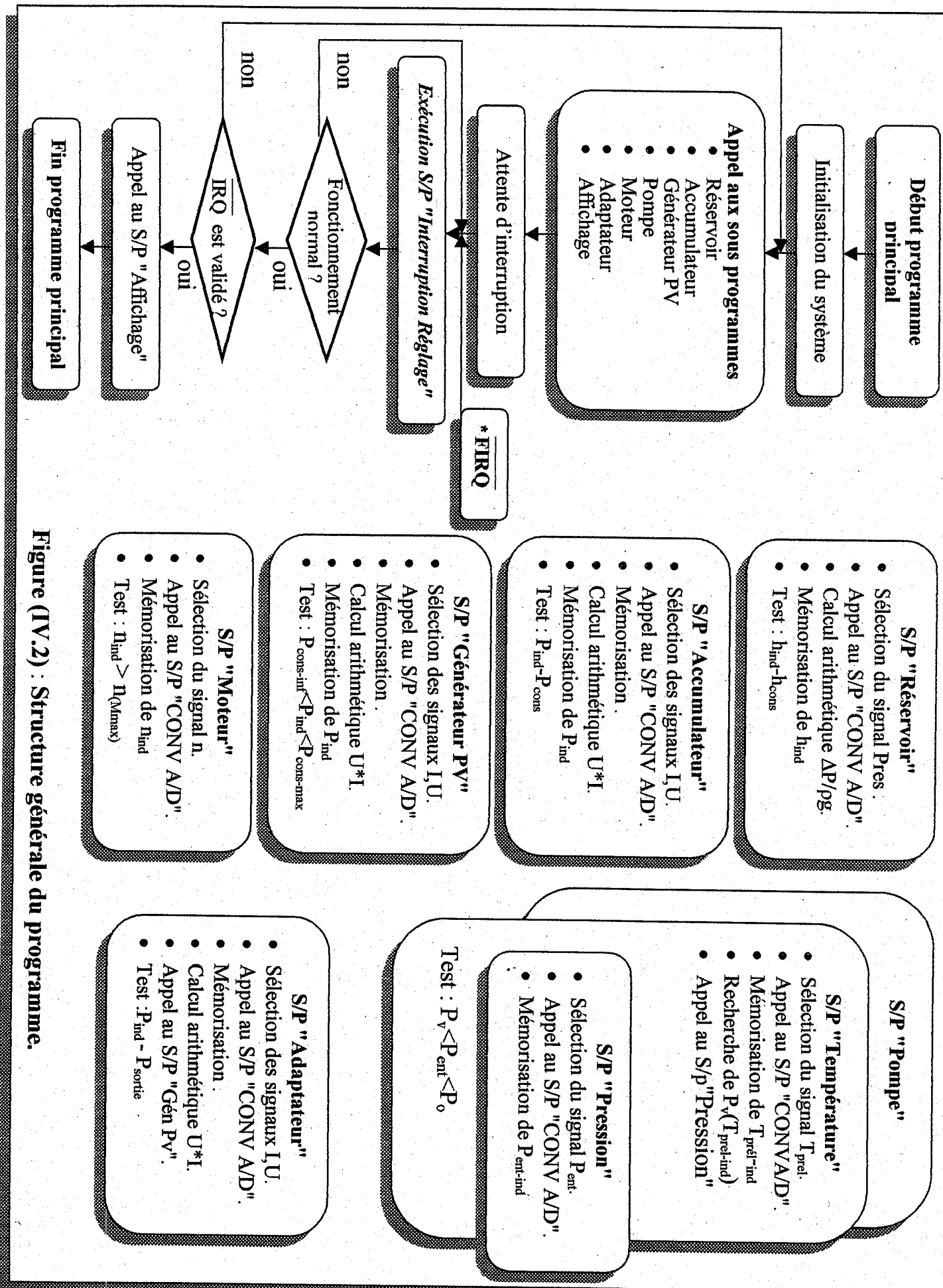


Figure (IV.2) : Structure générale du programme.

- S/P "Réservoir"**
- Sélection du signal Pres.
 - Appel au S/P "CONV A/D".
 - Calcul arithmétique $\Delta P/pg$.
 - Mémorisation de h_{ind}
 - Test : $h_{ind} < h_{cons}$

- S/P "Accumulateur"**
- Sélection des signaux I,U.
 - Appel au S/P "CONV A/D".
 - Mémorisation.
 - Calcul arithmétique $U*I$.
 - Mémorisation de P_{ind}
 - Test : $P_{ind} < P_{cons}$

- S/P "Générateur PV"**
- Sélection des signaux I,U.
 - Appel au S/P "CONV A/D".
 - Mémorisation.
 - Calcul arithmétique $U*I$.
 - Mémorisation de P_{ind}
 - Test : $P_{cons-inf} < P_{ind} < P_{cons-max}$

- S/P "Moteur"**
- Sélection du signal n.
 - Appel au S/P "CONV A/D".
 - Mémorisation de n_{ind}
 - Test : $n_{ind} > n_{Q(max)}$

- S/P "Pompe"**
- S/P "Température"**
- Sélection du signal T_{prel} .
 - Appel au S/P "CONV A/D".
 - Mémorisation de $T_{prel-ind}$
 - Recherche de $P_v(T_{prel-ind})$
 - Appel au S/p "Pression"

- S/P "Pression"**
- Sélection du signal P_{ent} .
 - Appel au S/P "CONV A/D".
 - Mémorisation de $P_{ent-ind}$

Test : $P_v < P_{ent} < P_o$

- S/P "Adaptateur"**
- Sélection des signaux I,U.
 - Appel au S/P "CONV A/D".
 - Mémorisation.
 - Calcul arithmétique $U*I$.
 - Appel au S/P "Gén Pv".
 - Test : $P_{ind} - P_{sortie}$

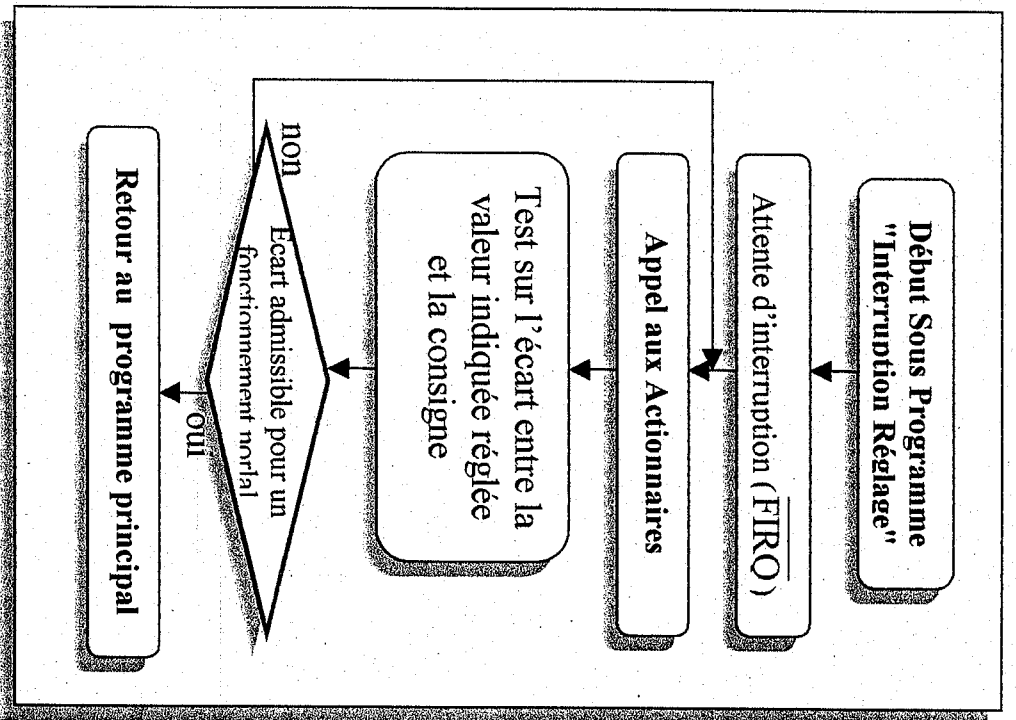
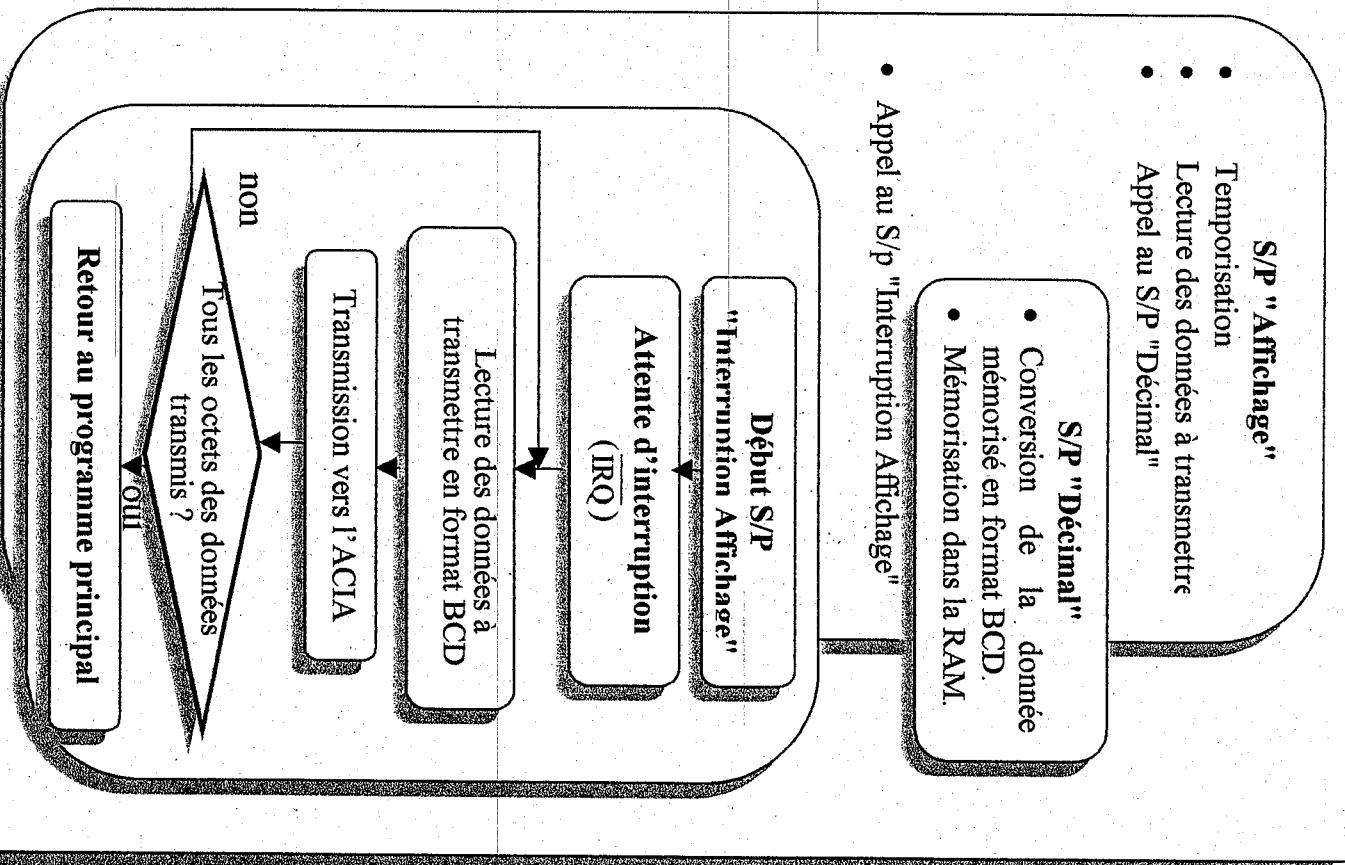


Figure (IV.2) : Structure générale du programme (Suite).



IV.4 Le programme Principal

Ce Programme contient les points suivants :

1- Une séquence d'initialisation :

- Initialisation de la RAM :Forçage à zéro des adresses .
- Initialisation du PIA :
 Port A :Bits 0 a 7 en entrées.
 Port B :Bits 0 a 7 en sortie.
- Initialisation de la pile :
Ne pas l'oublier pour les sous programmes. Nous mettons son sommet en 0050.
- Initialisation du registre d'index X, début de la table de données.
- Programmation de l'ACIA en sortie avec un bit de Start et un bit de Stop.
- Stockage des constantes dans la table de données située dans la RAM. Ces constantes sont constituées des nombres d'octets par donnée et des nombres d'identification de ces données selon la configuration suivante:

Cette table sera compété par un ensemble de sous programmes. Les nombres d'octets vont permettre au sous programme "*Interruption Affichage*" de gérer l'émission de données.

2- Lecture de la donnée numérique et stockage dans la table.

(ORA) → A
(A) → 0005

3- Appels aux sous programmes.

4- Attente des interruptions grâce à l'instruction **CWAY** qui valide l'entrée d'interruption. $\overline{\text{FIRQ}}$

Lorsque une impulsion apparaît à l'entrée de $\overline{\text{FIRQ}}$, le processeur recherche automatiquement le vecteur FFF6 et FFF7 où se loge l'adresse du sous programme "*Interruption Réglage*" qui sera exécuté dans le champ .

5- Test sur l'écart entre la valeur indiquée par le détecteur présélectionné et la consigne correspondante. Si l'écart est admissible le processeur continu l'exécution du programme. Sinon on conserve l'interruption et on fait appel à l'actionneur correspondant pour un réglage adéquat.

6- *Effectuer un OU LOGIQUE* entre le registre CCR et le mot FF dans but de masquer l'entrée d'interruption $\overline{\text{FIRQ}}$, pour permettre au processeur de continuer son optimisation .

$(\text{CCR}) + \text{FF} \rightarrow \text{CCR}$

7- *Attente d'interruption matérielle $\overline{\text{IRQ}}$* .Lorsque un niveau bas ($\overline{\text{IRQ}}$) apparaît a l'entrée $\overline{\text{IRQ}}$,le processeur recherche automatiquement le vecteur FFF8 et FFF9 ou se loge l'adresse du sous programme "*Interruption Affichage*" qui sera mis en service.

8- *Test sur le nombre de données transmis*. Toutes les données transmis, le processeur continu l'exécution du programme. si non décrémentation et continu la transmission.

$(A) - 1 \rightarrow A$.

$(A) \neq 0$ aller à (7) (continuer la transmission).

$(A) = 0$ continuer le programme principal.

9- *Remise a 1 du flag I* du registre CCR.

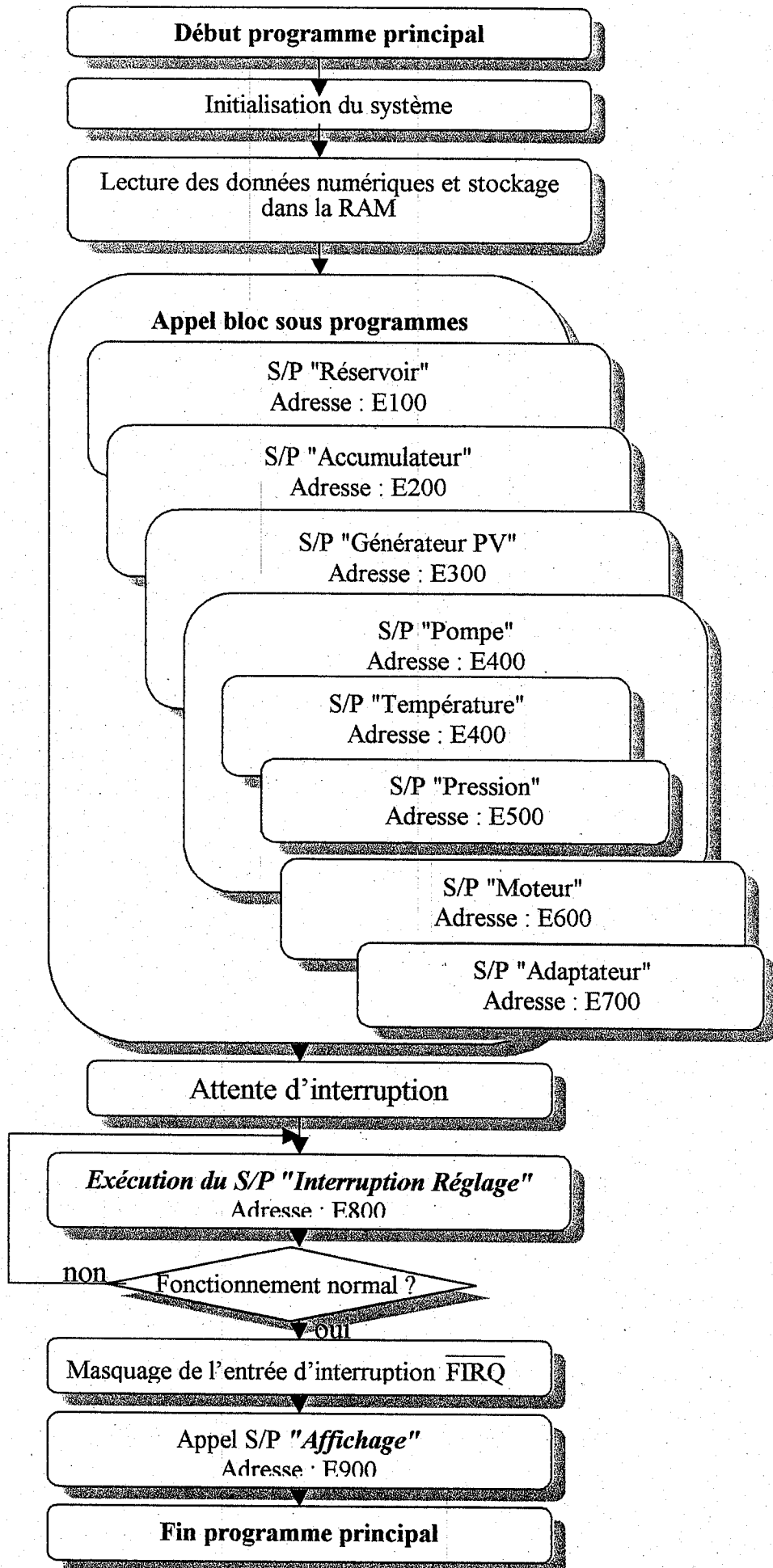


Figure (IV.3) : Organigramme du programme principal.

IV.4.1 Bloc d'initialisation du système

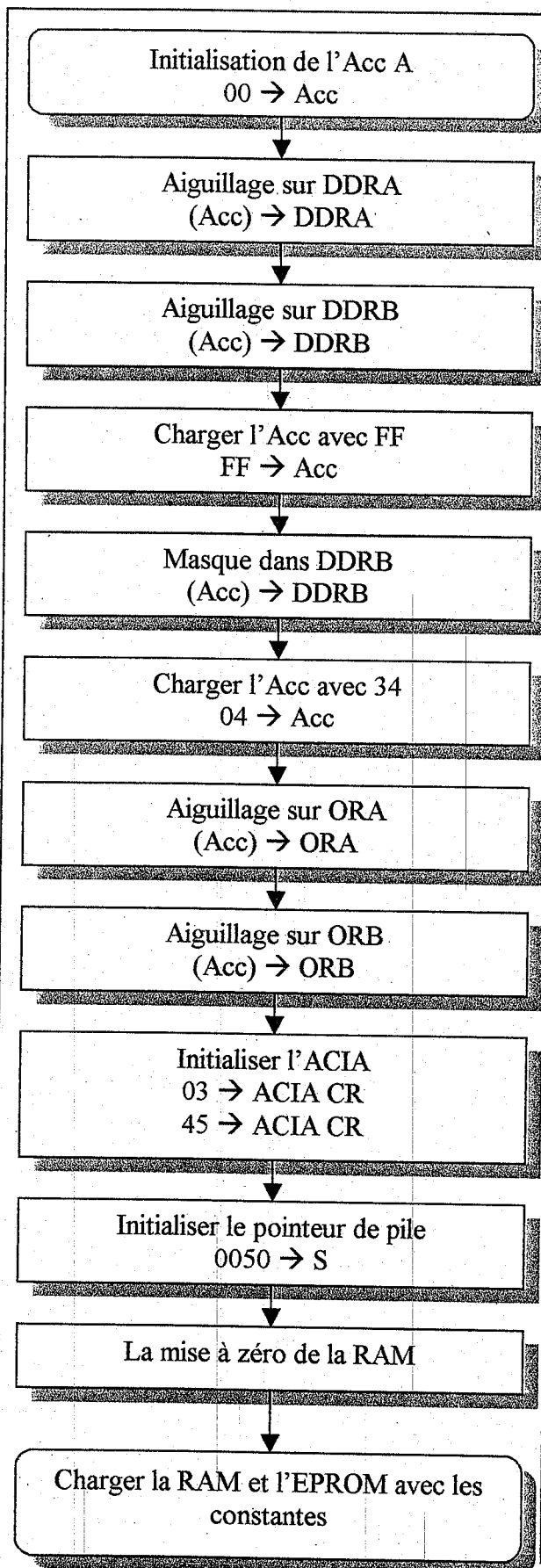
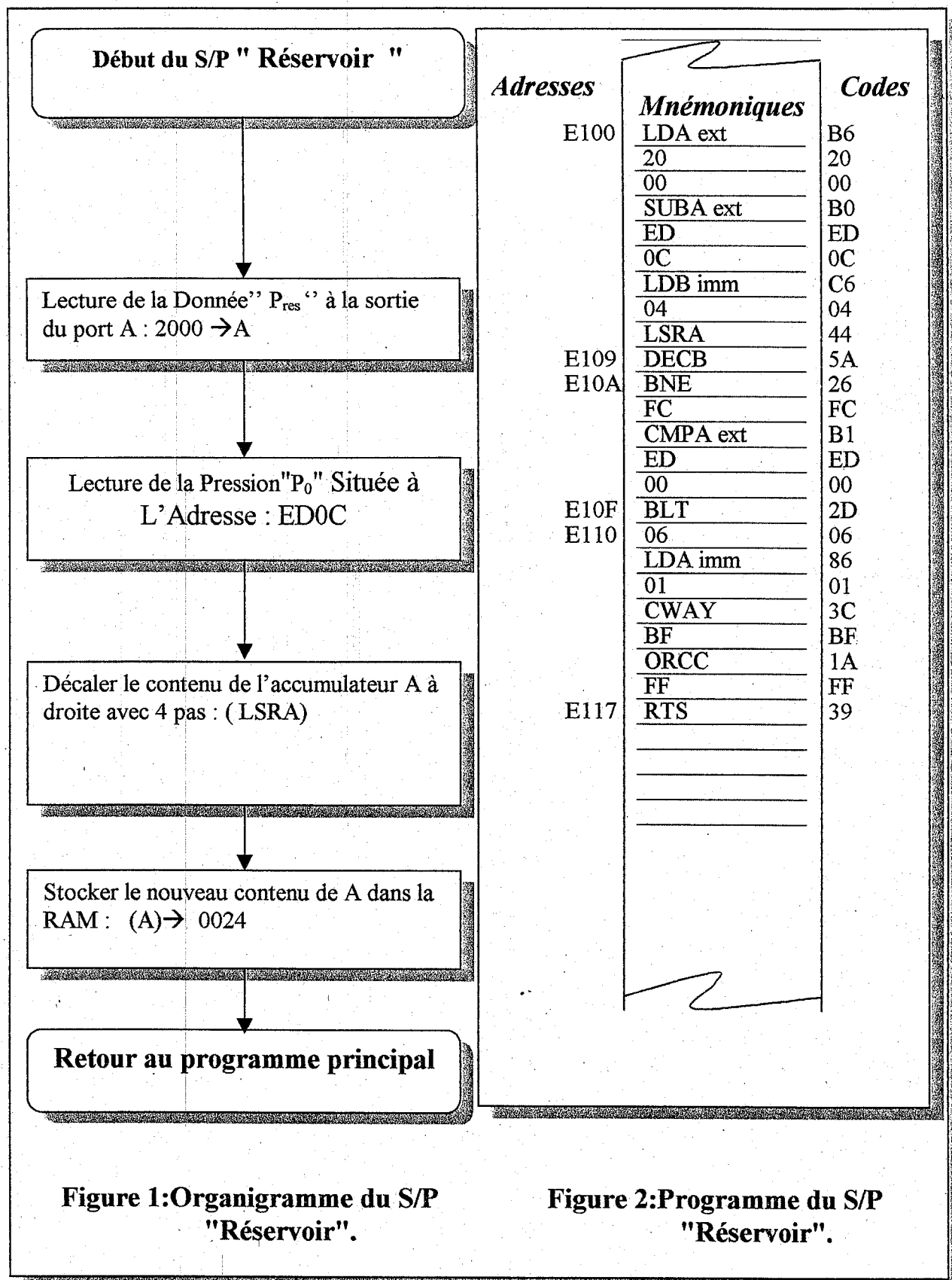


Figure 1: Organigramme du bloc d'initialisation .

Adresses	Mnémoniques	Codes
E000	CLR A	4F
	STAA ext	B7
	20	20
	01	01
	STAA ext	B7
	20	20
	03	03
	STAA ext	B7
	20	20
E009	00	00
E00A	COM A	43
	STAA ext	B7
	20	20
	02	02
	LDA imm	86
E00F	34	34
E010	STAA ext	B7
	20	20
	01	01
	STAA ext	B7
	20	20
	03	03
	LDS imm	10.CE
	00	00
	50	50
E019	LDX imm	8E
E01A	07	07
	FF	FF
	CLR X	6F
	00	00
	DEX	09
E01F	CMPX imm	8C
E020	FF	FF
	FF	FF
	BNE	26
	F8	F8
	LDA imm	26
	03	03
	STA ext	B7
	80	80
	00	00
E029	LDA imm	86
E02A	45	45
	STAA ext	B7
	80	80
	00	00

Figure 2: Programme du bloc d'initialisation .

IV.4.2 Sous programme "Réservoir"



IV.4.3 Sous programme "Accumulateur"

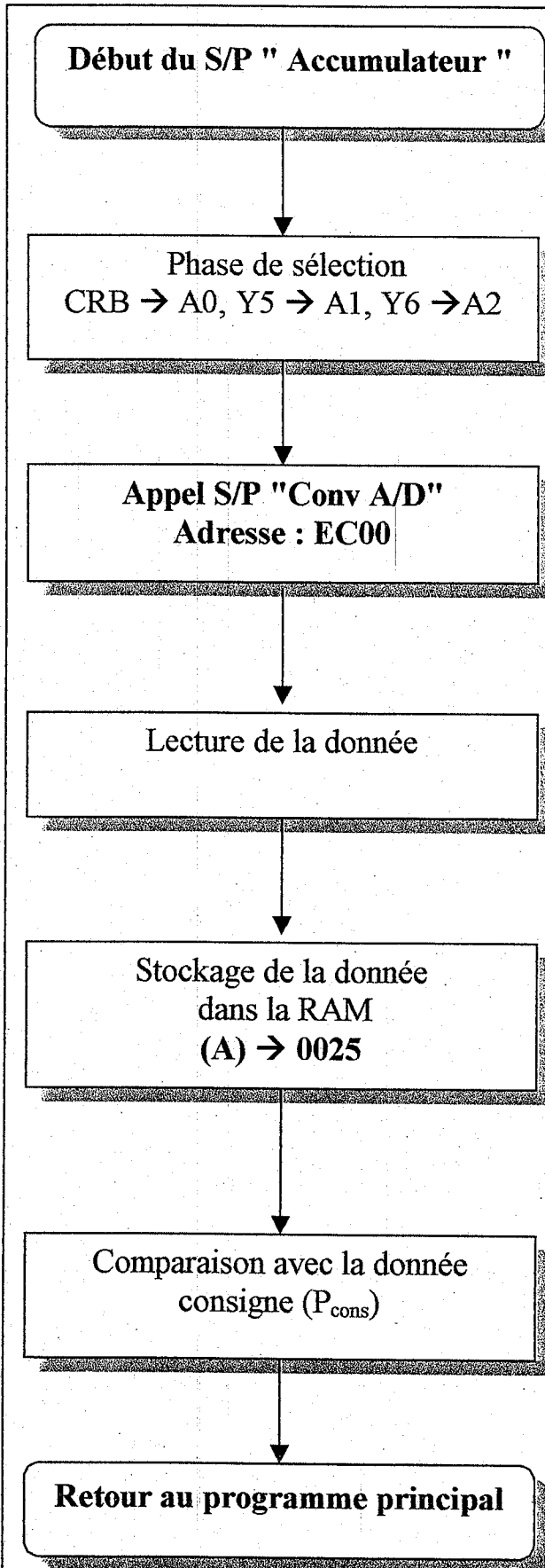


Figure 1: Organigramme du S/P " Accumulateur ".

Adresses	Mnémoniques	Codes
E200	LDA imm	86
	3C	3C
	STA ext	B7
	20	20
	00	00
	JSR	BD
	EC	EC
	00	00
	STB ext	F7
E209	00	00
E20A	25	25
	LDA ext	B6
	ED	ED
	01	01
	CMPA ext	B1
E20F	00	00
E210	25	25
	BGT	2 ^E
	09	09
	LDA imm	86
	02	02
	CWAY	3C
E217	BF	BF
E218	ORCC	1A
	FF	FF
	JMP	7 ^E
	E2	E2
	23	23
E21D	LDA imm	86
E22E	03	03
	CWAY	3C
E230	BF	BF
	ORCC	1A
	FF	FF
E223	RTS	39

Figure 2: Programme du S/P " Accumulateur ".

IV.4.4 Sous programme " Générateur PV "

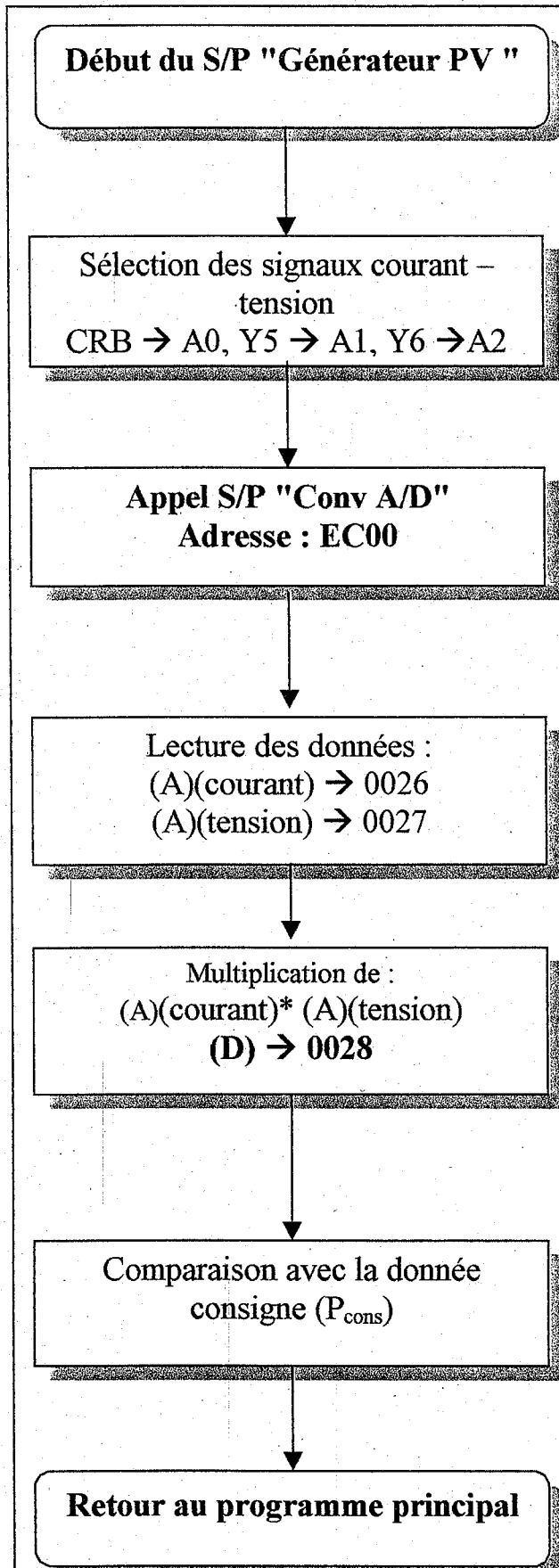


Figure 1: Organigramme du S/P " Générateur PV ".

Adresses	Mnémoniques	Codes
E300	LDX imm	8E
	00	00
	00	00
	LDA imm	86
	3C	3C
	LDB ext	FC
	A0	A0
	00	00
	STA ext	B7
E309	20	20
E30A	01	01
	STA ext	B7
	20	20
	03	03
	JSR	BD
	EC	EC
E30F	00	00
E310	STAB,X	E7
	26	26
	LEAX,1,X	30
	80	80
	CMPA imm	
	34	34
	BNE	26
	03	03
	JMP	7E
E319	E3	E3
E31A	21	21
	LDA imm	86
	34	34
	JMP	7E
	E3	E3
E31F	08	08
E320	LDA,X	A6
	24	24
	LDB,X	E6
	25	25
	MUL	3D
	ADCA	89
	00	00
	STD ext	FD
	00	00
E329	28	28
E32A	LDX imm	8F
	ED	ED
	(Suite ...)	

Figure 2: Programme du S/P " Générateur PV ".

Figure 2: Suite du programme S/P "Générateur PV"

Adresses	Mnémoniques (... Suite)	Codes
	02	02
	LDA, X ^r	A6
E32F	80	80
E330	CMPA ext	B1
	00	00
	28	28
	BEQ	27
	0B	0B
	CMPX imm	8C
	ED	ED
	0A	0A
E338	BNE	26
E339	F4	F4
	LDA imm	86
	03	03
	CWAY	3C
	BF	BF
E33E	ORCC	1A
E33F	FF	FF
E340	RTS	39

IV.4.5 Sous programme "Adaptateur"

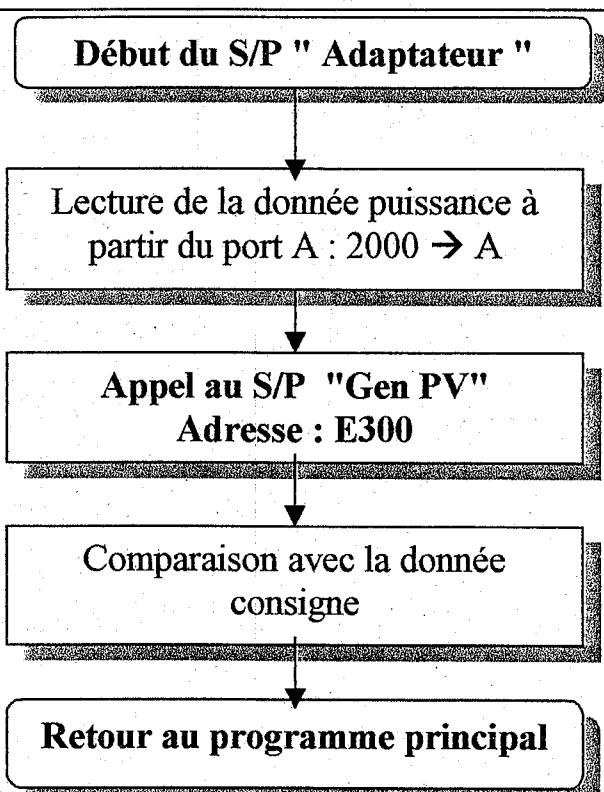


Figure 1: Organigramme du S/P "Adaptateur"

Adresses	Mnémoniques	Codes
E700	LDA ext	B6
	20	20
	00	00
	JSR	BD
	E3	E3
	00	00
	CMPA ext	B1
	ED	ED
	0E	0E
E709	BEQ	27
E70A	06	06
	LDA imm	86
	04	04
	CWAY	3C
	BF	BF
E70F	ORCC	1A
E710	FF	FF
	RTS	39

Figure 2: Programme du S/P "Adaptateur"

IV.4.6 Sous programme "Moteur"

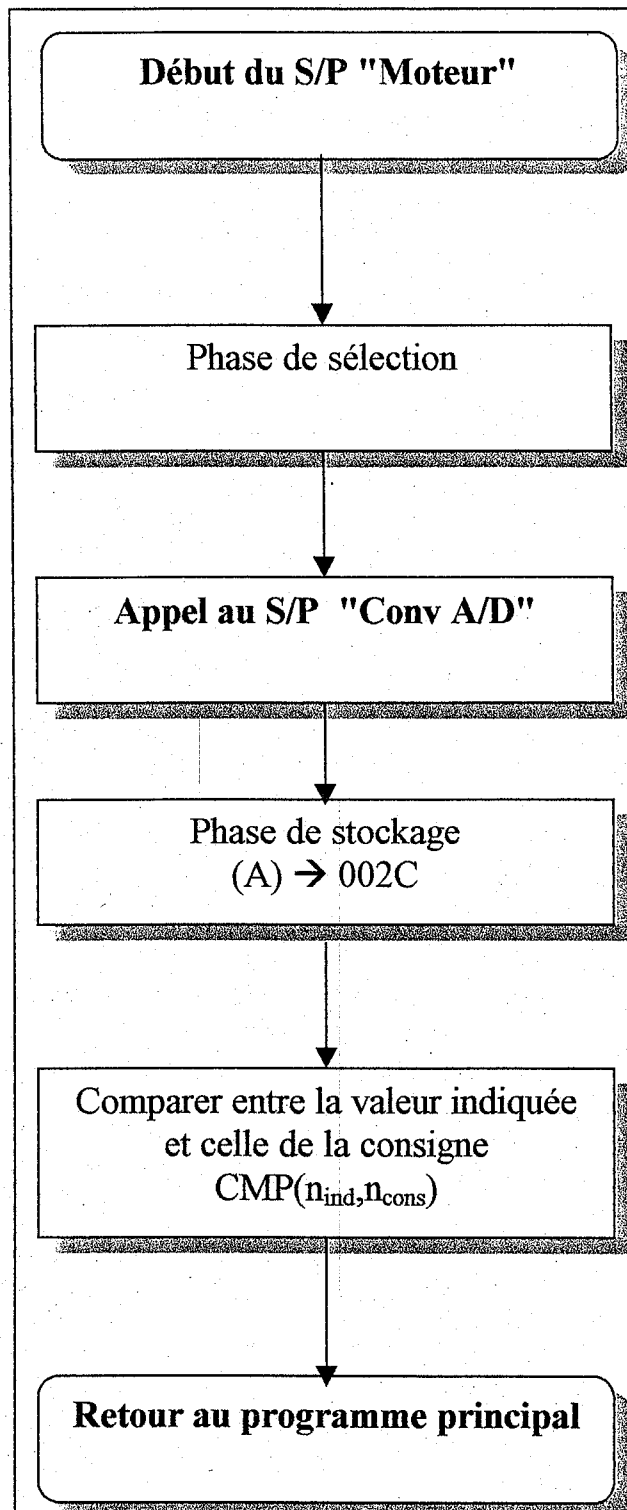


Figure 1: Organigramme du S/P "Moteur".

Adresses	Mnémomoniques	Codes
E600	LDA imm	86
	34	34
	STA ext	B7
	20	20
	01	01
	STA ext	B7
	20	20
	03	03
	LDB ext	F6
	E609	A0
E60A	00	00
	JSR	BD
	EB	EB
	00	00
	STAB ext	F7
E60F	00	00
E610	2C	2C
	LDX imm	8E
	00	00
	00	00
	LDA,X	A6
	2C	2C
	CMPA ext	B1
	ED	ED
	0B	0B
	E619	BLE
E61A	06	06
	LDA imm	86
	05	05
	CWAY	3C
	BF	BF
E62F	ORCC	1A
E630	FF	FF
	RTS	39

Figure 2: Programme du S/P "Moteur".

IV.4.7 Sous programme "Pompe"

Il se scinde en deux sousroutines : *S/P "Pression"* et *S/P "Température"*.

a) Sous programme "Pression"

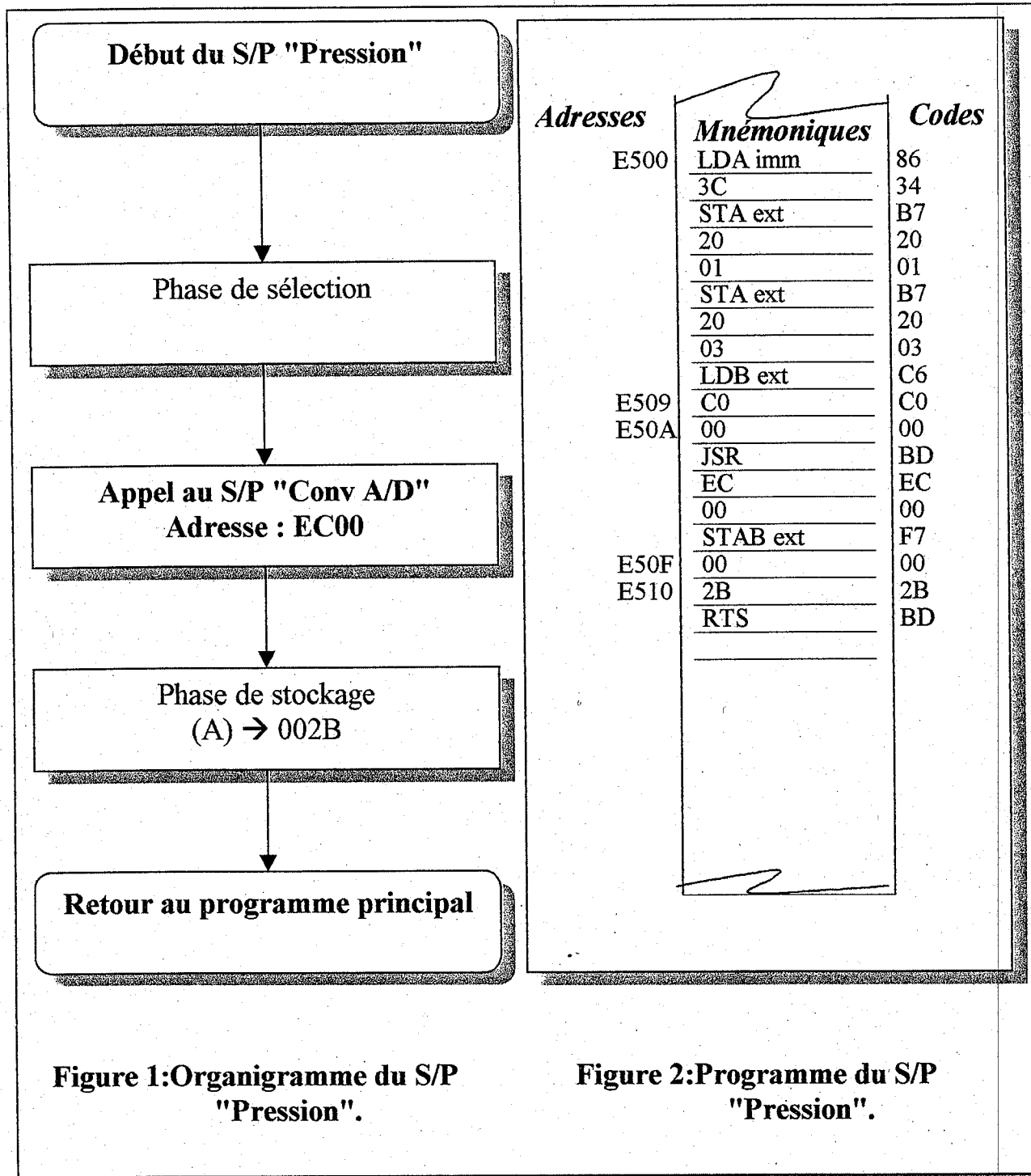


Figure 1: Organigramme du S/P "Pression".

Figure 2: Programme du S/P "Pression".

b) Sous programme "Température"

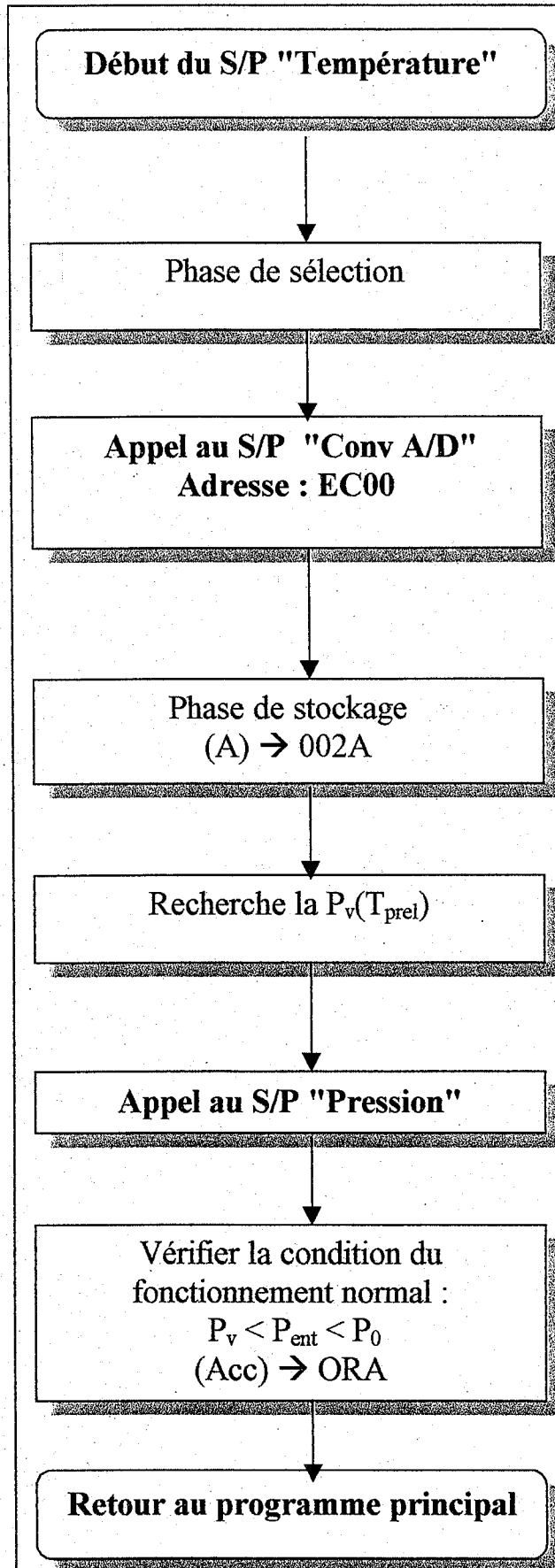


Figure 1: Organigramme du S/P "Température"

Adresses	Mnémoniques	Codes
E400	LDA imm	86
	34	34
	STA ext	B7
	20	20
	01	01
	STA ext	B7
	20	20
	03	03
	LDB ext	C6
E409	C0	C0
E40A	00	00
	JSR	BD
	EC	EC
	00	00
	STAB ext	F7
E40F	00	00
E410	2A	2A
	JSR	BD
	E5	E5
	00	00
	STB ext	F7
	00	00
	2B	2B
	LDX imm	8E
	EE	EE
E419	00	00
E41A	LDA, X ⁺⁺	A6
	81	81
	CMPA ext	B1
	00	00
	2A	2A
E41F	BNE	26
E420	FA	FA
	LDA, -1, X	A6
	82	82
	CMPA ext	B1
	00	00
	2B	2B
	BLT	2D
	06	06
E428	LDA imm	86
E429	06	06
	CWAY	3C
E42B	BF	BF
	ORCC	1A
E42D	FF	FF
E43E	RTS	39

Figure 2: Programme du S/P "Température"

IV.4.8 Sous programme "Interruption réglage"

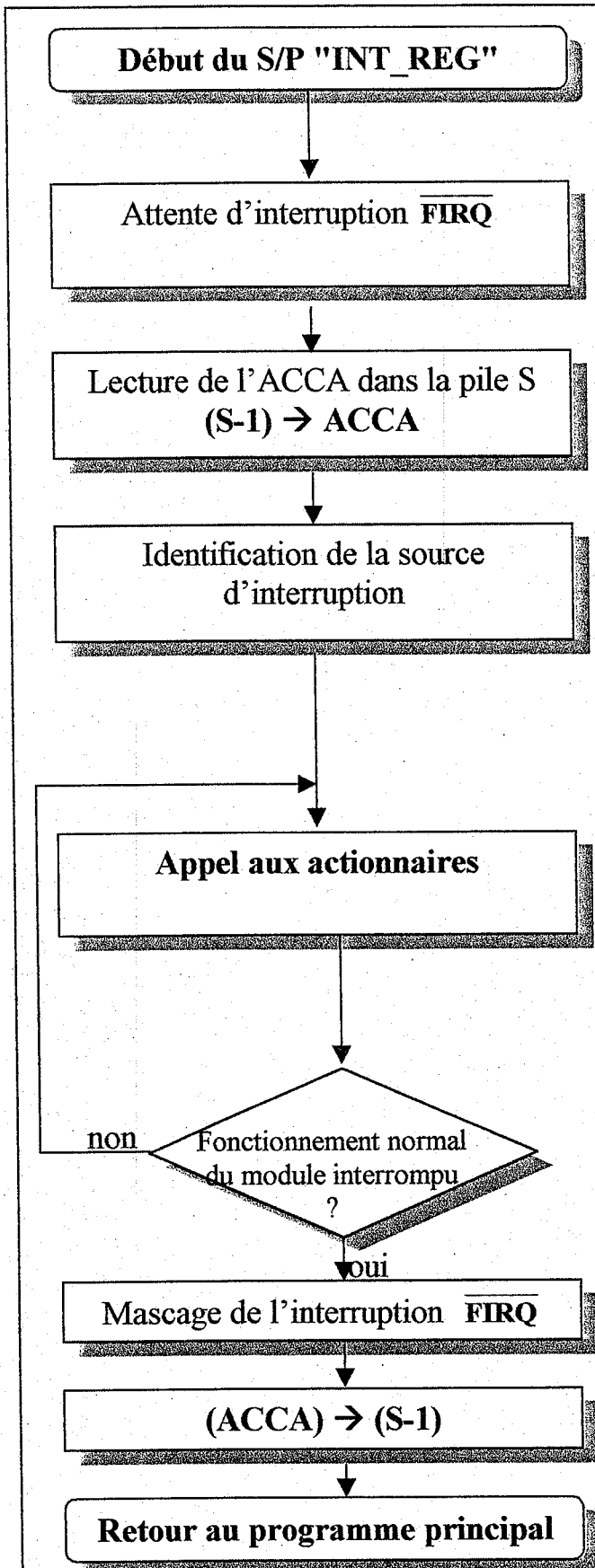


Figure 1: Organigramme du S/P " Interruption Réglage ".

Adresses	Mnémoniques	Codes
E800	LDA,+1,S	A6
61		61
	LDBimm	C6
00		00
	JSR	BD
E8		E8
40		40
	JSR	BD
E8		E8
30		30
	JSR	BD
E8		E8
50		50
	JSR	BD
E8		E8
30		30
	JSR	BD
E8		E8
60		60
	JSR	BD
E8		E8
30		30
	JSR	BD
E8		E8
70		70
	JSR	BD
E8		E8
30		30
	JSR	BD
E8		E8
30		30
	JSR	BD
E8		E8
90		90
	JSR	BD
E8		E8
30		30
	RTI	3B
	(SUITE)	

Figure 2: Programme du S/P " Interruption Réglage ".

Adresses			Adresses			Adresses		
Adresses	Mnémoniques	Codes	Adresses	Mnémoniques	Codes	Adresses	Mnémoniques	Codes
S/P « source d'interruption »			E855			E894		
E830	CMPBimm	C1		BNE	26		LDAimm	86
	05	05		11	11		37	37
	BNE	26		CMPAimm	81		JSR	BD
	03	03		02	02		E8	E8
	JMP	7E		Bne	26		B0	B0
	E8	E8		08	08		NOP	12
E837	28	28		LDAimm	86		NOP	12
	RTS	39		14	14		NOP	12
				JSR	BD		JSR	BD
E8B0	LDB imm	C6		E8	E8		E7	E7
	05	05		B0	B0		00	00
	JSR	BD		JMP	7E		JMP	7E
	E8	E8		E8	E8		E8	E8
	F0	F0		68	68		90	90
E8B5	RTS	39		LDAimm	86	E8A2	RTS	39
				06	06			
S/P « sortie vers le port B »				JSR	BD	S/P « Contrôle-Moteur »		
E8F0	STAext	B7		E8	E8	E8C0	CMPAimm	81
	20	20	E868	B0	B0		05	05
	00	00		RTS	39		BNE	26
	LDAimm	86					06	0E
	34	34	S/P « Contrôle-GPV »				LDAimm	86
	STAext	B7	E870	CMPAimm	81		57	57
	20	20		03	03		JSR	BD
	03	03		BNE	26		E8	E8
	NOP	12		14	14		B0	B0
	NOP	12		LDBext	F6		NOP	12
	NOP	12		20	20		NOP	12
E8FB	RTS	39		03	03		NOP	12
				BITB	C5		JSR	BD
				14	14		E6	E6
S/P « Contrôle-Réservoir »				BNE	26		00	00
E840	CMPAimm	81		08	08		JMP	7E
	01	01		LDAimm	86		E8	E8
	BNE	26		13	13		C0	C0
	05	05		JSR	BD	E8D2	RTS	39
	LDAimm	86		E8	E8			
	16	16		B0	B0	S/P « Contrôle-Pompe »		
	JSR	BD		JMP	7E	E8E0	CMPAimm	81
	E8	E8		E8	E8		06	06
	B0	B0		88	88		BNE	26
E849	RTS	39		LDAimm	86		05	05
				1B	1B		LDAimm	86
S/P « Contrôle Accumulat »				JSR	BD		16	16
E850	LDBext	F6		E8	E8		JSR	BD
	20	20		B0	B0		E8	E8
	03	03	E888	RTS	39		B0	B0
	BITB	C5				E8E9	RTS	39
	16	16						
			S/P « Contrôle-Adaptat »					
			E890	CMPAimm	81			
				04	04			
				BNE	26			
				0E	0E			

IV.4.9 Sous programme "Affichage"

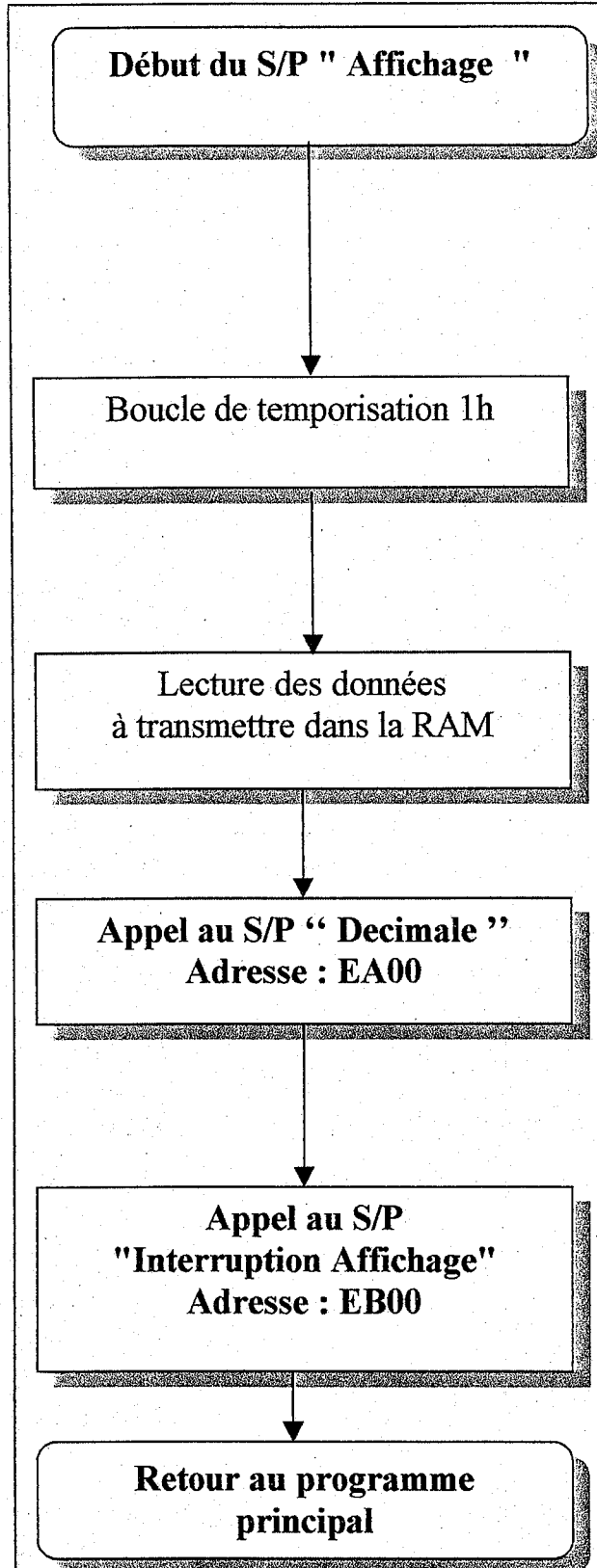


Figure 1: Organigramme du S/P "Affichage".

Adresses Codes	Mnémoniques	
E900	CLR	7F
	00	00
	30	30
	LDX imm	8E
	00	00
	00	00
	LDA, X	A6
	24	24
	STAA ext	B7
E909	00	00
E90A	30	30
	JSR	BD
	EA	EA
	00	00
	INCX	6C
	CMPX ext	8C
E90F	00	00
E910	23	23
	BNE	26
	F9	F9
	LDX imm	8E
	00	00
	00	00
	LDA imm	86
	09	09
	JSR	BD
E919	EB	EB
	00	00
	DECA	4A
	BNE	26
	FB	FB
	SEI	0F
	RTS	39

Figure 2: Programme du S/P "Affichage".

IV.4.10 Sous programme "Décimal"

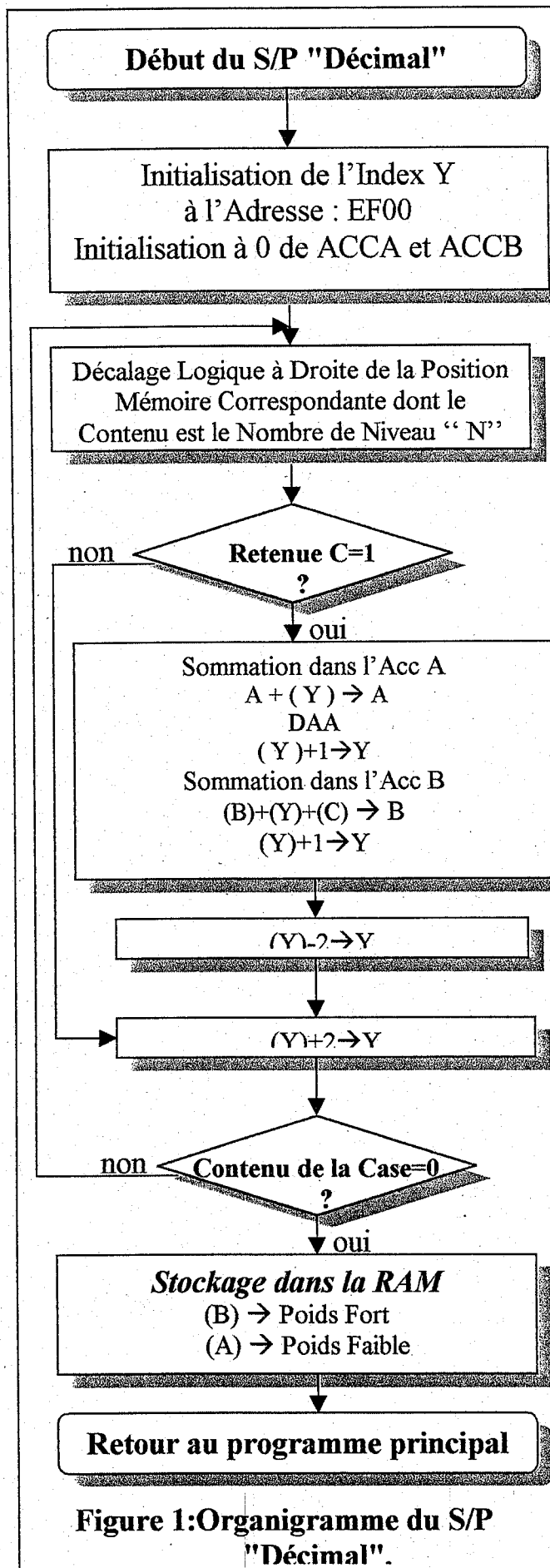


Figure 1: Organigramme du S/P "Décimal".

Adresses	Mnémoniques	Codes
EA00	LDX ext	8E
	00	00
	40	40
	LDY ext	10.8E
	EF	EF
	00	00
	CLRA	4F
	CLRB	5F
	LSR ext	74
EA09	00	00
EA0A	30	30
	BCC	24
	07	07
	ADDA	AB
	A0	A0
EA0F	DAA	A9
EA10	ADDB	E9
	A0	A0
	LEAY,-2,Y	31
	3E	3E
	LEAY,+2,Y	31
	22	22
	TST	7D
	00	00
	30	30
EA19	BNE	26
EA1A	ED	ED
	STB,2,X	F7
	82	82
	STA,1,X	B7
	80	80
EA1F	LEAX,1,X	30
EA20	80	80
	STAX ext	B7
	00	00
	40	40
	RTS	39

Figure 2: Programme du S/P "Décimal".

IV.4.11 Sous programme "Conv A/D"

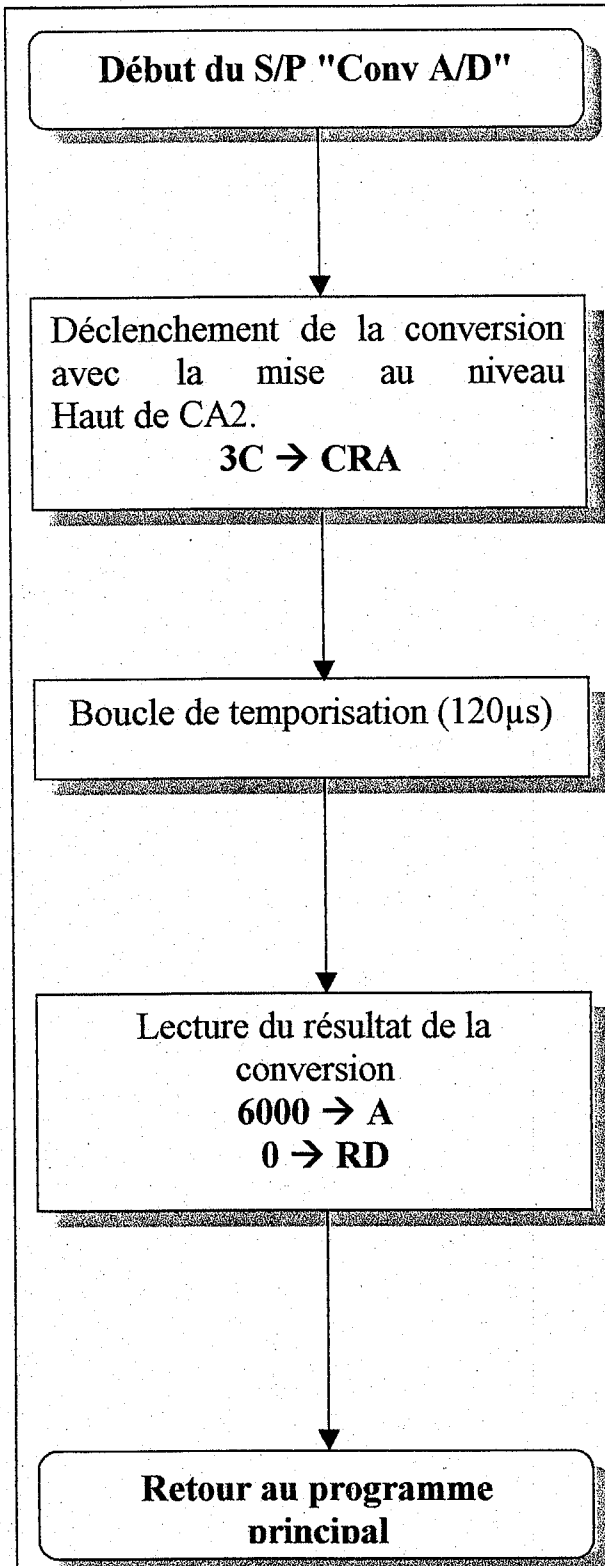


Figure 1: Organigramme du S/P "Conv A/D".

Adresses	Mnémoniques	Codes
EC00	LDA imm	86
	3C	3C
	STAA	B7
	20	20
	01	01
	NOP	12
	NOP	12
	NOP	12
	LDA imm	86
	20	20
EC09	DECA	4A
EC0A	BNE	26
	FD	FD
	LDA imm	86
	34	34
	STA ext	B7
EC0F	20	20
EC10	01	01
	LDB ext	F6
	60	60
	00	00
	RTS	39

Figure 2: Programme du S/P "Conv A/D".

IV.5 Organisation des mémoires EPROM et RAM

Le programme principal débute au sommet de l'EPROM c'est-à-dire E000, cette adresse est située aux cases mémoires FFFE et FFFF.

A l'initialisation du 6809 (Reset), celui-ci va automatiquement aller à ces adresses pour charger son compteur ordinal PC avec les adresses contenues dans ces cases mémoires c'est-à-dire celles du début du programme principal.

L'EPROM contient aussi toute les adresses des sous programmes, les valeurs des constantes ainsi que les poids des nombres binaires.

Le programme a été écrit en langage machine. La figure (IV.5.1) donne la structure de l'EPROM et la RAM.

EPROM		RAM	
Contenu		Contenu	
Adresses	Liste des Sous Programmes	Adresses	Paramètres en BCD
E000	Programme principal	0000	N. ^{bre} d'octets pour chaque donnée 03
E100	S/P "Réservoir"	0001	N° d'identification 01
E200	S/P "Accumulateur"	0002	Valeur en BCD : h_{res}
E300	S/P "Générateur PV"	0003	h_{res}
E400	S/P "Pompe" , S/P "Température"	0004	03
E500	S/P "Pression"	0005	02
E600	S/P "Moteur"	0006	Puissance d'accumulateur
E700	S/P "Adaptateur"	0007	Puissance d'accumulateur
E800	S/P "Interruption-Réglage"	0008	03
E900	S/P "Affichage"	0009	03
EA00	S/P "Décimal"	000A	Tension de générateur
EB00	S/P "Interruption-Affichage"	000B	Tension de générateur
EC00	S/P "Conv A/D"	000C	03
	TABLE DES CONSIGNES	000D	04
ED00	$h_{réservoir}$	000E	Courant de générateur
ED01	$P_{accumulateur}$	000F	Courant de générateur
ED02	P_{Gpmin}	0010	03
ED03		0011	05
.....		0012	Puissance de générateur
ED0A	P_{Gpmax}	0013	Puissance de générateur
ED0B	n_{moteur}	0014	03
ED0C	$P_{atm-res}$	0015	06
ED0D	$P_{atm-puits}$	0016	Température de prélèvement
		0017	Température de prélèvement

(A suivre)

(Suite)

Table des constantes T , P_v			
		0018	03
EE00	5	0019	07
EE01	8	001A	Pression d'entrée de la pompe
EE02	10	001B	Pression d'entrée de la pompe
EE03	11	001C	03
EE04	20	001D	08
EE05	23	001E	Puissance de sortie de l'adaptateur
EE06	30	001F	Puissance de sortie de l'adaptateur
EE07	42	0020	03
EE08	40	0021	09
EE09	73	0022	La vitesse de rotation du moteur
EE0A	50	0023	La vitesse de rotation du moteur
EE0B	123		
EE0C	60		Paramètres avant la conversion en BCD
EE0D	198	0024	Hauteur de stockage (h _{res})
EE0E	70	0025	Puissance d'accumulateur
EE0F	311	0026	Tension du générateur
	Table des constantes	0027	Courant du générateur
EF00	04	0028	Puissance du générateur
EF01	00	0029	Puissance de sortie de l'adaptateur
EF02	08	002A	Température de prélèvement
EF03	00	002B	Puissance d'entrée de la pompe
EF04	16	002C	Vitesse de rotation du moteur
EF05	00		
EF06	32	0050	PILE S
EF07	00		
EF08	64		
EF09	00		
EF0A	28		
EF0B	01		
EF0C	56		
EF0D	02		
EF0E	12		
EF0F	05		
	Vecteurs d'interruption		
FFF6	E8		
FFF7	00		
FFF8	EB		
FFF9	00		
FFFE	E0		
FFFF	00		

Figure (IV.5.1) : Structure des mémoires EPROM et RAM.

IV.6 Conclusion

Nous avons développé dans ce chapitre le coté Software du système PPV. L'ensemble du programmes permet de faire fonctionner le système PPV à son régime optimal. Le fonctionnement nominal est assuré par un ensemble de sous-routines fonctionnant en boucle fermé et qui commande la phase d'acquisition, traitement et réglage.

Nous avons ensuite donné les organigrammes des différentes parties de ce programme en apportant les explications nécessaires à leurs compréhension. La programmation en assembleur est explicitée au niveau de chaque organigramme.

C

H

A

P

I

T

R

E

V

CALCUL ECONOMIQUE D'UN SYSTEME (PPV)

1-Introduction .

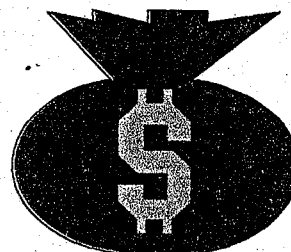
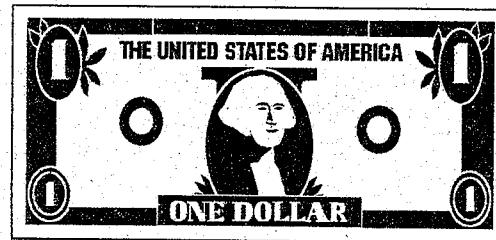
2-Investissement , Spécificité du problème .

3-L'Analyse Financière.

a°- Un Modèle de gestion des stocks.

b°- Analyse Micro-économique du Stockage.

4- Calcul Actuariel .



Liste des symboles

- x : Variable aléatoire.
- $f(x)$: Densité de probabilité.
- B : Coût de stockage unitaire .
- C : Valeur de la pénalité de défaillance unitaire .
- r : Valeur résiduelle unitaire.
- S : Capacité de stockage .
- $E(c)$: Espérance du coût total.
- R_d : Risque de défaillance .
- σ_a : Ecart type de la variable .
- x : Nombre de jour sans soleil .
- N^o_x : Niveau de service .
- j : Taux d'actualisation des recettes.
- f : Investissement nécessaire à la production d'une unité de Q .
- λ : Prix courant d'une unité produite.
- σ : Taux d'actualisation .
- B : Bénéfice actualisé.
- R : Recettes actualisées .
- D : Dépenses actualisées.
- R : Richesse produite au cour d'une période .
- Q : Production associée à l'unité de temps.
- CVA : Coût variable.
- γ : Taux d'inflation affectant le prix de l'énergie.
- ξ : Taux de pénalisation du futur .

V.1 Introduction

L'énergie solaire est l'un des plus vieux auxiliaires de l'homme, et on l'utilise encore beaucoup dans les pays où l'ensoleillement est favorable, elle n'est donc pas nouvelle à priori, par contre les matériaux utilisés dans les procédés de transformation font l'objet d'améliorations techniques permanentes.

L'économiste devra répondre à deux questions :

- *Quelle est la nature des problèmes rencontrés ?*
- *L'énergie étudiée est-elle économiquement viable ?*

La difficulté naîtra du fait qu'il n'existe aucune réponse décisive, tout dépendra des objectifs que l'on s'est fixé et de la qualité de certains choix, exemple: *Que signifie la notion de rentabilité lorsqu'on privilégie l'indépendance énergétique ?*

C'est donc d'un subtil mélange de variables objectives et subjectives que naîtront des éléments de réponse .

Il est notoire en économie du financement que les perspectives d'exploitation de telle ou telle énergie se trouvent liées à l'évolution des coûts réels d'installation et d'exploitation, «la crise de l'énergie» est en fait la crise d'une source d'énergie dont la rentabilité actuarielle s'estompe, le problème pour les cinquante années à venir est donc relatif à la diversification des sources d'énergie et ne se pose pas en termes de pénurie, tout au moins au niveau macro-économique .

Peut-on envisager dès lors l'énergie solaire comme un substitut au pétrole dans le cadre d'une unité différenciée ?

La théorie du choix des investissements peut-elle donner aux ménages des éléments d'appréciations de l'opportunité des générateurs photovoltaïques ?

Les réponses n'ont de sens en l'espèce, que si elles se développent à partir de données technologiques précises; on ne peut utiliser n'importe quel matériel pour atteindre des objectifs précis, de surcroît une technologie à une dimension temporelle liée aux structures même de son marché (état de la concurrence, dynamisme de la recherche....). l'ignorer ne peut que conduire à des choix arbitraires.

V.2 Investissement : Spécificité du problème

Un produit se définit donc aussi par rapport à un marché, c'est à dire relativement à la stratégie qui le soutend de la production à la commercialisation;

les gestionnaires furent amenés à parler de produit-marché, notion à la fois beaucoup plus vaste et beaucoup plus précise que celle de produit technique.

Beaucoup plus vaste car elle englobe des paramètres non technologiques (réseaux de distribution...) et beaucoup plus précise en tant qu'elle est considérée comme un point de liaison entre stratégies commerciales et industrielles sur un marché. Il était donc nécessaire d'étudier avec minutie les techniques en présence (rendement des machines, couple au démarrage...) et d'analyser les perspectives de production des entreprises concernées, à cette condition seulement avions-nous quelques chances de partir de données rationnelles. Mais les combinaisons productives paraissaient ici nombreuses, il fallait par nécessité dégager des indicateurs de choix. Deux ont été retenues:

- le ratio coût initial du capteur
Rendement

- L'adaptation la meilleure: c'est à dire qu'il fallait répondre à la question suivante: *quelle type de capteur compte tenu de l'ensoleillement in situ, permettrait de produire un maximum d'électricité ?*

au niveau du stockage l'étude devenait plus ambiguë car, outre l'analyse du spectre technologique, deux questions devaient se poser :

- *Quel était le bipoint (risque de défaillance, capacité de stockage) optimal, étant entendu qu'une probabilité de défaillance quasiment nulle nécessitait un investissement beaucoup trop lourd?*
- *sur quelle période (mois, trimestre, année...) devait porter le calcul de détermination des stocks d'ajustement production-demande?*

Il fallait pour cela pouvoir connaître la forme des courbes de production et de demande dans le temps .

L'organigramme suivant synthétise correctement l'ensemble des éléments qu'il était nécessaire de réunir pour un calcul micro-économique concernant le pompage photovoltaïque.

Ainsi le problème était clairement posé; la technologie déterminée, il restait à trouver l'algorithme permettant de connaître la quantité d'électricité à stocker .

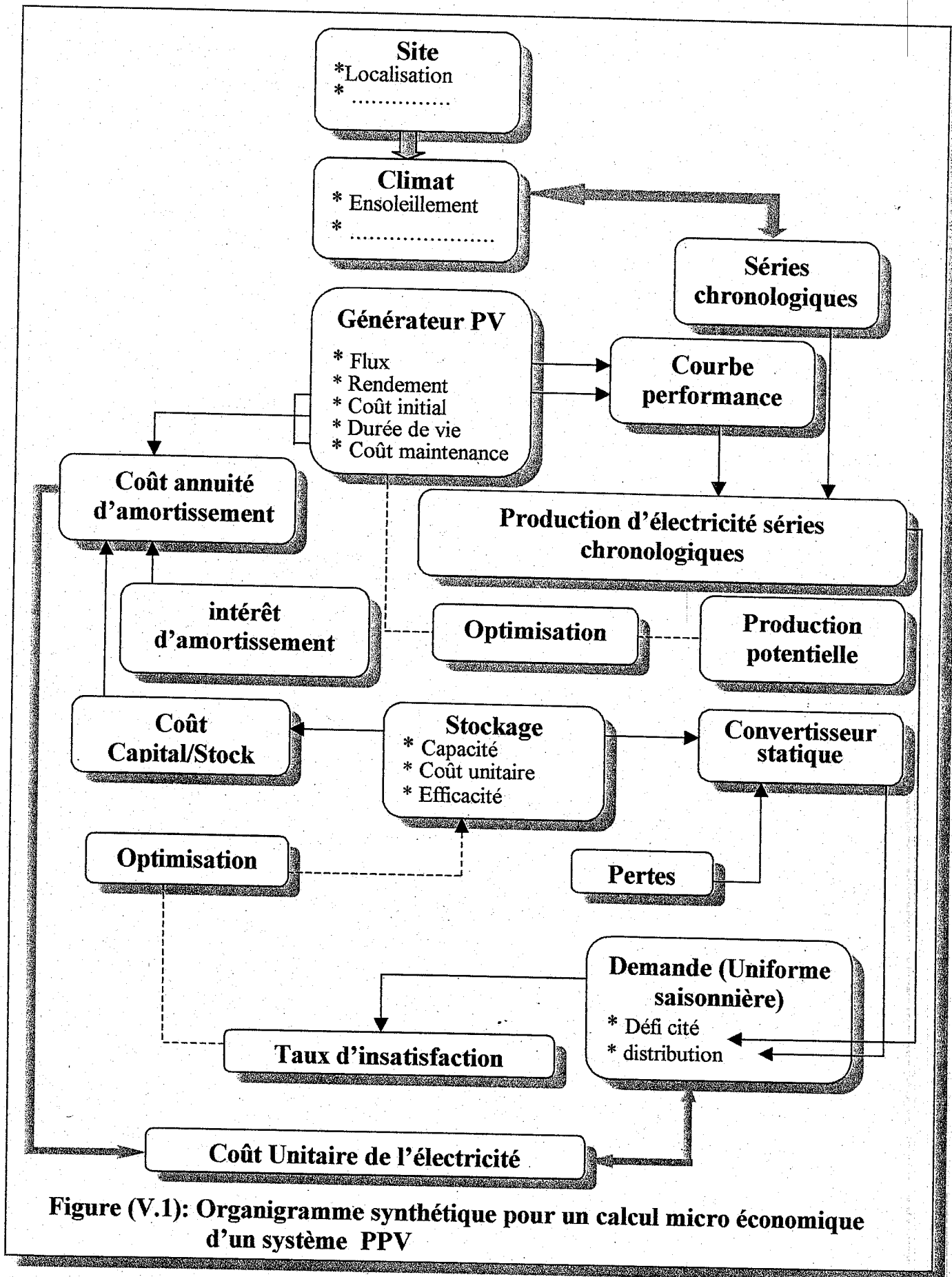


Figure (V.1): Organigramme synthétique pour un calcul micro économique d'un système PPV

V.3 L'Analyse Financière

V.3.a Un modèle de gestion des stock

L'étude du nombre d'accumulateurs était nécessaires à cause du poids important du stockage dans le coût total, il fallut utiliser un modèle de gestion des stocks particulièrement adapté, et bâti sur l'existence de deux types de coûts :

- Ceux relatifs à l'investissement en capital (coûts croissants) ;
- Ceux relatifs aux risques de défaillance inversement proportionnel aux variation des stocks.

Considérons une capacité de stockage ayant à servir une demande aléatoire relative au nombre de jours sans soleil qui est une variable aléatoire x dont on connaît la densité de probabilité : $f(x)=y=\psi[f(x)]$

Où ψ étant une fonction continue dérivable .

D'autre part, considérons les éléments suivants :

- b : *coût de stockage unitaire* ;
- c : *valeur de la pénalité de défaillance unitaire* ;
- r : *valeur résiduelle unitaire* ;
- s : *capacité de stockage* .

Le problème revenait donc à minimiser l'espérance du coût total pour une demande donnée, soit :

$$E(c) = bs + c \int_0^{\infty} (x - s) f(x) dx - r \int_0^s (b - x) f(x) dx$$

où :

- $\int_s^{\infty} (x - s) f(x) dx$ est le nombre d'unités dont la demande dépasse en probabilité le stocke (stockage insuffisant).
- $\int_0^s (b - x) f(x) dx$ est le nombre en probabilité d'unités surstockés (excédent).

Cette minimisation nécessite deux conditions :

- condition du 1^{er} ordre : $\frac{d^2 E(c_s)}{d(s^2)} = 0$;
- condition du 2^{ème} ordre $\frac{d^2 E(c_s)}{d(s^2)} < 0$.

Les calculs aboutissent à la relation : $F(s) = \frac{c-b}{c-r}$

Soit encore : $d = c[I - F(s)] + 2[F(s)]$. (V.1)

↓
Coût unitaire
Du stockage

↓
espérance d'économie
de pénalité lorsque le
stocke varie d'une
unité.

↘
espérance de la recette
provenant d'une unité
résiduelle.

Ainsi l'équation (V.1) nous donnait un modèle de gestion; un inconvénient toutefois apparaissait : la présence du facteur c , dont la dimension psychologique était évidente, il fallut poser le problème en termes micro-économiques.

V.3.b Analyse micro-économique du stockage

Considérons les variables suivantes :

R_d : risque de défaillance ;

σ_a : écart type de la variable ;

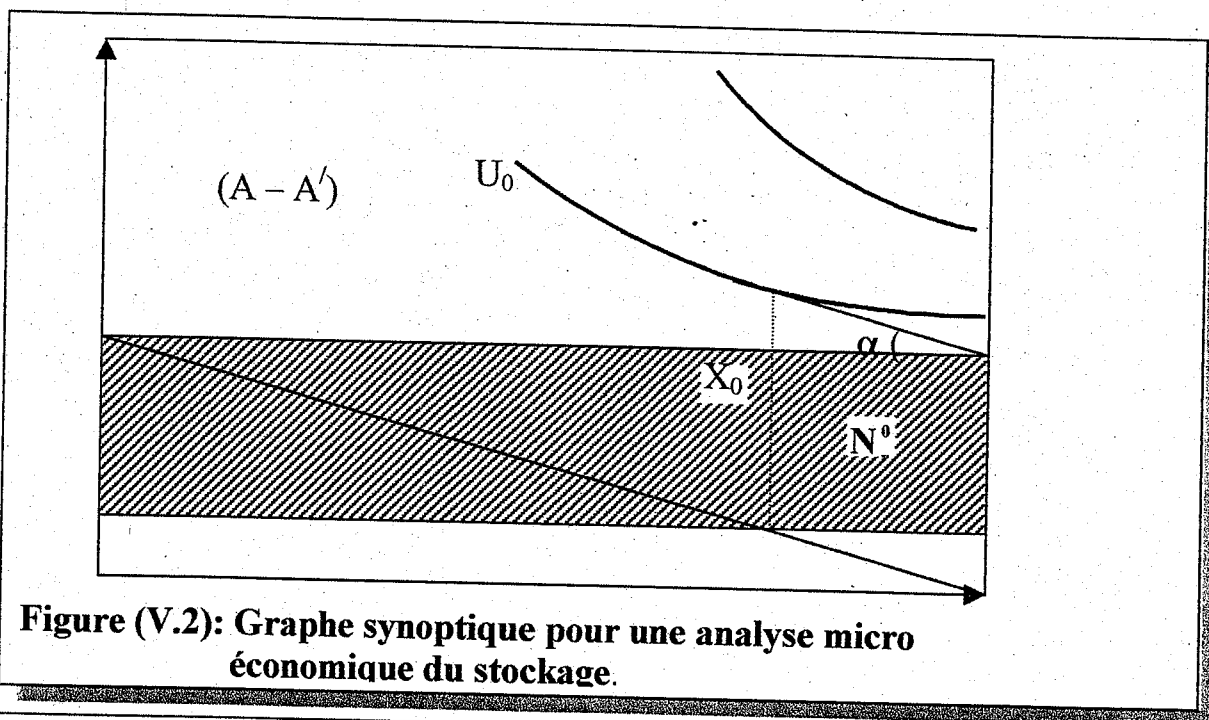
X : nombre de jours sans soleil ;

x : niveau de stockage ;

N_x^0 : niveau de service .

Nous nous contenterons de présenter le graphique (V.2) qui définit clairement la question.

Le segment de droite $A-A'$ représente la relation supposée linéaire entre le risque de défaillance et la capacité de stockage; la pente de cette droite représente l'écart type de la variable aléatoire, nombre de jour sans soleil.



A stockage équivalent une variation σ_a accroît les risques encourus, c'est la signification de la courbe en pointillés. Le point de tangence de la droite (A-A') avec la courbe d'indifférence détermine un couple optimal (x, R_d) ainsi que par projection sur une droite à 45°, le niveau de service désiré par l'agent économique. (La superficie totale du carré signifie un niveau de service de 100% ou un seuil de rupture nul).

V.4 Calcul actuariel

Cette partie se présentait comme le lien de réalisation des analyses précédentes, l'objectif était le suivant :

Développer un calcul actuariel sur une période n ans, tenant compte des éléments ci-après :

j : *taux d'actualisation des recettes* .

f : *investissement nécessaire à la production d'une unité de Q* .

v : *prix courant d'une unité produite, donc incluant période par période le taux d'inflation (étude faite par extrapolation) des prix courants à partir de données couvrant n années* .

σ : *taux d'actualisation choisi pour l'annuité d'amortissement du capital, c'est en réalité un coût d'opportunité* .

Le bénéfice actualisé au cours d'une période en analyse continue relatif à la production Q sera égal à :

$$B = \underline{R} - \underline{D} \text{ avec } \underline{R} : \text{recettes actualisées .}$$

$$\underline{D} : \text{dépenses actualisées .}$$

Nous obtenons l'expression suivante [19] :

$$B = \int_0^T v(t) \frac{R}{T} e^{-jt} dt - fQ \int_0^T e^{\sigma t} dt - CVA \quad , \quad Q = R/T$$

avec

CVA : *Coût variables* .

R : *richesse produite au cours d'une période ;*

Q : *une production associée à l'unité de temps* .

Le calcul de CVA donnait le résultat suivant :

$$CVA = \frac{[xPQ]}{[\gamma - \zeta]} (e^{T(\gamma)} - 1)$$

Avec γ : *taux d'inflation affectant le prix de l'énergie ;*

- ζ : *taux de pénalisation du futur* ;
 x : *fonction de l'énergie produite, en valeur* .

Cinq paramètres étaient significatifs : $\gamma, \zeta, f, Q, j, \theta$, auxquels on doit donner différentes valeurs afin d'appréhender un maximum de situations concrètes .

Afin de déterminer une combinaison optimale entre l'énergie et le stockage de l'eau nous allons proposer un modèle. Nous considérons le schéma illustré dans la figure (V.3) et essayons de trouver le meilleur arrangement de stockage qui correspond au meilleur prix. Les suppositions suivantes sont incluses dans la présente formulation:

- 1- Le modèle est opérationnel durant une période de 24 heures.
- 2- Le jour est divisé en deux périodes : *La journée, ou la période de collection* lorsque le collecteur (le générateur photovoltaïque) délivre de l'énergie, et *la nuit, ou la période de non collection* lorsque l'énergie doit être fournie par les accumulateurs.
- 3- Pendant la période de collection, l'eau est pompé dans le réservoir et le surplus de l'énergie est stocké dans les batteries.
- 4- Une valeur moyenne d'insolation est utilisée pendant la période de collection. Cette valeur est calculée en divisant l'énergie totale, disponible pendant le jour par la durée de la période de collection.
- 5- La valeur de l'insolation pendant la période non-collection est nulle.
- 6- Le dimensionnement de la pompe est basé sur les besoins d'eau à pomper pendant la journée.
- 7- L'énergie se dissipe dans les divers modules de collection, de transport, transfert de chaleur et dans les processus de conversion tout en conservant le débit d'eau.
- 8- La livraison de l'eau à partir du réservoir est gratuite.

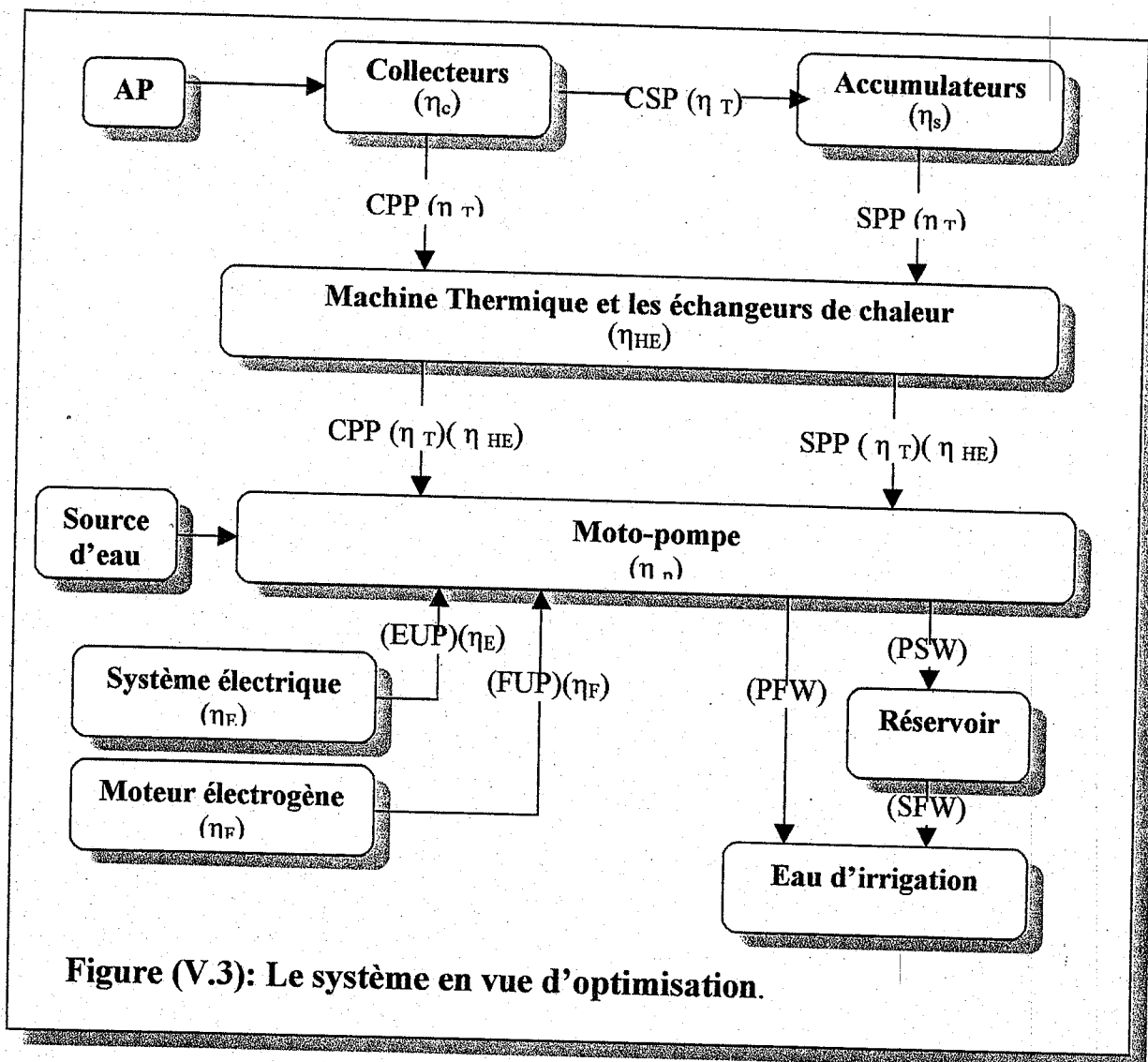


Figure (V.3): Le système en vue d'optimisation.

□ **Définition des variables.**

Les indices "D" et "N" sont ajoutés aux caractères pour distinguer entre les valeurs de la journée et celles de la nuit.

Input :

- H : hauteur total, m
- γ : densité spécifique de l'eau, N/m^3 .
- AP : insolation disponible, Kw/m^2 .
- Q : débit nécessaire, m^3/h
- t : durée de la période de collection, h
- η_c : efficacité des collecteurs, %
- η_P : efficacité de la pompe, %
- η_s : efficacité des accumulateurs, %
- η_T : rendement de transport de la puissance, %
- η_{HE} : rendement des machines thermiques, %
- CC : Prix des collecteurs, DA/m^2 .
- ESC : Prix des accumulateurs, DA/Kwh .
- PC : Prix de la pompe, DA/m^3 .

HEC : Prix de la machine thermique, DA/Kw.

WSC : Prix de stockage de l'eau, DA/m³.

Variables :

PP : Puissance de pompage, Kw.

CSP : Collecteurs-accumulateurs, Kw.

CPP : Collecteurs-motopompe, Kw

SPP : Accumulateurs-motopompe, Kw.

CP : Puissance totale convertie, Kw.

PSW : L'eau pompé dans le réservoir, m³/h.

PFW : L'eau pompé directement vers la surface à irriguer, m³/h.

SFW : Débit : Réservoir – surface à irriguer, m³/h.

PW : Quantité d'eau pompé, m³/h.

A : Surface des collecteurs, m².

TC : Prix total du système, DA.

L'objectif de ce modèle est de minimiser le prix total du système. Cela consiste le prix des collecteurs, le prix des accumulateurs, le prix des machines thermiques et le prix de stockage de l'eau dans le réservoir .

La fonction objective sera écrite comme suite :

$$\min TC = (CC)(A) + (ESC)(t)(\eta_T)(CSP) + (PC + HEC)(PP) + (WSC)(t)(PSW).$$

Les contraintes en cours :

a- (eau pompé pendant la journée) = (eau pompé vers les terres à irriguer pendant la journée) + (eau pompé vers le réservoir).

$$(PW)_D = (PFW)_D + (PSW).$$

b- (puissance nécessaire pour le pompage durant la journée) = $[(\gamma)(H)/\eta_P]$ (eau pompé pendant la journée).

$$(PP)_D = [(\gamma)(H)/\eta_P](PW)_D = [(\gamma)(H)/\eta_P](PFW_D + PSW).$$

c- (puissance nécessaire pour le pompage durant la journée) = (puissance collecteur-pompe) $(\eta_T)(\eta_{HE})$.

$$PP_D = (CPP)(\eta_T)(\eta_{HE}).$$

Combinant (b) et (c) on obtient :

$$(CPP)(\eta_T)(\eta_{HE}) = [(\gamma)(H)/\eta_P](PFW_D + PSW). \quad (V.1)$$

d- (puissance en sortie des collecteurs)=(surface des panneaux)(puissance disponible)(η_C).

$$CP = (A)(AP)(\eta_C).$$

e- (puissance en sortie des collecteurs)=(collecteur- accumulateur) + (collecteur-motopompe).

$$CP = CSP + CPP.$$

Combinant (d) et (e) on obtient :

$$(A)(AP)(\eta_C) = CSP + CPP \quad (V.2)$$

f- (eau pompé vers la terre à irriguer pendant la journée)=(eau disponible pendant la journée).

$$PFW_D = Q_D \quad (V.3)$$

g- (puissance de pompage durant la nuit)=[$(\gamma)(H)/\eta_P$](eau pompé durant la nuit).

$$PP_N = [(\gamma)(H)/\eta_P](PFW)_N$$

h- (puissance de pompage durant la nuit)=(accumulateur-moto pompe)(η_T)(η_{HE}).

$$PP_N = (SPP)(\eta_T)(\eta_{HE}).$$

Combinant (g) et (h) on obtient :

$$(SPP)(\eta_T)(\eta_{HE}) = [(\gamma)(H)/\eta_P](PFW)_N \quad (V.4)$$

i- (eau pompé vers la terre à irriguer durant la nuit) + (eau pompé de réservoir vers la terre) \geq (eau disponible durant la nuit).

$$PFW_N + SFW \geq Q_N \quad (V.5)$$

j- (eau pompé vers le réservoir)(t) \geq (eau pompé du réservoir vers la terre)(24-t).

$$(PSW)(t) \geq (SFW)(24-t). \quad (V.6)$$

k- (énergie stockée durant la journée) \geq (énergie utilisée durant la nuit)(collecteur-accumulateur)(η_T)(η_S)(t) \geq (réservoir-motopompe)(24-t)

$$(CSP)(\eta_T)(\eta_S)(t) \geq (SPP)(24-t) \quad (V.7)$$

Les équations (V.1), (V.7) sont les contraintes qui entrent en jeu dans notre formulation. Après simplification on peut aboutir au modèle suivant :

$$\begin{aligned} \min TC &= (CC)(A) + (ESC)(t)(\eta_T)(CSP) + (PC+HEC)(B)(PS_N + PFW_D) + \\ & \quad (WSC)(t)(PSW) \\ &= (CC)(A) + (ESC)(t)(\eta_T)(CSB) + [(PC+HEC)(B) + (WSC)t](PSW) + \\ & \quad (PC+HEC)(B)(PFW_D). \end{aligned}$$

sujet à :

- (1) $CSP + [(B)/(\eta_T)(\eta_{HE})][PSW + PFW_D] \leq (AP)(\eta_C)(A).$
(équilibre des puissances).
- (2) $PFW_D \geq Q_D$
(Besoin d'eau durant la journée).
- (3) $PFW_N + SFW \geq Q_N$
(Besoin d'eau durant la nuit).
- (4) $(PSW)(t) \geq (SFW)(24 - t).$
(eau utilisé pendant la nuit ne peut pas dépassé le niveau du réservoir durant la journée).
- (5) $(CSP)(\eta_T)^2(\eta_S)(\eta_{HE})(t) \geq (q)(PFW_N)(24 - t).$
(énergie utilisée pendant la nuit ne peut pas dépasser l'énergie stockée pendant la journée).

Remarques: tous les variables sont positives .

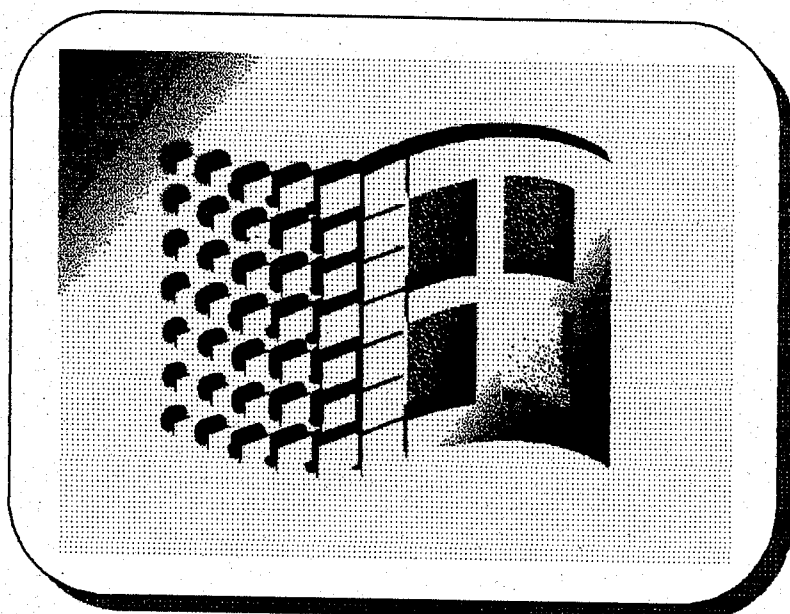
C H A P I T R E

VI

Simulation par MATLAB

(Version 5)

1. Introduction.
2. Les opérateurs Bit à Bit.
3. Fonctions de manipulations des heures.
4. Résultats.
 - *Réservoir*
 - *Accumulateur*
 - *GPV*
 - *Adaptateur*
 - *Moteur*
 - *Pompe*



VI-1-Introduction

La version 5 de *MATLAB* s'est dotée de nombreuses nouvelles fonctionnalités. Les types des données ont été enrichis par les structures, les objets, les cellules, Les ensembles et les tableaux multidimensionnels.

MATLAB permet de faire des opérations bit à bit sur des entiers positifs, suivant le type de machine que vous possédez, ces entiers doivent être plus petits que bit max. Par exemple un PC486-DX4-100, cette limite vaut $(2^{53} - 1)$.

VI-2- Les Opérateurs bit à bit

1-*Bitand* : ET logique

En notation binaire, les chiffres 5 et 3 s'expriment respectivement (101) et (01). L'application, sur ces deux nombres, du ET logique bit à bit donne (001), soit 1 en décimal.

```
>> bitand(5,3)=1
```

2-*Bitcmp* : Complémentation d'un bit

$B = \text{bitcmp}(A,n)$: B ; est un nombre entier naturel, codé sur n bits, obtenu par la complémentation de tous les bits du nombre A.

```
>> bitcmp(5,3) = 2
```

3-*Bitor* : OU logique

$C = \text{bitor}(A,B)$: A et B sont des entiers naturels.

C est un nombre entier naturel, obtenu par un OU logique entre les bits de meme rang des nombres A et B.

```
>> C = bitor(5,3) = 7.
```

4-*Bitxor* : OU exclusif

$C = \text{bitxor}(A,B)$: A et B sont des entiers naturels.

C est un nombre entier naturel, obtenu par un OU exclusif entre les bits de meme rang des nombres A et B.

```
>> C = bitxor(5,3) = 6.
```

5-*Bitget* : Valeur d'un bit à une position donnée

$B = \text{bitget}(A,k)$: B ; contient la valeur du bit de rang k du nombre A. Le rang k doit être compris entre 1 et 52 (nombre maximal de bit en notation entière).

```
>> C = bitget(5,3) = 1.
```

Comme on peut spécifier plusieurs valeurs du rang k dans un vecteur ligne.

```
>> C = bitget(5,[2 3]) = 0 1.
```

6 -Bitset : Mise à 1 d'un bit à une position donnée.

$B = \text{bitset}(A,k)$: Mise à 1 du bit de rang k du nombre A .

`>> B = bitset(5,2) = 7.`

7-Bitshift : Décalage de N bits.

$B = \text{bitshift}(A,n)$: Retourne la valeur du nombre A décalé de N bits. Le décalage à gauche ($n>0$) est équivalent à une multiplication par 2^n . Le décalage à droite ($n<0$) revient à une division par 2^{-n} . Ces équivalences sont à la base de la programmation de la fonction *bitshift*.

`>> B = bitshift(5,2) = 20.`

* Les fonctions *bitand*, *bitor*, *bitxor* sont programmées sous forme de fichiers *MEX*.

VI-3- Fonctions de manipulations des heures

MATLAB fournit quelques fonctions de base pour la manipulation des heures. Elles sont intéressantes pour la comparaison de la complexité d'algorithmes en temps de calcul. Nous rencontrons sous *MATLAB* les fonctions décrites ci-après.

Clock, *fix (Clock)*, *Etime*, *Tic* et *Toc*.

La commande *Tic* lance un timer. La commande *Toc* permettra de consulter le temps écoulé depuis la dernière commande *Tic*. Ce temps pourra être affiché directement ou stocké dans une variable. Nous avons alors une méthode pour l'évaluation du temps CPU nécessaire à un programme donné.

VI-4- Résultats et Discussions

Tous les symboles utilisés ci dessous sont indiqués à l'en-tête de chaque section du **chapitre III** : Conception Hardware du système PPV.

VI-4-1- Réservoir

<pre> » reser DeltaP = 0 Hauteur indiquée en metre Hind = 0 Hauteur indiquée par le capteur numerique B3 = 0 0 0 0 0 0 0 0 ans = continuer le programme DeltaP = 200 Hauteur indiquée en metre Hind = 2 Hauteur indiquée par le capteur numerique B3 = 0 0 0 0 0 0 1 0 ans = continuer le programme DeltaP = 400 Hauteur indiquée en metre Hind = 4 Hauteur indiquée par le capteur numerique B3 = 0 0 0 0 0 1 0 0 ans = continuer le programme DeltaP = 600 Hauteur indiquée en metre Hind = 6 Hauteur indiquée par le capteur numerique » </pre>	<pre> B3 = 0 0 0 0 0 1 1 0 ans = continuer le programme DeltaP = 800 Hauteur indiquée en metre Hind = 8 Hauteur indiquée par le capteur numerique B3 = 0 0 0 0 1 0 0 0 ans = continuer le programme DeltaP = 1000 Hauteur indiquée en metre Hind = 10 Hauteur indiquée par le capteur numerique B3 = 0 0 0 0 1 0 1 0 ans = le reservoir est plein ans = Appel au sous programme Interruption Reglage ACCA = 1 Controle Reservoir Source d"Interruption Reservoir Sortie vers le port B du PIA :Relais Moteur Asyn Moteur Asynchrone deconnecte Retour au S/P *Interruption Reglage * Fin du S/P *Interruption Reglage* </pre>
---	---

b-Discussion

Après qu'on a fixé la hauteur de consigne (H_{cons}) à 10m et la pression atmosphérique à 1atm, le capteur numérique installé au *port A* du *PIA* délivre à chaque itération la pression au niveau du réservoir qui sera lue par l'*accumulateur A* du microprocesseur. Ce dernier effectue les opérations de soustraction ($\Delta P = P_{ind} - P_{atm}$) et de division $[\Delta P / (\rho * g)]$ pour extraire le niveau du stockage (H_{ind}) qui sera comparé par la suite avec la hauteur de consigne. Tant que la hauteur indiquée est inférieure de la consigne le microprocesseur continue sa tâche. Mais dès que le capteur affiche la valeur crête, le microprocesseur intervient pour faire appel au sous programme réglage pour déconnecter le moteur, tout en donnant la source d'interruption ($ACCA=1$) qui sera utile par la suite pour identifier le module interrompu.

VI-4-2- Accumulateur

» ACC

puissance de consigne min et max

Selection du signal puissance

Accumulateur

ACCA =

0

Conversion A/D

B0025 =

0 0 0 0 0 0 0 0

Attention la batterie est en decharge
profonde

Source de l'Interruption

Appel au S/P Interruption Reglage

Controle Accumulateur

B2002 =

16

Connecter la batterie avec le generateur

ACCA =

100

Conversion A/D

B0025 =

0 1 1 0 0 1 0 0

Attention la batterie est en decharge
profonde

Source de l'Interruption

Appel au S/P Interruption Reglage

Controle Accumulateur

B2002 =

16

Connecter la batterie avec le generateur

ACCA =

200

Conversion A/D

B0025 =

1 1 0 0 1 0 0 0

B2002 =

16

ACCA =

300

Conversion A/D

B0025 =

0 0 1 0 1 1 0 0

B2002 =

16

ACCA =

400

Conversion A/D

B0025 =

1 0 0 1 0 0 0 0

B2002 =

16

ACCA =

500

Conversion A/D

B0025 =

1 1 1 1 0 1 0 0

B2002 =

16	900
ACCA =	Conversion A/D
600	B0025 =
Conversion A/D	1 0 0 0 0 1 0 0
B0025 =	B2002 =
0 1 0 1 1 0 0 0	16
B2002 =	ACCA =
16	1000
ACCA =	Conversion A/D
700	B0025 =
Conversion A/D	1 1 1 0 1 0 0 0
B0025 =	B2002 =
1 0 1 1 1 1 0 0	16
B2002 =	ACCA =
16	1100
ACCA =	Conversion A/D
800	B0025 =
Conversion A/D	0 1 0 0 1 1 0 0
B0025 =	ATTENTION la batterie est en surcharge
0 0 1 0 0 0 0 0	Source d'Interruption
B2002 =	Appel au S/P "Interruption Reglage
16	Controle Accumulateur
ACCA =	B2002 =
	16
	"Accumulateur est deconncte
	»

b-Discussion

Dans le cas où le réservoir est plein, on s'intéresse à stocker l'énergie fournie par le générateur photovoltaïque (GPV) dans des accumulateurs. Ce dernier est caractérisé par une puissance *min* et une autre *max*. Afin d'éviter les différents types de dégradations qui peut subir une batterie, le microprocesseur prend soin de lui. Durant le fonctionnement, le microprocesseur vérifie si le moteur est déconnecté ($B2002=14$). Si oui, la batterie sera connectée avec le générateur. Au fil du temps, on prélève la puissance issue de la batterie qui sera comparer par la suite à celles de consignes (P_{min}, P_{max})

*Si la puissance indiquée est inférieure à P_{min} , la batterie est en décharge profonde. Le microprocesseur intervient et assure la connexion entre la batterie et le générateur photovoltaïque.

*Si la puissance indiquée est supérieure à P_{max} , la batterie est en surcharge et le microprocesseur lance un message pour déconnecter la batterie.

*Si la puissance est incluse dans la zone (P_{min}, P_{max}) la batterie est en régime optimal et le microprocesseur continue sa tâche.

VI-4-3- Générateur Photovoltaïque

<p>» GPV</p> <p>Pgpvinf =</p> <p>100</p> <p>Pgpvmax =</p> <p>1000</p> <p>Pgpv =</p> <p>1</p>	<p>Le GPV est hors de fonctionnement optimal</p> <p>Appel au S/P Interruption Reglage Controle *GPV*</p> <p>le stock de batteries est connecte</p> <p>le GPV est deconnecte</p> <p>Masquer l'entree d"Interruption FIRQ</p> <p>Pgpv =</p> <p>41</p>
<p>Le GPV est hors de fonctionnement optimal</p> <p>Appel au S/P Interruption Reglage Controle *GPV*</p> <p>le stock de batteries est connecte</p> <p>le GPV est deconnecte</p> <p>Masquer l'entree d"Interruption FIRQ</p> <p>Pgpv =</p> <p>11</p>	<p>Le GPV est hors de fonctionnement optimal</p> <p>Appel au S/P Interruption Reglage Controle *GPV*</p> <p>le stock de batteries est connecte</p> <p>le GPV est deconnecte</p> <p>Masquer l'entree d"Interruption FIRQ</p> <p>Pgpv =</p> <p>11</p>
<p>Le GPV est hors de fonctionnement optimal</p> <p>Appel au S/P Interruption Reglage Controle *GPV*</p> <p>le stock de batteries est connecte</p> <p>le GPV est deconnecte</p> <p>Masquer l'entree d"Interruption FIRQ</p> <p>Pgpv =</p> <p>21</p>	<p>Le GPV est hors de fonctionnement optimal</p> <p>Appel au S/P Interruption Reglage Controle *GPV*</p> <p>le stock de batteries est connecte</p> <p>le GPV est deconnecte</p> <p>Masquer l'entree d"Interruption FIRQ</p> <p>Pgpv =</p> <p>121</p>
<p>Le GPV est hors de fonctionnement optimal</p> <p>Appel au S/P Interruption Reglage Controle *GPV*</p> <p>le stock de batteries est connecte</p> <p>le GPV est deconnecte</p> <p>Masquer l'entree d"Interruption FIRQ</p> <p>Pgpv =</p> <p>31</p>	<p>Le GPV fonctionne en regime optimal</p> <p>Pgpv =</p> <p>231</p>
<p>Le GPV est hors de fonctionnement optimal</p> <p>Appel au S/P Interruption Reglage Controle *GPV*</p> <p>le stock de batteries est connecte</p> <p>le GPV est deconnecte</p> <p>Masquer l'entree d"Interruption FIRQ</p> <p>Pgpv =</p> <p>31</p>	<p>Le GPV fonctionne en regime optimal</p> <p>Pgpv =</p> <p>341</p>
<p>31</p>	<p>Le GPV fonctionne en regime optimal</p>

Pgpv = 451 Le GPV fonctionne en regime optimal	Pgpv = 31 Le GPV est hors de fonctionnement optimal Appel au S/P Interruption Reglage Controle *GPV* le stock de batteries est connecte le GPV est deconnecte Masquer l'entree d"Interruption FIRQ
Pgpv = 21 Le GPV est hors de fonctionnement optimal Appel au S/P Interruption Reglage Controle *GPV* le stock de batteries est connecte le GPV est deconnecte Masquer l'entree d"Interruption FIRQ	Pgpv = 341 Le GPV fonctionne en regime optimal
Pgpv = 231 Le GPV fonctionne en regime optimal	Pgpv = 651 Le GPV fonctionne en regime optimal
Pgpv = 441 Le GPV fonctionne en regime optimal	Pgpv = 961 Le GPV fonctionne en regime optimal
Pgpv = 651 Le GPV fonctionne en regime optimal	Pgpv = 1271 Le GPV est hors de fonctionnement optimal Appel au S/P Interruption Reglage Controle *GPV* le stock de batteries est connecte le GPV est deconnecte Masquer l'entree d"Interruption FIRQ »
Pgpv = 861 Le GPV fonctionne en regime optimal	

b-Discussion

Pour assurer le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque, le microprocesseur contrôle au fur et à mesure la puissance issue du générateur. A chaque itération, la puissance délivrée est comparée à deux consignes P_{inf} et P_{max} .

*Si la puissance indiquée est incluse dans la zone P_{inf} et P_{max} , le microprocesseur nous assure que la source est en plein régime.

*Si non, le microprocesseur fait appel aux accessoires (Accumulateurs, Moteur électrogène) pour délivrer une puissance optimale :

-Si le stock tampon (Accumulateurs) répond à nos exigences ,il prend la relève.

-Si non le moteur électrogène reste la dernière solution.

VI-4-4- Adaptateur

» adapt

Lecture de la donne numerique Padapt

A2000 =

1 0 0 0 1 1 0 0

Padapt =

140

Appel au S/P GPV

Pgpv =

140

Adaptation entre la source et la charge
Continuer le programme

» adapt

Lecture de la donne numerique Padapt

A2000 =

0 1 1 1 1 0 0 0

Padapt =

120

Appel au S/P GPV

Pgpv =

140

la charge est hors adaptation avec la charge
Appel au S/P Interruption Reglage
Controle Adaptateur
Ajuster l'impedance d'entree de l'adaptateur
»

b-Discussion

Afin que l'énergie générée par la source soit transmis en transparence vers la charge, un capteur numérique installé au port *A* du *PIA* prélève la puissance de sortie de l'étage Adaptateur (*A2000*) pour être comparé à celle issue de la source (*P_{gpv}*). Si l'impédance de sortie de la source est égale à celle de l'entrée Adaptateur, le microprocesseur nous s'assure pour un transfert fiable de l'énergie. Si non, le microprocesseur lance un appel pour ajuster l'impédance d'entrée Adaptateur jusqu'à avoir une adaptation entre les deux étages.

VI-4-5- Moteur

<p>» mot</p> <p>Ncons =</p> <p>300</p> <p>Nind =</p> <p>200</p> <p>NNind =</p> <p>1 1 0 0 1 0 0 0</p> <p>ACCB =</p> <p>1 1 0 0 1 0 0 0</p> <p>MEDOC =</p> <p>300</p> <p>le moteur est hors de regime optimal Appel au S/P Interruption Reglage Ajuster la vitesse du moteur vers la zone optimal</p> <p>» » mot</p> <p>Ncons =</p> <p>300</p> <p>Nind =</p> <p>400</p> <p>NNind =</p> <p>1 0 0 1 0 0 0 0</p>	<p>ACCB =</p> <p>1 0 0 1 0 0 0 0</p> <p>MEDOC =</p> <p>300</p> <p>le moteur fonctionne en régime optimal Continuer le programme</p> <p>» mot</p> <p>Ncons =</p> <p>300</p> <p>Nind =</p> <p>400</p> <p>NNind =</p> <p>1 0 0 1 0 0 0 0</p> <p>ACCB =</p> <p>1 0 0 1 0 0 0 0</p> <p>MEDOC =</p> <p>300</p> <p>le moteur fonctionne en régime optimal Continuer le programme</p> <p>»</p>
--	--

b-Discussion

Afin d'éviter le risque de réduire la durée de vie de la machine à cause de son échauffement excessif, le capteur délivre à tout instant la vitesse de rotation du moteur (N_{ind}) qui sera comparé à celle de la consigne (N_{cons}).

*Si la valeur indiquée (N_{ind}) est inférieure à (N_{cons}), le moteur est hors de régime optimal. A ce moment, le microprocesseur passe ces consignes au port B du PIA (port des Actionnaires) pour ajuster la vitesse du moteur vers la zone optimal. L'ajustement peut être effectué soit par une variation:

- de tension de la source,
- de fréquence,
- de glissement.

*Si non, le moteur est en fonctionnement optimal et le microprocesseur continue sa tâche.

VI-4-6- Pompe

» pompe	ACCA =
Ppr =	311
400	
PPre =	ACCA =
1 0 0 1 0 0 0 0	-11
Tpr =	la pompe est hors de fonctionnement optimal
50	Appel au S/P Interruption Reglage deconnecter le moteur
TTpr =	300
0 0 1 1 0 0 1 0	PPre =
ACCA =	0 0 1 0 1 1 0 0
123	Tpr =
la pompe fonctionne en regime optimal	70
Continuer le programme	TTpr =
» pompe	0 1 0 0 0 1 1 0
Ppr =	ACCA =
300	311
PPre =	ACCA =
0 0 1 0 1 1 0 0	-11
Tpr =	la pompe est hors de fonctionnement optimal
70	Appel au S/P Interruption Reglage deconnecter le moteur
TTpr =	»
0 1 0 0 0 1 1 0	

b-Discussion

Afin d'éviter le phénomène de cavitation et le désamorçage de la pompe, un capteur de température permet d'acquérir la donnée température au niveau de la surface de prélèvement (T_{pr}). Cette température sera comparée par celles qui existent dans l'*EPROM*. En fonction de cette dernière on peut extraire la pression de vapeur d'eau. A ce niveau le microprocesseur compare entre la pression trouvée (P_v) et celle de la pression d'entrée de la pompe (P_{ent}).

*Si $P_v < P_{ent} < P_{atm}$, le microprocesseur nous signale que la pompe fonctionne en régime optimal.

*Si non, le phénomène de cavitation nous oblige de déconnecter la pompe.

CONCLUSION

CONCLUSION

Un système de contrôle et d'optimisation basé sur un microprocesseur a été développé pour des procédés du photovoltaïque. La complexité de la tâche d'optimisation a été accrue graduellement pour faire ressortir la contribution du microprocesseur. Ce contrôle, une fois développé dans un laboratoire avec des micro-ordinateurs de test, peut être facilement implanté sur des systèmes de cartes industrielles utilisables dans un environnement moins protégé.

Les procédés photovoltaïques ont des caractéristiques particulières. Ils sont très souvent non linéaires du fait de la nature des données météorologiques. Les variables manipulés peuvent être liées entre elles. Les systèmes en état transitoire sont fréquents. Devant ces problèmes particulières, les stratégies d'optimisation doivent être sûres, souples et performantes. Le contrôle adaptatif est très utile. Donc les algorithmes d'optimisation efficaces sont généralement complexes.

Un certain nombre de contraintes justifient une gestion globale de l'énergie dans une installation de pompage photovoltaïque. L'énergie fournie par le générateur photovoltaïque est très fluctuante : ce dernier est toujours soumis aux perturbations rapides dues aux passages nuageux d'autre part.

Les problèmes posés par le stockage tampon (prix, fiabilité, pertes...) nécessitent une optimisation de son dimensionnement. On préfère souvent un stockage sous forme de produit final (eau). Dans tous les cas il est nécessaire d'avoir un contrôle précis de la charge des batteries constituant le stockage tampon.

Enfin, les procédures de sécurité doivent assurer qu'une panne ou qu'un incident survenant lors du fonctionnement d'un des éléments, n'entraîne pas de conséquence pour le reste de l'installation.

Ces différentes contraintes imposent donc une gestion globale de l'énergie disponible supposant une connaissance précise de l'état énergétique de l'ensemble du système (disponibilité, flux, stockage) et faisant appel à des algorithmes de décisions hiérarchisées à plusieurs niveaux :

- *Sécurité.*
- *Optimisation de fonctionnement.*
- *Satisfaction des besoins prioritaires.*
- *Satisfaction des besoins secondaires.*

Plusieurs solutions peuvent être envisagées pour la gestion :

- *Des dispositifs de logique et de commutation à relais .*
- *Des dispositifs micro programmés de gestion et de commande centralisés associés à des moyens de contrôle de chaque élément .*

Les dispositifs à relais ne permettent le plus souvent qu'un fonctionnement sous-optimal et ,sauf dans les cas les plus simples ,les algorithmes de décisions sont très difficiles à réaliser en logique câblée .

Les dispositifs micro programmés de gestion et de commande centralisées en temps réel permettent de résoudre le problème dans la plus part des cas.

Un microprocesseur exécute les différentes taches nécessaires :

**Gestion multiplexée de la centrale d'acquisition de données pour la mesure des paramètres de fonctionnement des différents éléments.*

**Calcul et affichage des consignes d'asservissement des divers modules permettent le fonctionnement optimal du générateur et de charge .*

**Etablissement des bilans énergétiques instantanés et cumulés .*

**Prise de décision suivant les priorités de fonctionnement en considération des bilans préalablement établis et du maintien de la sécurité .*

A partir de là , nous pensons que le développement d'un dispositif d'optimisation à base de microinformatique inclus ou non dans une structure de contrôle hiérarchisée doit s'accroître . Il a un avenir prometteur pour nombre de procédés spécialement en photovoltaïque où d'importants et difficiles problèmes de contrôle restent à résoudre .

PERSPECTIVES

PERSPECTIVES

PRIMO : Le soleil contre le feu

Pour éviter que les forêts s'embrasent, des pompes à eau solaires sont à l'étude. elles pourraient, à distance et loin de tout, être un instrument efficace dans l'arsenal des pompiers.

Chaque année, des centaines d'hectares qui partent en fumée. Or le soleil, qui a sa part de responsabilité dans ces embrasements annuels, pourrait se racheter en participant à la prévention des incendies.

L'idée est la mise en place d'une station d'arrosage pour les zones à risque isolées, alimentée par des panneaux solaires. En mouillant préventivement une zone de garrigue, elle aiderait les pompiers soit en opposant un obstacle à la propagation du feu, soit en le déviant vers une impasse, car on éteint rarement un incendie : On le conduit plutôt vers une zone où il s'éteint de lui-même faute de combustible. Couplée à des batteries, les panneaux solaires doivent fournir à la station l'énergie nécessaire pour générer un jet d'eau très puissant, et, éventuellement, alimenter une station de pompage dans le sol pour remplir d'eau les citernes après utilisation. L'installation doit être opérationnelle en juillet et août, et fonctionner sans problème pendant les jours « rouges », contrainte assurée grâce à la fiabilité de plus de 99% des systèmes solaires photovoltaïques.

SECONDO : Utilisation d'un récepteur GPS

Le système "Global Positioning System" conçu à l'origine par l'armée Américaine, est constitué d'une constellation de satellites tournant autour de la terre sur des orbites différentes de telle manière qu'au moins trois (03) satellites soient visibles simultanément à tout instant de n'importe quel point du globe. Un récepteur GPS permet, grâce aux signaux reçus des satellites, de calculer et délivrer tous les paramètres et les informations liés à l'installation dotée de ce récepteur.

Un récepteur GPS peut facilement être connecté à un micro-ordinateur ou un microprocesseur. L'échange d'informations s'effectue avec une liaison série. Des codes spécifiques pour chaque interrogation sont utilisés pour communiquer avec le récepteur. On peut ainsi demander la position du site (latitude, longitude, altitude), les informations astronomiques (Déclinaison Solaire, Angle Horaire, Hauteur du soleil, Azimut du Soleil, Temps Solaire Vrais, Durée Astronomique du Jour...), la vitesse du vent, le flux incident sur le site, l'heure, l'état du GPS...

Le renouvellement des informations est de l'ordre de cinq (5) secondes. Il existe deux modes de fonctionnement du GPS, le premier d'une précision de dix (10) minutes sur la position exige l'accord du gouvernement Américain, le second d'une précision de cent (100) mètres est ouvert à tout le monde.

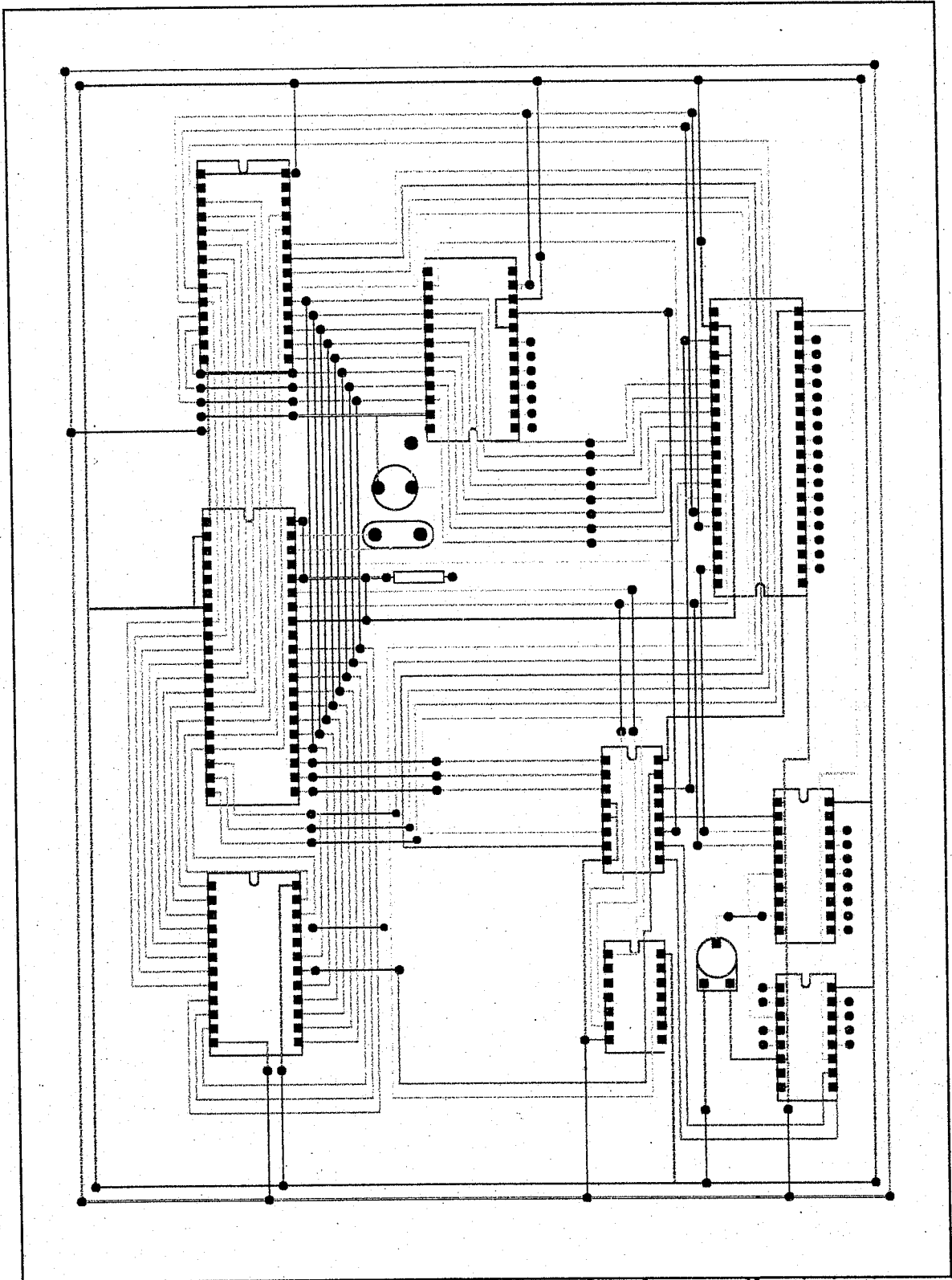


Fig.1 : Implantation des composants dans la carte d'optimisation.

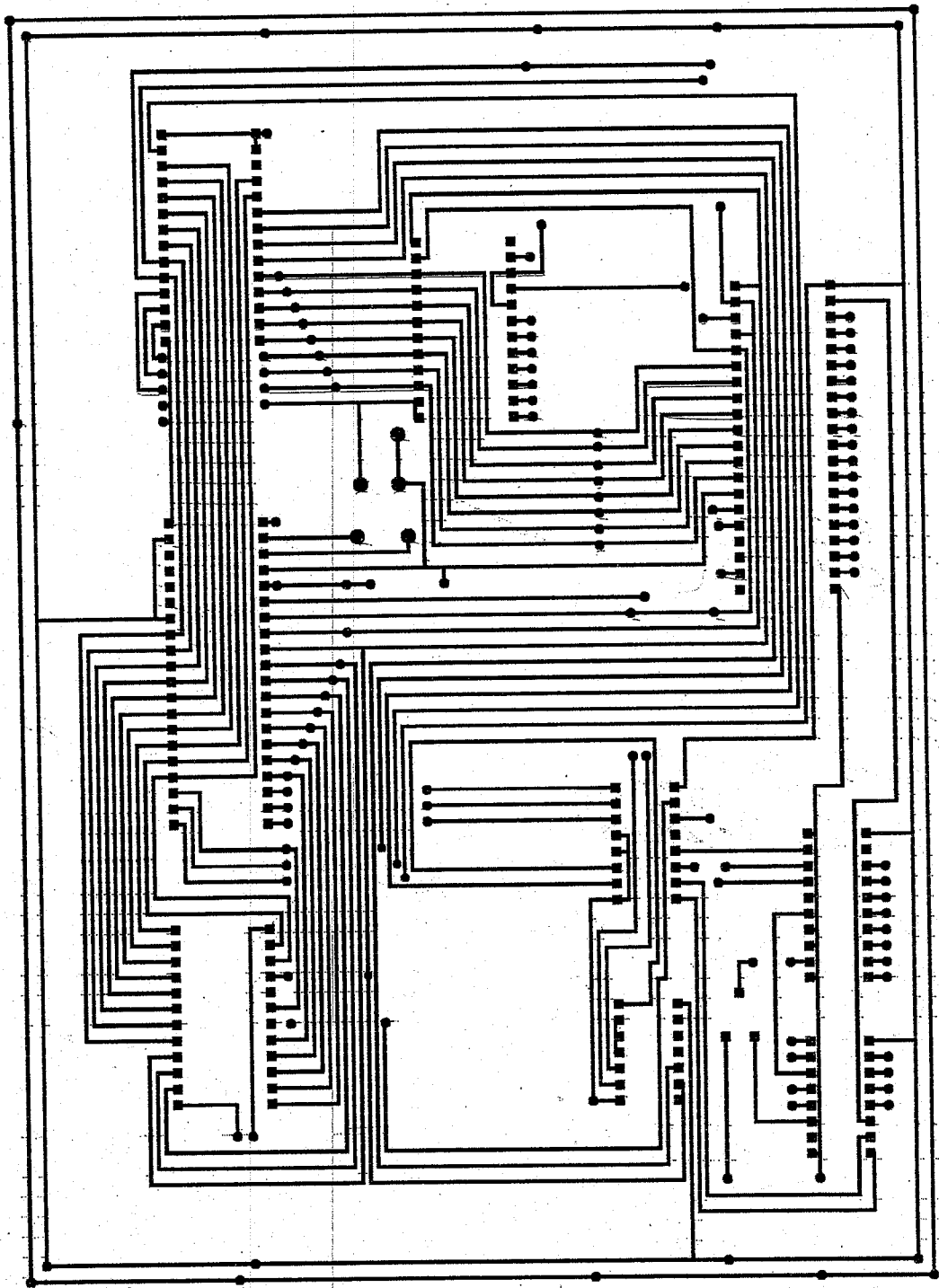


Fig.2 : Circuit Imprimé de la carte d'optimisation.

ANNEXES

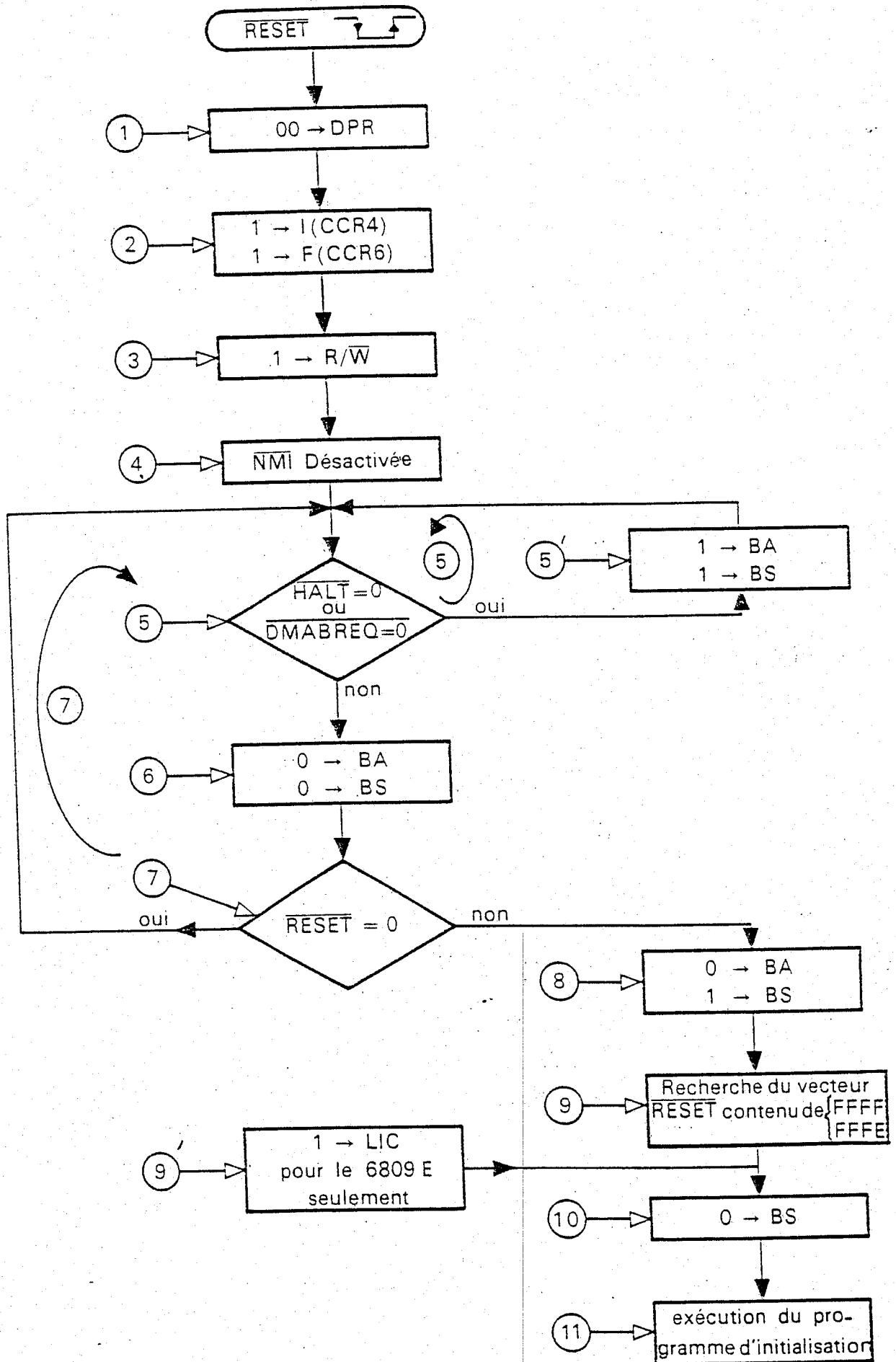
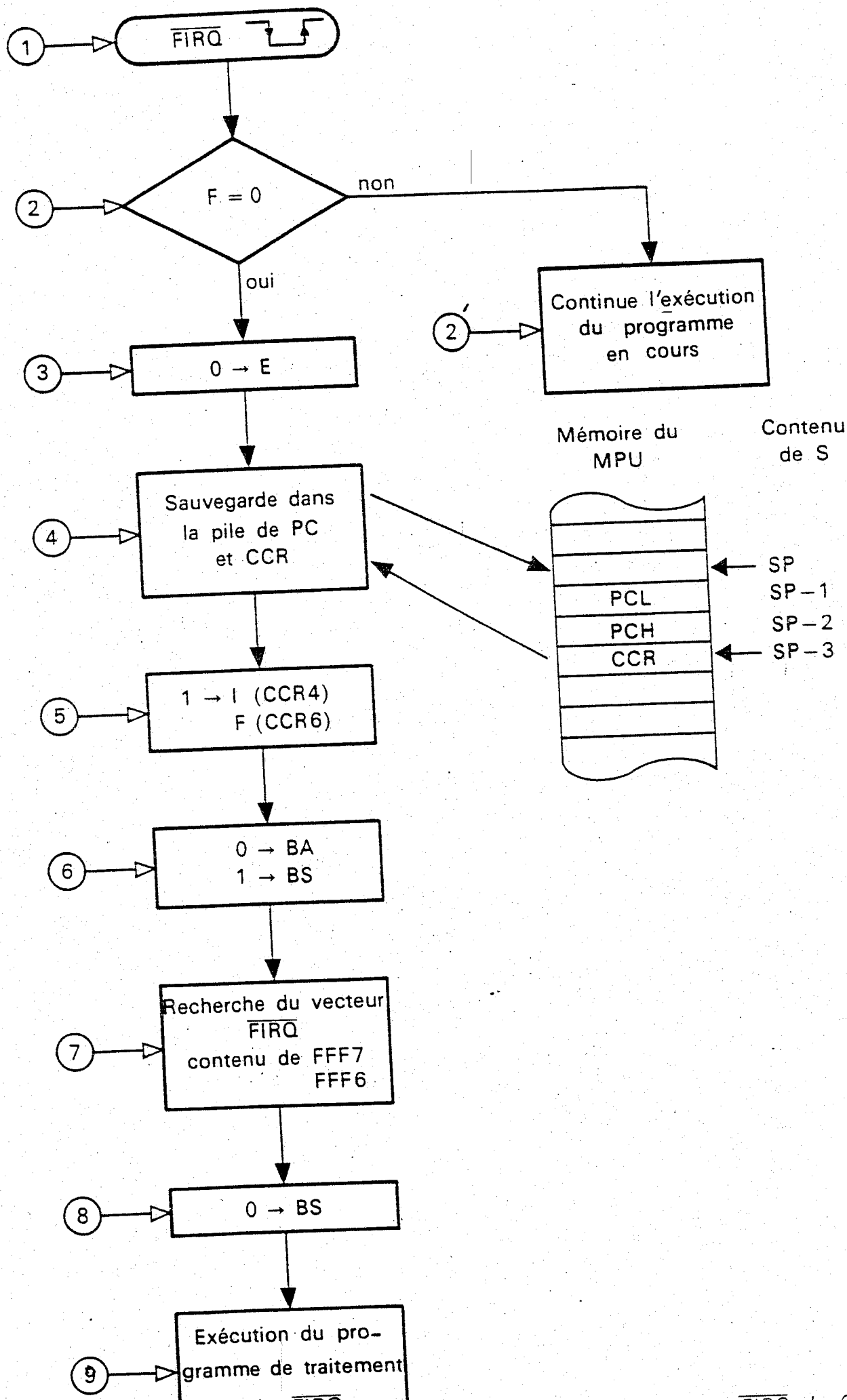


Fig. 1.5. — Séquence RESET du 6809.



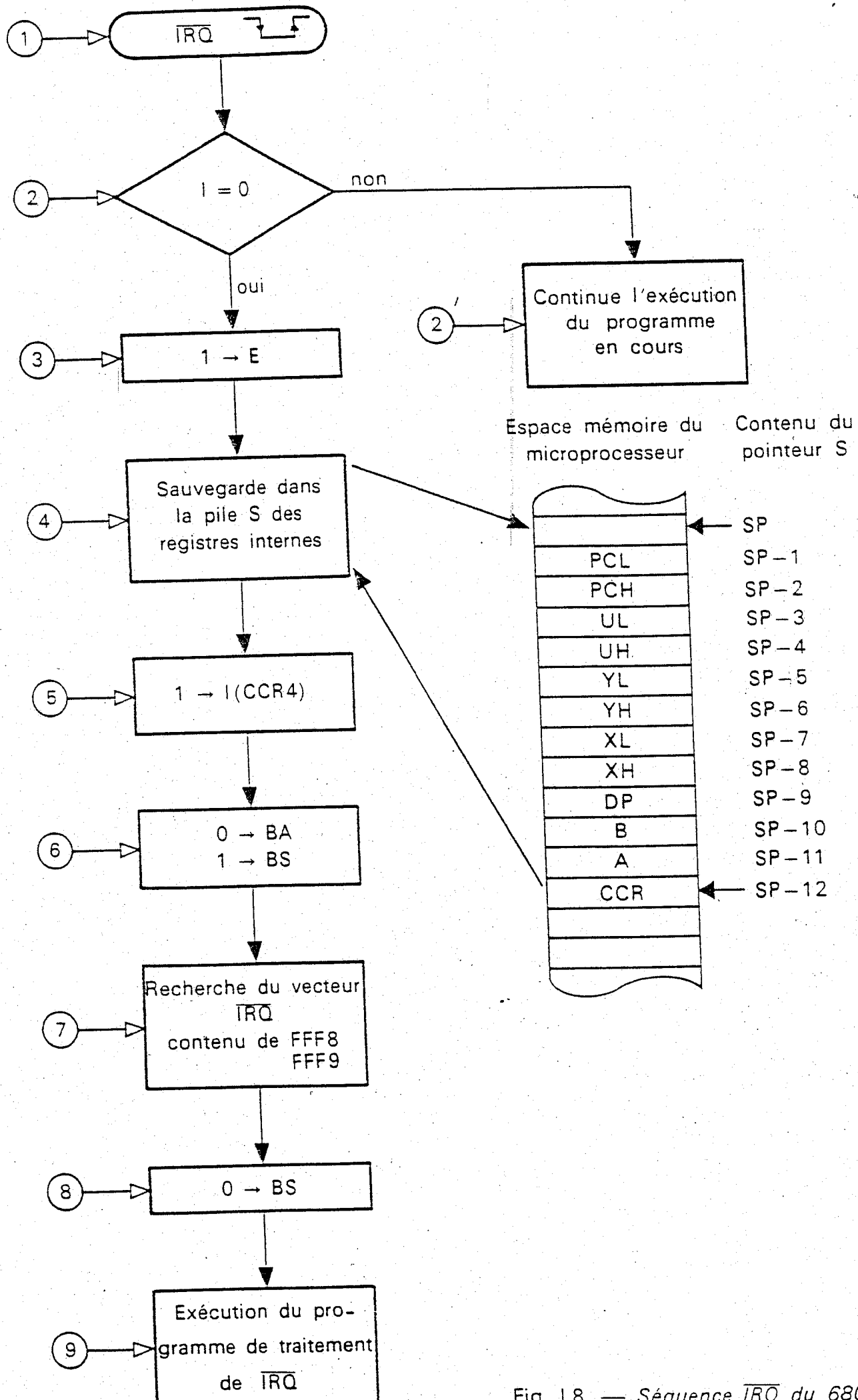


Fig. 18 — Séquence \overline{IRQ} du 6809.

4. Les instructions d'interruptions

4.1. Attente d'interruption-CWAY

Cette instruction effectue un ET logique entre l'octet mémoire immédiat et le registre des codes conditions. On peut effacer ici les masques d'interruptions.

La figure I.11 nous donne le séquençage des opérations internes réalisées par le microprocesseur.

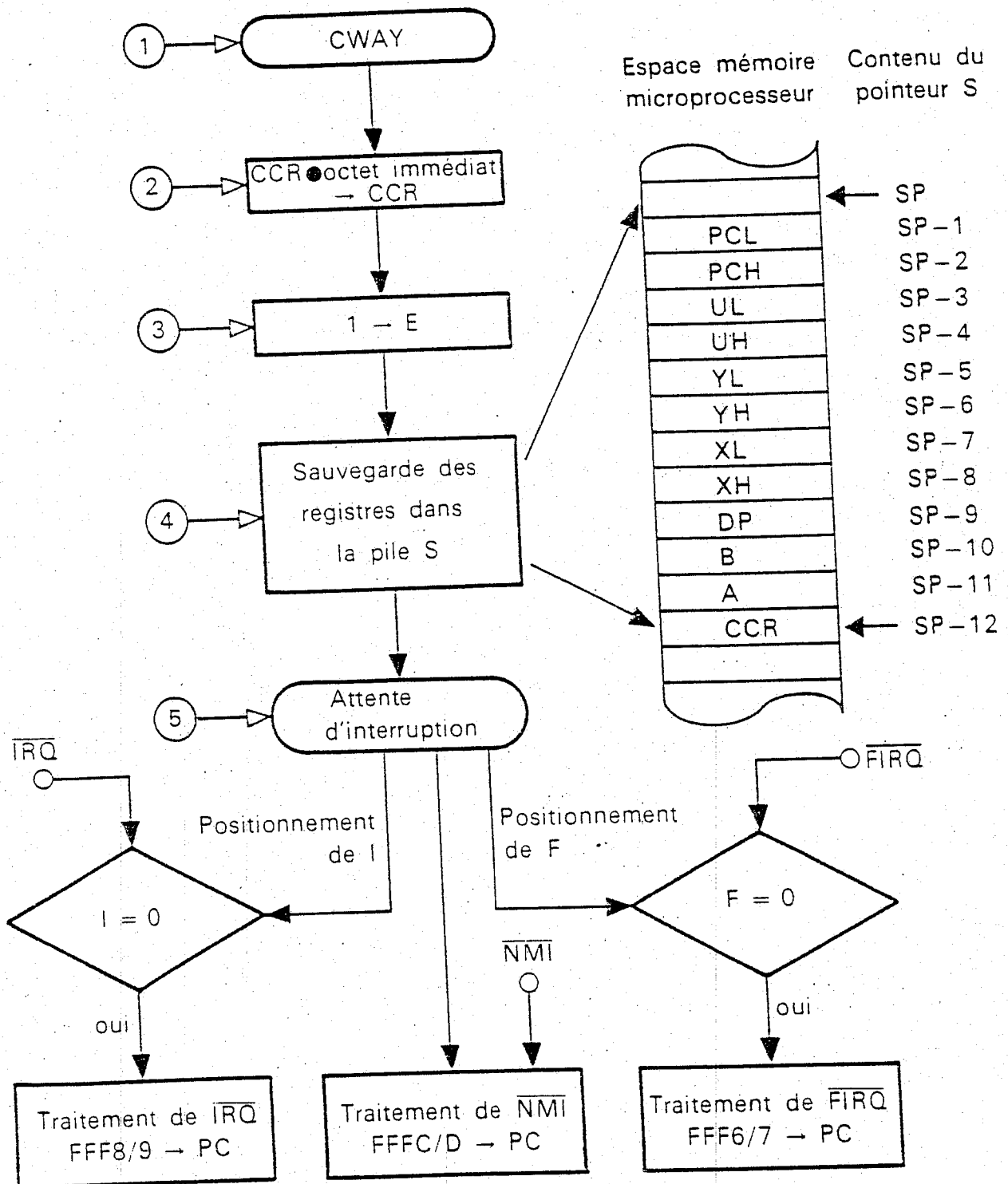


Fig. I.11. — Séquence CWAY du 6809.

5. Conclusion

Le tableau ci-dessous résume tous les moyens de traitement d'interruption disponibles sur le microprocesseur 6809.

Niveaux de priorité	Interruptions		Vecteurs d'interruption	Fonction	Sauvegarde	Masquage
	matérielle	logicielle				
1	RESET		FFFFE/F	Initialisation Interruption non masquable Inter. → logiciel système Interruption rapide Interruption normale Interruption → logiciel utilisateur	néant	NMI, I et F
2	NMI	SW1	FFFFC/D		totale (E = 1)	I, F
3	FIRO		FFFA/B		totale (E = 1)	I, F
4	FIRO		FFF6/7		partielle (E = 0)	I
5			FFF8/9		totale (E = 1)	néant
6		SWI2	FFF4/5		totale (E = 1)	néant
6		SWI3	FFF2/3	totale (E = 1)	néant	
<i>Instructions d'interruptions</i>						
Nom			Traitement engendré			
CWAY			NMI, FIRO, IRO			
SYNC			NMI, FIRO, IRO ou programme principal			
RTI			Programme normal			
<i>Fonction</i>				<i>Sauvegarde</i>		
Attente d'interruption				Totale (E = 1)		
Synchronisation externe				néant		
Retour d'interruption				<i>Dépilement</i>		
				total (E = 1)		
				partiel (E = 0)		

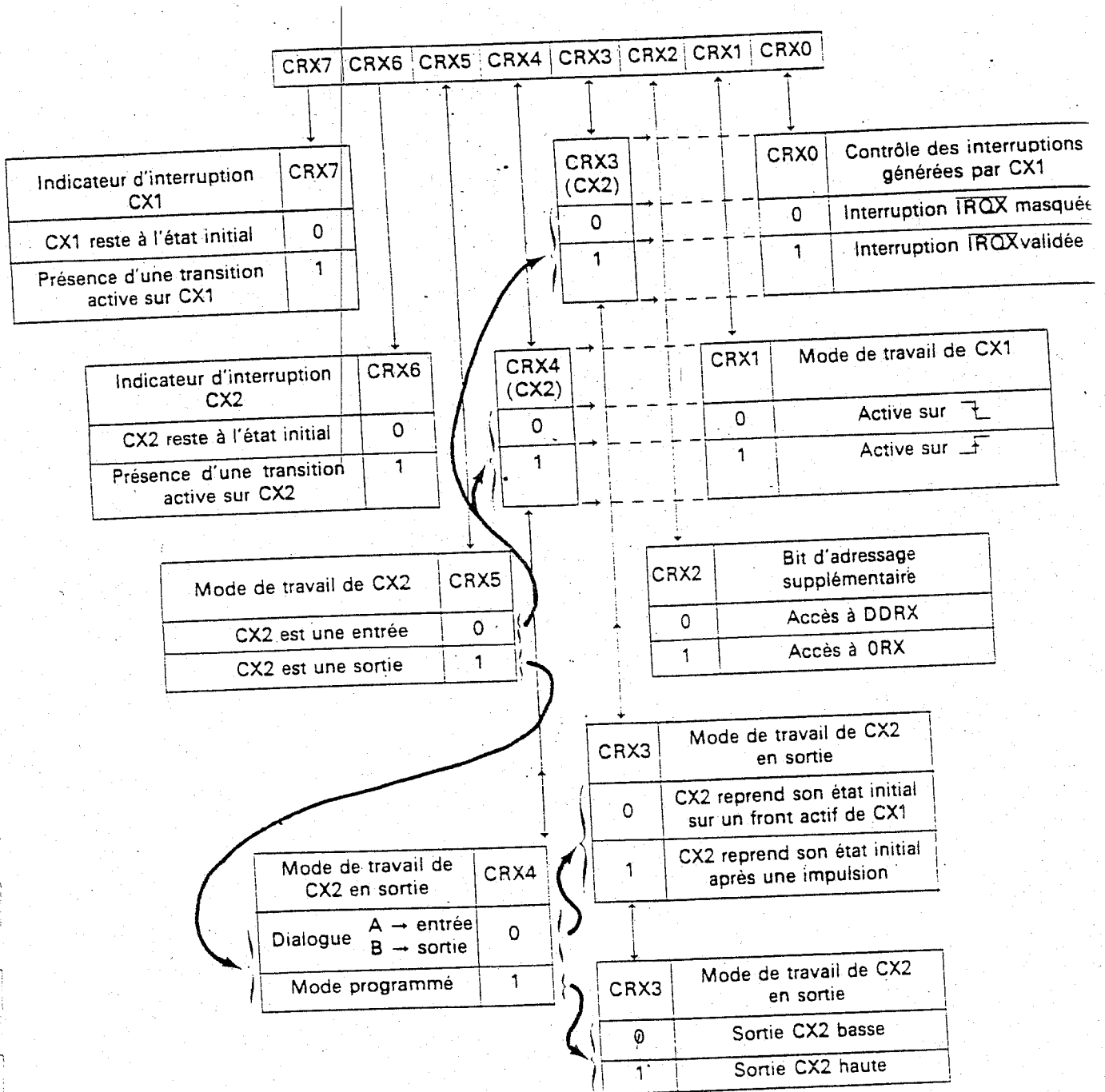


Fig. III.8. — Programmation des registres de contrôle du PIA - X = A ou B.

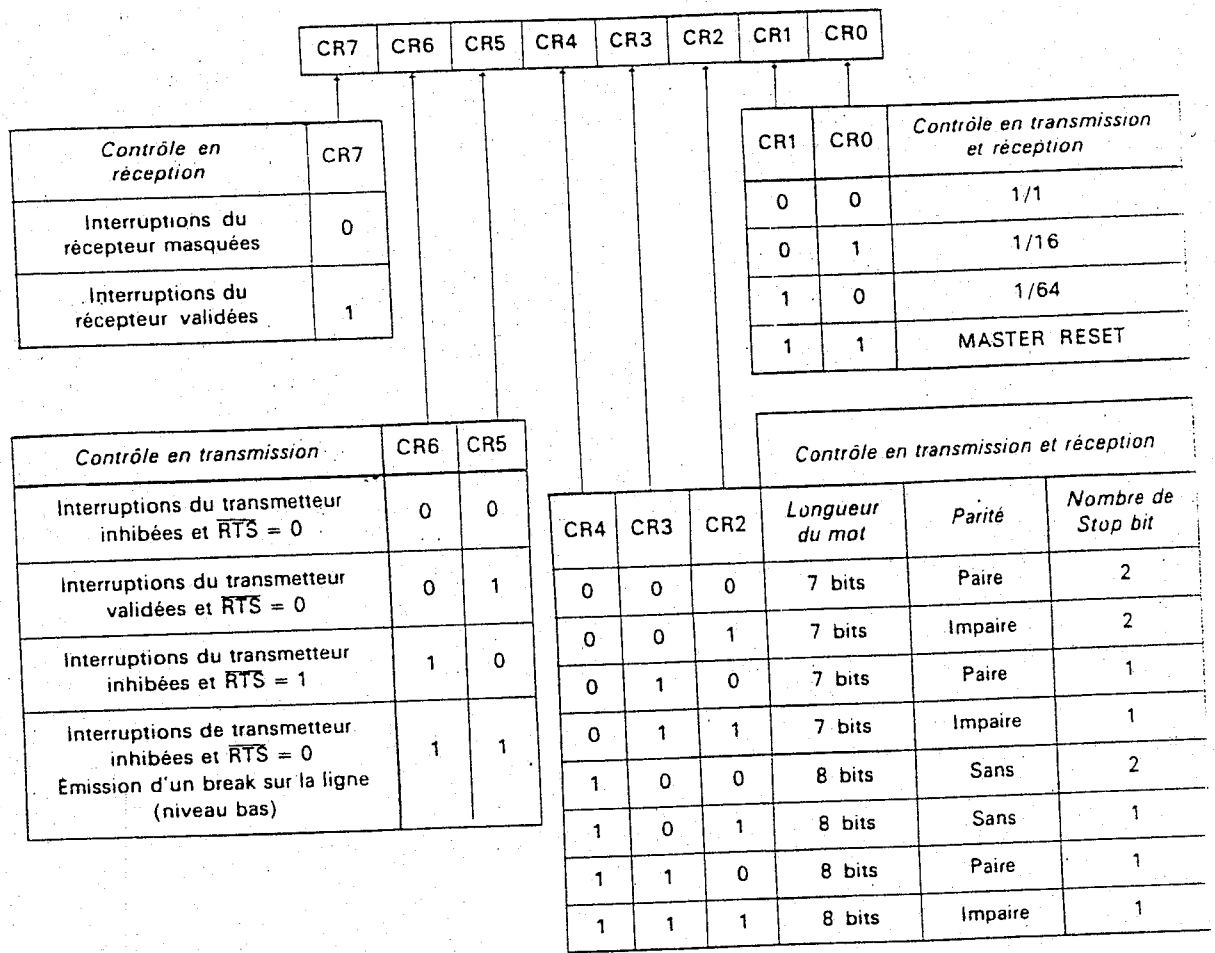


Fig. III.17. — Programmation du registre de contrôle de l'ACIA.

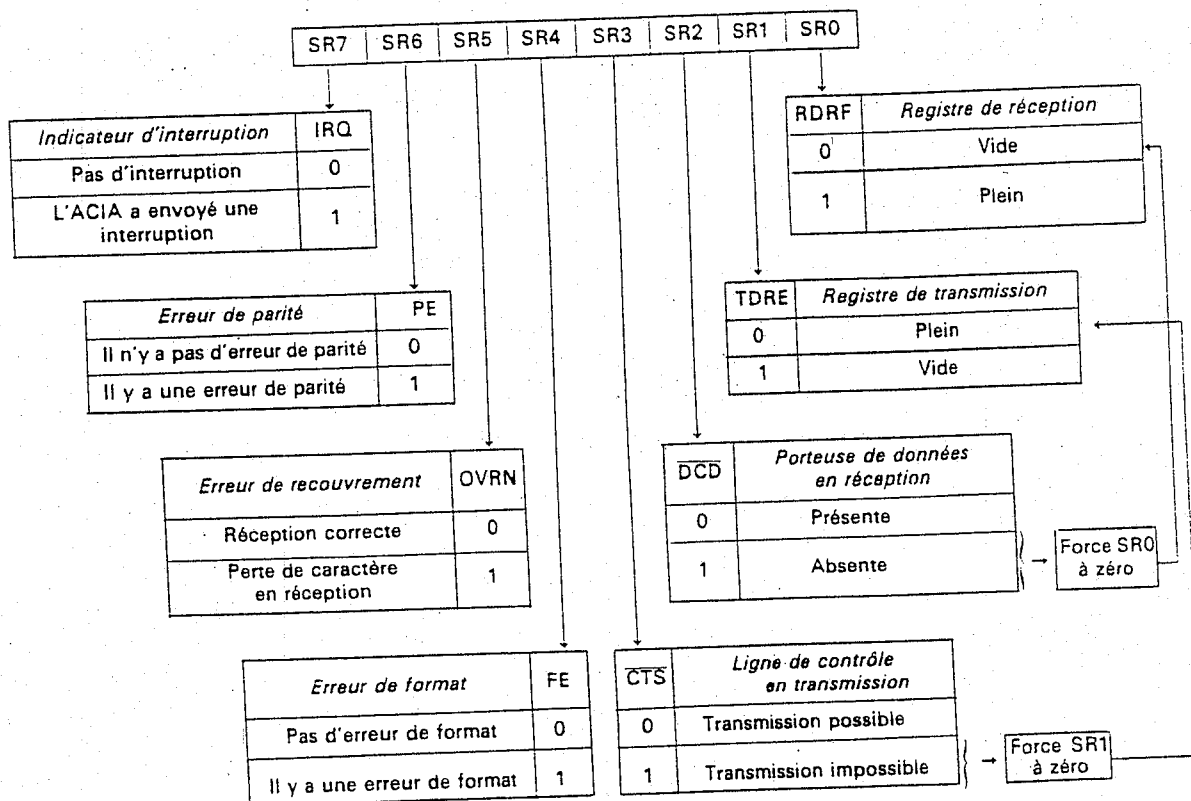


Fig. III.18. — Rôle du registre d'état de l'ACIA.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H.BUHLER, "Réglage des systèmes d'électronique de puissance, presse polytechniques et universitaires romandes", Lausanne, 1997.
- [2] H.BUHLER, "Conception de systèmes automatiques, presse polytechniques et universitaires romandes", Lausanne, 1988
- [3] SAH.C.T., Noyce, R.N. et SHOCKLY.W., "Proc. I.R.E.45" (1957) 1228.
- [4] KOTHARI, L.S, MATHUR, P.C, Kapoor , A., Saxena, P. and SHARMA, R.P. "J.ph. Physique" . 53 (1982) 5982.
- [5] GREEN, M.A., "Solis stack Electron." 20 (1977) 265.
"Solis stack Electron." 24 (1981) 788.
- [6] HALL, R.N., "Solide State Electron". 24 (1981) 593.
- [7] NGUYEN, P.H. et RAVELLET , S., "Communication à paraître au congrès international E.C. Photovoltaïque Solar Energy Conference organisé par la C.C.E à Athènes", Grèce du 17-21 octobre 1983.
- [8] Claude Jaussaud , Jean -Pierre Joly , Alain Million et Jean-Michel "Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information .
Direction de la recherche technologique ". CLEFS CEA N°: 44.
Hiver 2000-2001 .P29 -P34.
- [9] A.Mouchot , "la chaleur solaire et ses applications industrielles", Gauthier - Vilars , Paris (1869), réédité par A.Blanchard (1980).
- [10] A. Guillemin , "la chaleur" , Hachette, Paris (1884)
- [11] A.Corre , "Energie solaire , effets thermiques". Sélection de brevets, technique et documentation , Paris (1981).
- [12] Jean . Gosse, "Revue de l'énergie "n°: 354, mai 1983 , P264-P269.
- [13] L.Figuier , "les merveilles de la science" , T.IV, Furne et Jouvet, Paris (s.d).
- [14] REQUIER, BORLAND, CHAUMAIN, ROUAN, "Utilisation optimale de générateurs photovoltaïques". Entropie N°: 96, 1980.
- [15] REQUIER, BORLAND, CHAUMAIN, ROUAN. "Transmission optimale de puissance entre les générateurs utilisant les énergies renouvelables et des récepteurs". Article pour la 21^e Rencontre Internationale de la COMPLES, Ajaccis, 1982.
- [16] REQUIER, BORLAND, CHAUMAIN, ROUAN. "Adaptation d'impédance d'un générateur photovoltaïque à l'aide d'un récepteur programmable. Utilisation à la réalisation de mini-réseaux multi-générateurs multi-récepteurs", Article pour le 3^{ème} Séminaire pour l'énergie solaire. Trimestre, 1982.

- [17] **P.Rouan**. "Etude et réalisation d'un système d'acquisition et de traitement de donnée adapté aux énergies renouvelables", Thèse 3^{ème} cycle, Faculté des sciences de Toulouse, 1980.
- [18] **G.chaumain**. "Etude de l'optimisation du transfert de puissance entre des générateurs et des récepteurs à l'aide de dispositifs micro-programmés". Thèse de docteur-ingénieur, université Paris XII, 1982.
- [19] **Gerard Barrere**, "Energie éolienne et calcul économique, étude d'un système différencié en région Toulousaine", Revue de l'énergie, n°:334, Mai 1981, P242 - P253 .
- [20] **A.Blajkine**, "Electrotechnique générale", Edition Mir, 1977
- [21] **J.D.Nocond** , "Calculatrices , traité d'électricité " , vol. XVI, presses polytechniques romandes , Lausanne , 1983.
- [22] **H.Nussbaumer**, "Informatique industrielle" , vol. I à IV, Presses polytechniques romandes , Lausanne 1986/1987.
- [23] **H.Buhler** , "Réglages échantillonnés" , voll (chap. 1 à 10), Presses polytechniques romandes , Lausanne , 1982.
- [24] **R.Longchamp**. "Commande numérique de systèmes dynamiques" , presses polytechniques et universitaires romandes , Lausanne , 1995.
- [25] **Mohammed Taibi**, "Machines hydrauliques et compresseurs", OPU :10-1993.
- [26] **M.N. BAHADORI** , "Solar water pumping". Solar Energy 21,307-316(1978).
- [27] **J.T PYTLINSKY** , "Solar energy installations for pumping irrigation water" Solar Energy 21,255-262 (1978).
- [28] **R.E. BARDER**, "Current costs of solar powered organic Rankine cycle engines" Solar Energy 20,1-5 (1977).
- ∩ [29] **Barland, Bradal, Requier**. "Recherche de la puissance optimale délivrée par un générateur photovoltaïque à l'aide d'un dispositif microprogrammé", Procédings of the third E.C photovoltaic solar energy conference, Cannes, 1981.
- [30] **M.Barland**. "Etude dynamique du couplage de générateurs de puissance finie à des récepteurs électromécaniques", Thèse d'état Paris XII. Octobre 1983.
- [31] **A. Fossard**. "Commande des systèmes multidimensionnelles", Dunod, 1972.
- [32] **Michel Messud**, "La pratique du microprocesseur, Conception des applications", Cepadues édition 1991, Toulouse.
- [33] **Claude Dardanne**, "Le microprocesseur 6809, Périphériques, Processeur graphique", Edition Eyrolles, 1982.

[34] Y.R.Hsio et B.A.Blevin , "Direct coupling of photovoltaic power source to water pumping system " ,Solar Energy , vol.32 , No. 4 , pp.489,498 , 1984 .

[35] R.W.Maltin , "Design optimization and performance characteristics of a photovoltaic micro irrigation system for use in developing country " ,MIT Lincoln Lab. ,C00/4094-33 (1979) .

[36] J.A.Roger , Solar energy 23 ,193 (1979) .

[38] A.Braunstein et A.Kornfeld , "Analysis of solar lowered electric water pumps" , Solar energy , vol.27,No.3 , pp.235-240 , (1981) .

[39] J.Bani , "Analysis of a direct coupling D.C . motor and a photovoltaic converter " , Solar energy , vol.21, pp.73-79 , (1978) .

[40] J.Appelbaum , "Performance Analysis of D.C. motor-photovoltaic-converter system-II , series and shunt excited motor " , Solar energy , vol.27,No.5 , pp.421-431 , (1981) .

[41] Barland ,M .,G. ,Masselot ,C. , "Alimentation d'une pompe immergée à partir d'un générateur photovoltaïque à l'aide d'un onduleur triphasé à transistor" , Revue phys.appl. 15 , pp. 263-269 .

[42] Annabi ,M. , "Identification d'une installation de pompage solaire" , Revue Internationale d'hélio technique , 2^{ème} semestre 1980 .

[43] BEI. ,M. ,Jalade , J.C. , "Conditionnement de puissance :simulation sur calculateur hybride " ,Colloque sur les systèmes de conversion photovoltaïque , C 4-5 Décembre 1978, Toulouse .

[44] I.j.Karassik et al. , " Pump handbook " ,Mc craw-Hill ,New York (1976)

**OPTIMISATION D'UN SYSTEME DE
POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE
A BASE D'UN MICROPROCESSEUR**

*Thèse De Magister En Physique
Energétique Et Matériaux*

*Proposé par: Mr B. Benyoucef
(Professeur à l'Université de Tlemcen).
Présenté par : Mr T. Boussoukaia.*

Résumé :

Les procédés du photovoltaïque offrent un large champ d'application pour les microprocesseurs. Cette thèse est une contribution au développement d'algorithmes de contrôle efficaces, facilement programmables sur des micro-ordinateurs.

Ces micro-ordinateurs doivent communiquer avec leur environnement. La structure matérielle et le logiciel général requis sont présentés. Des contrôleurs à base de microprocesseur utilisés pour le contrôle de puissance délivrée par un générateur photovoltaïque, pour le contrôle de la vitesse de rotation d'une machine asynchrone et du débit issu d'une pompe centrifuge sont explicités. Ces exemples montrent les larges possibilités offertes par ce type de contrôle en photovoltaïque.

Mots-clés :

Pompage photovoltaïque *Conduite optimale de système *Contrôle par microprocesseurs.

Abstract :

Photovoltaic processes offer a wide application field for microprocessors. This paper is a contribution to the development of efficient control algorithms, easily programmable on microcomputers. The microcomputers have to communicate with their environment. The general hardware and software required and explicited. Test microprocessor based controllers used for power release by the solar power pack, for determination of the rate of volume flow, the head of water and the efficiency of the system as a function of the radiation levels. They show the large possibilities offered by this type of controllers in photovoltaic.

Keywords:

**Solar powered electric water pumps *Optimal control for systems
*Process control *Control algorithms.**