

N° d'ordre : 550

50376
1982
255

50376
1982
255

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour l'obtention du grade de

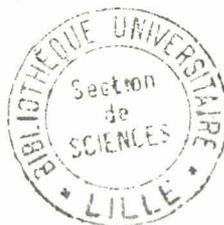
DOCTEUR ÈS-SCIENCES PHYSIQUES

par

Christian VASSEUR

Docteur-Ingénieur

**LA NOTION D'ÉVÈNEMENT
DANS LES SYSTÈMES DYNAMIQUES :
 DÉTECTION, CLASSIFICATION TEMPS REEL ET APPLICATION
 À LA CONCEPTION D'UNE INSTRUMENTATION DISTRIBUÉE.**



Soutenue le 2 juin 1982 devant la Commission d'Examen :

MM.	P. VIDAL	Président,
	J.M. TOULOTTE	Rapporteur,
	F. LHOTE	Rapporteur,
	R. THIBAUT	Rapporteur,
	G. ALENGRIN	Examineur,
	O. DUBOIS	Examineur,
	C. CHOPIN	Examineur.

- AVANT-PROPOS -

Le travail exposé dans ce mémoire a été réalisé au Centre d'Automatique de l'Université de Lille 1. Avant d'en entamer l'exposé, je tiens à remercier les chercheurs qui, par leur collaboration, sont à l'origine de certains aspects des résultats présentés : Mademoiselle B. CHEBEL, Messieurs C. RAJAGOPALAN, M. COUVREUR et J.M. LECERF.

P. VIDAL, Directeur du Centre d'Automatique de Lille m'a permis, en m'accueillant dans son laboratoire, de m'initier à la recherche. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde gratitude.

J.M. TOULOTTE, Professeur à l'Université de Lille 1, a été responsable scientifique et rapporteur de cette thèse. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance et de mon amitié pour l'attention, les conseils et l'aide constante qu'il m'a apportés.

Les conseils prodigués par Monsieur F. LHOTE, Directeur du laboratoire d'Automatique de Besançon, m'ont été particulièrement utiles dans la recherche d'une présentation synthétique du premier chapitre du mémoire. Je le remercie vivement pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'être rapporteur de ce travail.

J'ai très vivement apprécié les qualités humaines et scientifiques de R. THIBAUT, Professeur à l'Université de Sherbrooke (Québec), qui m'a accueilli dans son laboratoire en 1972-74. Qu'il trouve, ici, l'expression de ma profonde gratitude pour s'être intéressé à mes travaux et avoir accepté d'être l'un des rapporteurs de cette thèse.

Je remercie Monsieur G. ALENGRIN, Professeur au Laboratoire des Signaux et Systèmes de Nice, pour l'intérêt qu'il a témoigné à ces travaux et pour sa présence parmi les membres du jury.

Monsieur O. DUBOIS, Médecin Chef au Centre de Pathologie Néonatale d'Arras a été l'instigateur de certaines applications de cette thèse. Qu'il trouve ici l'expression de mes remerciements reconnaissants.

C. CHOPIN, Responsable de l'Unité Ouest du Centre de Réanimation Respiratoire de l'Hôpital Calmette de Lille, est à l'origine du projet d'instrumentation intégrée présenté au dernier chapitre du mémoire. Les points de vue qu'il a donnés m'ont particulièrement sensibilisé au problème de l'instrumentation interactive et de l'ergonomie. Je le remercie vivement de son aimable collaboration.

La patience et le dévouement de Madame A. PIGNON et de Messieurs G. VEINNANT et J. HOUZE ont été abondamment sollicités pour la dactylographie et la réalisation matérielle de ce mémoire. Qu'ils soient remerciés pour leur efficacité et leur bonne humeur.

Mes remerciements vont enfin à tous les amis avec qui j'ai eu la chance de collaborer tant à l'Université de LILLE 1 qu'à l'Université de SHERBROOKE.

Ce travail a été partiellement financé par le Conseil
Régional de la Région Nord/Pas-de-Calais et par l'I.N.S.E.R.M.
(C.R.L. 805014).

S O M M A I R E

- - - - -

INTRODUCTION GÉNÉRALE :..... i.1.

CHAPITRE 1 : **COMMUNICATION ET OBSERVATION**

1 - INTRODUCTION.....	I.1.
2 - LES MECANISMES DE LA COMMUNICATION.....	I.2.
2.1. Schéma élémentaire.....	I.2.
2.2. Sémantique et syntaxe.....	I.5.
2.3. La Coopération source-destination.....	I.6.
2.4. Schémas fonctionnels de base.....	I.8.
2.5. Caractère discret de la communication.....	I.10.
3 - OBSERVATION DES PROCESSUS.....	I.13.
3.1. Introduction.....	I.13.
3.2. Observation en perception.....	I.15.
3.3. Représentation et interprétation.....	I.17.
3.4. Observation en compréhension : Apprentissage...	I.20.
3.5. Observation en compréhension : Interactivité...	I.23.
4 - CONCLUSION.....	I.26.

P R E M I È R E P A R T I E

LA NOTION D'ÉVÉNEMENT : RECONNAISSANCE ET CLASSIFICATION TEMPS RÉEL.

CHAPITRE 2 : **LA NOTION D'ÉVÉNEMENT**

1 - INTRODUCTION ET EXEMPLE PRELIMINAIRE.....	II.1.
2 - PRESENTATION FORMELLE.....	II.3.
2.1. Définitions.....	II.3.
2.1.1. <i>Datation et chronologie</i>	II.3.
2.1.2. <i>Ensemble chronologique</i>	II.4.
2.1.3. <i>Événement</i>	II.5.
2.2. Propriétés temporelles.....	II.5.
2.2.1. <i>Propriétés des événements</i>	II.5.
2.2.2. <i>Chaîne chronologique</i>	II.6.
2.3. Assemblage d'événements et situations.....	II.6.
2.3.1. <i>Notion de situation</i>	II.6.
2.3.2. <i>Répétitivité</i>	II.7.
2.4. Exemples.....	II.7.
2.5. Conclusion.....	II.11.
3 - CARACTERISATION DE CHAINES CHRONOLOGIQUES.....	II.11.
3.1. Fenêtres d'observation.....	II.11.
3.2. Procédure d'observation.....	II.12.
3.2.1. <i>Espace d'observation</i>	II.12.
3.2.2. <i>Situation moyenne dans $F_q(N)$</i>	II.14.
3.2.3. <i>Incertitude locale</i>	II.15.
3.2.4. <i>Incertitude globale</i>	II.18.
3.2.5. <i>Etude de variabilité</i>	II.19.
3.2.6. <i>Exemple</i>	II.21.
3.2.7. <i>Réglage des paramètres</i>	II.25.

3.3. Conclusion.....	II.26.
4 - APPLICATIONS FONDAMENTALES.....	II.27.
4.1. Introduction.....	II.27.
4.2. Cas des séquences multiples.....	II.29.
4.2.1. Séquences issues d'une même chaîne <i>chronologique</i>	II.29.
4.2.2. Séquences issues de chaînes chronologiques <i>distinctes</i>	II.31.
4.2.3. Cas général.....	II.31.
4.3. Analyse temporelle.....	II.33.
4.3.1. Principe.....	II.33.
4.3.2. Synchronisation des séquences multiples.....	II.35.
5 - CONCLUSION.....	II.35.

CHAPITRE 3 : **DETECTION ET CLASSIFICATION**

1 - INTRODUCTION.....	III.1.
2 - DETECTION SEQUENTIELLE.....	III.2.
2.1. Introduction.....	III.3.
2.2. Validation et restauration des données.....	III.3.
2.2.1. La validation.....	III.3.
2.2.2. La restauration de l'information.....	III.5.
2.3. La détection des événements.....	III.7.
2.3.1. Le test de seuils.....	III.7.
2.3.2. Mise en oeuvre de la dérivée du signal.....	III.8.
2.3.3. Utilisation de l'enveloppe.....	III.13.
2.3.4. Conclusion.....	III.16.

3 - PROTOTYPES ET CLASSIFICATION.....	III.16.
3.1. Introduction.....	III.16.
3.2. Paramètres caractéristiques et cahier des charges.	III.18.
3.3. Les situations prototypes.....	III.23.
3.3.1. <i>Introduction</i>	III.23.
3.3.2. <i>Formulation du problème</i>	III.23.
3.4. Détermination des noyaux initiaux.....	III.24.
3.4.1. <i>Principes</i>	III.24.
3.4.2. <i>Définition de base</i>	III.27.
3.4.3. <i>Propriétés fondamentales des domaines d'observation</i>	III.27.
3.4.4. <i>Séparation des modes</i>	III.28.
3.4.5. <i>Implantation sur calculateur numérique</i>	III.29.
3.4.6. <i>Conclusion</i>	III.33.
3.5. Evolution des prototypes.....	III.35.
3.5.1. <i>Affectation des nouveaux événements</i>	III.35.
3.5.2. <i>Remise à jour des prototypes</i>	III.39.
3.6. L'aspect temps réel.....	III.45.
4 - CONCLUSION.....	III.46.

DEUXIÈME PARTIE

ARCHITECTURE DISTRIBUÉE ET INSTRUMENTATION MICROINFORMATISÉE.

CHAPITRE 4 : **LES STRUCTURES MICROINFORMATISÉES**

1 - INTRODUCTION.....	IV.1.
2 - LES STRUCTURES DE TRAITEMENT.....	IV.2.
2.1. Les structures conventionnelles.....	IV.2.
2.2. Les structures fonctionnelles réparties.....	IV.3.
2.2.1. <i>Exemple</i>	IV.3.
2.2.2. <i>Cas général</i>	IV.5.
2.2.3. <i>Applications</i>	IV.9.
2.3. Aspects matériels.....	IV.10.
2.3.1. <i>Les processeurs</i>	IV.10.
2.3.2. <i>Les liaisons</i>	IV.11.
2.3.3. <i>Le stockage de l'information</i>	IV.12.
2.4. Conclusion.....	IV.13.
3 - LA COMMUNICATION HOMME-MACHINE.....	IV.14.
3.1. Introduction.....	IV.14.
3.2. Résultats, rôle de l'imagerie.....	IV.16.
3.2.1. <i>Introduction et exemple préliminaire</i>	IV.16.
3.2.2. <i>Les variables visuelles</i>	IV.19.
3.2.3. <i>Analyse de l'information à représenter</i> ...	IV.20.
3.2.4. <i>Applications</i>	IV.22.
3.2.5. <i>Conclusion</i>	IV.23.

3.3. La relation Homme-Machine.....	IV.23.
3.3.1. <i>Introduction</i>	IV.23.
3.3.2. <i>Les deux types de consoles</i>	IV.24.
3.3.3. <i>Implications logicielles</i>	IV.25.
3.4. Conclusion.....	IV.27.
4 - FIABILITE ET MAINTENANCE.....	IV.28.
4.1. Introduction.....	IV.28.
4.2. Aspects matériels.....	IV.28.
4.2.1. <i>Fiabilité</i>	IV.28.
4.2.2. <i>Maintenance</i>	IV.29.
4.3. Fiabilité et maintenance logicielles.....	IV.30.
4.3.1. <i>Généralités</i>	IV.30.
4.3.2. <i>Les contraintes temps réel</i>	IV.31.
5 - CONCLUSION.....	IV.34.

CHAPITRE 5 : **PROPOSITIONS POUR UNE INSTRUMENTATION INTEGREE**

1 - GENERALITES.....	V.1.
2 - LE CAHIER DES CHARGES.....	V.3.
2.1. Introduction.....	V.3.
2.2. Descriptif général.....	V.3.
2.2.1. <i>Synoptique de l'instrument</i>	V.3.
2.2.2. <i>Les signaux du bilan</i>	V.4.
2.2.3. <i>Fonctions de base</i>	V.5.
2.2.4. <i>Modes de fonctionnement</i>	V.9.
2.2.5. <i>Modularité</i>	V.9.
2.3. Récapitulatif.....	V.9.

3 - SOLUTIONS PROPOSEES.....	V.12.
3.1. Généralités.....	V.12.
3.2. Architecture d'ensemble.....	V.12.
3.3. Les modules M_1	V.15.
3.3.1. <i>Présentation</i>	V.15.
3.3.2. <i>La liaison M_1-système scrutateur</i>	V.16.
3.3.3. <i>Fonctionnement</i>	V.19.
3.4. Le système scrutateur.....	V.22.
3.4.1. <i>Généralités</i>	V.22.
3.4.2. <i>Connexion à BUS2</i>	V.24.
3.4.3. <i>Fonctionnement</i>	V.25.
3.5. Le système de pilotage.....	V.26.
3.6. Le module moniteur simple.....	V.27.
3.7. Autres caractéristiques.....	V.28.
3.8. Conclusion.....	V.31.
4 - LA CONSOLE DE PILOTAGE.....	V.31.
4.1. Généralités.....	V.31.
4.2. Fonctionnement.....	V.33.
4.2.1. <i>L'élément 1</i>	V.33.
4.2.2. <i>Le pilotage du moniteur simple</i>	V.34.
4.2.3. <i>Le fonctionnement interactif</i>	V.37.
5 - CONCLUSION.....	V.45.

CONCLUSION GÉNÉRALE..... c.1.

BIBLIOGRAPHIE.

ANNEXES.

INTRODUCTION GENERALE

Ce mémoire a pour objectif de présenter une approche méthodologique globale au problème de l'observation des processus dynamiques.

Dans ce but, le couple processus - observateur est assimilé à une chaîne de communication dont il convient d'optimiser le fonctionnement. La stratégie d'analyse consiste alors à donner aux signaux (continus ou discrets, quantitatifs ou qualitatifs) délivrés par le processus, une structure de messages décomposables en primitives adaptées appelées événements.

Cette étude, dont le support initial se situe dans le domaine du Génie Biologique et Médical (traitement automatique des signaux électrophysiologiques, /1, 10/) couvre un premier champ d'application immédiat qui est l'analyse automatique des signaux. Toutefois, compte tenu de la démarche et des techniques utilisées (détection, classification temps réel, algorithmes de décision,....) elle s'adapte facilement à d'autres ensembles d'application tels que le contrôle de fabrication ou la surveillance des processus (contrôles de qualité, diagnostics de pannes,....).

Par ailleurs, les structures logiques induites par la méthodologie offrent d'excellentes possibilités d'implantation sur des architectures matérielles microinformatisées. Ce dernier aspect est fondamental car il permet de déboucher sur la conception d'une instrumentation industrielle intégrant un haut niveau de traitement /11/.

Ainsi, et sur la base de ce schéma directeur, le mémoire est divisé en deux parties intitulées respectivement :

i.2.

- La Notion d'Événement : Reconnaissance et Classification Temps Réel.
- Architecture Distribuée et Instrumentation Micro-informatisée.

La première partie développe tout d'abord l'étude des méthodes mathématiques s'articulant autour de la notion d'événement (chapitre 2). Dans ce contexte, les techniques de classification automatiques et d'analyse structurale du signal sont ensuite examinées au Chapitre 3.

La seconde partie est plus particulièrement orientée vers l'analyse des architectures matérielles à base de composants microinformatiques (chapitre 4). Finalement, nous donnons à titre d'exemple, au chapitre 5, des propositions pour la réalisation d'une instrumentation intégrée dédiée à la surveillance clinique d'un ensemble de signaux électrophysiologiques.

Le contexte précis des travaux effectués est défini, quant à lui, dans un premier chapitre introductif intitulé : Communication et Observation.

C H A P I T R E 1

COMMUNICATION ET OBSERVATION

1 - INTRODUCTION :

L'un des fondements essentiels du prodigieux développement de l'Homme réside dans sa capacité à communiquer avec ses semblables. Il est d'ailleurs remarquable que les grandes étapes de ce développement soient jalonnées de découvertes relatives à la communication.

Initialement, le langage parlé a constitué l'outil privilégié de transmission du savoir, des techniques et des traditions, ces éléments devenant eux-mêmes le support des premières civilisations.

Ensuite, l'invention de l'écriture, sous la forme de pictogrammes en Mésopotamie (3500 avant J.C.) puis de hiéroglyphes en Egypte, fut un événement capital dans l'essor des civilisations. C'est ainsi qu'est apparue la possibilité de transmettre des messages à très longue distance et de constituer des registres administratifs permettant de structurer des populations entières en états organisés.

Enfin, et pour accroître encore la puissance que lui confère sa capacité de communication, l'Homme s'est doté d'un ensemble important d'outils remarquables : imprimerie, télégraphe, téléphone, télévision, ordinateur..., dont la multiplication a donné naissance à la civilisation actuelle, civilisation de la communication par excellence.

Toutefois, et au delà des contacts avec autrui, ce sont aussi les contacts avec l'univers environnant qui conditionnent, chez l'Homme, les actions, les réactions et les adaptations propres à son développement. A cet égard, il semble bien que le processus d'appréhension de l'environnement physique puisse s'analyser en prenant appui sur des mécanismes similaires à ceux de la communication. En particulier, il est clair que l'observation d'un processus physique peut se décomposer en deux phases distinctes, plus ou moins développées :

- la perception, à laquelle est liée la notion de capteur,
- la compréhension, à laquelle sont liées les notions d'interprétation et de signification des objets perçus.

Nous allons tenter d'établir une classification des moyens que peut mettre en oeuvre l'Homme pour observer son environnement physique. Cette classification qui prend en compte les niveaux de perception et de compréhension nous permettra ensuite de caractériser les dispositifs d'observation à haut niveau de compréhension qui font l'objet de ce mémoire.

2 - LES MECANISMES DE LA COMMUNICATION :

2.1. Schéma élémentaire

La communication entre deux interlocuteurs peut se définir comme la transmission plus ou moins réciproque de messages et de leurs significations. Chaque message s'identifie alors à une combinaison de signes se référant à un certain code. La figure 1.1. illustre les différents éléments d'une chaîne de communication unidirectionnelle (sans réciprocité), reliant une source (par exemple un locuteur) et une destination (par exemple un auditeur) :

- ①. Le processus de communication prend naissance au sein de la source. Ainsi, pour un locuteur, c'est au niveau du cortex cérébral que sont élaborés les concepts et les idées à transmettre à l'auditeur.

- ②. Le codeur transforme l'information à transmettre en un message respectant un code ou un enchaînement de codes prédéfinis. Par exemple le concept "OISEAU" se traduit par les mots "BIRD" ou "VOGEL" selon que le locuteur est de langue anglaise ou de langue allemande, ces mots pouvant eux-mêmes être transcodés en code morse.
- ③. L'émetteur transpose le message en signaux physiques : ondes sonores, ondes électriques, signaux optiques, gestes, écriture, images, etc...
- ④. Le canal de transmission constitue le support matériel par où transitent les signaux de l'émetteur : atmosphère, ligne électrique, fibre optique, etc...

Les éléments ⑤, ⑥ et ⑦ relatifs à la destination réalisent, respectivement, les fonctions inverses des éléments ③, ② et ① de la source.

- ⑤. Le récepteur reçoit, du canal, des signaux qui sont éventuellement bruités et dégradés. Son rôle est alors de reconditionner les signaux physiques de manière à en extraire un code aussi cohérent que possible.
- ⑥. Le décodeur, se référant, à son tour, aux codes utilisés par la source, reconnaît les signes perçus par le récepteur et identifie le message.
- ⑦. Finalement, la destination définit sa propre version du message en s'appuyant sur un ensemble de critères d'appréciation qui, eux-mêmes, mettent en jeu la faculté de compréhension, l'expérience, la culture, la sensibilité, les associations d'idées, ... Ainsi le mot OISEAU perçu par l'auditeur peut évoquer les concepts de LEGERETE ou de LIBERTE selon le contexte de la communication ou selon l'humeur de l'auditeur.

sens de transmission du message

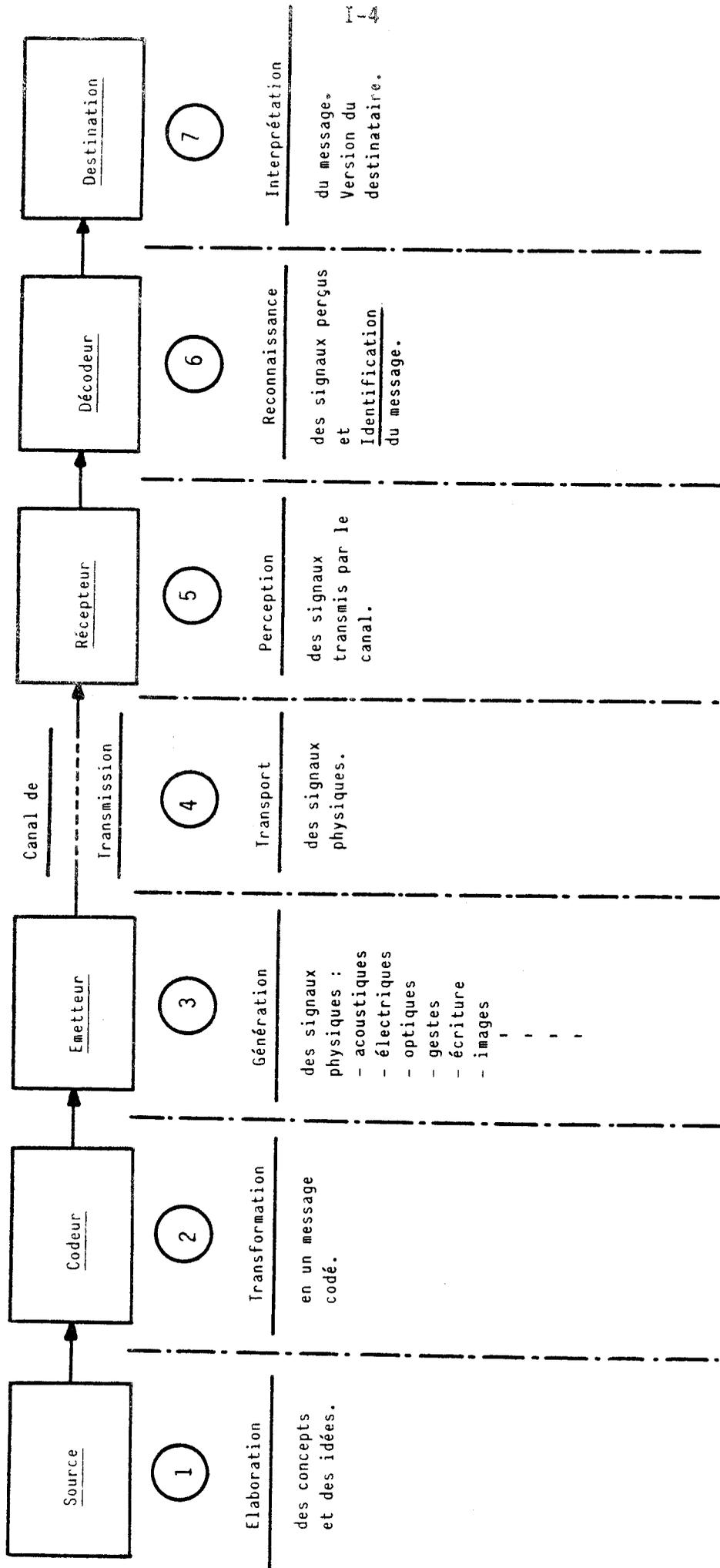


Figure 1.1. : Schéma élémentaire d'une chaîne de communication unidirectionnelle.

. REMARQUE : Il apparaît, dès à présent, que la fonction de mémorisation est indispensable à la réalisation de la communication. En particulier, c'est elle qui permet l'accès à l'ensemble des connaissances a priori. Dès lors, il est clair que les machines intégrant cette fonction (notamment les machines informatiques) joueront, elles aussi, un rôle déterminant dans la conception des dispositifs automatiques de communication.

2.2. Sémantique et syntaxe

Quoiqu'élémentaire, le schéma précédent montre que tout message peut être étudié sous deux aspects :

- celui de sa construction selon des règles parfaitement définies : c'est l'aspect syntaxique,
- celui de sa signification, c'est-à-dire des concepts et des idées qui sont véhiculés : c'est l'aspect sémantique.

Ainsi, en parlant des langages naturels, on peut dire que le dictionnaire permet d'appréhender la sémantique d'une langue, alors que la grammaire permet d'en acquérir la syntaxe : règles d'accord, conjugaison, etc....

Le premier aspect fait l'objet de nombreux travaux, notamment en reconnaissance automatique de la parole ou de l'écriture /1-5/. Plus généralement il intègre la mise en oeuvre des langages formels en tant qu'outils de reconnaissance des formes /6-9/.

L'aspect sémantique est d'un emploi évidemment plus délicat et les expériences les plus avancées dans ce domaine concernent également la reconnaissance automatique de la parole /10-11/. L'un des objectifs essentiels de ce mémoire est de montrer comment on peut utiliser certains aspects sémantiques pour l'observation automatique des processus physiques.

. REMARQUE : Les travaux de Shannon /12/ sur ce qu'il est convenu d'appeler la "théorie de l'information" analysent, plus spécifiquement, les moyens d'utiliser de manière optimale un canal de transmission. Pour cela de nombreuses notions sont utilisées : quantité d'information et entropie,

performance d'un code, capacité d'un canal, vitesse de transmission, etc... Ces aspects n'entrent pas dans le cadre de cette étude.

2.3. La coopération source-destination

L'efficacité de la communication est conditionnée par l'établissement d'une certaine coopération entre la source et la destination. Ainsi, il est clair que devant un locuteur dont la langue et la culture sont inconnues de lui, l'auditeur interprétera le message comme un bruit. On peut alors dire que, dans ce cas, le message a été reçu en perception mais non en compréhension.

De manière plus précise deux critères de classification peuvent être utilisés pour distinguer les différents types de coopérations existant entre la source et la destination.

- Le premier critère permet d'indiquer si la coopération est directe ou indirecte :

* *elle est directe lorsque la source et la destination font directement référence à un ensemble de connaissances et de règles connues des deux a priori.*

* *elle est indirecte lorsque la source et la destination font appel à un élément intermédiaire (intervenant extérieur, partenaire, interprète, moniteur,...) afin d'améliorer l'efficacité de la communication.*

- Le second critère permet d'indiquer si la coopération est implicite ou explicite :

* *elle est implicite lorsqu'il n'existe aucune réaction de la destination sur la source. C'est notamment le cas des communications unidirectionnelles : auditeur de radio, téléspectateur,...*

* elle est explicite lorsque la destination réagit sur la source. Dans ce cas, les protagonistes de la communication sont alternativement source et destination. On parle alors d'interlocuteurs et de dialogue ou de communication interactive.

. REMARQUE : Lorsqu'il est question de "réaction de la destination sur la source", il s'agit de réaction immédiate permettant de modifier en temps réel le processus de communication. Les réactions différées du type "critique d'émission de télévision" contribuent essentiellement, quant à elles, à modifier les connaissances et les règles de référence utilisées dans la communication.

Le tableau de la figure 1.2. donne quelques exemples de communications classées selon les critères présentés ci-dessus.

Types de coopération	<u>DIRECTE</u>	<u>INDIRECTE</u>
<u>Implicite</u>	<ul style="list-style-type: none"> * Auditeur. * Téléspectateur. * Etudiant notant un cours. * Médecin examinant une radiographie, un électrocardiogramme,... 	<ul style="list-style-type: none"> * Auditeur d'une conférence avec traduction simultanée. * Communication écrite voyants / non voyants : traduction automatique en braille /13/. * Dispositifs d'aide aux malentendants /14/.
<u>Explicite</u>	<ul style="list-style-type: none"> * Dialogue. * Débat. 	<ul style="list-style-type: none"> * Débat via un interprète. * Communication via les dispositifs d'aide aux handicapés (non voyants, malentendants, muets).

Figure 1.2. : Coopération Source - Destination.

2.4. Schémas fonctionnels de base

Les schémas de la figure 1.3. donnent une synthèse des principaux modes de communication envisagés précédemment, dans le cas d'une coopération explicite entre les deux interlocuteurs*.

L'illustration 1.3.a. correspond à une communication directe :

- ①. I1 et I2 sont les deux interlocuteurs
- ②. R1 et R2 constituent les ensembles de connaissances et de règles connus de I1 et I2 respectivement.

Dans ces conditions, $R1 \cap R2$ est l'ensemble des connaissances et des règles communes, auquel se réfèrent I1 et I2 pour communiquer entre eux. Il est clair que si $R1 \cap R2$ est vide, I1 et I2 ne peuvent pas communiquer directement. Au contraire, la communication est d'autant plus efficace que $R1 \cap R2$ est important.

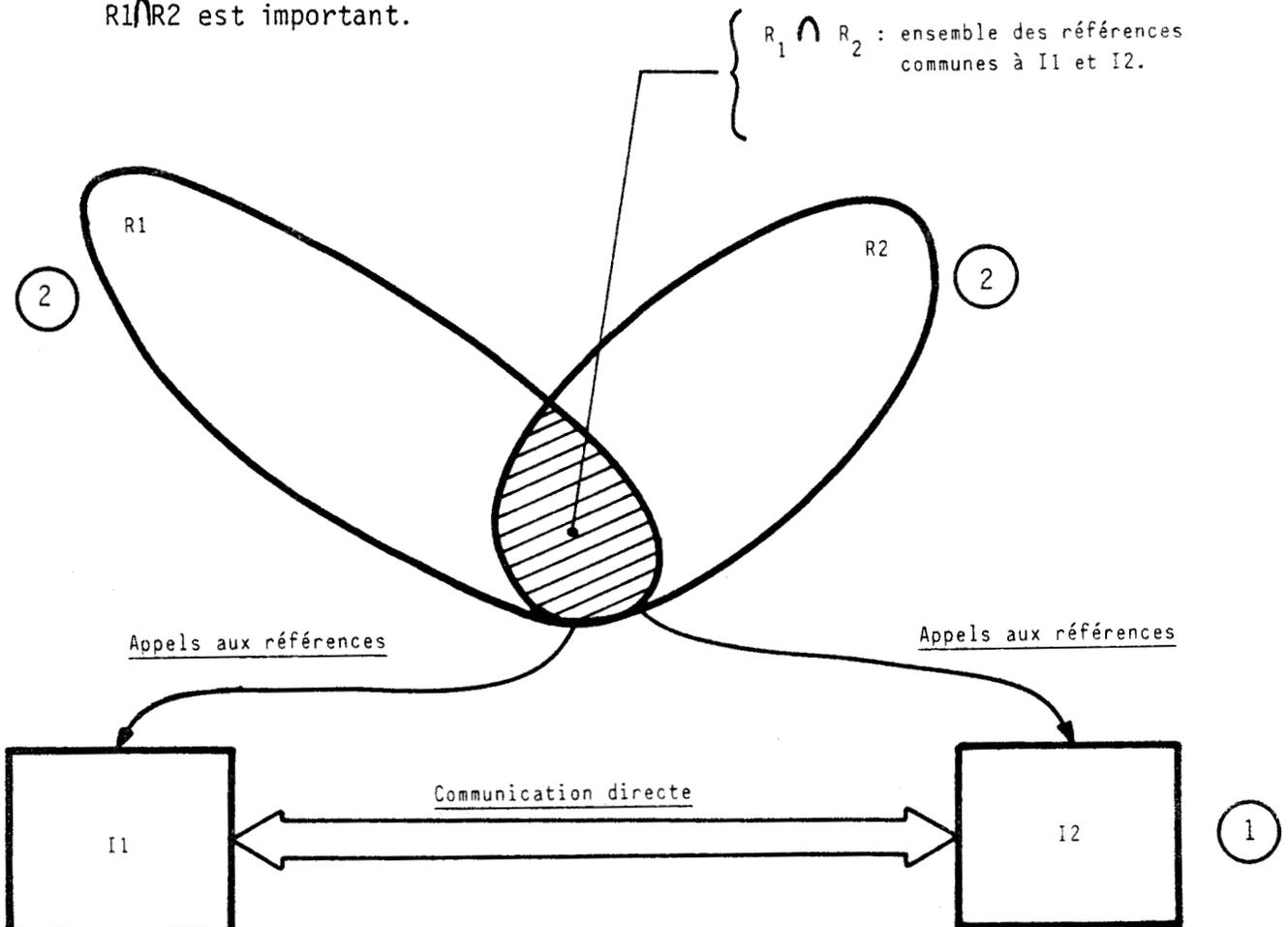


Figure 1.3.a. : Communication directe explicite.

* Sur ces schémas, les rectangles représentent des éléments physiques ou matériels (individus ou processus), tandis que les ovales représentent des éléments abstraits (concepts, connaissances, règles syntaxiques, etc...)

L'illustration 1.3.b. correspond à une communication indirecte. En plus des éléments précédents, on y voit apparaître :

- ③. P qui est le partenaire chargé d'établir la communication entre I1 et I2.
- ④. R qui constitue l'ensemble des connaissances et des règles connues de P.

Dans ce cas, la communication entre I1 et I2 est le résultat des communications de P avec I1 et I2 respectivement. Cela suppose évidemment que les intersections $R \cap R1$ et $R \cap R2$ ne soient pas vides.

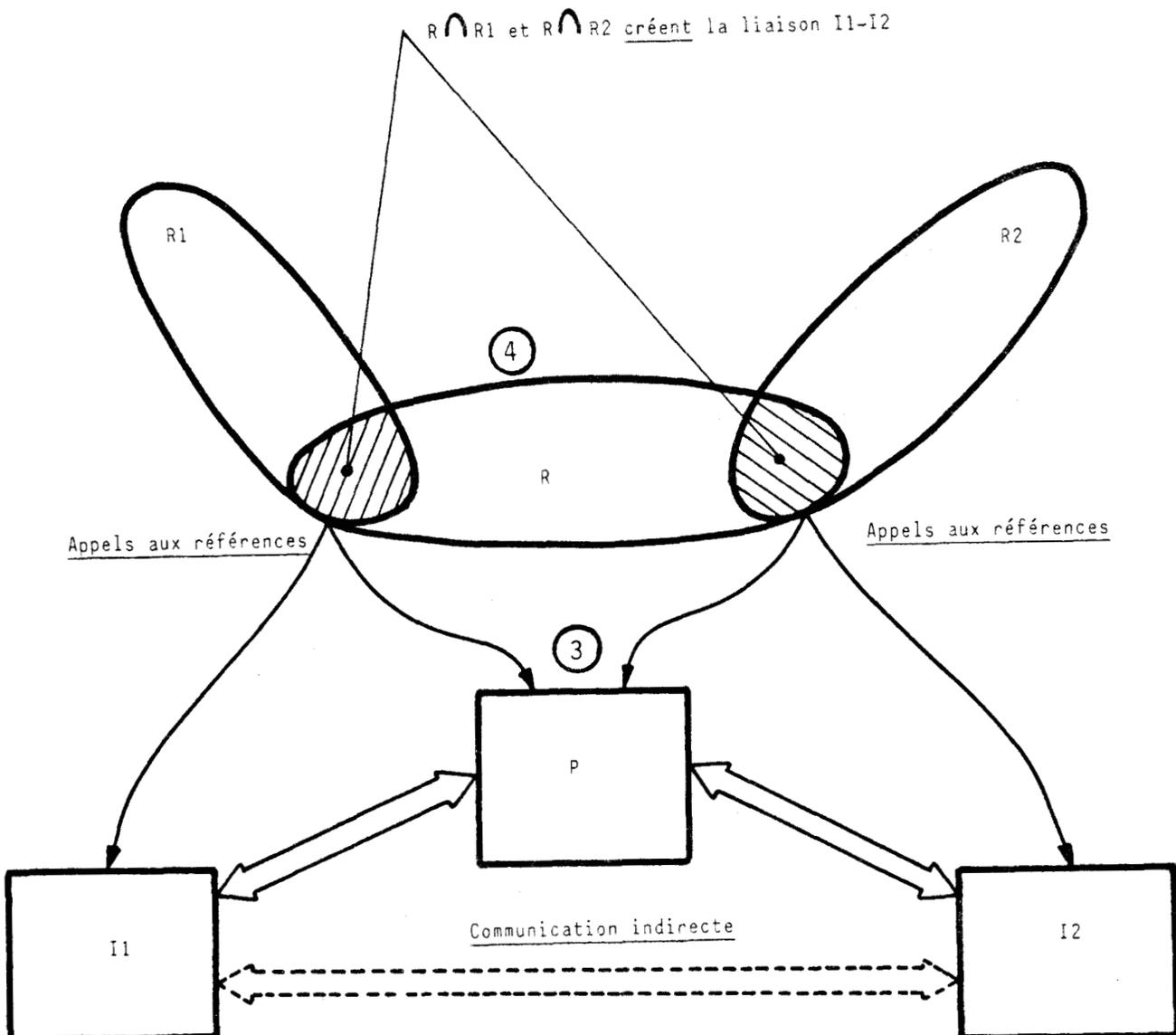


Figure 1.3.b. : Communication indirecte explicite.

. REMARQUE 1 : La figure 1.3.b. illustre une situation où l'intersection $R1 \cap R2$ est vide. Dans ce cas P crée complètement la liaison I1-I2 et joue donc un rôle de professeur.

Dans le cas où $R1 \cap R2$ n'est pas vide (figure 1.3.c.) P est chargé d'améliorer l'efficacité de la liaison I1-I2. Son rôle est alors celui d'un moniteur.

. REMARQUE 2 : Le cas de la communication implicite s'illustre de manière analogue, d'une part en dédiant à l'un des interlocuteurs une fonction de source et à l'autre une fonction de destination, et d'autre part en substituant aux flèches de communication bidirectionnelles, apparaissant sur les schémas, des flèches unidirectionnelles.

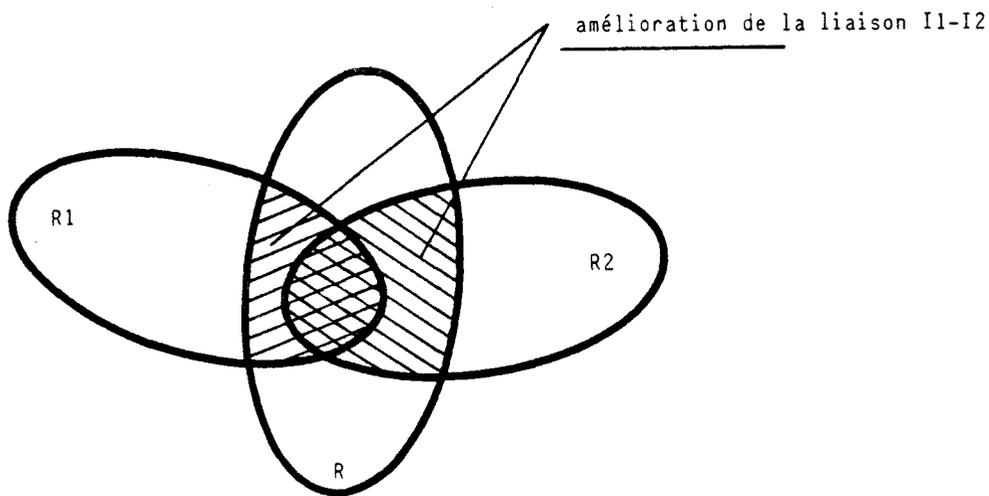


Figure 1.3.c. : Cas où $R1 \cap R2 \neq \emptyset$ (Communication indirecte).

2.5. Caractère discret de la communication

Bien que les manifestations physiques extérieures de la communication présentent très souvent un caractère continu (signal vocal, signaux électriques, signaux acoustiques,...) il semble bien que, fondamentalement, la communication soit un processus de type discret. Ainsi en est-il

de la structuration d'un message en primitives telles que lettres, mots séparés d'un espace, phrases ponctuées, paragraphes, etc....

Cette opération qui consiste à associer à un signal continu (par exemple le signal vocal) une suite de primitives, peut être regardée comme une extension de l'opération d'échantillonnage temporel utilisée en traitement numérique du signal analogique.

La figure 1.4. illustre le parallèle effectué entre les deux opérations :

- dans le cas de l'échantillonnage temporel (figure 1.4.a.), on associe à chaque instant d'échantillonnage la mesure de la grandeur analogique représentée par le signal. Par ailleurs, la fréquence des instants d'échantillonnage est définie par une horloge externe asynchrone du signal et non nécessairement périodique.

- la décomposition en primitives (figure 1.4.b.) associe à certaines portions de signal, le résultat d'une classification. Les portions ainsi étiquetées constituent des primitives dont la succession peut réaliser un message analysable sous divers aspects : syntaxe, sémantique, etc... Dans ce cas, on substitue à l'opération de mesure, l'opération d'analyse qui se décompose, comme en chimie, en une phase d'acquisition d'informations suivie d'une phase finale de classification. D'autre part, le marquage des instants d'échantillonnage est ici remplacé par l'identification - détection des portions de signal porteuses de primitives. Cette détection est donc par essence une opération synchrone du signal.

L'analyse syntaxique est un outil particulièrement bien adapté à l'étude de l'enchaînement des primitives. Dans ce sens, elle constitue une méthode privilégiée d'étude de la parole ou de l'écriture. Toutefois, l'utilisation de primitives ne permet pas toujours de rendre compte simplement de certains aspects fondamentaux du traitement des signaux temporels, tels que durées, rythmes, variations, etc....

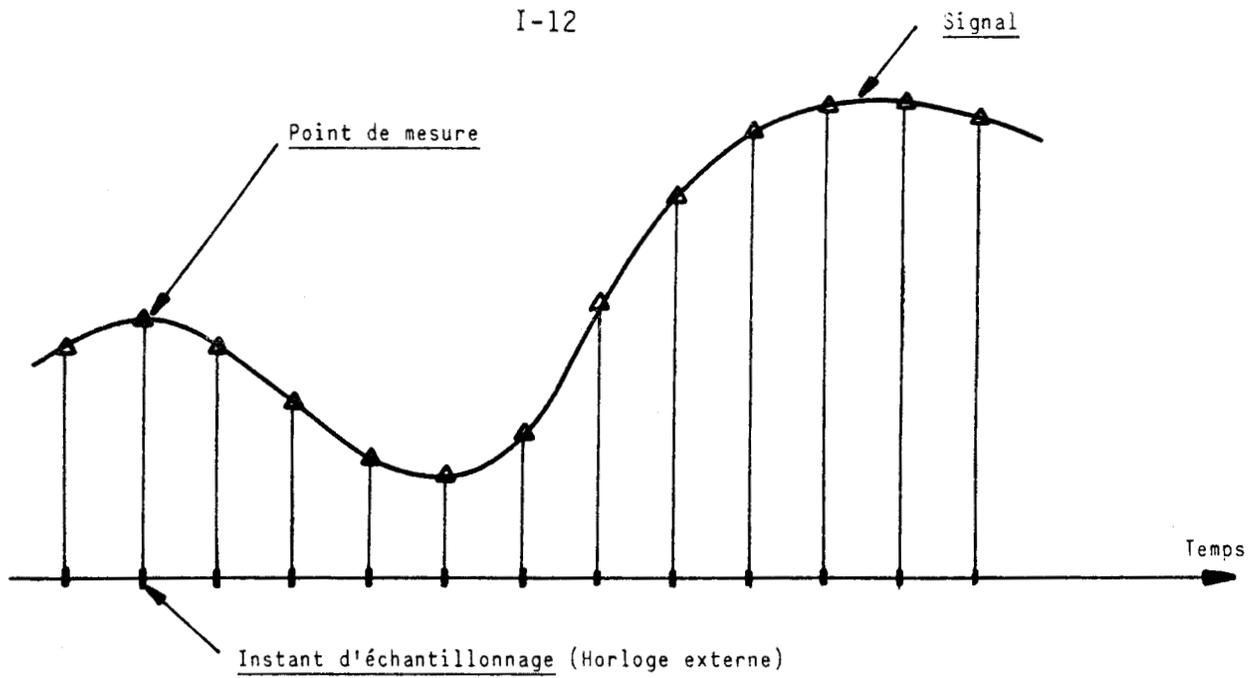


Figure 1.4.a. : Echantillonnage.

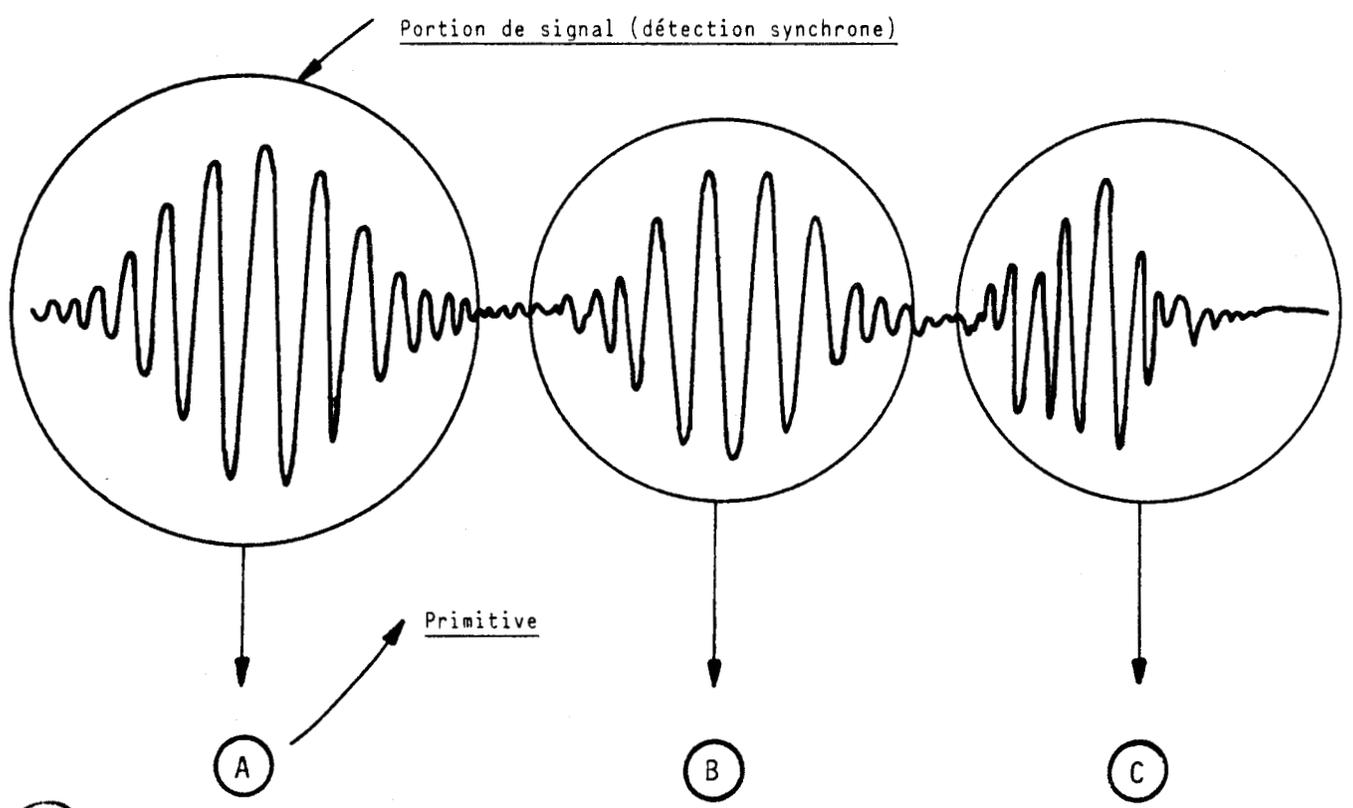


Figure 1.4.b. : Décomposition en primitives.



L'intégration de ces composantes se fera en substituant à la notion de primitive, la notion d'événement définie et analysée au chapitre 2.

3 - OBSERVATION DES PROCESSUS :

3.1. Introduction

En prolongement de l'analyse précédente, qui se réfère essentiellement à la communication humaine, nous abordons maintenant le problème de l'observation des processus physiques. Pour cela, la démarche envisagée s'appuie sur les points suivants (cf. figure 1.5.) :

- le fonctionnement du processus se traduit par un ensemble de manifestations extérieures telles que bruits, déplacements, tensions électriques, pressions, températures, etc....
- ces manifestations extérieures constituent autant de messages permettant à l'observateur* d'entrer en communication avec le processus.
- l'objectif est de développer les méthodes et les moyens permettant d'améliorer la communication entre le processus et l'observateur.

Une telle démarche, qui vise à la conception d'une instrumentation dite "intelligente", ajoute à la notion de perception (capteurs) la notion d'aide à la communication et à la compréhension. Dans ce sens, l'instrument n'est plus seulement l'objet qui permet à l'homme d'appréhender son environnement, mais il devient un outil d'aide à la réflexion et à la décision.

* On désigne par "observateur" soit un individu, soit un instrument.

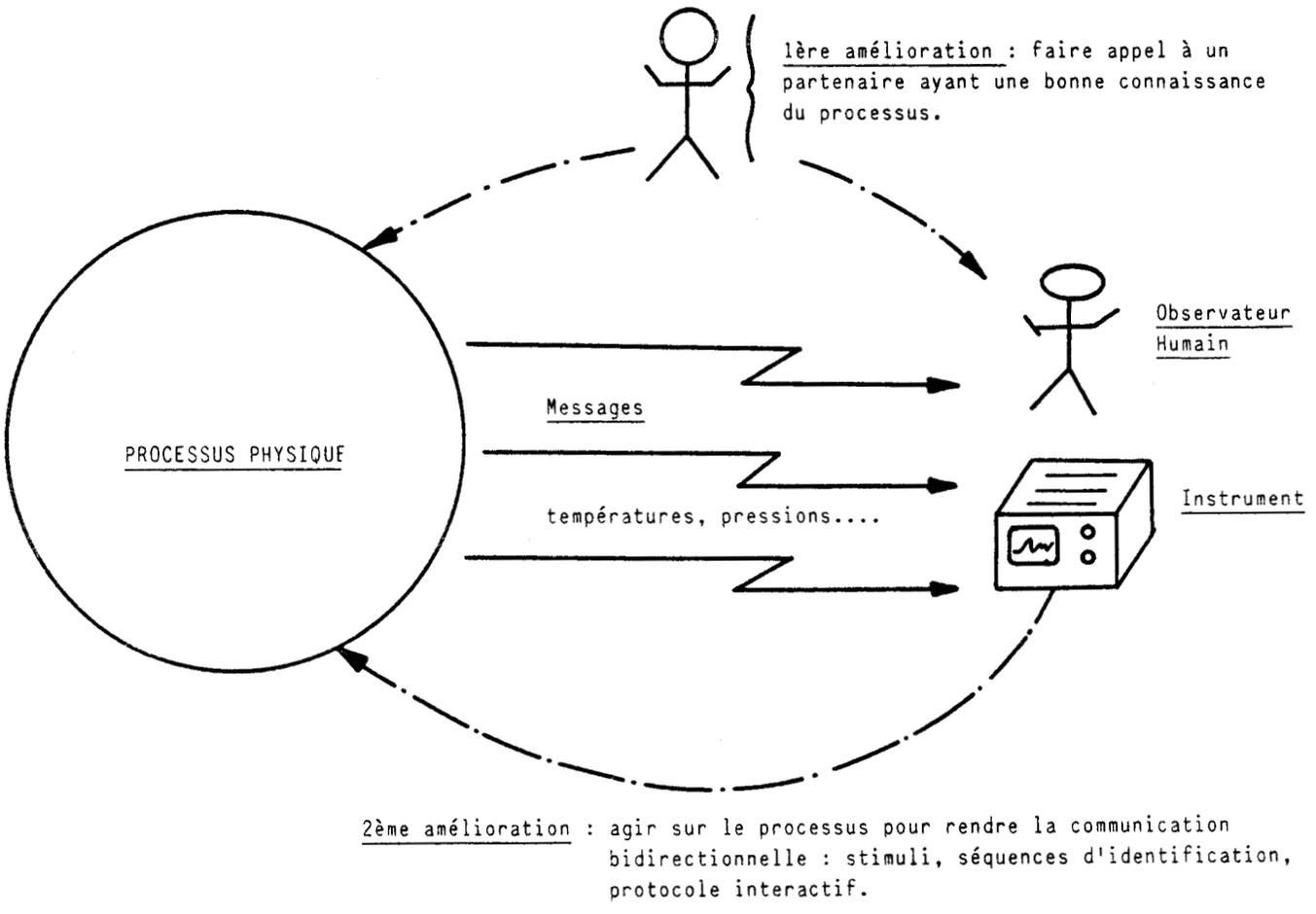


Figure 1.5. : La communication processus - observateur.



Il existe alors deux directions d'investigation dans lesquelles il semble intéressant de s'engager pour améliorer la communication processus - observateur (cf. figure 1.5.) :

- la première est indiquée par le fait qu'a priori le processus physique observé ne coopère pas avec l'observateur. On se trouve donc ici dans le cas où l'apport d'un partenaire extérieur (moniteur ou professeur ayant une bonne connaissance du processus) paraît essentiel à l'amélioration de la communication.
- la seconde direction est indiquée par le fait qu'a priori la communication est unidirectionnelle, le processus étant la source et l'observateur la destination. Dans ce cas, l'amélioration consiste à favoriser les échanges bidirectionnels. Pour cela, on autorise l'observateur à agir sur le processus par stimuli, séquences d'identification, protocole interactif, etc...

Compte-tenu de ce qui précède, nous tentons d'établir, dans la suite, une classification des moyens à mettre en oeuvre pour améliorer la communication processus - observateur. Cette classification vise à mettre en évidence la gradation existant entre l'observation en perception et l'observation en compréhension.

3.2. Observation en perception

Elle est réalisée à partir d'une structure de communication élémentaire dont les éléments sont illustrés figure 1.6.

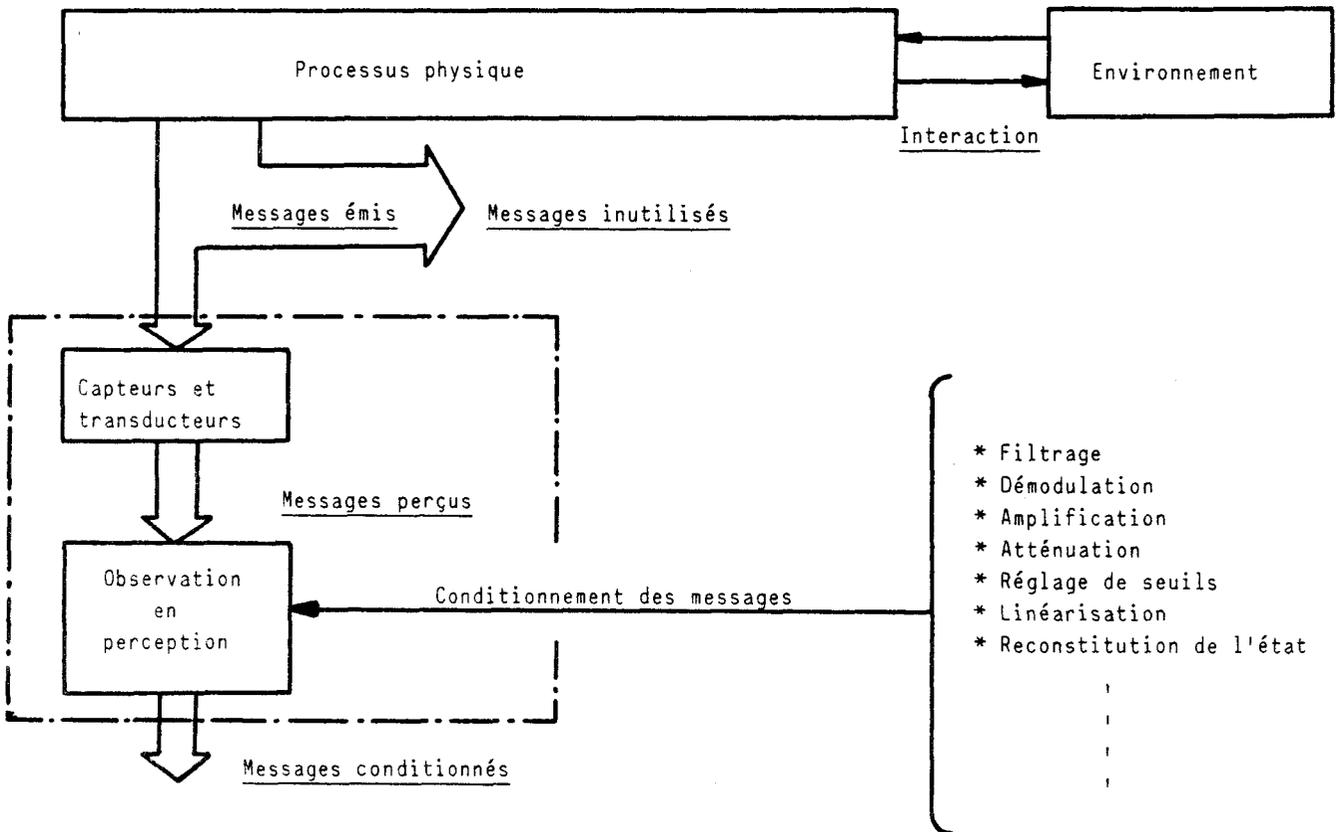


Figure 1.6. Observation en perception.

Ce dispositif constitue tout simplement un filtre connecté au processus par l'intermédiaire de capteurs ou de transducteurs chargés de recueillir une partie des messages émis. La fonction de l'observateur en perception est alors essentiellement une fonction de conditionnement des messages utilisés. Les outils du conditionnement sont multiples et englobent la plupart des méthodes de traitement du signal /15-30/ :

- Filtrage (KALMAN, WIENER, moindres carrés...).
- Modulation - Démodulation.
- Amplification - Atténuation.
- Seuils.
- Linéarisation.
- Reconstitution de l'état, théorie des observateurs (LUENBERGER, KALMAN,...)

3.3. Représentation et Interprétation

Le conditionnement résultant de l'observation en perception permet d'obtenir une représentation acceptable des messages perçus. C'est ce que réalisent la plupart des appareils de visualisation - contrôle tels que dérouleurs graphiques, moniteurs cathodiques, cadrans analogiques ou numériques, etc...

Toutefois, à partir de la perception, l'accès à la compréhension des messages est souvent facilité en passant de l'espace de représentation à un espace d'interprétation. Ce passage, illustré figure 1.7. est obtenu à partir de diverses transformations mathématiques /31-35/ :

- Transformations fréquentielles (FOURIER, WALSH).
- Analyse de structure et extraction des paramètres caractéristiques d'un signal : pentes, points de cassure, rythmes,...
- Changements d'axes et recherche des projections principales.

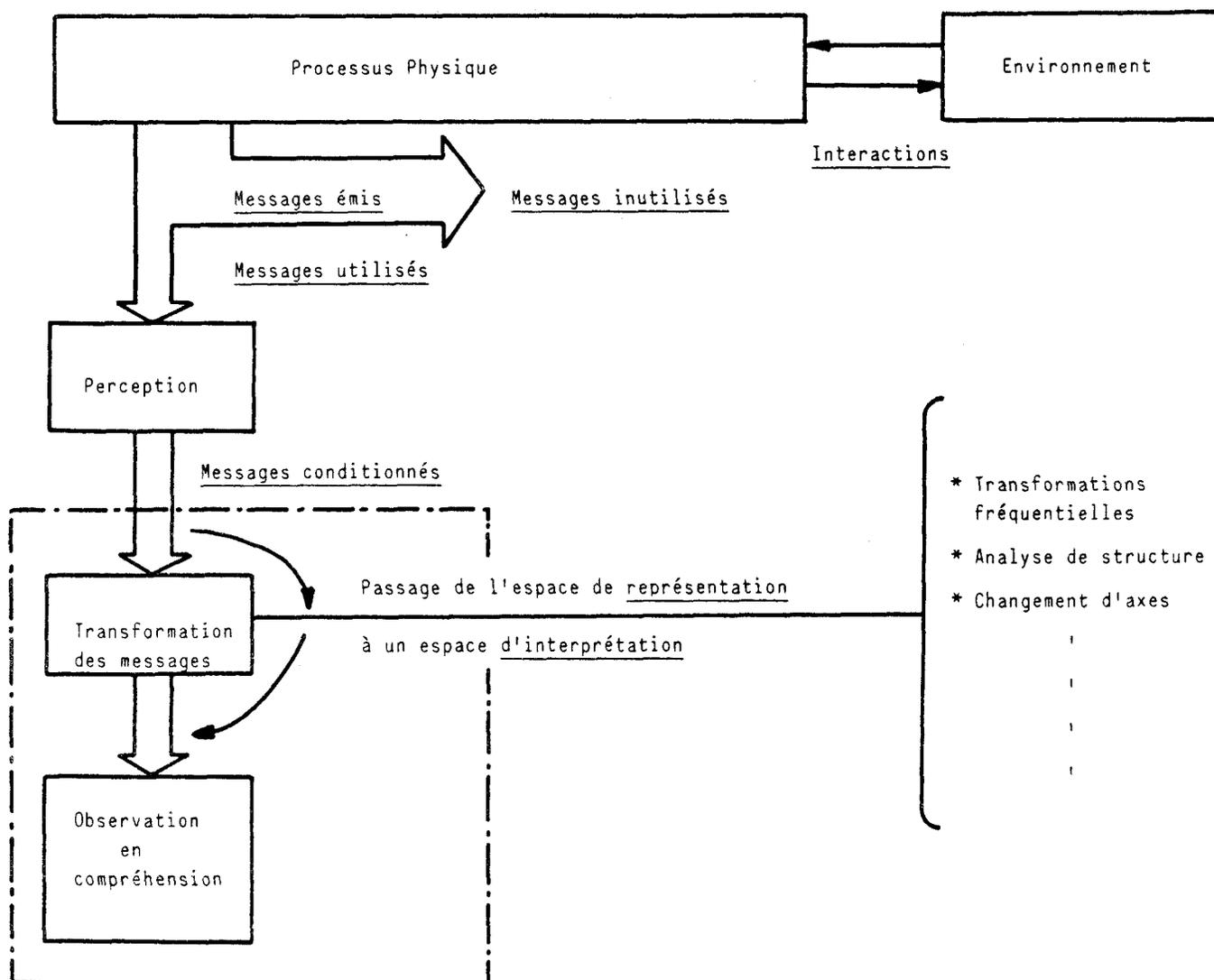


Figure 1.7. Représentation et Interprétation.

Le passage à un espace d'interprétation constitue une première forme d'introduction de la sémantique dans la procédure d'observation.

A titre d'illustration, considérons le tracé de la figure 1.8. et supposons, dans un premier temps, qu'il s'agisse d'un électroencéphalogramme (E.E.G.).

On sait que ce signal est caractérisé par un certain nombre de formes d'ondes (α , δ_1 , δ_2 , θ) correspondant à des fourchettes de fréquences bien définies et recensées par les médecins. Un tel contexte sémantique (concept d'E.E.G., importance des fréquences) suggère clairement de passer dans un espace fréquentiel (FOURIER, WALSH,...) pour procéder à l'interprétation de l'E.E.G.

Supposons maintenant que ce signal soit la tension de sortie ajustée à zéro d'un composant électronique. Cette sortie est normalement bruitée et l'on désire analyser l'occurrence des pics de tension supérieures à $100 \mu\text{V}$. Dans ce cas, le signal, qui a strictement le même contenu fréquentiel que l'E.E.G. précédent, sera interprété à partir d'une transformation mettant en jeu des seuils de détection de pics. Le contexte sémantique est donc différent (concept de bruit, importance des pics), alors que la représentation est restée invariante.

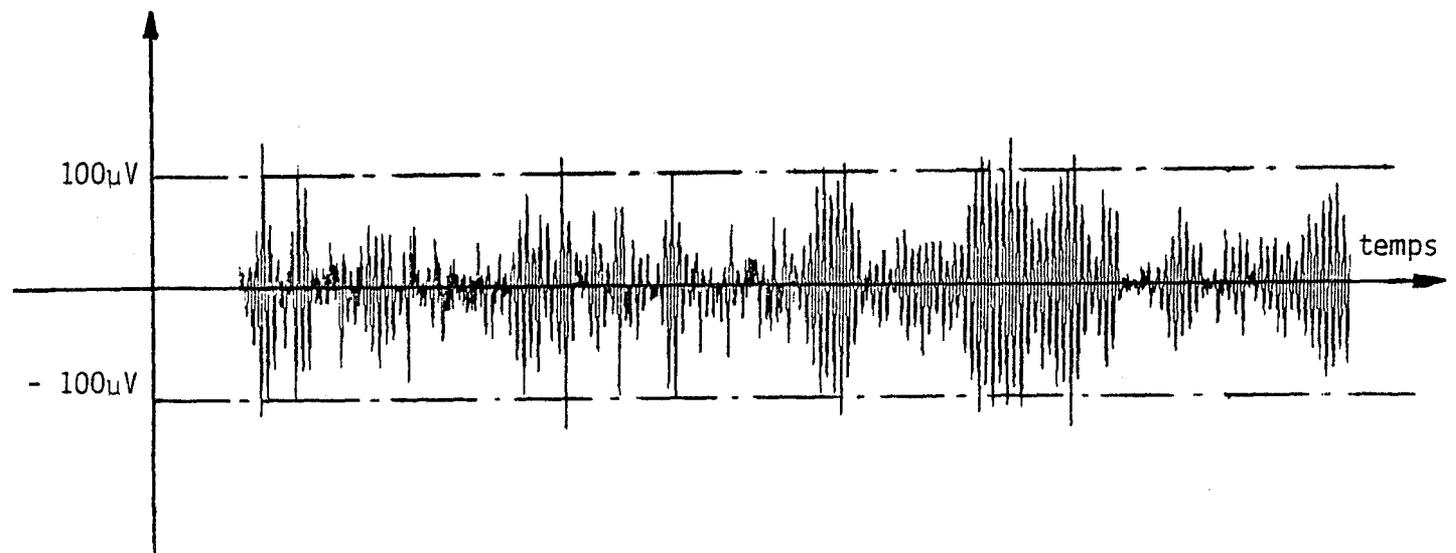


Figure 1.8. E.E.G. ou tension de sortie.

Le couplage représentation - interprétation, dont on trouvera une analyse détaillée en /36/ constitue en fait le réel générateur de ce que l'on peut véritablement appeler l'information. Par ailleurs il décrit une structure récursive dans la mesure où un niveau d'interprétation peut lui-même devenir un niveau de représentation et ainsi de suite... C'est le cas des pixels d'une image dont les regroupements mettent en évidence des lettres donnant elles-mêmes des mots, puis des phrases etc...

. REMARQUE : Dans sa démarche intellectuelle l'Homme procède également à cet "empilage" de divers niveaux de représentation et d'interprétation. Toutefois, dans ce cas, les niveaux sont de surcroît couplés bilatéralement, par rebouclages. Il est clair qu'une telle structuration augmente encore les performances de reconnaissance et d'interprétation.

3.4. Observation en compréhension : apprentissage.

Nous avons vu que l'apport sémantique permettant l'amélioration de la communication processus - observateur est obtenu en faisant appel à un partenaire. Le rôle de ce partenaire ou professeur est alors de transmettre sa propre connaissance du processus à l'observateur, cette transmission mettant elle-même en jeu diverses procédures d'apprentissage.

De ce fait, le fonctionnement d'une machine ou d'un instrument doit nécessairement intégrer une phase d'apprentissage. Celle-ci se traduit, le plus souvent, par une mémorisation des "connaissances", soit sous forme analogique (enregistrements), soit sous forme numérique (mémoires de microprocesseur).

Nous envisageons, dans un premier temps, le cas des instruments dont les connaissances sont figées a priori (apprentissage hors ligne). Les machines à mémorisation évolutive mettant en jeu soit l'apprentissage en ligne, soit un fonctionnement interactif seront décrites par la suite.

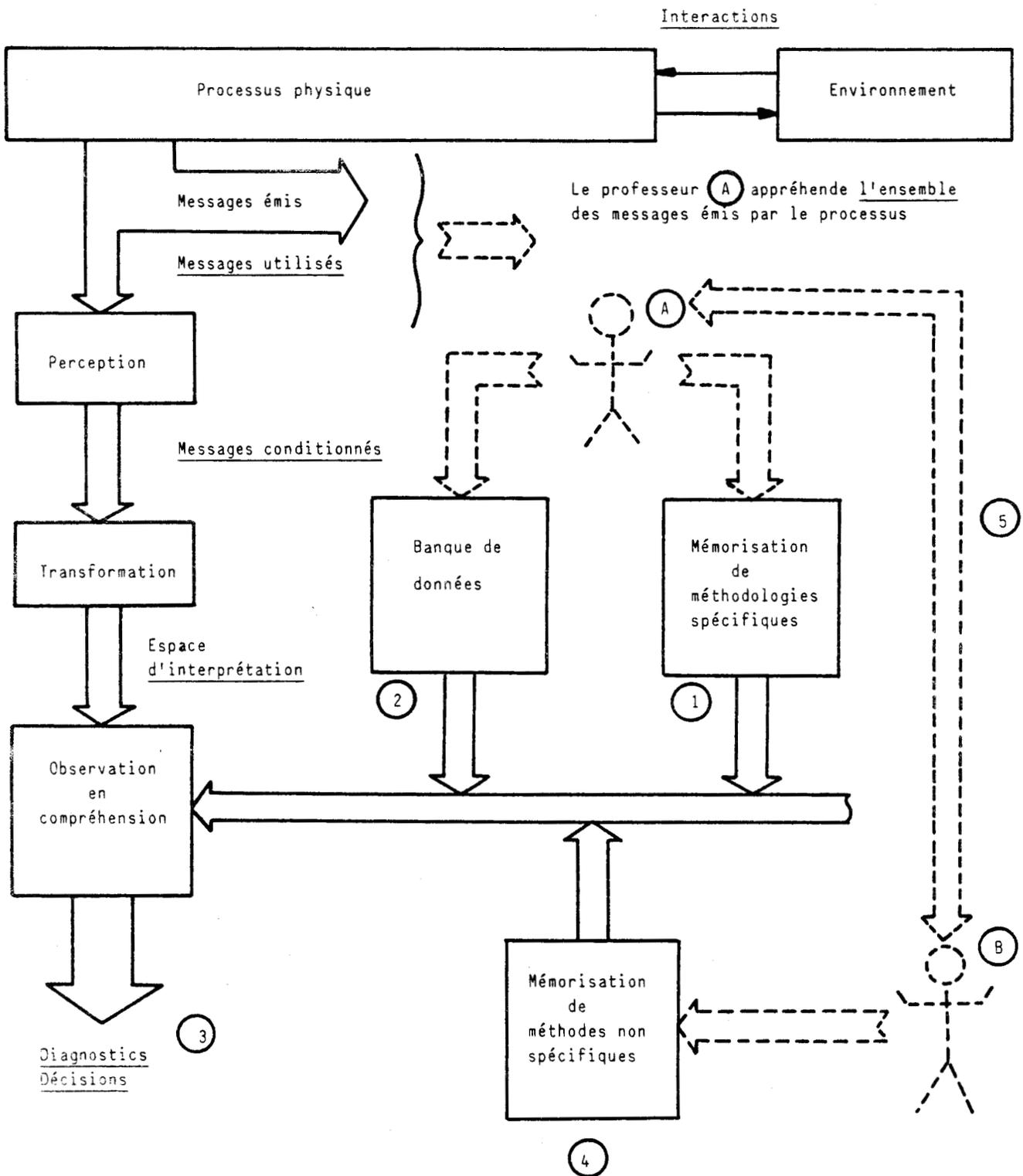
Dans ces conditions, la figure 1.9. donne une description des principaux éléments fonctionnels constituant un instrument d'observation

en compréhension travaillant de manière non interactive. Sur cette figure, les opérations effectuées a priori, c'est-à-dire hors ligne ou en temps différé, sont représentées en pointillé.

- le professeur (A) est chargé d'inscrire dans la mémoire de l'observateur les deux types d'informations notés (1) et (2) sur la figure 1.9.
- le type (1) correspond à la mémorisation des méthodologies de travail (programmes), grâce auxquelles l'observateur sera capable de donner une (ou plusieurs) interprétation(s) aux messages perçus. Ces méthodes sont spécifiques du processus physique et dédiées à lui.
- le type (2) englobe les données et paramètres quantitatifs ou qualitatifs, caractéristiques du processus observé : paramètres d'identification, valeurs standard de paramètres physiologiques, etc... Cet ensemble de mémorisation peut alors constituer une banque de données plus ou moins complexe.
- le résultat de l'interprétation effectuée par l'observateur se traduit par un ensemble de diagnostics et de décisions (3)

. EXEMPLE : Considérons de nouveau l'E.E.G. décrit précédemment. Dans ce cas, le professeur (A) peut-être un neurologue qui demande de mémoriser en (1) des méthodes du type "analyse de la fréquence des ondes". Ceci conduit alors à mémoriser en (2) les valeurs des différentes fourchettes de fréquences associées aux types d'ondes définis par (A) : α , δ_1 , δ_2 , θ .

- l'apprentissage peut être complété par un deuxième professeur (professeur (B)) dont le rôle est de fournir à l'observateur les outils et les méthodes non spécifiques du processus qui permettent de mettre en oeuvre les méthodologies proposées par (A) .



* Les pointillés représentent des opérations effectuées en temps différé.



Figure 1.9. : Observation en compréhension non interactive.

- dans ce cas, l'apprentissage est d'autant meilleur que la communication (5) entre les membres de "l'équipe pédagogique" (professeur (A) - professeur (B)) est bonne.

. EXEMPLE : Pour l'E.E.G., d'après les informations données en (1) par (A) , un professeur (B) analyste du signal peut proposer de mémoriser en (4) diverses méthodes mathématiques à caractère général telles que F F T, F W T, estimation spectrale par prédiction linéaire /37/, etc...

. REMARQUE : Outre l'inscription dans la mémoire de la machine d'un certain ensemble de consignes de travail, on peut envisager l'utilisation d'autres techniques d'apprentissage plus élaborées : apprentissage par déduction, par extrapolation, par essais successifs, par analogie... Il est clair, toutefois, que toutes ces techniques font elles-mêmes appel à la fonction fondamentale de mémorisation.

3.5. Observation en compréhension : interactivité

Nous envisageons maintenant le cas général d'une structure interactive de communication entre le processus physique et l'observateur. Cette structure, illustrée figure 1.10.* , met en jeu, outre les composantes précédemment définies, les deux éléments suivants :

- un opérateur humain (OH) dont le rôle est de fournir en temps réel un complément sémantique à l'observateur. Pour cela (OH) appréhende globalement le processus et son environnement en utilisant des formes de communication dont l'automatisation est parfois impossible : perception des odeurs et des couleurs ou palpation lorsque (OH) se comporte lui-même comme un observateur, ou bien encore stimulation (cas de l'examen clinique d'un patient) lorsque (OH) se comporte comme une source vis à vis du processus physique.

* Afin de ne pas alourdir le schéma de la figure 1.10., les opérations effectuées en temps différé (professeur (A) , professeur (B) , communication (5)) n'y sont plus représentées. Elles ne sont toutefois pas supprimées.

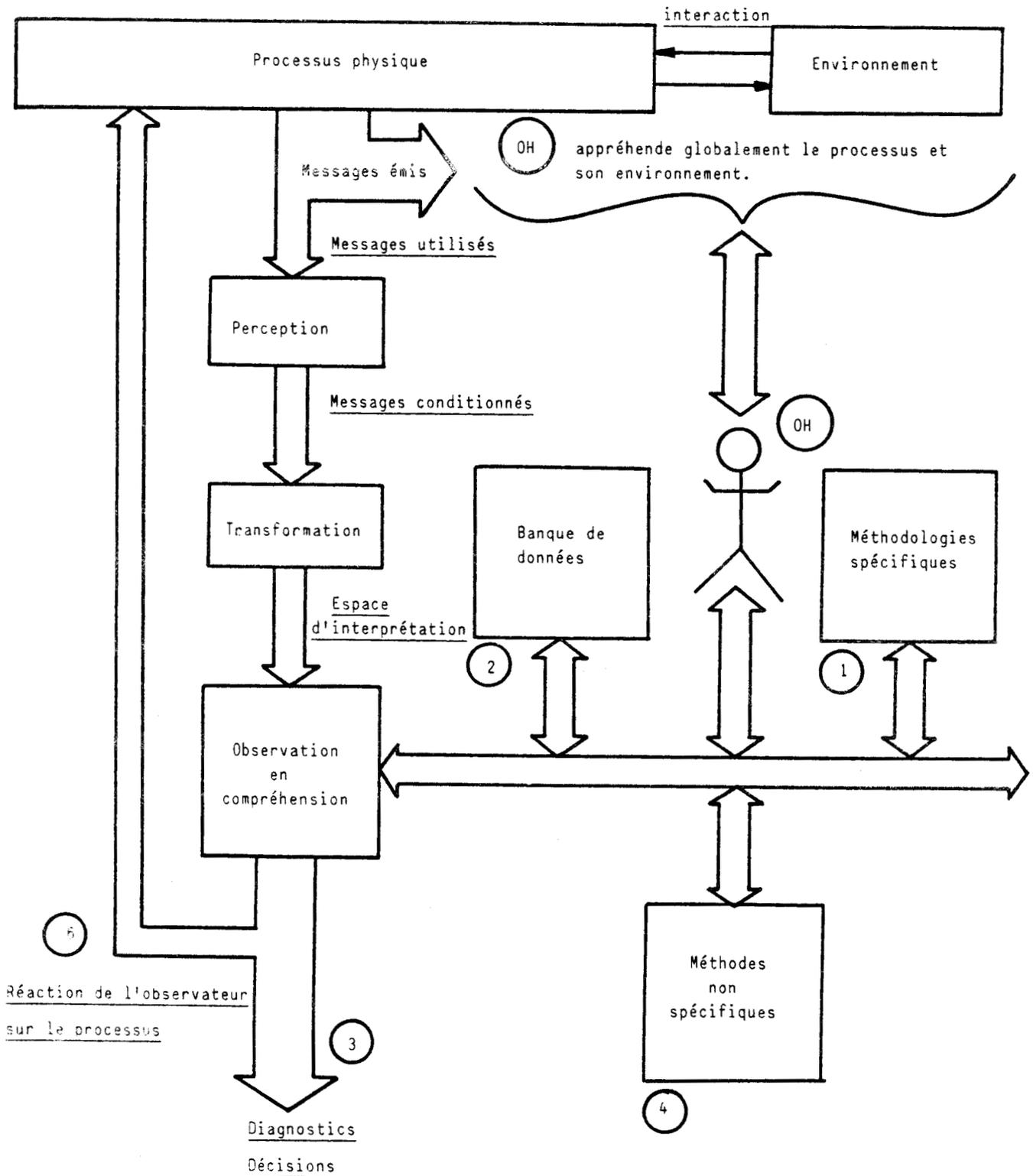


Figure 1.10. : Interactivité.

Le dialogue (OH) - (processus/environnement) s'accompagne alors d'un dialogue (OH) - observateur qui permet de réaliser le complément sémantique améliorant la communication processus - observateur.

Dans ce cas, (OH) se comporte typiquement comme un moniteur (cf. § 2.4., figures 1.3.b. et 1.3.c.) et la procédure réalisée conduit à modifier les contenus de (2) (modifications de paramètres), de (1) ou de (4) (choix de méthodes spécifiques ou non spécifiques).

- le deuxième élément complémentaire de cette structure est le dispositif de réaction (6) permettant à l'observateur de réagir, en temps réel, sur le processus. Ce dernier élément conduit alors à la définition du dispositif d'observation en compréhension totalement interactif schématisé figure 1.11.

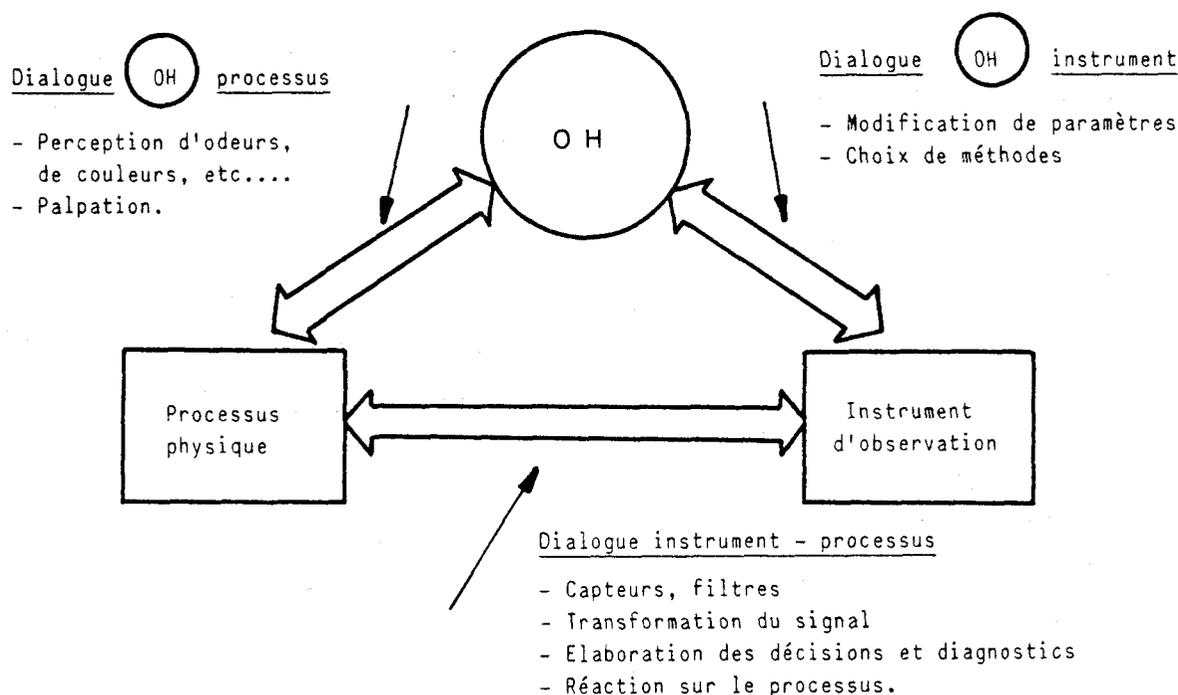


Figure 1.11.

4 - CONCLUSION :

La structure que nous venons d'analyser décrit le fonctionnement d'une instrumentation d'observation (moniteurs médicaux, dispositifs de contrôle,...), dédiée non seulement à la perception des messages émis par le processus, mais aussi et surtout à l'interprétation et à la compréhension de ces messages, le but étant de fournir à l'utilisateur des éléments de diagnostic et de décision.

La réalisation d'un tel objectif suggère alors au concepteur d'assigner à l'instrument d'observation trois fonctions fondamentales dont le rôle est d'améliorer la communication observateur - processus :

- apprentissage,
- interactivité,
- décision.

Ce mémoire tente d'apporter une réponse au problème de la réalisation de ces fonctions. Pour cela, deux aspects seront successivement examinés : celui des méthodes puis celui des moyens.

Sur le plan des méthodes, la première partie fournit un outil de description et de caractérisation des phénomènes temporels constituant les messages émis par le processus. La procédure envisagée s'appuie sur la décomposition d'un signal en une succession d'événements caractéristiques, dont nous donnons une définition formelle (Chapitre 2). Par ailleurs, la classification de ces événements à des fins de diagnostic et de décision fait l'objet d'un développement particulier où seront envisagés, notamment les problèmes d'apprentissage a priori et d'apprentissage en temps réel (Chapitre 3).

Sur le plan des moyens, il est clair que la structure précédemment décrite s'articule autour de deux éléments fonctionnels caractéristiques des machines informatiques : la mémorisation (apprentissage des données) et le traitement (programmation des méthodes). Dans ce sens, nous examinerons, dans la seconde partie, quelles sont les possibilités

offertes par les structures microinformatisées, pour la mise en oeuvre des méthodes envisagées. Un accent particulier sera alors mis sur l'interactivité et notamment sur le dialogue Opérateur Humain - Instrument (Chapitre 4). Finalement, le Chapitre 5 fournit, à titre d'exemple, des propositions pour la réalisation d'une instrumentation intégrée dédiée à la surveillance des principales fonctions physiologiques de l'Homme.

- PREMIERE PARTIE -

LA NOTION D'ÉVÉNEMENT : RECONNAISSANCE ET
CLASSIFICATION TEMPS RÉEL.

C H A P I T R E 2

LA NOTION D'ÉVÉNEMENT

1 - INTRODUCTION ET EXEMPLE PRELIMINAIRE :

Tout phénomène temporel peut être décrit comme la succession dans le temps d'événements caractéristiques. A titre d'exemple, l'électrocardiogramme de la figure 2.1. peut être interprété comme la succession d'ondes pseudopériodiques représentant chacune un événement "cycle cardiaque". Chaque événement est alors caractérisé par un certain nombre de paramètres et de mesures effectuées sur ces paramètres /1/. Dans l'exemple cité précédemment les paramètres les plus couramment utilisés sont les durées et amplitudes des ondes P, Q R S et T.

De la même manière, on peut considérer tout événement donné comme un assemblage d'événements plus élémentaires. Ainsi, si l'on désire traiter l'électrocardiogramme précédent sur calculateur numérique, on procède à une conversion analogique-digital à la fréquence d'échantillonnage f_e et l'événement "cycle cardiaque" apparaît alors comme un assemblage d'événements "périodes d'échantillonnage" caractérisés chacun par l'amplitude de l'E C G au moment de l'échantillonnage. Dans ce cas les règles d'assemblage s'énoncent :

- reconnaître les débuts d'ondes P sur l'E C G,
- un cycle cardiaque est l'assemblage séquentiel des échantillons contenus entre deux débuts d'ondes P successives.

En sens inverse, il est possible d'imaginer une règle d'assemblage pour les événements "cycles cardiaques" et de définir ainsi une succession d'événements "états cardiaques" (rythme normal, tachycardie, bradycardie,...). La règle d'assemblage revient simplement à comparer le rythme cardiaque à des seuils standardisés : plus de 100 battements par minute pour la tachycardie et moins de 50 par minute pour la bradycardie.

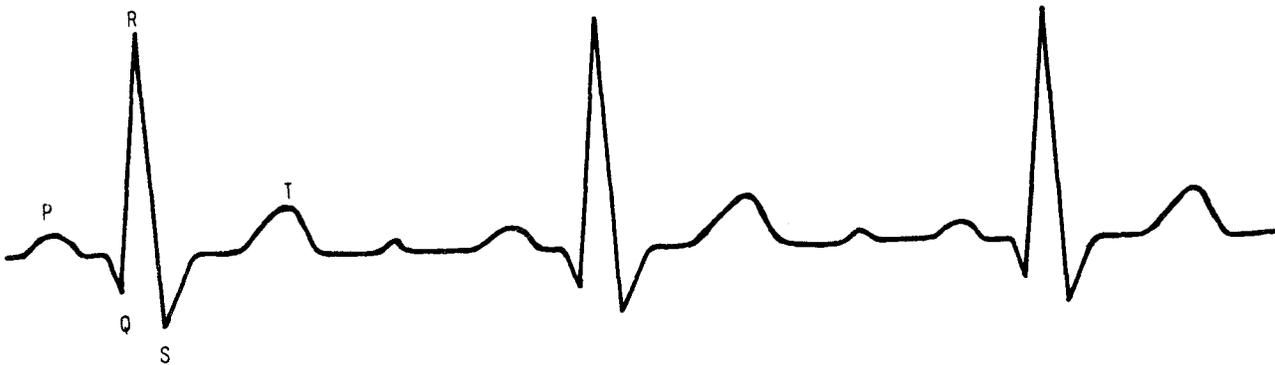


Figure 2.1. : l'E C G.

Ainsi, et selon l'analyse du chapitre précédent, il apparaît que l'observation d'un phénomène peut se situer à divers niveaux d'interprétation. Chaque niveau est caractérisé par un type d'événements dont l'assemblage permet d'accéder à un niveau d'interprétation supérieur.

Dans une telle démarche, la vision du phénomène est d'autant plus synthétique qu'elle se situe à un haut niveau d'interprétation. De même, la durée des événements observés est d'autant plus longue que l'on se situe à un haut niveau d'observation.

Le concept d'événement peut évidemment être rapproché de celui de primitive utilisé en analyse syntaxique. Par contre, il présente l'intérêt de sous tendre un ensemble de notions complémentaires indispensables à l'analyse des phénomènes temporels : durée, rythmes, répétitions, variations, etc...

Nous tenterons, dans ce chapitre, de préciser et de formaliser toutes les notions s'articulant autour de ce concept d'événement.

2 - PRESENTATION FORMELLE :

2.1. Définitions

2.1.1. Datation et chronologie. Le repérage du temps s'effectue normalement par une variable notée t prenant ses valeurs soit dans \mathbb{R} ou \mathbb{R}^+ , dans le cas du repérage analogique, soit dans un ensemble fini ou infini d'instantanés discrets, dans le cas de l'échantillonnage temporel. Ce type de repérage constitue une opération de datation.

On peut alors compléter la notion précédente en associant au repérage des dates (ou instantanés), un ensemble de durées. On aboutit ainsi au concept de chronologie, selon la définition formelle suivante :

. Définition 1 : On appelle chronologie un sous-ensemble de $\mathbb{R} \times \mathbb{R}^+$ noté $K = \{(t,d)\}$, ordonné par rapport à t selon la relation d'ordre \leq .

Pour chaque élément $k = (t,d) \in K$,

- . t est la date de k
- . d est la durée de k .

La figure 2.2. illustre un exemple de chronologie. A noter qu'à chaque date t peuvent correspondre plusieurs durées possibles.

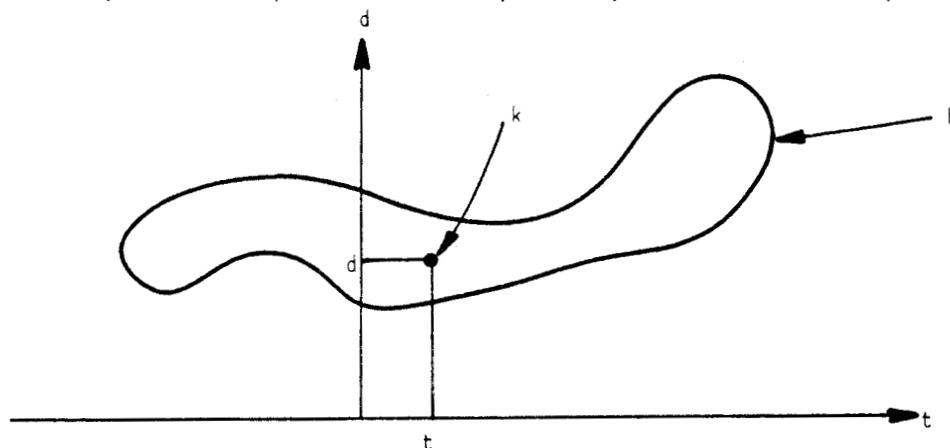


Figure 2.2. : Chronologie.

2.1.2. Ensemble chronologique. Soit $O = \{o\}$ un ensemble défini par les propriétés caractéristiques des objets lui appartenant. Soit, par ailleurs, f une application de O dans K , non nécessairement injective. Dans ces conditions, la définition formelle d'un ensemble chronologique est la suivante :

. Définition 2 : On appelle ensemble chronologique, le sous-ensemble de $O \times K$ constituant le graphe de l'application f . Ce sous-ensemble noté E est formé des triplets (o, t, d) tels que :

$$o \xrightarrow{f} (t, d)$$

La figure 2.3. donne l'illustration d'un ensemble chronologique.

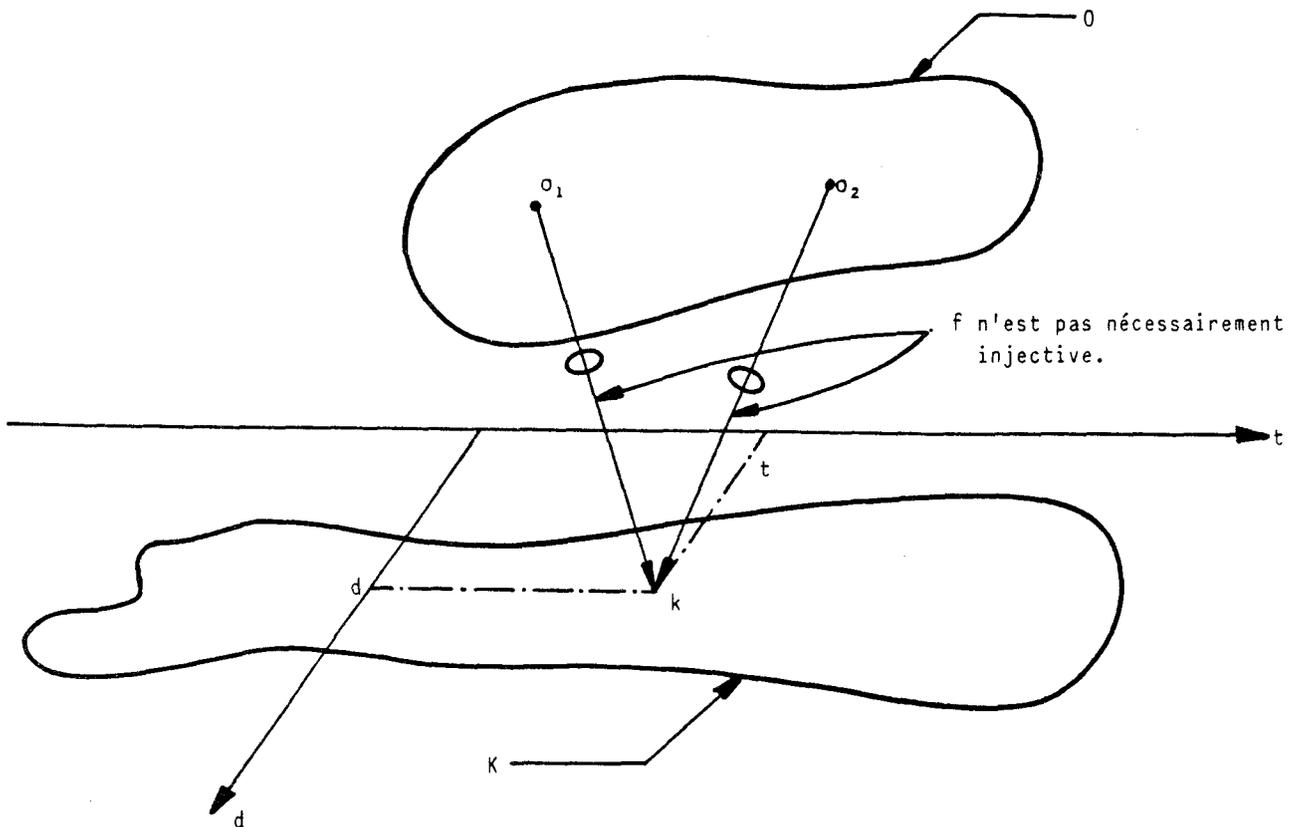


Figure 2.3. : Ensemble chronologique.

. EXEMPLE : L'ensemble de l'humanité constitue un ensemble chronologique dont chaque élément (chaque humain) est affecté d'un couple date-durée : l'instant de la naissance, la durée de la vie.

2.1.3. Événement.

. Définition 3 : On appelle événement tout élément appartenant à l'ensemble E défini précédemment. Un événement est donc un triplet Objet - Date - Durée noté : $e = (o, t, d)$.

2.2. Propriétés temporelles

2.2.1. Propriétés des événements.

Soit $e_1 = (o_1, t_1, d_1)$ et $e_2 = (o_2, t_2, d_2)$ deux événements associés à deux intervalles de temps notés :

$$\Delta\theta_1 = [t_1, t_1 + d_1]$$

$$\Delta\theta_2 = [t_2, t_2 + d_2]$$

Dans ces conditions, on peut énoncer les propriétés suivantes :

- i) e_1 précède e_2 si $t_1 < t_2$
- ii) e_1 et e_2 sont synchronisés si $t_1 = t_2$
- iii) e_1 et e_2 sont simultanés si $t_1 = t_2$ et $d_1 = d_2$
- iv) e_1 et e_2 sont adjacents : si $t_2 = t_1 + d_1$
ou si $t_1 = t_2 + d_2$
- v) e_1 et e_2 sont disjoints si $\Delta\theta_1 \cap \Delta\theta_2 = \emptyset$

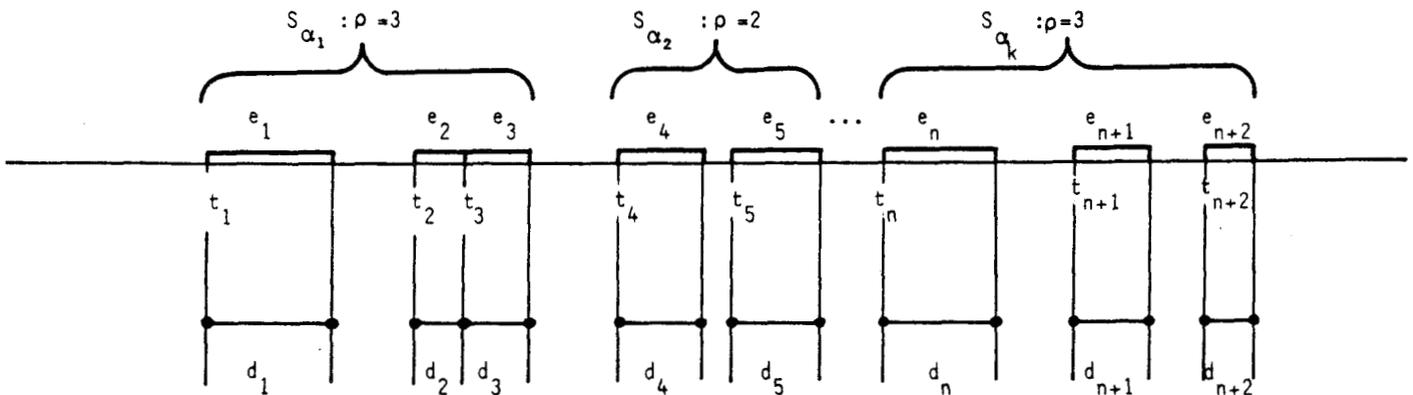
2.2.2. Chaîne chronologique.

. Définition 4 : Tout ensemble chronologique pour lequel deux événements quelconques pris deux à deux sont soit adjacents, soit disjoints est appelé chaîne chronologique.

Une chaîne chronologique s'identifie donc à une succession d'événements vérifiant chacun un ensemble de propriétés caractéristiques.

2.3. Assemblages d'événements et situations

2.3.1. Notion de situation. L'ensemble des événements constituant une chaîne chronologique peut être partitionné en un nombre fini de classes. Pour cela, il suffit d'appliquer à cet ensemble une procédure de classification appropriée permettant d'affecter chaque événement de la chaîne chronologique considérée à une classe de la partition.



- . e_1, e_2 et e_3 appartiennent à la même situation S_{α_1} : répétitivité $\rho = 3$.
- . on peut avoir $S_{\alpha_k} = S_{\alpha_1}$: la chaîne peut traverser plusieurs fois une même situation.

Figure 2.4. : La chaîne chronologique.

. Définition 5 : Chaque classe de la partition précédemment définie s'appelle une situation. On désigne chaque situation par $S_i, (i = 1, L)$, notation dans laquelle L représente le nombre de situations possibles dans la chaîne chronologique considérée.

2.3.2. Répétitivité.

. Définition 6 : Soit une chaîne chronologique pour laquelle ρ événements successifs $\{e_{n+k}, k = 1, \rho\}$ appartiennent à une même situation S_i . On dit alors que, pour les événements considérés, la chaîne chronologique se trouve dans la situation S_i avec une répétitivité ρ .

Cette dernière notion complète les notions précédentes dans le but de définir, dans la suite de ce chapitre, une méthodologie d'analyse quantitative des chaînes chronologiques. La figure 2.4. donne un récapitulatif illustré des notions introduites précédemment :

- *chronologie,*
- *événement,*
- *chaîne chronologique (événements disjoints ou adjacents),*
- *situation,*
- *répétitivité.*

2.4. Exemples

Avant d'aborder le problème de la caractérisation des chaînes chronologiques et des séquences de situations, nous donnons, ci-après, deux exemples illustrant la présentation formelle effectuée en ce début de chapitre.

Le premier exemple correspond à l'illustration de la figure 2.5. Elle représente une sinusoïde d'équation $y = A \sin \omega t$ dont la période est notée $T = \frac{2\pi}{\omega}$. Cette sinusoïde fournit une information analogique dont le traitement sur calculateur numérique nécessiterait une conversion analogique-digital à la période T_e appelée période d'échantillonnage /2/.

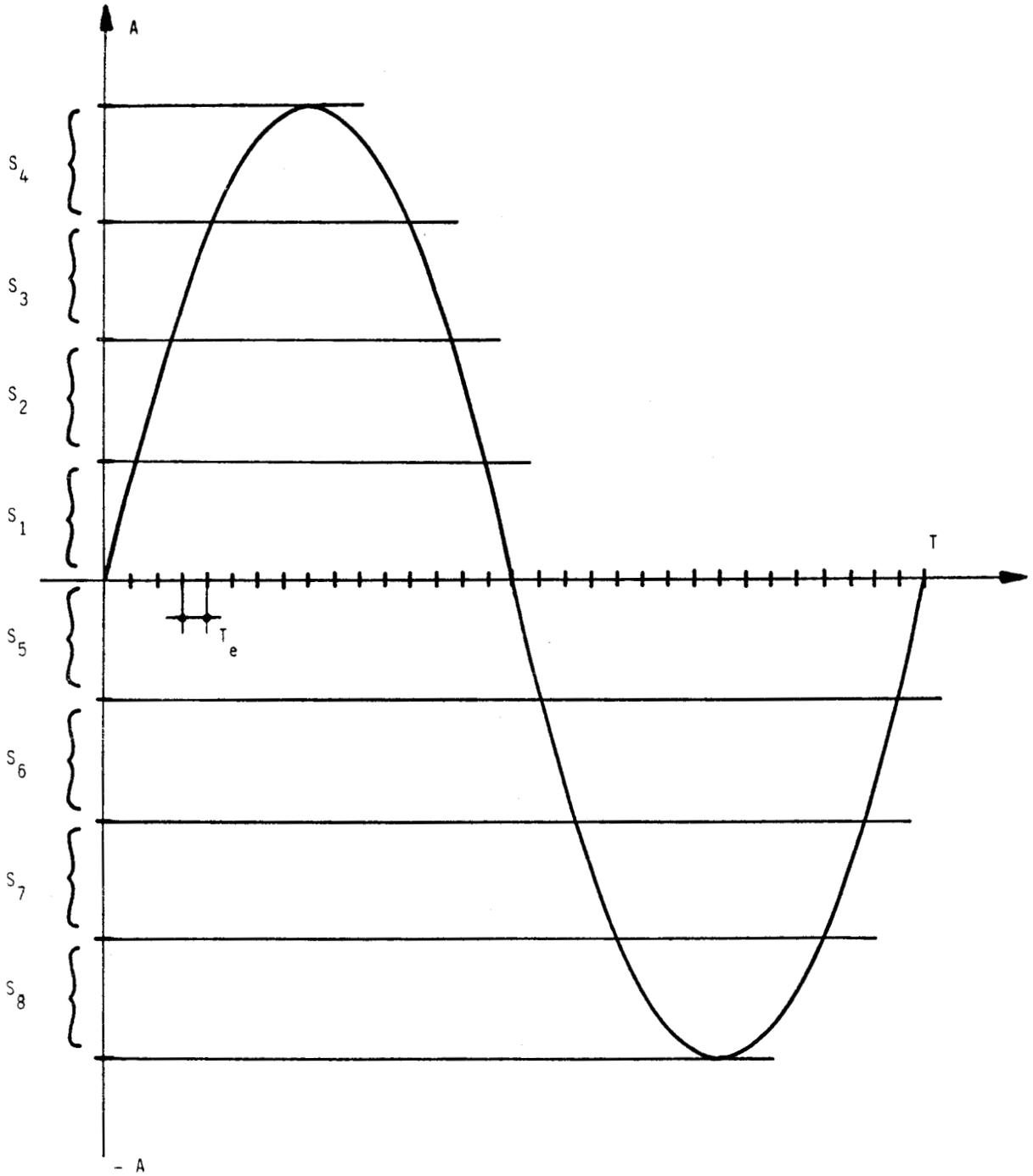


Figure 2.5.



Pour la commodité de l'exemple, on choisit $T_e = \frac{T}{32}$, cette valeur respectant bien évidemment les conditions du théorème de Shannon /3/ : $T_e \leq \frac{T}{2}$. Cette première démarche revient alors à définir une chaîne chronologique caractérisée par une succession d'événements s'identifiant chacun à une prise d'échantillon.

Supposons maintenant que l'organe de numérisation utilisé permette de détecter huit fourchettes de largeurs identiques pour des valeurs comprises entre $-A$ et $+A$ (figure 2.5.). Cette contrainte supplémentaire conduit à associer aux huit fourchettes huit situations notées S_i ($i = 1,8$) et définies comme suit :

$$S_1 : 0 \leq y < A/4$$

$$S_2 : A/4 \leq y < A/2$$

$$S_3 : A/2 \leq y < 3A/4$$

$$S_4 : 3A/4 \leq y < A$$

$$S_5 : -A/4 \leq y < 0$$

$$S_6 : -A/2 \leq y < -A/4$$

$$S_7 : -3A/4 \leq y < -A/2$$

$$S_8 : -A \leq y < -3A/4.$$

Enfin, pour compléter la description, on associe à chaque situation une répétitivité identifiée ici au nombre d'instantanés d'échantillonnage successifs tombant dans une fourchette donnée. Dans ces conditions, si on note (S_i, ρ) chaque couple "Situation - Répétitivité", un rapide calcul montre qu'une période de sinusöide peut être décrite par la suite :

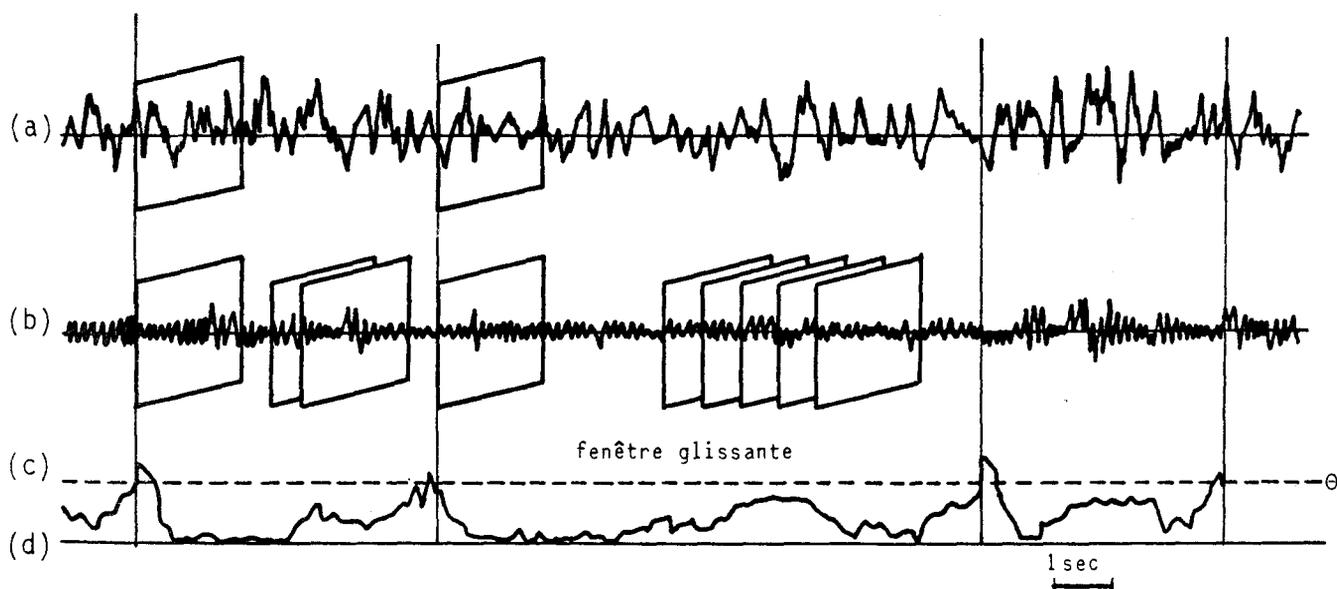
$$(S_1,2), (S_2,1), (S_3,2), (S_4,7), (S_3,2), (S_2,1), (S_1,2) \dots \dots \dots$$

$$(S_5,1), (S_6,1), (S_7,2), (S_8,7), (S_7,2), (S_6,1), (S_5,1).$$

Cet exemple élémentaire montre en fait que la notion d'événement permet, pour les signaux analogiques, d'élargir la notion d'échantillonnage. Cette dernière notion, en effet, s'applique habituellement aux grandeurs temporelles (période d'échantillonnage) alors que les prises d'échantillons (grandeurs spatiales) sont supposées effectuées avec une précision infinie, qui correspond, pour l'exemple proposé, à un nombre infini (ou en tout cas très grand) de fourchettes de mesure. Une telle démarche revient à imposer des critères de choix pour la prise d'information

temporelle alors qu'aucun critère de choix n'est défini pour la prise d'information spatiale.

Le second exemple est tiré des travaux de Bodenstein et Praetorius /4/ (figure 2.6.). Afin d'analyser l'électroencéphalogramme on définit une fenêtre d'observation glissant le long du signal et à l'intérieur de laquelle sont évalués les spectres successifs de l'électroencéphalogramme. Cette première démarche revient alors à associer à chaque fenêtre d'observation un événement "calcul du spectre". Un seuil de similarité θ est ensuite défini pour deux spectres successifs. Si le test de similarité est positif les deux spectres sont classés dans la même situation. Sinon, on sort de la situation présente et on entre dans une nouvelle situation (figure 2.6.). Quoique non explicitée par les auteurs la notion de répétitivité apparaît ici clairement et s'identifie simplement au nombre de fenêtres d'observation successives à l'intérieur desquelles les spectres évalués sont semblables au seuil de similarité θ près.



- a) E E G
- b) Erreur de prédiction résultant de l'estimation spectrale
- c) Seuil de similarité θ
- d) Mesure de similarité.

Figure 2.6. (d'après /4/)

2.5. Conclusion

L'utilisation des notions de chronologie et d'événement d'une part et de la classification des événements à l'intérieur de situations données d'autre part permet de donner une très grande souplesse aux prises d'information faites sur les phénomènes temporels. En premier lieu, le repérage temporel se fait, dans ce cas, par le biais d'une chronologie qui peut être définie par rapport au phénomène lui-même et non pas par rapport à une horloge externe au phénomène. On verra par exemple que pour l'étude des systèmes biologiques possédant leurs rythmes propres (c'est-à-dire leurs horloges propres) une telle approche revêt une importance déterminante. La classification des événements permet, par ailleurs, de substituer à la notion de mesure la notion d'appartenance à telle ou telle classe d'événements (situation). De la même manière que précédemment cette approche permet de définir la prise d'information par rapport au phénomène. Pour cela il suffit ici de déterminer par une procédure d'apprentissage préalable les situations prototypes caractéristiques du phénomène étudié.

Ainsi, aussi bien dans le domaine temporel que dans le domaine spatial, la prise d'information revêt un caractère essentiellement intrinsèque que nous allons exploiter pour analyser les chaînes chronologiques et les séquences de situations qu'elles engendrent.

3 - CARACTERISATION DES CHAINES CHRONOLOGIQUES :

La caractérisation des chaînes chronologiques s'appuie sur la réalisation de fenêtres d'observation variables (aussi bien dans le temps que dans l'espace), au travers desquelles sont analysées les tendances et la dynamique des phénomènes observés.

3.1. Fenêtres d'observations

Soit une chaîne chronologique d'événements e_p . On appelle fenêtre d'observation de largeur N et d'extrémité e_q , la suite des événements notée :

$$F_q(N) = \{e_{q-j}, j = 0, N-1\}, q \geq N$$

Il importe de souligner que la largeur d'une telle fenêtre est évaluée en nombre d'événements et non pas en unités de temps. Compte-tenu du fait que les événements successifs n'ont pas tous la même durée, cette procédure permet, lorsque l'on fait glisser $F_q(N)$, c'est-à-dire lorsque q varie, de réaliser des comparaisons ou des statistiques non biaisées par le nombre des événements mis en jeu à l'intérieur des fenêtres successives.

3.2. Procédure d'observation

3.2.1. Espace d'observation. Soit un phénomène temporel susceptible de présenter L situations S_i ($i = 1, L$). A priori toutes ces situations jouent le même rôle dans la description du phénomène et cette propriété peut se traduire géométriquement dans un espace euclidien de dimension L noté E^L et appelé espace d'observation.

Pour cela, il suffit d'associer à chaque situation S_i le vecteur unitaire de l'axe n° i de cet espace, ce vecteur unitaire étant noté \vec{S}_i .

Ainsi, un phénomène à 3 situations possibles est représenté dans un espace à 3 dimensions, comme l'illustre la figure 2.7.

Par ailleurs, l'ensemble des vecteurs S_i ($i = 1, L$) vérifie les deux propriétés évidentes suivantes, qui découlent de la définition de l'espace E^L :

$$\begin{aligned} \text{i) } & \|\vec{S}_i\| = 1 \quad \forall i && \text{(vecteur unitaire)} \\ \text{ii) } & \left. \begin{aligned} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j &= 0 \text{ si } i \neq j \\ &= 1 \text{ si } i = j \end{aligned} \right\} && \text{(espace orthonormé)} \end{aligned}$$

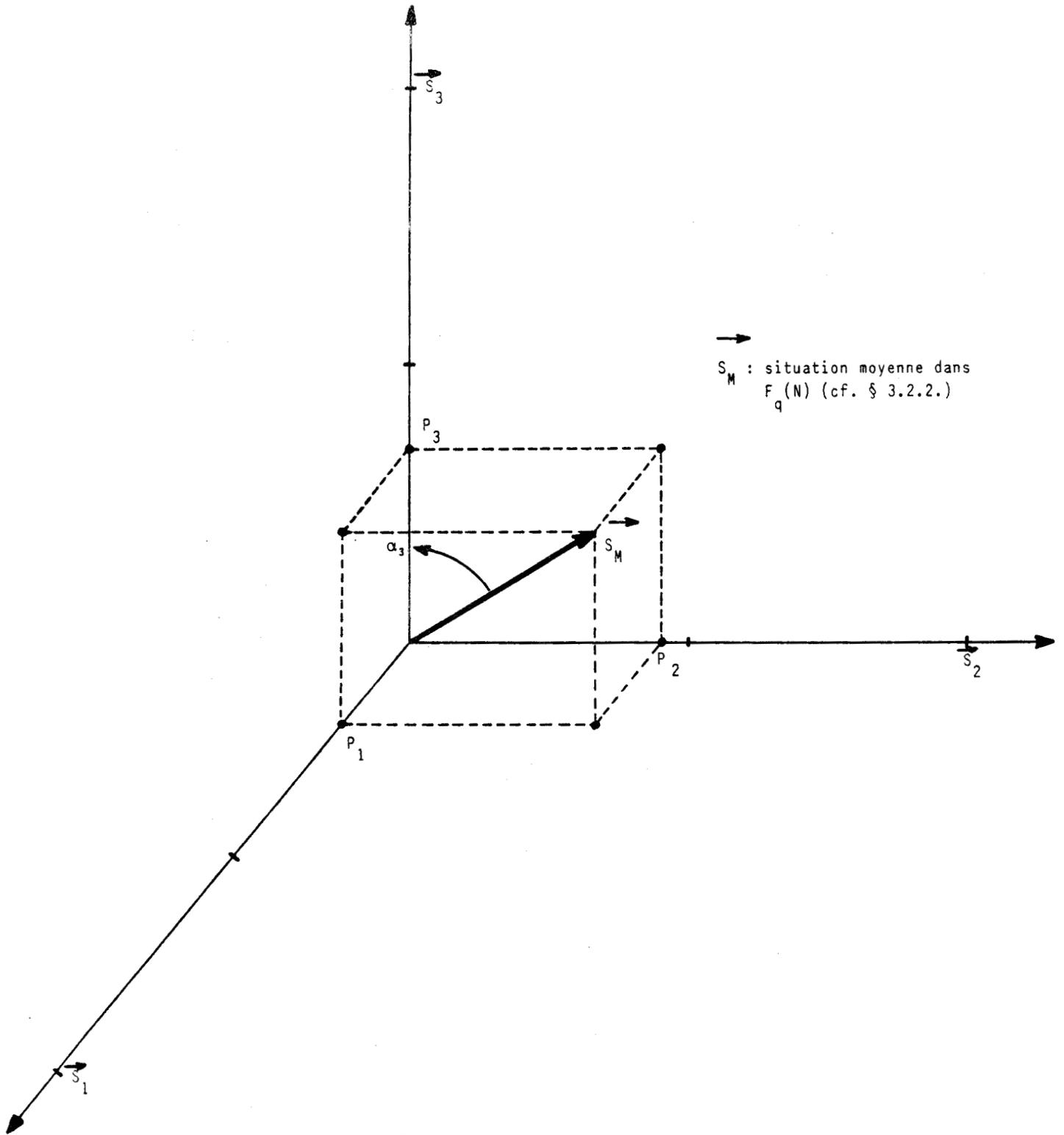


Figure 2.7. : Espace d'observation.



3.2.2. Situation moyenne dans $F_q(N)$

Soit un phénomène temporel susceptible de présenter L situations S_i ($i = 1, L$) et $F_q(N)$ une fenêtre d'observation contenant N événements successifs e_{q-j} ($j = 0, N-1$).

La classification et l'affectation de ces événements aux différentes situations proposées permet d'estimer la probabilité d'occurrence de chaque S_i , à l'intérieur de la fenêtre considérée. Si on note P_i la probabilité de S_i , il vient :

$$P_i = \frac{\text{card. } \{e_{q-j}/e_{q-j} \in S_i\}}{N}, \quad i = 1, L \quad (1)$$

Il convient de noter que l'expression $\text{card. } \{e_{q-j}/e_{q-j} \in S_i\}$ est en fait égale à la somme des répétitivités associées à la situation S_i , à l'intérieur de la fenêtre $F_q(N)$. Par ailleurs les P_i vérifient les propriétés évidentes suivantes :

$$0 \leq P_i \leq 1, \quad \forall i \quad \text{et} \quad \sum_{i=1}^L P_i = 1 \quad (2)$$

Dans ces conditions et ainsi que l'illustre la figure 2.7., la situation moyenne S_M associée à la fenêtre $F_q(N)$ est représentée dans E^L par le vecteur \vec{S}_M tel que :

$$\vec{S}_M = \sum_{i=1}^L P_i \cdot \vec{S}_i \quad (3)$$

\vec{S}_M est entièrement défini à partir des probabilités P_i . Toutefois, il existe deux paramètres géométriques intéressants permettant de "situer" facilement \vec{S}_M par rapport aux S_i . Ces deux paramètres sont :

$$\|\vec{S}_M\| : \text{module de } \vec{S}_M$$

$$\cos \alpha_k = \frac{\vec{S}_k \cdot \vec{S}_M}{\|\vec{S}_M\|}, \quad k = 1, L : \text{cosinus directeur de } \vec{S}_M \text{ vis à vis de } S_k.$$

De manière évidente, nous avons :

$$\|\vec{S}_M\| = \left[\begin{array}{c} L \\ \sum_{i=1} P_i^2 \end{array} \right]^{1/2} \quad (4) \text{ et}$$

$$\cos \alpha_k = \frac{P_k}{\left[\begin{array}{c} L \\ \sum_{i=1} P_i^2 \end{array} \right]^{1/2}}, \quad k = 1, L \quad (5)$$

. REMARQUE 1 : Le paramètre $\cos \alpha_k$ permet d'évaluer "l'écart angulaire" séparant \vec{S}_M et \vec{S}_k . Nous verrons dans la suite que $\|\vec{S}_M\|$ est lié, quant à lui, à la dispersion des situations S_i , dans la fenêtre $F_q(N)$.

. REMARQUE 2 : Afin de ne pas alourdir les notations, la situation moyenne a été notée S_M . En fait, étant évaluée dans $F_q(N)$, S_M est une fonction de q (c'est-à-dire de la date) et de N (c'est-à-dire de la largeur de la fenêtre). En toute rigueur, il faudrait donc noter :

$$S_M(q, N). \text{ De même pour } P_k \text{ et } \cos \alpha_k.$$

3.2.3. Incertitude locale. La dispersion autour de la situation $S_M(q, N)$ apparaissant sur $F_q(N)$ peut être évaluée en considérant les situations moyennes élémentaires apparaissant sur des fenêtres intérieures à $F_q(N)$. Plus précisément, si n est la largeur de ces fenêtres ($n \ll N$), leur ensemble se note :

$$\{F_j(n), j = q-N+n, q\}$$

et les situations moyennes correspondantes :

$$\{S_m(F_j(n)), j = q-N+n, q\}$$

La figure 2.8. donne une illustration de ce découpage.

Dans ces conditions, la dispersion (ou incertitude) relative à la contribution de S_k dans la réalisation de S_M a pour expression :

$$\delta_k(q, N, n) = \frac{1}{\sqrt{N-n+1}} \sqrt{\sum_{j=q-N+n}^q \left[\vec{S}_k \cdot (\vec{S}_M(F_q(N)) - \vec{S}_m(F_j(n))) \right]^2} \quad (5)$$

dans laquelle le produit scalaire :

$$\sigma_j = \vec{S}_k \cdot (\vec{S}_M(F_q(N)) - \vec{S}_m(F_j(n))) \quad (6)$$

donne la valeur de la projection sur \vec{S}_k de l'écart entre $\vec{S}_M(F_q(N))$, qui est la situation moyenne sur la fenêtre $F_q(N)$, et $\vec{S}_m(F_j(n))$, qui est la situation moyenne sur la fenêtre $F_j(n)$ intérieure à $F_q(N)$.

Le paramètre $\delta_k(q, N, n)$ ainsi défini est une fonction des trois variables q (c'est-à-dire la date), N et n (largeur des fenêtres d'observation utilisées). Pratiquement on fixera N et n et on étudiera les variations δ_k en fonction de q .

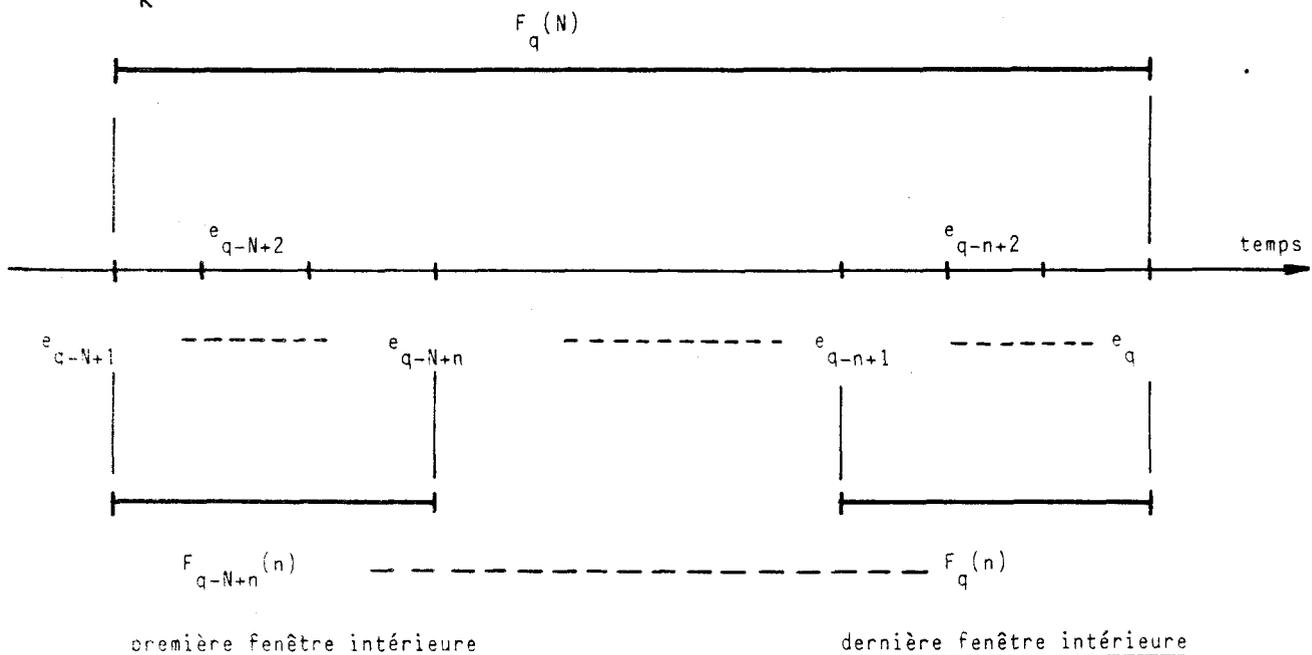


Figure 2.8. : Découpage de $F_q(N)$ en fenêtres intérieures.

. Cas où $n = 1$: Ce cas simple conduit à des relations facilement exploitables en pratique. En effet, pour cette valeur de n , chaque vecteur $\vec{S}_m(F_j(n))$ s'identifie à l'un des vecteurs $\vec{S}_i (i = 1, L)$. Ainsi l'expression de σ_j apparaissant en (6) peut s'écrire, compte-tenu de (3) :

$$\sigma_j = \vec{S}_k \cdot \vec{S}_M - \vec{S}_k \cdot \vec{S}_i = P_k - \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq k \text{ (1er cas)} \\ 1 & \text{si } i = k \text{ (2ème cas)} \end{cases}$$

$$\sigma_j = \begin{cases} P_k & \text{si } i \neq k \text{ (1er cas)} \\ P_k - 1 & \text{si } i = k \text{ (2ème cas)} \end{cases}$$

Dans la fenêtre $F_q(N)$, le 2ème cas se produit $N \cdot P_k$ fois et le 1er cas $N(1-P_k)$ fois. Ainsi on peut réécrire (5) sous la forme :

$$\delta_k(q, N, 1) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\sum_{j=q-N+1}^q \sigma_j^2}$$

$$\delta_k(q, N, 1) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{N \cdot P_k \cdot (1-P_k)^2 + N(1-P_k) \cdot P_k^2}$$

Soit en développant :

$$\delta_k(q, N, 1) = \sqrt{P_k(1-P_k)} \quad (7)$$

. REMARQUE 1 : La fonction $P_k(1-P_k)$ est maximale pour $P_k = 1/2$. C'est donc pour cette valeur de P_k que la situation S_k présente le maximum d'incertitude. A l'inverse, pour les valeurs $P_k = 1$ et $P_k = 0$, l'incertitude relative à la contribution de S_k dans la génération de S_M est bien sûr nulle.

. REMARQUE 2 : Il existe une certaine similitude entre la fonction $\delta_k(q, N, 1)$ et la fonction entropie définie par l'expression suivante /5/ :

$$H_k = - P_k \cdot \text{Ln } P_k - (1-P_k) \cdot \text{Ln } (1-P_k) \quad (8)$$

Cette fonction, en effet, comme la fonction $\delta_k(q, N, 1)$, est maximale pour $P_k = 1/2$ et minimale pour $P_k = 1$ ou $P_k = 0$. Ainsi, de ce point de vue, H_k et $\delta_k(q, N, 1)$ ont des structures analogues permettant d'évaluer le degré d'intermination de S_M dû à S_k .

3.2.4. Incertitude globale. Ce dernier paramètre intègre toutes les incertitudes locales δ_k et s'écrit :

$$\Delta(q, N, n) = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \delta_k^2} \quad (9)$$

Cas où $n = 1$: dans ce cas, reprenant l'expression de δ_k donnée en (7) il vient :

$$\begin{aligned} \Delta(q, N, 1) &= \frac{1}{\sqrt{L}} \sqrt{\sum_{k=1}^L P_k(1-P_k)} \\ \Delta(q, N, 1) &= \frac{1}{\sqrt{L}} \sqrt{1 - \sum_{k=1}^L P_k^2} \end{aligned} \quad (10)$$

qui peut s'écrire, compte-tenu de l'expression de $||\vec{S}_M||^2$ donnée en (4) :

$$\Delta(q, N, 1) = \frac{1}{\sqrt{L}} \cdot \sqrt{1 - ||\vec{S}_M||^2} \quad (11)$$

. REMARQUE : $\Delta(q, N, 1)$ est maximale lorsque $||\vec{S}_M||^2$ est minimal, c'est-à-dire lorsque :

$$\sum_{k=1}^L P_k^2 \text{ minimal, sous la contrainte : } \sum_{k=1}^L P_k = 1$$

La solution de ce problème est évidente. Elle est obtenue pour $P_k = \frac{1}{L}$, $\forall k$.

Ce résultat montre que l'incertitude globale sur S_M est maximale, lorsque les L situations S_k sont équiprobables sur $F_q(N)$. Ici encore, la fonction entropie $\sum_{k=1}^L H_k$ permet d'aboutir à la même conclusion.

3.2.5. Etude de variabilité. Les paramètres définis précédemment permettent d'évaluer l'influence de chaque situation S_k à la génération de S_M . Toutefois ils ne permettent pas de rendre compte de la façon dont chacune des situations est apparue à l'intérieur d'une fenêtre donnée. A titre d'exemple, si on suppose qu'une situation S_α est apparue avec une probabilité d'occurrence $P_\alpha = 1/2$, cela peut traduire les deux possibilités extrêmes suivantes : ou bien S_α est apparue continûment pendant la moitié de la fenêtre d'observation ou bien S_α est apparue tous les deux événements, diverses possibilités intermédiaires étant également envisageables.

Afin de rendre compte de ce phénomène, on peut imaginer la procédure suivante : soit $F_q(N)$ la fenêtre d'observation impliquée et $\{F_j(n), j = q-N+n, q\}$ l'ensemble des fenêtres intérieures à $F_q(N)$. Dans un premier temps on comptabilise pour chaque $F_j(n)$ le nombre d'abandons de chaque situation S_k et on note $v_j(S_k)$ ce nombre. Si par exemple $F_j(5) = \{S_{\alpha_1}, S_k, S_{\alpha_2}, S_k, S_{\alpha_3}\}$, on a $v_j(S_k) = 2$ car S_k est abandonnée deux fois dans $F_j(5)$. On peut noter que la valeur maximale possible pour un $v_j(S_k)$ est $n/2$ si n est pair et $(n-1)/2$ si n est impair. On note v_{\max} cette valeur maximale. Dans ces conditions on peut définir pour S_k , le taux d'abandon par l'expression :

$$\tau_j(S_k) = \frac{v_j(S_k)}{v_{\max}} \quad (12)$$

Le taux moyen d'abandon de S_k étendu à $F_q(N)$ s'exprime alors par :

$$T_q(S_k) = \frac{1}{N-n+1} \sum_{j=q-N+n}^q \tau_j(S_k) \quad (13)$$

Finalemment la variabilité de S_k à l'intérieur de $F_q(N)$ est définie en rapportant $T_q(S_k)$ à la probabilité d'occurrence de S_k soit :

$$V_q(S_k) = \frac{T_q(S_k)}{P_k} \quad (14)$$

. Interprétation : Le paramètre $V_q(S_k)$ est sensible à deux phénomènes. D'une part en effet il permet de mettre en évidence les situations à taux d'abandon élevé. D'autre part, de deux situations à taux d'abandon égaux, c'est la situation la plus rare qui est affectée de la variabilité la plus grande. Pratiquement l'utilisation de ces propriétés permet de mettre en valeur les accidents apparaissant à l'intérieur des séquences stables. A titre d'exemple, soit la fenêtre $F_q(10)$:

$$\{S_1, S_1, S_1, S_\alpha, S_1, S_1, S_1, S_1, S_1, S_1\}$$

Dans cette fenêtre S_α apparaît comme un accident (une extrasystole au milieu de cycles cardiaques normaux par exemple).

Choisissant $n = N = 10$ il vient

$$\left[\begin{array}{l} T_q(S_1) = \frac{1}{5} = 0,2 \\ T_q(S_\alpha) = \frac{1}{5} = 0,2 \end{array} \right. , \left. \begin{array}{l} P_1 = 0,9 \\ P_\alpha = 0,1 \end{array} \right] \rightarrow \left[\begin{array}{l} V_q(S_1) = 0,22 \\ V_q(S_\alpha) = 2 \end{array} \right.$$

La variabilité de S_α est ici 9 fois supérieure à celle de S_1 et met parfaitement en évidence le caractère accidentel de S_α .

. Variabilité globale : de la même façon que l'incertitude globale, il est possible de définir la variabilité globale à l'intérieur de $F_q(N)$ par l'expression

$$V_q = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L V_q(S_i) \quad (15)$$

3.2.7. *Exemple* : Pratiquement on peut caractériser une séquence de situations en exprimant les paramètres suivants :

- P_k et $\delta_k(q, N, n)$ pour obtenir une information locale sur l'influence de S_k à l'intérieur de la fenêtre $F_q(N)$
- $V_q(S_k)$ pour obtenir une information locale sur la dynamique (variabilité) de S_k à l'intérieur de la fenêtre $F_q(N)$
- $\Delta(q, N, n)$ et V_q pour obtenir les informations globales correspondant respectivement aux $\delta_k(q, N, n)$ et aux $V_q(S_k)$ ($k = 1, \dots, L$).

Soit, à titre d'exemple, un phénomène temporel susceptible de présenter trois situations possibles et décrit par la séquence de couples "situation - répétitivité" suivant :

$(S_1, 3), (S_2, 1), (S_3, 1), (S_1, 6), (S_2, 2), (S_1, 4), (S_2, 1), (S_3, 2)$.

Choisissant $N = 10$ et $n = 5$, on aboutit, pour les différentes fenêtres $F_q(10)$ ($q = 10, \dots, 20$) au tableau de paramètres suivant :

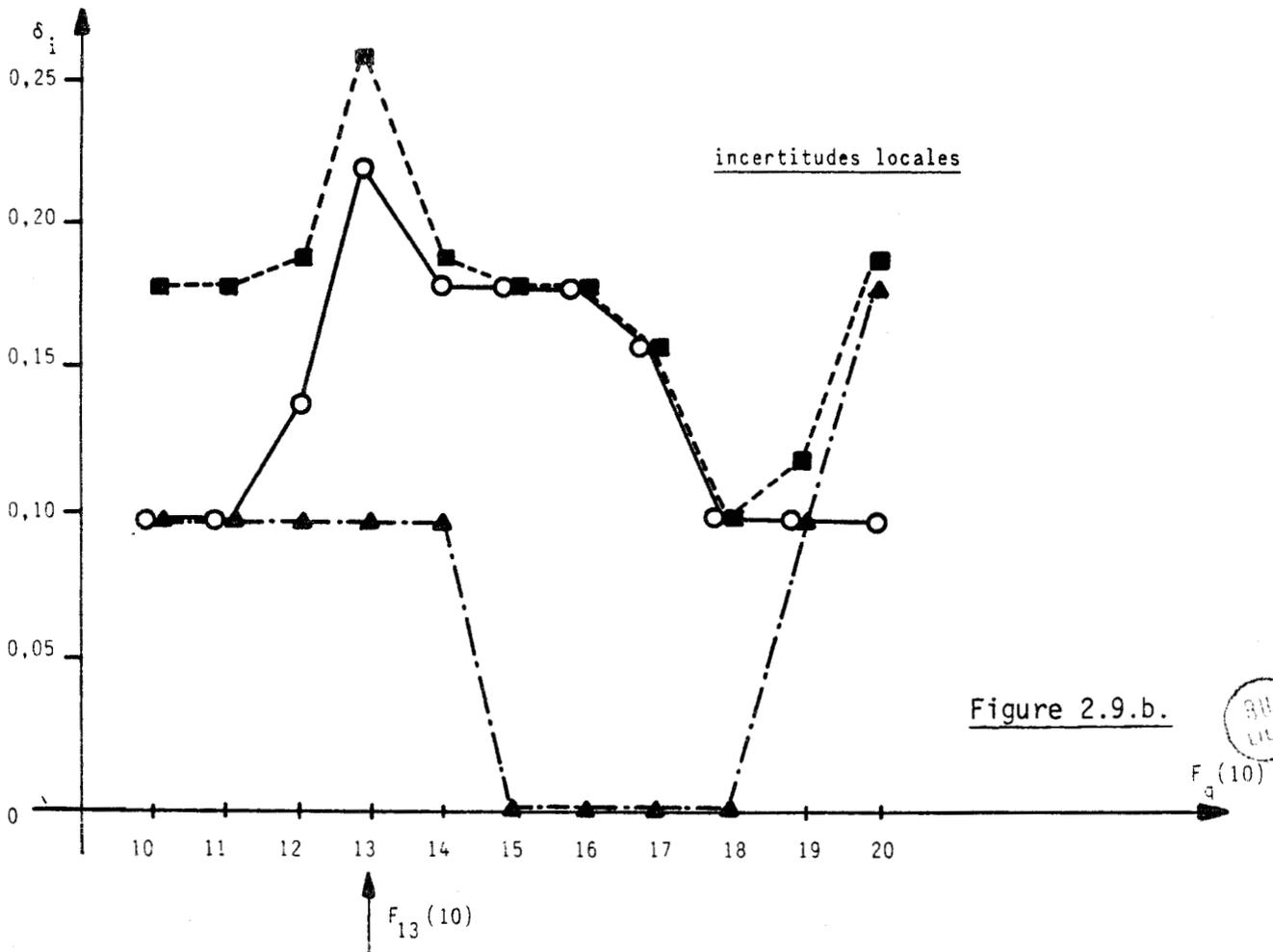
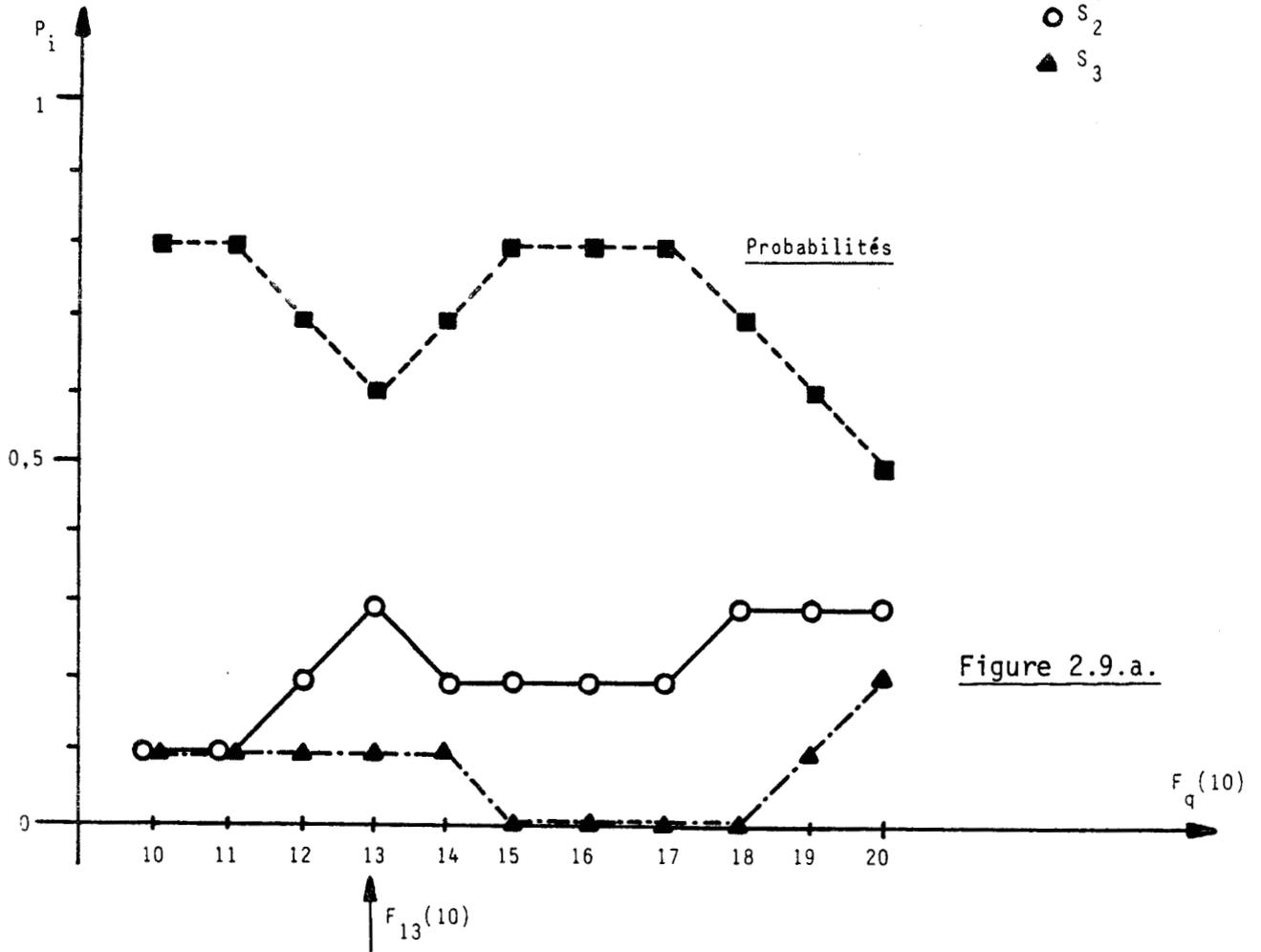
$F_q(10)$	P_1	P_2	P_3	δ_1	δ_2	δ_3	Δ	V_1	V_2	V_3	V
$q = 10$	0,8	0,1	0,1	0,18	0,10	0,10	0,13	0,31	3,33	3,33	2,32
$q = 11$	0,8	0,1	0,1	0,18	0,10	0,10	0,13	0,21	2,50	3,33	2,00
$q = 12$	0,7	0,2	0,1	0,19	0,14	0,10	0,15	0,24	0,83	2,50	1,19
$q = 13$	0,6	0,3	0,1	0,26	0,22	0,10	0,20	0,28	0,28	1,67	0,74
$q = 14$	0,7	0,2	0,1	0,19	0,18	0,10	0,16	0,36	0,42	0,83	0,54
$q = 15$	0,8	0,2	0	0,18	0,18	0	0,15	0,42	0,83	0	0,42
$q = 16$	0,8	0,2	0	0,18	0,18	0	0,15	0,42	1,25	0	0,56
$q = 17$	0,8	0,2	0	0,16	0,16	0	0,13	0,42	1,67	0	0,70
$q = 18$	0,7	0,3	0	0,10	0,10	0	0,08	0,48	1,11	0	0,53
$q = 19$	0,6	0,3	0,1	0,12	0,10	0,10	0,11	0,56	1,39	0	0,65
$q = 20$	0,5	0,3	0,2	0,19	0,10	0,18	0,16	0,67	1,39	0	0,69

. Interprétation : Ce tableau, illustré par les graphes de la figure 2.9. amène les commentaires suivants :

- la situation S_1 domine la séquence observée. Ceci se traduit par une valeur élevée de P_1 (figure 2.9.a.). De plus S_1 est stable car sa variabilité V_1 demeure faible (figure 2.9.d.).
- la situation S_3 apparaît comme un accident se produisant en début de séquence. Ceci se traduit par une variabilité V_3 élevée en début d'observation et une variabilité nulle en fin d'observation (figure 2.9.d.).
- la situation S_2 présente une occurrence "intempestive" qui se traduit par une variabilité V_2 importante tout au long de l'observation (figure 2.9.d.).
- la fenêtre $F_{13}(10)$ joue un rôle particulier dans la séquence observée. Elle présente en effet, vis à vis de S_1 et S_2 , une forte incertitude (figure 2.9.b.) accompagnée d'une très faible variabilité (figure 2.9.d.). Ce phénomène traduit, entre S_1 et S_2 , un conflit qui est également illustré figure 2.9.a. par les apparitions simultanées d'un minimum local pour S_1 et d'un maximum local pour S_2 .
- l'observation du paramètre global Δ montre le rôle particulier de $F_{13}(10)$ (maximum local figure 2.9.c.).
- enfin, l'observation du paramètre global V met en évidence une stabilisation des phénomènes en fin d'observation.

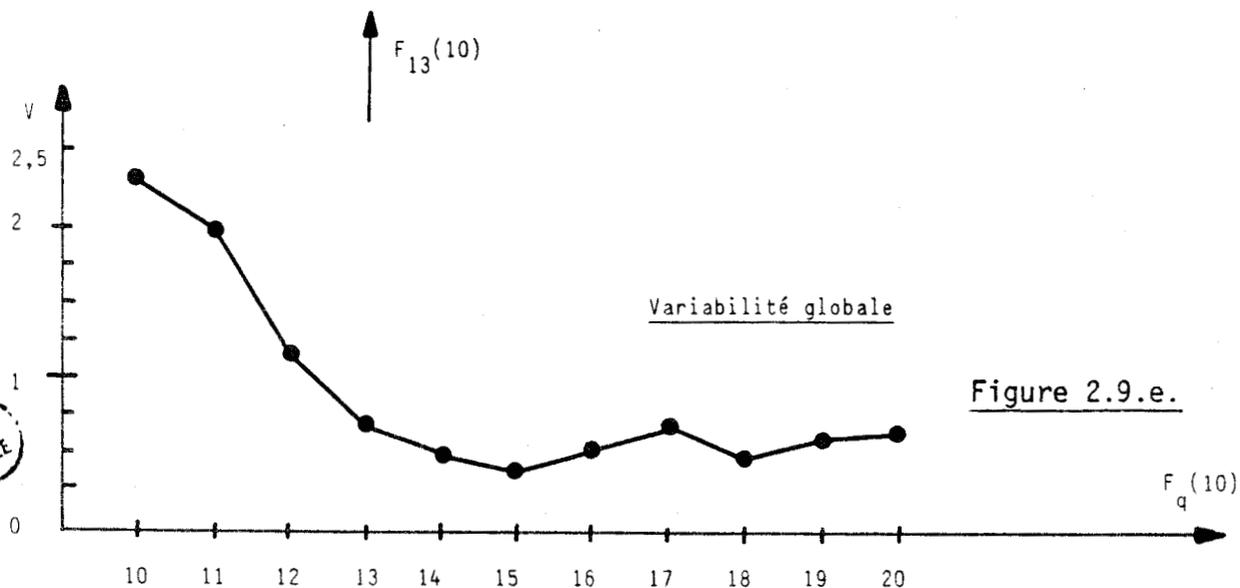
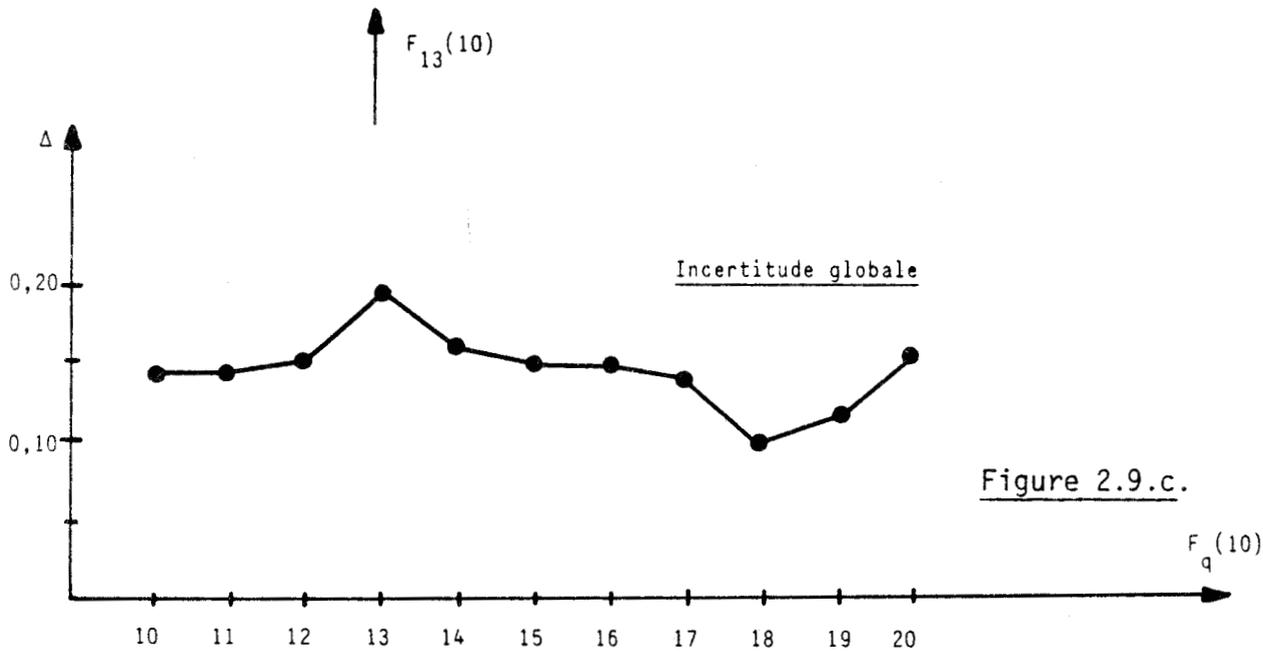
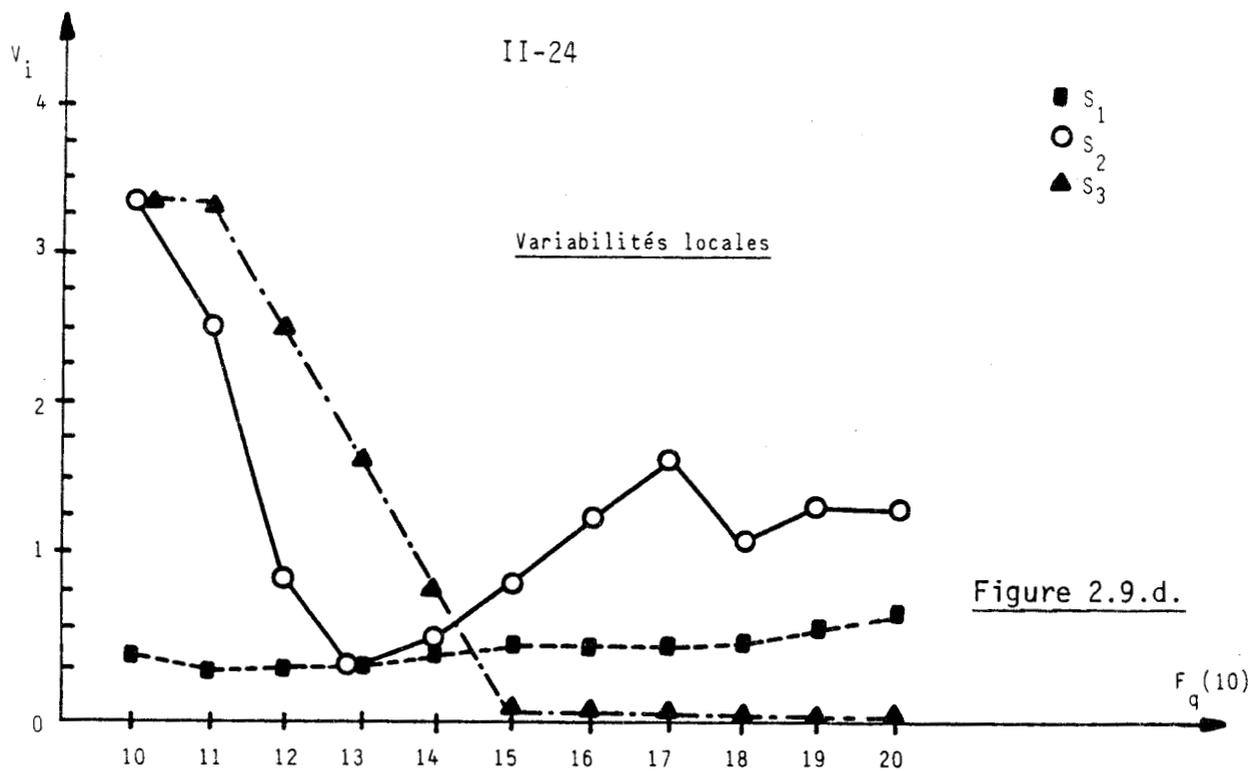
. REMARQUE : Le caractère accidentel que pourrait présenter S_3 en fin d'observation n'apparaît pas dans l'analyse effectuée (Variabilité S_3 nulle en $F_{20}(10)$). Ceci est dû au fait que pour conclure quant à la dynamique de S_3 il faut pouvoir effectuer une observation suffisamment longue. Dans le cas présent les dernières fenêtres utilisées ($F_{19}(10)$ et $F_{20}(10)$) ont vu apparaître S_3 mais n'ont pas pu la voir disparaître, de telle sorte, qu'à ce stade, aucune conclusion ne peut être faite quant à la variabilité de S_3 .

- S_1
- S_2
- ▲ S_3



BUS
LILLÉ

- S_1
- S_2
- ▲ S_3



3.2.7. Réglage des paramètres. L'utilisation de fenêtres d'observation de largeurs variables conduit à un effet de filtrage comparable au phénomène de moyenne glissante. Dans ce dernier cas, il est possible de définir avec précision les caractéristiques du filtrage en fonction de la fréquence d'échantillonnage et de la largeur de la fenêtre utilisée /6/. Toutefois, dans le cas de fenêtres à l'intérieur desquelles sont considérés plusieurs types de situations possibles, la notion de fréquence de coupure devient moins évidente. La largeur des fenêtres d'observation principales peut alors être réglée en utilisant la notion de taux d'abandon et en tenant compte des considérations suivantes :

- i) L'événement détermine la prise d'information élémentaire, autant dans le domaine spatial que dans le domaine temporel. De cette manière, la détection des événements successifs réalise une cadence d'échantillonnage toujours adaptée à la dynamique des phénomènes observés. Ainsi, et de manière implicite, le problème du choix de la cadence d'échantillonnage est immédiatement résolu, indépendamment de la largeur des fenêtres d'observation utilisées.
- ii) Une fenêtre de largeur N permet d'observer correctement toute situation présentant au moins 1 abandon tous les N événements. Par conséquent si une étude préalable a permis d'estimer le taux moyen d'abandon de S_k à la valeur $\hat{T}(S_k)$, il lui correspond, d'après l'expression (12) dans laquelle on fait $v_j(S_k) = 1$, une largeur de fenêtre N_k telle que :

$$N_k = \text{Partie entière de } \left(\frac{2}{\hat{T}(S_k)} \right) + 1$$

Dans ces conditions, pour l'observation de l'ensemble des situations S_k ($k = 1, \dots, L$) on choisit N tel que :

$$N = \max_{k=1, L} N_k$$

L'extrême difficulté qu'il peut y avoir à évaluer de manière suffisamment précise les valeurs $\hat{T}(S_k)$ confère au paramètre N calculé précédemment un caractère essentiellement indicatif. Pratiquement on utilisera cette valeur comme point de départ pour un apprentissage par essais successifs.

En ce qui concerne les fenêtres de largeur n imbriquées dans les fenêtres principales, elles ont essentiellement pour rôle d'évaluer la dynamique des phénomènes. Compte-tenu de la considération i), ceci peut être réalisé au moyen de fenêtres imbriquées très courtes qui ont d'autre part l'avantage supplémentaire d'atténuer les effets de bord. Pratiquement si L est le nombre de situations possibles et si a priori ces situations sont équiprobables, on choisit $n = L$.

3.3. Conclusion

L'utilisation des concepts d'événement et de situation permet d'assimiler tout phénomène temporel à un assemblage de composantes (les situations) dont les influences respectives peuvent être évaluées par le jeu d'un ensemble de paramètres associés à l'espace d'observation E^L défini précédemment. D'autre part, la mise en oeuvre de fenêtres d'observation imbriquées permet d'exploiter deux aspects complémentaires utiles à la description des phénomènes temporels. Dans un premier temps, en effet, l'exploitation de la fenêtre de largeur N se traduit par un processus de filtrage qui permet de décrire les tendances moyennes du phénomène observé. Dans un second temps l'utilisation de fenêtres imbriquées de largeur $n \leq N$ permet d'évaluer la dynamique instantanée qui accompagne toute tendance moyenne.

Ces quantifications de tendances et de dynamiques fournissent alors un outil objectif pour la caractérisation des séquences de situations décrivant un phénomène temporel. En particulier, la quantification permet d'envisager la comparaison de séquences se déroulant simultanément. Cette exploitation fondamentale est développée dans la suite de ce chapitre.

4 - APPLICATIONS FONDAMENTALES :

4.1. Introduction

Les concepts développés précédemment permettent de définir, à partir d'une chaîne chronologique, une séquence de situations issues de l'ensemble $\{S_i, i = 1, L\}$ et associée à une procédure de classification PC définie a priori. Dans ce sens, la démarche adoptée pour la caractérisation de la chaîne chronologique possède, comme le montre figure 2.10., une structure essentiellement linéaire.

une boucle
par événement
défecté.

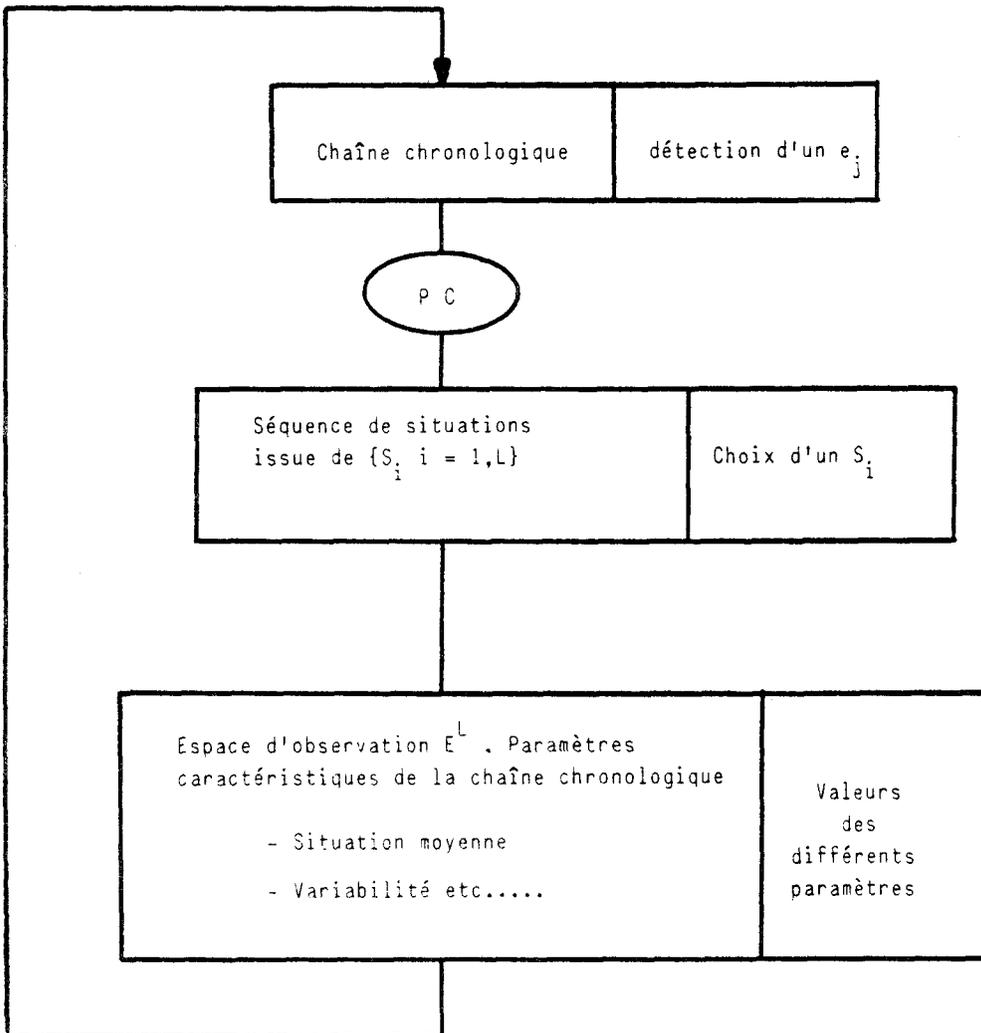


Figure 2.10.

. REMARQUE : Il importe de bien effectuer ici la distinction entre l'ensemble des situations possibles $\{S_i, i = 1, L\}$ et la séquence des situations issues de $\{S_i\}$. Le premier ensemble n'intègre pas le paramètre "temps" tandis que le second le fait intervenir de manière explicite. Afin de mettre en évidence ce rôle prépondérant du temps, la figure 2.10. indique un rebouclage ainsi que les opérations qui sont effectuées à chaque boucle de travail (détection d'un e_j , choix d'un S_i , etc...).

Cette procédure résulte en la définition de fonctions temporelles telles que situation moyenne, variabilité, incertitude, etc..., pour lesquelles la période d'échantillonnage est adaptée à la chronologie des événements eux-mêmes. A titre d'exemple, lors de l'étude de la respiration chez le nouveau-né, si l'événement est le cycle respiratoire et si on décide d'analyser la mécanique ventilatoire d'un patient, une procédure de classification élémentaire consiste à définir trois situations correspondant à trois fourchettes d'amplitude // :

S_1^m : cycle de forte amplitude,

S_2^m : cycle d'amplitude moyenne,

S_3^m : cycle de faible amplitude.

Dans ces conditions, la représentation temporelle des paramètres définis précédemment aura l'allure de la figure 2.11. sur laquelle l'échelle des temps s'identifie à la chronologie des événements élémentaires. Plus précisément, la longueur de la division associée à l'événement e_j est proportionnelle à $(t_{j+1} - t_j)$, expression dans laquelle t_{j+1} et t_j représentent respectivement les dates de e_{j+1} et e_j .

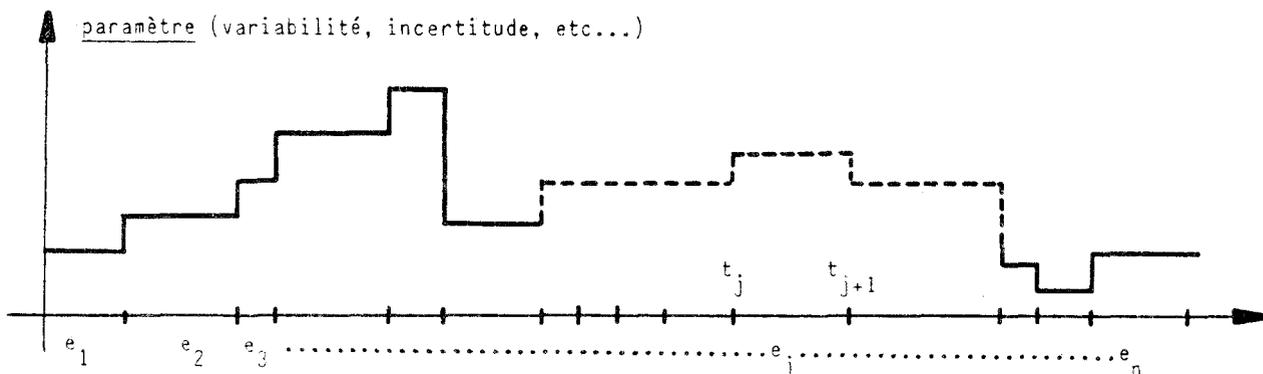


Figure 2.11.

Une telle représentation se prête alors parfaitement aux analyses conventionnelles telles que : modélisation fonctionnelle, extrapolations, interpolations, études fréquentielles, etc....

4.2. Cas des séquences multiples

La génération, en parallèle, de plusieurs séquences de situations peut être envisagée de deux manières fondamentales. La première consiste à appliquer, à une même chaîne chronologique d'événements, des procédures de classification multiples. La seconde utilise plusieurs chaînes chronologiques distinctes pour générer les différentes séquences de situations.

4.2.1. Séquences issues d'une même chaîne chronologique.

Ce cas conduit à la structure arborescente de la figure 2.12., qui utilise des notations analogues à celles de la figure 2.10.

Dans un tel schéma, chaque procédure de classification PC_k est associée à un ensemble de situations $\{S_{i_k}^k, i_k = 1, L_k\}$, lui-même générateur d'un ensemble de paramètres temporels noté Π_k . Le démarrage des opérations liées à chacune des branches de traitement est cadencé par la chaîne chronologique elle-même qui constitue, dans ce cas, l'horloge interne du processus. Un tel cadenceur, qui est rarement périodique, est utilisable directement à l'intérieur de structures de traitement en temps réel. Cet aspect sera développé au chapitre 4.

A titre d'exemple, reprenons le cas de la respiration chez le nouveau-né présenté au paragraphe 4.1. Si on associe à l'étude de la mécanique ventilatoire, l'étude des échanges gazeux, on est amené à définir une seconde procédure de classification correspondant, par exemple, à deux situations possibles relatives à la pression de CO_2 dans le sang.

S_1^g : pression de CO_2 normale,

S_2^g : pression de CO_2 excessive (hypercapnie).

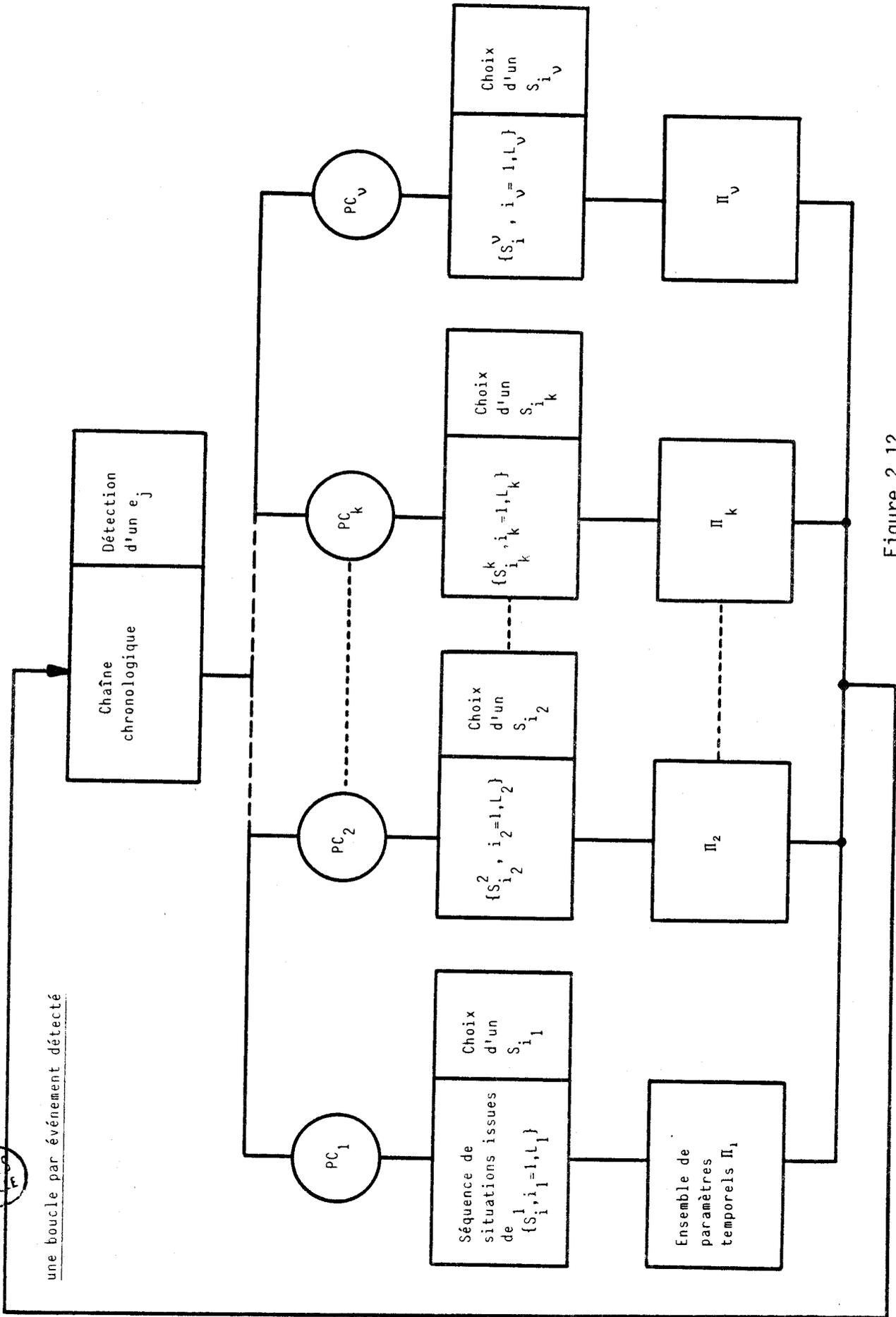


Figure 2.12.

BUS LILLE

Dans ces conditions, à chaque cycle respiratoire, on déclenche, en parallèle deux procédures de classification pour choisir respectivement une situation parmi $\{S_1^m, S_2^m, S_3^m\}$ et une situation parmi $\{S_1^g, S_2^g\}$. L'analyse se poursuit ensuite selon le schéma de la figure 2.12.

4.2.2. Séquences issues de chaînes chronologiques distinctes. Ce cas, illustré figure 2.13., est caractérisé par la présence, dans le processus, de plusieurs horloges internes, chacune étant associée à une chaîne chronologique.

L'exemple qui illustre ce cas est celui dans lequel on associe à l'étude de la mécanique ventilatoire, l'étude des troubles du cycle cardiaque. Une analyse sommaire pourrait, dans cette optique, envisager trois situations possibles :

S_1^C : cycle cardiaque normal,

S_2^C : extrasystole supraventriculaire,

S_3^C : extrasystole ventriculaire.

Dans ces conditions, à la détection d'un cycle respiratoire, on déclenche la procédure de classification permettant de choisir une situation parmi $\{S_1^m, S_2^m, S_3^m\}$, tandis qu'à la détection d'un cycle cardiaque on déclenche la procédure de classification permettant de choisir une situation parmi $\{S_1^C, S_2^C, S_3^C\}$. Il est évident que, dans ce cas, les deux processus de classification sont asynchrones l'un de l'autre. Par conséquent, l'étude des interdépendances pouvant lier les deux chaînes chronologiques nécessite la définition d'un élément de synchronisation. Cet aspect sera examiné ultérieurement .

4.2.3. Cas général. Ce cas est simplement une hybridation des deux cas précédents. Il consiste à examiner des chaînes chronologiques distinctes et à associer à chacune de ces chaînes plusieurs procédures de classification.

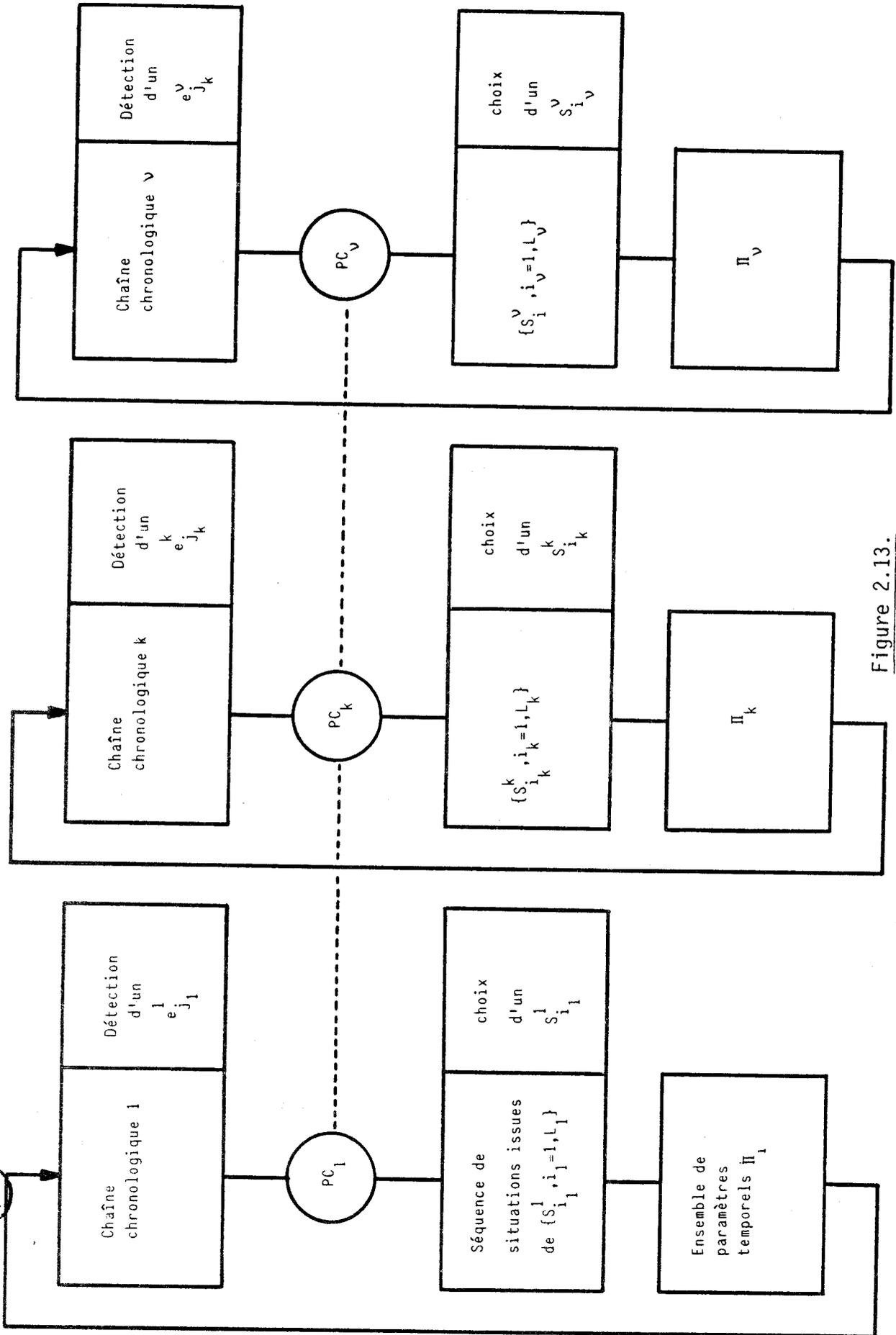


Figure 2.13.

4.3. Analyse temporelle

4.3.1. Principe. Le traitement des séquences multiples vise à mettre en évidence les relations existant entre deux trains de situations issus soit d'une même chaîne chronologique, soit de deux chaînes chronologiques distinctes. Ce problème peut être abordé de deux manières différentes. La première consiste à traiter les fonctions temporelles des paramètres générés par les séquences considérées. Cette méthode conduit alors à l'exploitation de techniques classiques de traitement du signal utilisant notamment les fonctions d'intercorrélation /8/. Cet aspect ne sera pas abordé dans le cadre de cette étude.

La deuxième manière d'envisager l'analyse des séquences multiples consiste à définir, compte-tenu des notations adoptées pour les figures 2.12. et 2.13., l'espace d'observation suivant :

- la dimension de l'espace est égale au nombre ν des procédures de classification mises en jeu en parallèle (cf. figures 2.12. et 2.13.). Ainsi on associe à chaque procédure de classification PC_k ($k = 1, \nu$) un axe k de l'espace.
- chaque axe de l'espace comporte autant de divisions qu'il y a de situations associées à la procédure de classification correspondante. Ainsi l'axe k associé à la procédure PC_k comporte L_k divisions.
- de cette manière on obtient un réseau dont chacun des sommets représente un ensemble de situations pouvant survenir simultanément.

A titre d'exemple, la figure 2.14. illustre le réseau obtenu pour les ensembles de situations $\{S_1^m, S_2^m, S_3^m\}$ et $\{S_1^g, S_2^g\}$ définis précédemment (cf. paragraphe 4.2.1.)

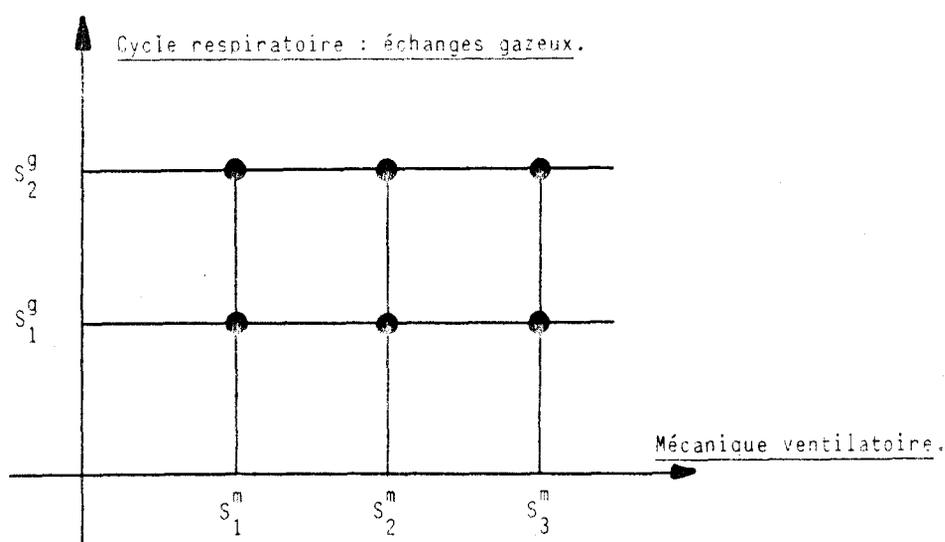


Figure 2.14.

L'analyse d'un tel réseau permet alors de caractériser la distribution des sommets qui sont atteints au cours de l'évolution du processus. Cette procédure met parfaitement en évidence le caractère récursif de la méthode. En effet, deux sommets du réseau ne pouvant pas être atteints simultanément, on peut considérer que chacun de ces sommets constitue, pour le phénomène observé, une situation potentielle issue d'une chaîne chronologique unique. De cette manière, on se ramène à un traitement de séquence simple, tel que défini au paragraphe 3 de ce chapitre.

. REMARQUE : Il apparaît que, dans ce cas, chaque chaîne chronologique se comporte comme un automate élémentaire à nombre fini d'états (les situations). Le fonctionnement des séquences multiples se définit alors comme le produit cartésien des automates élémentaires. Toutefois ce fonctionnement s'inscrit, non pas dans un cadre déterministe, mais bien dans un cadre probabiliste lié aux différents paramètres statistiques précédemment définis (taux d'abandon, variabilité,...) /9, 10/.

4.3.2. Synchronisation des séquences parallèles. Compte-tenu de ce qui a été envisagé précédemment, il apparaît que l'élément de synchronisation des séquences parallèles s'identifie simplement à la chaîne chronologique unique capable de générer les situations potentielles associées à chacun des sommets du réseau. Dans le cas de séquences parallèles issues d'une même chaîne chronologique d'événements la synchronisation est assurée, de manière évidente, par cette chaîne elle-même. Par contre, dans le cas de séquences parallèles issues de chaînes chronologiques distinctes la synchronisation est moins évidente. Elle peut être envisagée de la manière suivante :

Soit deux chaînes d'événements distinctes dont une illustration est donnée figure 2.15. :

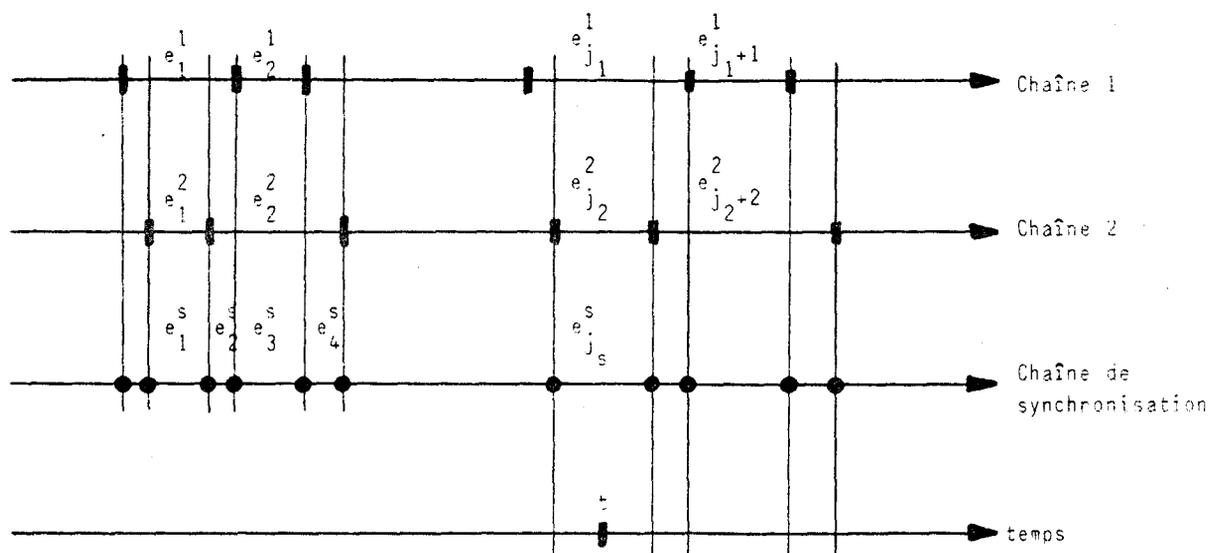


Figure 2.15.

La date et la durée de chacun des événements $e_{j_1}^1$ de la première chaîne sont notées respectivement $t_{j_1}^1$ et $d_{j_1}^1$.

La date et la durée de chacun des événements $e_{j_2}^2$ de la seconde chaîne sont notées respectivement $t_{j_2}^2$ et $d_{j_2}^2$.

Dans ces conditions, la chaîne de synchronisation associée aux deux chaînes précédentes est constituée d'une suite d'événements $e_{j_s}^S$ de date $t_{j_s}^S$ et de durée $d_{j_s}^S$ définies par les relations suivantes :

$\forall t, \exists t_{j_s}^S$ et $d_{j_s}^S$ tels que :

$$t_{j_s}^S = \sup_{j_1, j_2} (t_{j_1}^1, t_{j_2}^2) \text{ avec } t_{j_1}^1 \leq t \text{ et } t_{j_2}^2 \leq t$$

$$t_{j_s}^S + d_{j_s}^S = \inf_{j_1, j_2} (t_{j_1}^1 + d_{j_1}^1, t_{j_2}^2 + d_{j_2}^2) \text{ avec } t_{j_1}^1 + d_{j_1}^1 \geq t \text{ et } t_{j_2}^2 + d_{j_2}^2 \geq t.$$

La situation associée à chaque événement $e_{j_s}^S$ s'identifie alors à l'ensemble des situations présentes simultanément sur la chaîne 1 et sur la chaîne 2 pendant toute la durée de $e_{j_s}^S$.

5 - CONCLUSION :

L'identification des systèmes est parfois rendue difficile par le fait que les entrées ne sont pas toujours parfaitement maîtrisées et que les sorties sont difficilement accessibles. Dans ce cas, l'observation des phénomènes temporels apparaît alors comme une ressource supplémentaire permettant l'étude du comportement d'un processus.

Dans ce sens, une première démarche possible consiste à prélever sur le processus un ensemble important de paramètres et à réaliser une analyse globale de cet ensemble. Les techniques utilisées relèvent alors soit de l'analyse en composantes principales pour définir les paramètres essentiels, soit de l'analyse discriminante pour caractériser les différents états du processus observé /11, 12/. Dans ce cas, les résultats sont essentiellement conditionnés par le choix initial des paramètres appréhendés et les traitements mathématiques s'effectuent avec un faible degré d'interactivité entre l'opérateur et le dispositif d'analyse.

La seconde démarche, qui est celle présentée dans ce chapitre, vise à transformer l'observation globale d'un phénomène temporel en une juxtaposition d'observations élémentaires faciles à réaliser. Un tel morcellement est accompli en deux étapes successives. La première consiste à isoler, à l'intérieur du processus, les éléments correspondant à des horloges internes génératrices de chronologies. La seconde étape vise à associer à chacune des horloges ainsi définies un ensemble de procédures d'observation spécifiques.

La formalisation d'une telle démarche conduit à regarder chaque horloge interne comme un générateur d'événements susceptibles de traverser plusieurs situations potentielles définies a priori. Dans cette optique, la définition des situations permet d'introduire dans la méthode une certaine sémantique, c'est-à-dire une forme d'interactivité entre l'opérateur et le dispositif d'observation. Plus précisément, c'est par ce biais que l'homme de l'art (celui qui possède la meilleure expérience du processus observé) peut intervenir pour améliorer les procédures automatiques d'observation.

Une telle approche débouche sur la notion de cahier des charges établi par concertation entre le concepteur et l'utilisateur. Dans ce cadre, l'utilisateur (c'est-à-dire l'homme de l'art) apporte sa connaissance et son expérience du processus tandis que le concepteur aide l'utilisateur à intégrer cette connaissance et cette expérience dans les méthodes mathématiques et dans les technologies mises en oeuvre pour l'automatisation de l'observation. Nous verrons, au chapitre suivant, qu'un tel cahier des charges permet notamment de définir sans ambiguïté les procédures de classification utilisées pour la caractérisation des séquences de situations.

Une autre spécificité de la méthode réside dans son caractère récursif. Il est apparu, en effet, qu'on pouvait associer plusieurs situations pour définir un nouvel événement et renouveler cette opération indéfiniment. Cette propriété est fondamentale car elle permet, après avoir eu une démarche analytique, de resynthétiser l'ensemble des analyses effectuées sur un

processus temporel donné et de fournir éventuellement, une vision globale de l'observation. De plus, dans la mesure où l'on est capable d'isoler chaque événement élémentaire, on peut moduler à volonté le degré de synthétisation et placer ainsi l'observation du processus à divers niveaux de complexité.

Nous abordons au chapitre suivant les problèmes de classification automatique des événements, compte-tenu des spécificités induites par la méthode d'observation envisagée : aspects temps réel, non stationarité des phénomènes, adaptativité,....

CHAPITRE 3

DETECTION ET CLASSIFICATION

1 - INTRODUCTION :

Le chapitre précédent a permis de mettre en évidence deux actes fondamentaux intervenant dans la caractérisation d'une chaîne chronologique : la détection séquentielle d'événements et leur classification automatique.

La classification automatique a fait l'objet de nombreux travaux /1/ et le développement de ce chapitre ne vise pas à passer en revue la panoplie des outils en résultant. Le but est plutôt d'examiner dans quelles conditions une méthode de classification peut prévaloir sur une autre. En particulier on examinera la possibilité de définir une classification se référant à des prototypes mouvants, c'est-à-dire non stationnaires. Cette idée est guidée par le fait que, pratiquement, les chaînes chronologiques observées ne sont, elles mêmes, pas stationnaires globalement mais seulement stationnaires par morceaux /2/.

Une telle contrainte nécessite, effectivement, la remise à jour continue des éléments de référence . De plus, le caractère "temps réel" de cette opération donne un relief particulier aux méthodes de classification, notamment lors de leur implantation sur machines informatiques : cet aspect fera l'objet d'un examen particulier.

La détection séquentielle des événements d'une chaîne chronologique relève, quant à elle, davantage d'une certaine forme d'artisanat que de méthodes universelles et objectives. La multiplicité des structures de signaux rencontrées, conduit, en effet, à considérer chaque cas comme un cas particulier. On examinera, toutefois, comment il est possible de dégager quelques principes méthodologiques fondamentaux.

2 - DETECTION SEQUENTIELLE DES EVENEMENTS :

2.1. Introduction

Il faut considérer que lorsqu'une information est captée, elle représente une matière première non élaborée et quasiment inexploitable directement. Dans ce sens, la détection séquentielle ne peut commencer qu'après un "raffinage" préalable de la matière première. Cette étape préliminaire comporte généralement quatre opérations :

- l'amplification,
- le filtrage,
- la validation,
- la restauration.

L'amplification et le filtrage sont deux opérations bien maîtrisées /3/. Leur réalisation est facilitée par l'existence, sur le marché, de composants analogiques de hautes performances tels que les amplificateurs opérationnels. L'amplification permet de donner une amplitude convenable à des signaux qui, le plus souvent se mesurent, au départ, en millivolts ou en milliampères. Le filtrage, quant à lui, vise à éliminer du signal initial, certaines fréquences composites, soit parce qu'elles sont parasites (comme le 50 Hz du réseau électrique), soit parce qu'elles sont indésirables (modulation de l'E C G par le cycle respiratoire).

Aucun développement supplémentaire ne sera donné sur ces opérations élémentaires couramment effectuées. Les difficultés posées par la validation et la restauration des mesures ou des données sont, par contre, moins bien maîtrisées. Nous les exposerons brièvement avant d'aborder, à proprement parler, le problème de la détection séquentielle des événements.

2.2. Validation et restauration des données

2.2.1. La validation. Tout bon système de traitement doit effectuer systématiquement cette opération élémentaire. Elle consiste à vérifier si la mesure qu'on vient d'effectuer ne présente pas un caractère aberrant.

Si, par exemple, lors de la pesée journalière d'un nouveau-né, on constate une prise de poids supérieure au poids de lait ingéré depuis la précédente pesée, on peut conclure à une erreur. Dans ce cas, il ne faut pas tenir compte de la mesure, l'éliminer ou mieux, si c'est possible, effectuer une nouvelle mesure. Ce traitement est illustré figure 3.1.

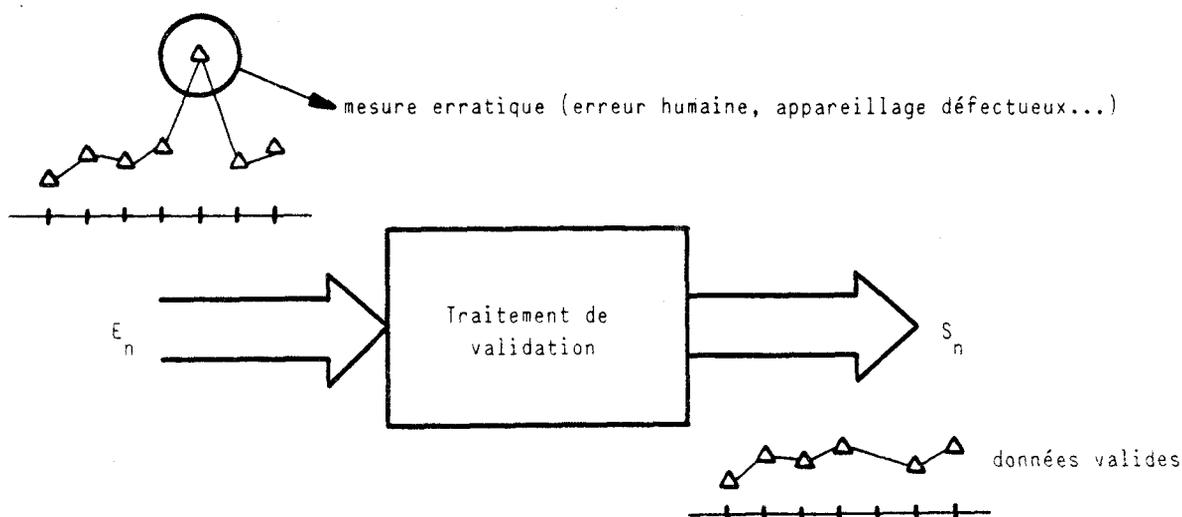


Figure 3.1.

Dans certains cas il est impossible d'obtenir une nouvelle mesure significative simplement parce que la dynamique du signal ne le permet pas. Le traitement consiste alors uniquement à éliminer les valeurs erronées, ainsi que l'illustre l'E C G de la figure 3.2.

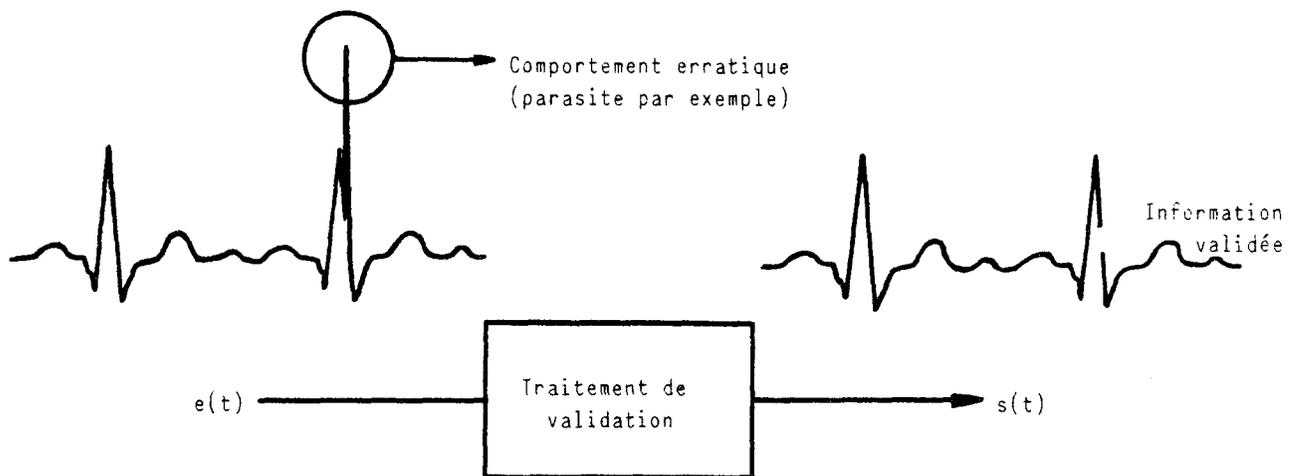


Figure 3.2.

Les opérations de validation sont en général fondées sur des méthodes de comparaison entre une valeur estimée par prédiction et la valeur mesurée. Plus précisément, soit un ensemble de mesures effectuées sur une grandeur E aux q instants qui ont précédé l'instant $(n+1)$:

$$\{E_{n-q+1}, E_{n-q+2}, \dots, E_n\}.$$

Compte tenu de ces q observations, on définit une fonction de prédiction visant à estimer ce que sera la valeur de E à l'instant $(n+1)$ /4/. On note cette fonction de prédiction :

$$\hat{E}_{n+1} = p(E_{n-q+1}, E_{n-q+2}, \dots, E_n) \quad (1)$$

Dans ces conditions, à l'instant où l'on effectue la mesure E_{n+1} , on évalue la différence :

$$\Delta_{n+1} = \hat{E}_{n+1} - E_{n+1}$$

On définit ensuite une fourchette à l'intérieur de laquelle doit se trouver Δ_{n+1} pour valider E_{n+1} et la loi de validation s'écrit alors :

si $m \leq \Delta_{n+1} \leq M$, alors E_{n+1} est valide

sinon E_{n+1} est aberrant.

. REMARQUE : L'ensemble $E = \{E_{n-q+1}, E_{n-q+2}, \dots, E_n\}$ peut, lui même contenir des valeurs E_{n-q+j} non valides. Dans ce cas, la prédiction ne peut se faire qu'en substituant aux valeurs erronées de E des valeurs de remplacement que l'on note \tilde{E}_{n-q+j} et qui restaurent l'information initiale.

2.2.2. La restauration de l'information. C'est une opération délicate résultant directement de la précédente. Elle consiste à choisir des valeurs estimées en remplacement de mesures qui ont été rejetées ou même non effectuées. La restauration de l'information vise à assurer la continuité de la séquence de nombres représentative du phénomène (discret ou analogique) observé.

Dans ce sens, deux démarches sont possibles : ou bien on utilise la valeur estimée telle qu'elle a été calculée précédemment, ou bien on procède par interpolation, c'est-à-dire a posteriori. Dans ce cas il vient :

$$\tilde{E}_{n+1} = i(E_{n-q+1}, E_{n-q+2}, \dots, E_n, \dots, E_{n+1-1}) \quad (2)$$

expression dans laquelle $i(.)$ est une loi d'interpolation sur $q+1+1$ mesures.

Exemple : $\tilde{E}_{n+1} = \frac{E_n + E_{n+2}}{2}$ (interpolation linéaire).

. REMARQUE 1 : De la même manière que pour la validation, l'ensemble d'interpolation peut, lui même contenir certaines valeurs de remplacement qui viennent se substituer aux valeurs erronées.

. REMARQUE 2 : Il existe certaines situations dans lesquelles la restauration n'est pas effectuée sur des mesures isolées, mais sur des "paquets" de mesures successives. Soit, à titre d'exemple l'E C G de la figure 3.3.

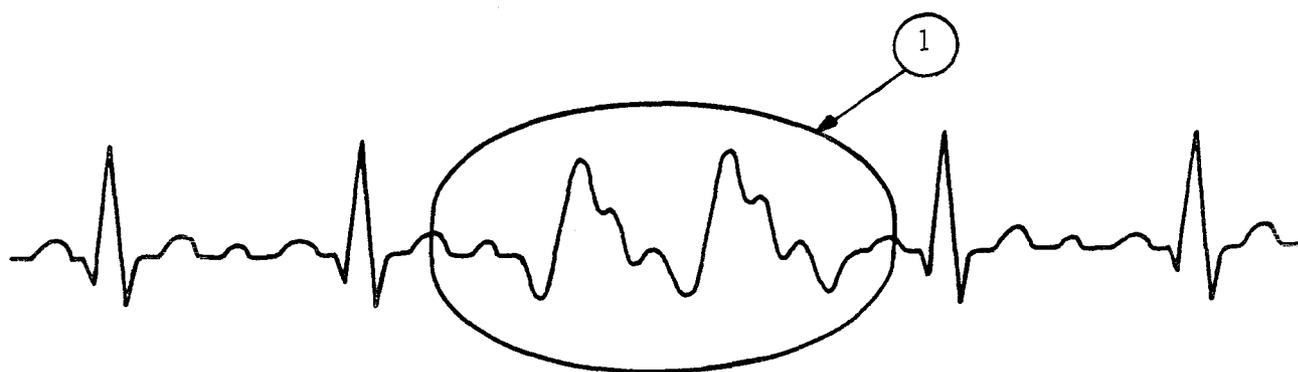


Figure 3.3.

Ce signal contient une zone, notée ①, à l'intérieur de laquelle l'information est complètement dégradée parce que le patient a toussé.

Quelle est, dans ce cas l'attitude à adopter ?

- peut-on restaurer l'information ?
- doit-on restaurer l'information ?

D'un point de vue médical, la réponse à cette dernière question est, sans doute, négative. Si, par contre, l'algorithme de traitement travaille en temps réel, la nécessité d'assurer la continuité de l'information alimentant cet algorithme peut conduire à une réponse affirmative. Dans ce cas, la restauration vise à introduire dans la zone ① un nombre de cycles moyens tel que la valeur du rythme cardiaque au moment de l'incident soit respectée.

2.3. La détection des événements

Le caractère souvent empirique qui accompagne la détection des événements (cycles cardiaques, cycles respiratoires,...) ne permet pas de définir des méthodes universelles de travail. Par contre, il existe un certain nombre de techniques fréquemment utilisées en détection et qui permettent, en particulier, de tester la structure de l'information.

Ces techniques sont notamment :

- le test de seuils.
- l'utilisation de la dérivée du signal.
- l'utilisation de l'enveloppe du signal.

2.3.1. Le test de seuils. C'est une technique élémentaire illustrée sur l'E C G de la figure 3.4.

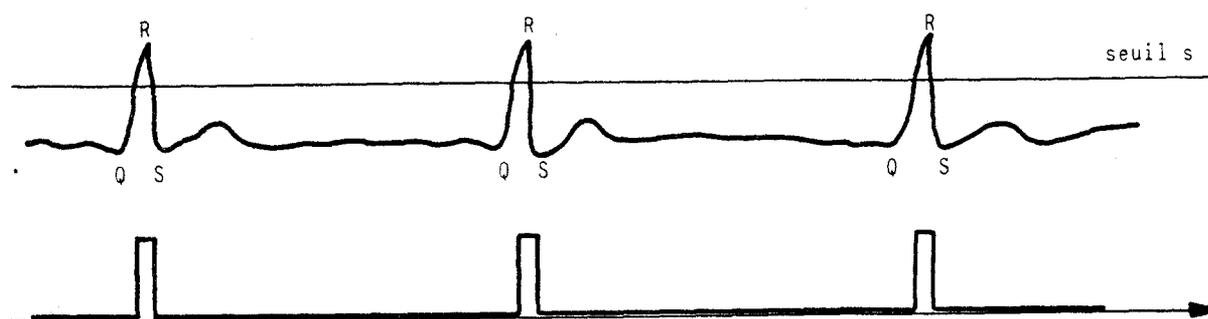


Figure 3.4.

Elle permet, en comparant le signal à un seuil s , de détecter un élément saillant de l'événement (ici le pic R du complexe Q R S) et, par suite, d'appréhender l'événement "cycle cardiaque" tout entier par exploration du signal autour de R.

La manipulation des seuils est une opération délicate. Elle nécessite, en particulier, une adaptation continue de la valeur du seuil aux amplitudes du signal. Reprenons, pour illustrer cette contrainte, l'exemple de l'E C G en considérant une observation de longue durée (figure 3.5.).

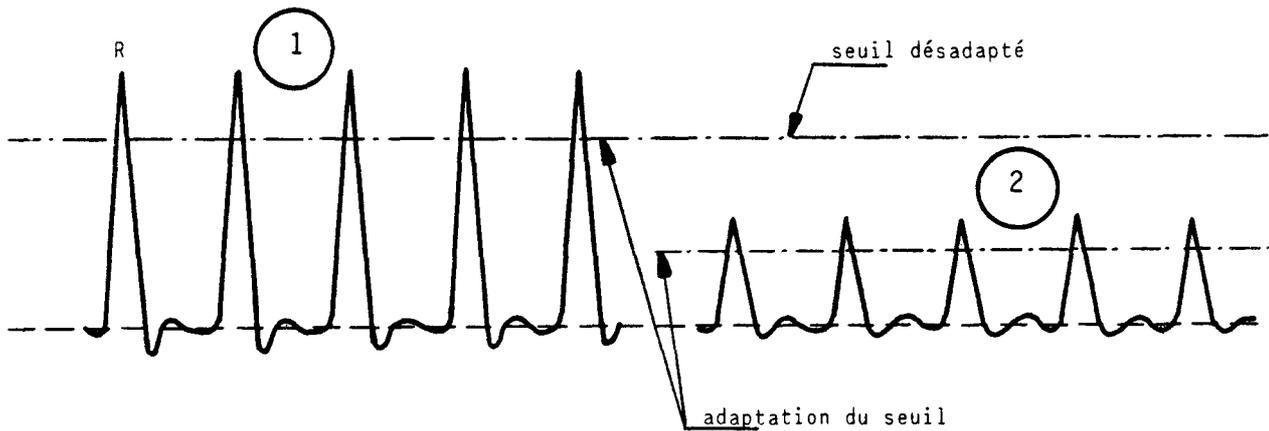


Figure 3.5.

Si par suite de modifications des contacts au niveau des électrodes, l'amplitude des pics R diminue, la valeur du seuil définie pour la zone (1) devient incorrecte lorsque l'on aborde la zone (2). On dit alors que le seuil est désadapté. Pour pallier cette difficulté il suffit simplement de définir la valeur du seuil, non pas de manière absolue, mais en référence à l'amplitude moyenne des q pics R précédant l'instant d'observation. Plus précisément, si on note R_j l'amplitude du $j^{\text{ème}}$ pic R, le seuil s_n servant de référence pour $n^{\text{ième}}$ cycle cardiaque s'écrit :

$$s_n = \frac{\alpha}{q} \sum_{i=1}^q R_{n-i} \quad (3)$$

expression dans laquelle q est un entier caractérisant l'horizon d'évaluation de la moyenne d'amplitude des pics et α est un coefficient strictement inférieur à 1.

Ce simple exemple illustre le caractère scabreux que peut revêtir la définition d'un seuil en valeur absolue.

2.3.2. Mise en oeuvre de la dérivée du signal. Dans certains cas, lorsque l'information recueillie présente un caractère cyclique ou pseudocyclique, il est intéressant d'en exploiter la dérivée temporelle. Soit, à titre d'exemple, le signal de la figure 3.6. noté $y(t)$. Il caractérise une onde respiratoire de nouveau-né, par le biais de

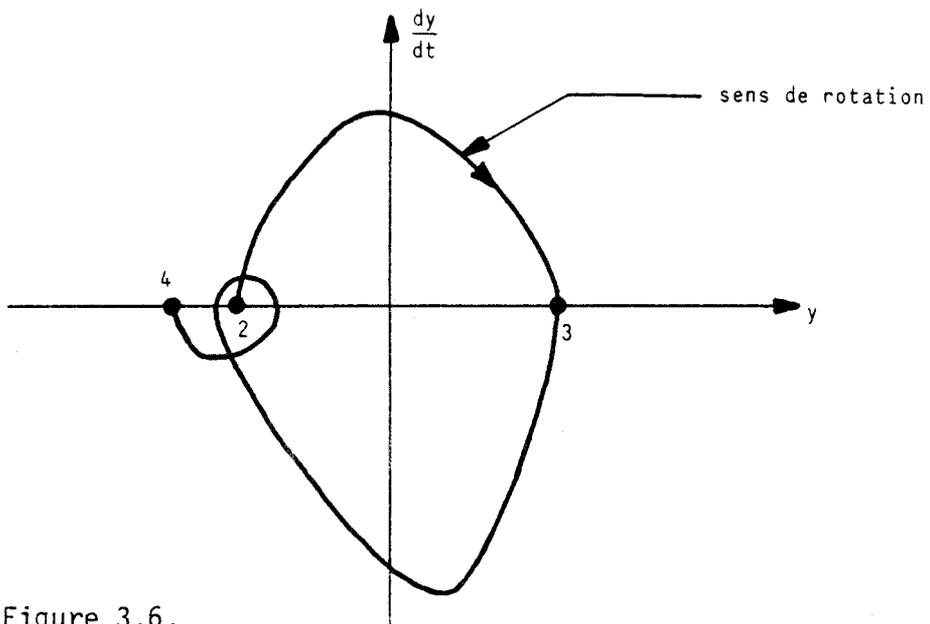
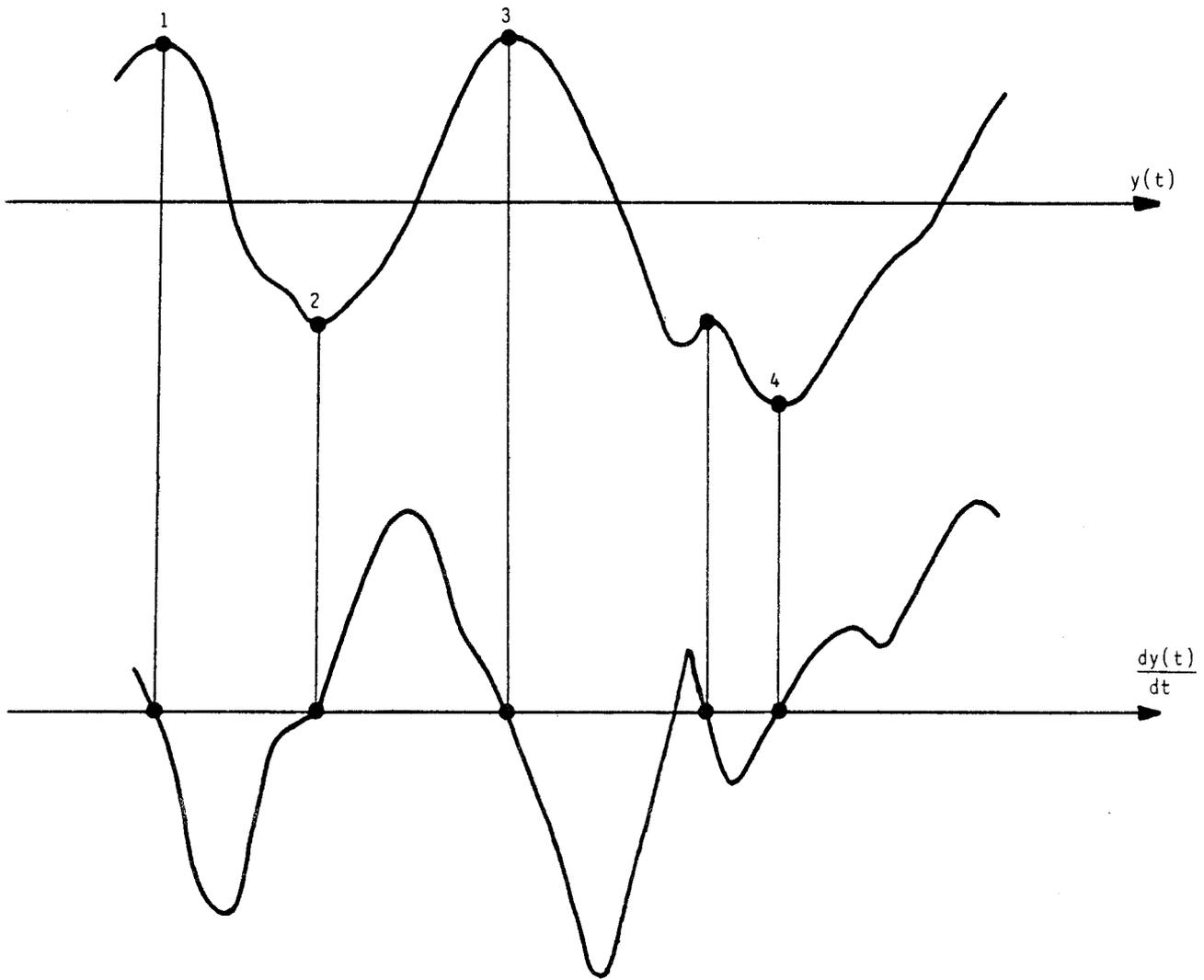


Figure 3.6.

son impédance thoracique /5/. Si on calcule la dérivée de ce signal et si on trace dy/dt en fonction de $y(t)$ on obtient une représentation du cycle respiratoire dans le plan de phase (forme de LISSAJOUS). Une telle représentation permet d'isoler avec précision chaque cycle respiratoire en détectant les intersections des formes de LISSAJOUS successives avec l'axe $y(t)$. Dans l'exemple considéré le début de chaque cycle respiratoire (début d'inspiration) coïncide avec la dernière intersection de l'axe $y(t)$ du côté négatif, précédant une intersection de l'axe $y(t)$ du côté positif. La répétition de ce processus permet d'isoler les événements "cycles respiratoires" successifs tels que le cycle (2-3-4) de la figure 3.6.

Pratiquement l'évaluation de la dérivée peut se faire selon une procédure numérique temps réel implantable sur microprocesseur monochip /6/. Cette procédure, fondée sur le principe de segmentation récursive, est présentée en annexe A1. Elle offre l'avantage de fournir une bonne immunité au bruit, dans la mesure où elle intègre, dans un même calcul, le filtrage du signal incident et l'estimation de la dérivée de ce signal. La figure 3.7. illustre le résultat obtenu sur un signal d'impédance thoracique, pour une période d'échantillonnage de 10 ms et un horizon de segmentation de 15 échantillons ($q = 7$).

Dans certaines circonstances où l'on recherche, soit un gain de place mémoire, pour la programmation d'un microprocesseur monochip, soit un gain de temps pour une programmation temps réel, on peut être amené à évaluer la dérivée par un montage analogique. Cette technique implique l'utilisation d'un signal incident $y(t)$ parfaitement conditionné et dépourvu de parasites. Dans ces conditions, la solution peut être obtenue simplement à partir d'un dispositif tel que celui illustré figure 3.8.a.

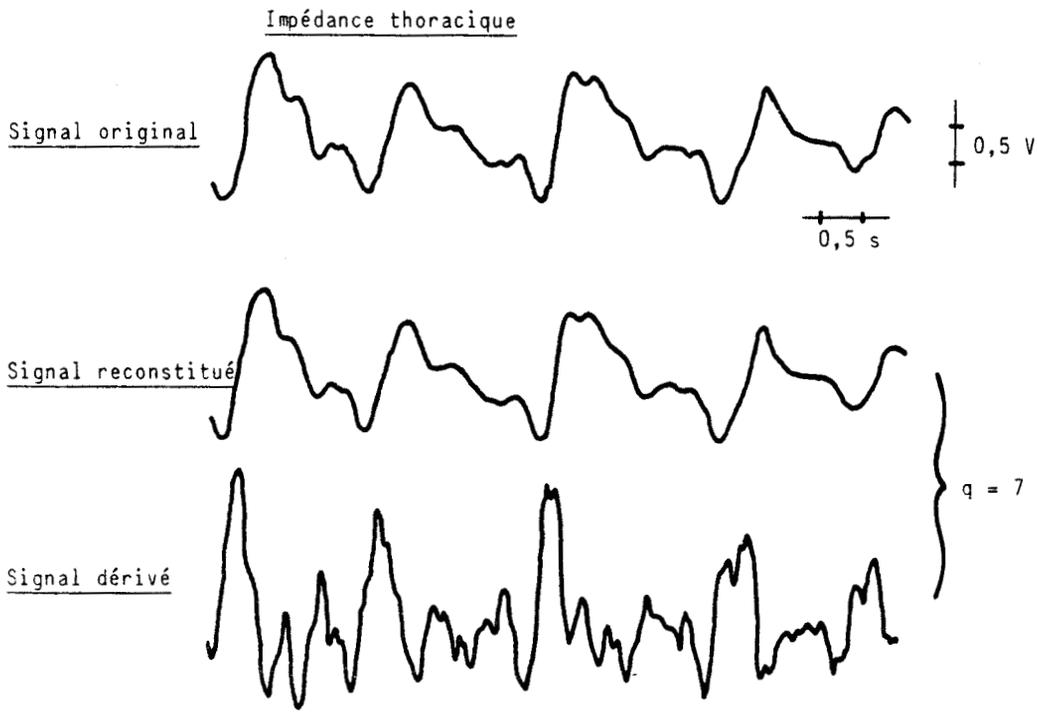


Figure 3.7.

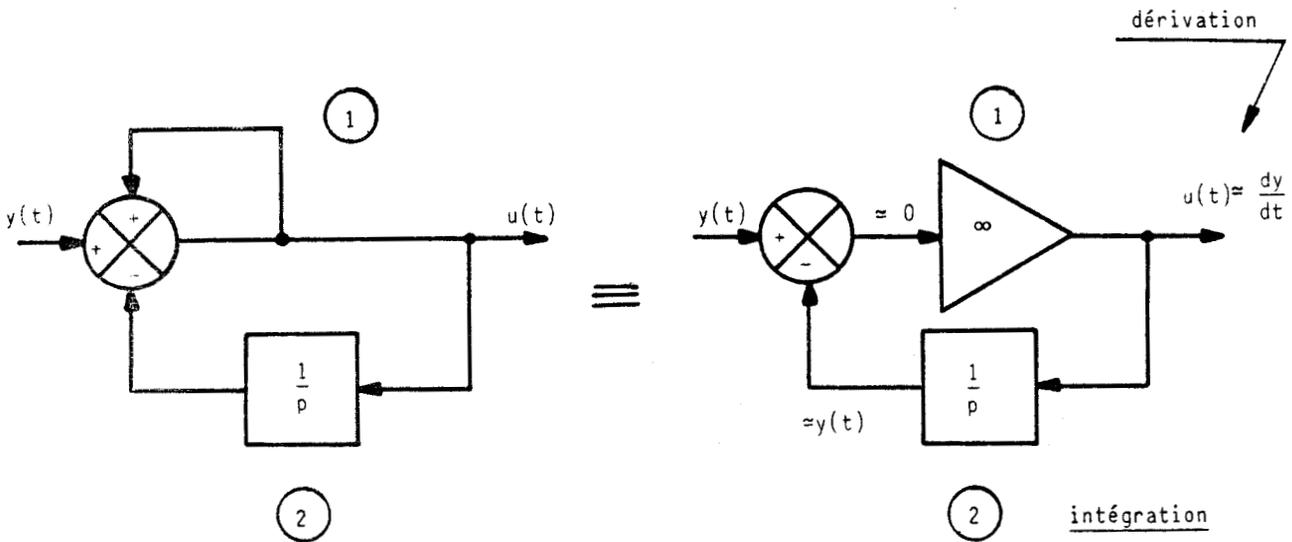


Figure 3.8.a.

Figure 3.8.b.

Ce schéma est équivalent à celui de la figure 3.8.b. par application des deux principes suivants :

- ① réaction positive afin d'obtenir un gain théoriquement infini.
- ② principe d'inversion associant à la chaîne de réaction la fonction inverse (intégration) de celle à réaliser dans la chaîne d'action (dérivation).

. APPLICATION : Ce dispositif ne peut fonctionner convenablement que si l'on peut assurer l'existence de la dérivée du signal $y(t)$. Dans le cas contraire, le système décroche et la sortie de la chaîne d'action devient infinie (saturation). Pratiquement, et pour assurer l'existence de $\frac{dy}{dt}$, on fait précéder le dispositif d'un filtre du premier ordre dont la fréquence de coupure est calculée de manière à ne pas déformer le signal incident. Le montage analogique correspondant est celui de la figure 3.9.

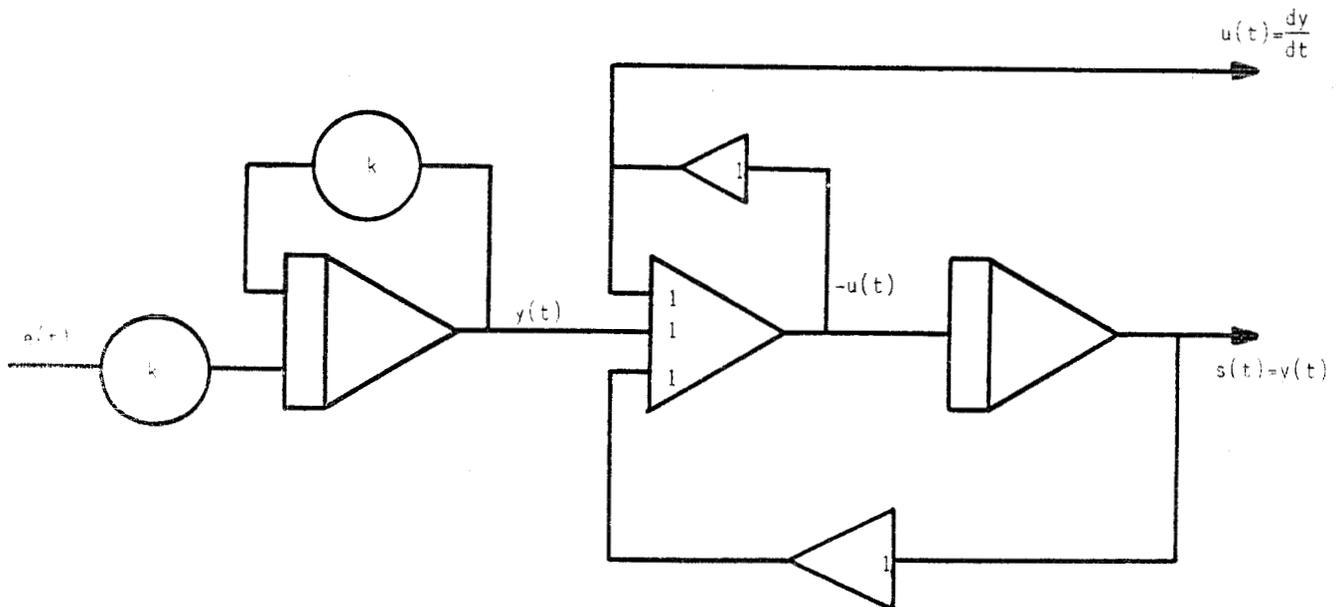


Figure 3.9.

La boucle paire de ce montage n'est pas instable car elle n'est pas isolée et subit la rétroaction de $-s(t)$. La figure 3.10. donne l'exemple de quelques signaux types dérivés par cette méthode.



Figure 3.10.

2.3.3. Utilisation de l'enveloppe. L'enveloppe d'un signal réel constitue une source d'information intéressante dans la mesure où elle est proportionnelle à la valeur quadratique moyenne instantanée du signal /7/. Cette notion, liée à l'énergie développée à chaque instant, permet d'associer la détection d'événements contenus dans un signal à la variation de l'énergie fournie par ce signal. Soit, par exemple, le signal de la figure 3.11.a. Il représente un bruit intestinal recueilli par stéthoscopie automatique /8/. Dans ce cas, le temps de présence effective des bruits est très faible par rapport au temps d'écoute, de telle sorte que le problème de détection des "événements bruits" revêt une importance fondamentale dans l'analyse temps réel automatisée. Pour l'application présentée, la détection est simplement réalisée en comparant l'enveloppe du signal (c'est-à-dire son énergie) à un seuil de détection (figure 3.11.).

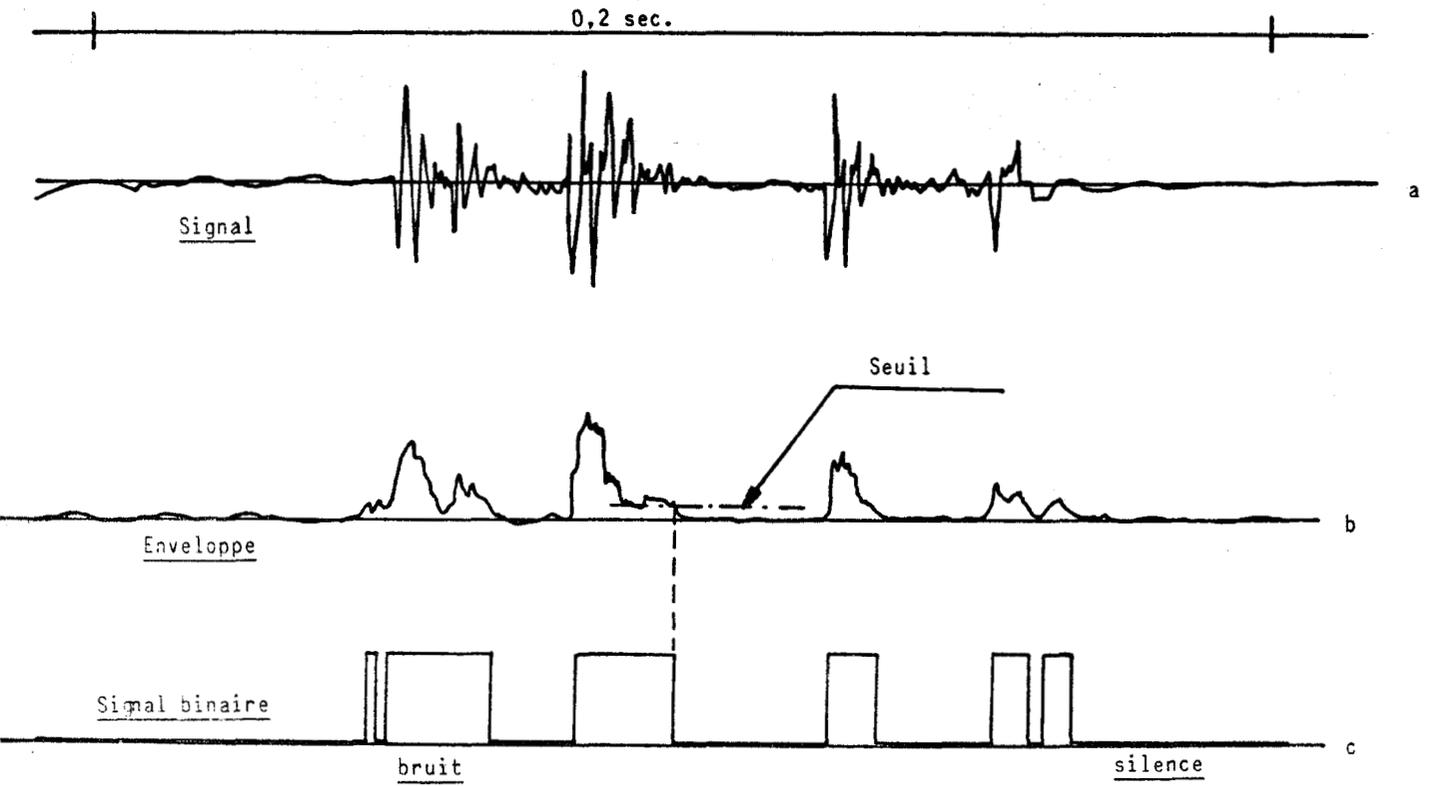


Figure 3.11. (d'après /8/)



La technique d'évaluation de l'enveloppe s'accompagne le plus souvent du calcul de la phase instantanée. Si $f(t)$ est le signal incident, on peut l'écrire sous la forme /7/ :

$$f(t) = A(t) \cdot \cos [g(t)] , \quad A(t) \geq 0 \quad (4)$$

expression dans laquelle $A(t)$ et $g(t)$ désignent respectivement l'enveloppe et la phase instantanées de $f(t)$ qui est supposé réel.

Il existe une infinité de couples $[A(t), g(t)]$ satisfaisant à l'équation (4). L'utilisation du signal analytique $f_+(t)$ associé à $f(t)$ permet de restreindre le problème et d'obtenir une solution unique. Soit, en effet, $F(\omega)$ le spectre de fréquence de $f(t)$ défini pour tout $\omega \in]-\infty, +\infty[$. Supposant que le signal $f(t)$ n'a pas de composante continue ($F(0) = 0$), on peut décomposer $F(\omega)$ à partir de deux éléments notés $F_+(\omega)$ et $F_-(\omega)$ et associés respectivement aux valeurs $\omega > 0$ et $\omega < 0$. Il vient alors :

$$F(\omega) = \frac{1}{2} [F_+(\omega) + F_-(\omega)] \quad (5)$$

Dans ces conditions, on appelle signal analytique associé à $f(t)$ le signal complexe $f_+(t)$ obtenu en évaluant la transformée de FOURIER inverse de $F_+(\omega)$. Expriment $f_+(t)$ sous forme polaire il vient :

$$\left. \begin{array}{l} f_+(t) = A(t) e^{j g(t)} \\ \text{et} \\ f(t) = \operatorname{Re}[f_+(t)] = A(t) \cdot \cos [g(t)] \end{array} \right] \quad (6)$$

Cette méthode permet de déterminer de manière unique le couple $[A(t), g(t)]$ (enveloppe-phase) associé à $f(t)$. Différentes techniques mathématiques telles que la démodulation complexe ou la transformée de HILBERT permettent de résoudre ce problème. Dans tous les cas on suppose que $f(t)$ est un signal à bande étroite.

On peut aboutir à un résultat analogue, beaucoup plus simplement, en évaluant, d'une part l'enveloppe par détection des pics d'amplitude successifs, d'autre part la phase par comptage des passages à zéro du signal. La figure 3.12. (d'après /7/) donne une idée de l'efficacité de cette méthode empirique.

2.3.4. Conclusion. Aucune des techniques décrites précédemment ne constitue un outil infaillible. Pratiquement, la détection des événements est réalisée en combinant plusieurs méthodes susceptibles de se compléter dans leur efficacité. On pourra, par exemple, utiliser le seuil de la dérivée, la dérivée de l'enveloppe ou toute autre combinaison de ce genre. L'assemblage judicieux des méthodes dépend en fait de la structure de l'événement à détecter. Dans ce sens, aucune règle de travail ne peut être définie a priori.

Il existe, par contre, une procédure dont la mise en oeuvre peut facilement se généraliser, c'est la technique du recoupement. Elle consiste à utiliser simultanément plusieurs méthodes de détection et à confronter les résultats obtenus (recoupements). Ceci fournit une plus grande sûreté de fonctionnement à tout système automatique de détection des événements.

3 - PROTOTYPES ET CLASSIFICATION :

3.1. Introduction

Dans le prolongement normal de la détection, la classification des événements vise à affecter chacun de ceux-ci à une catégorie représentative d'une situation (cf. Chapitre 2). Cette opération de classification peut elle-même se décomposer en trois étapes fondamentales qui sont :

- la définition des paramètres permettant de caractériser les événements.

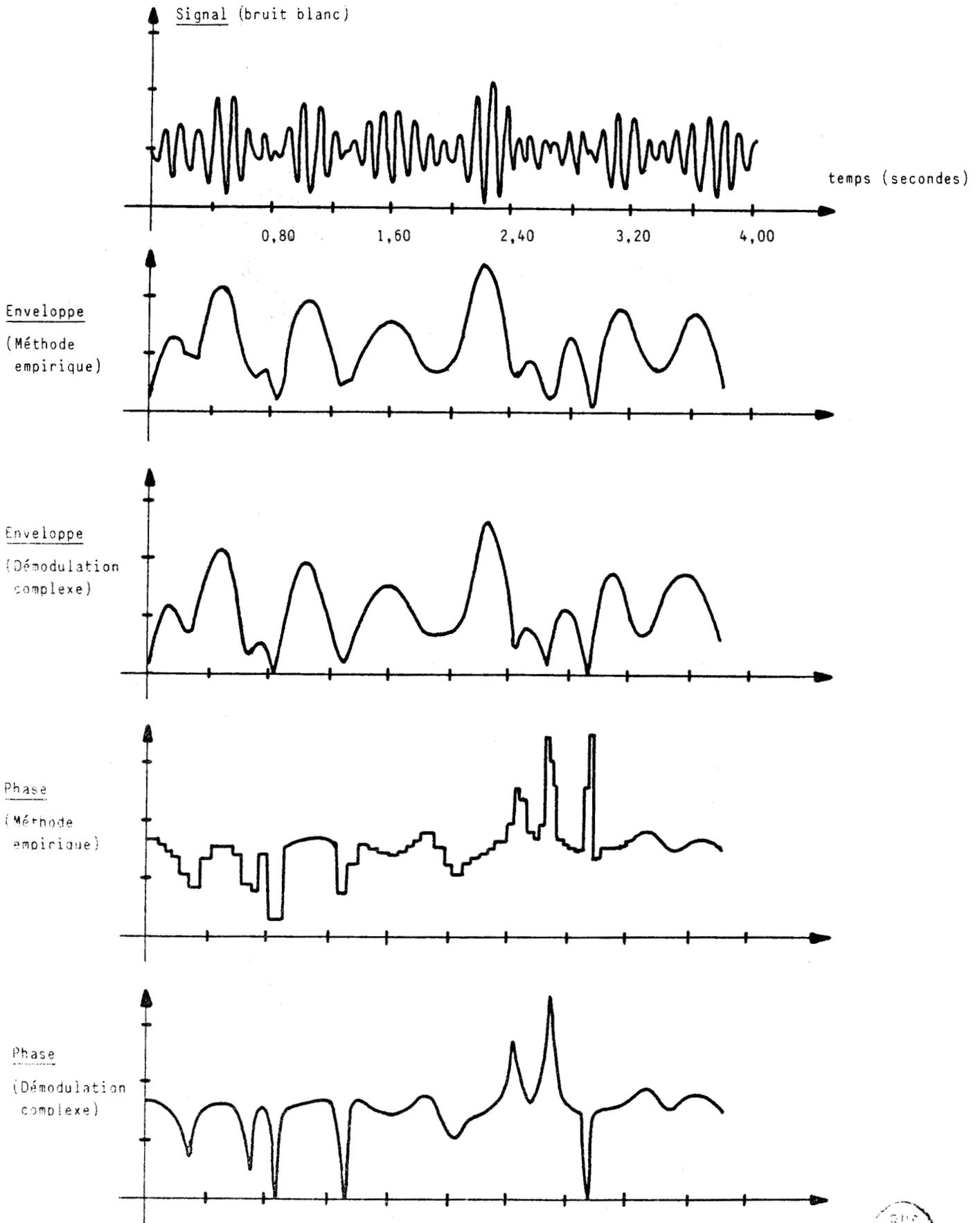


Figure 3.12. :(d'après /7/)



- la génération des événements ou des groupes d'événements prototypes constituant les références de la classification.
- la classification proprement dite.

Le but de ce paragraphe n'est évidemment pas de passer en revue les multiples méthodes qui ont été construites autour de ces trois volets de la classification. L'objectif est plutôt de mettre en relief certaines spécificités capables de servir la méthodologie définie dans les chapitres précédents. C'est dans cette optique que seront développées deux notions bien précises :

- la notion de cahier des charges associé à la définition des paramètres caractéristiques des événements.
- la notion de prototype mouvant (ou évolutif) qui permet de tenir compte du comportement non stationnaire des phénomènes observés.

3.2. Paramètres caractéristiques et cahier des charges

Le choix des paramètres caractéristiques conditionne fortement, sinon entièrement, la solution au problème de la classification. En effet, indépendamment des traitements numériques ultérieurs qu'ils peuvent subir, ce sont ces paramètres qui définissent, effectivement, l'espace initial d'observation des événements. Inversement, la finalité de l'observation ou de la classification peut conditionner le choix des paramètres caractéristiques. Cette proposition qui peut sembler moins évidente, est guidée par des considérations pratiques très simples.

A titre d'illustration, envisageons de nouveau l'examen de l'activité électrique du myocarde. Pour cela, le coeur peut être assimilé à un générateur délivrant à chaque instant une tension électrique qui est la résultante des fém élémentaires induites au niveau de chaque fibre musculaire. Cette tension présente dans l'espace une orientation et une amplitude fonctions du temps qui peuvent être représentées par un vecteur $\vec{V}(t)$ ainsi que le montre la figure 3.13. A chaque événement "cycle cardiaque"

l'extrémité de $\vec{V}(t)$ décrit une trajectoire paramétrée par le temps et dont la forme et le rythme d'occurrence sont susceptibles de caractériser le comportement (normal ou pathologique) du myocarde /9/. Dans ces conditions, on peut envisager, pour l'observation de cette activité électrique, divers contextes de travail.

Si, dans un premier cas, l'examen est strictement orienté vers le dépistage d'une cardiopathie, il faut appréhender sur chaque trajectoire un nombre important de points caractéristiques ou de paramètres. En effet le but est ici de réaliser une classification suffisamment discriminante pour conduire à la détections des différentes pathologies ou anomalies recensées par les spécialistes : hypertrophies auriculaires, ventriculaires, troubles de la conduction, troubles du rythme.....Plus généralement et pour utiliser le vocabulaire défini dans le chapitre précédent, on dira que, dans ce cas, le nombre de situations associées à chaque événement est important. Conséquemment le nombre de paramètres à appréhender est, lui aussi, important. Dans un tel contexte l'examen est effectué selon un protocole parfaitement standardisé, intégrant notamment la nécessité de placer le patient dans des conditions particulières (repos, épreuve d'effort...). En outre, pour suivre l'évolution d'une éventuelle pathologie, il importe de renouveler l'observation périodiquement (par exemple tous les mois).

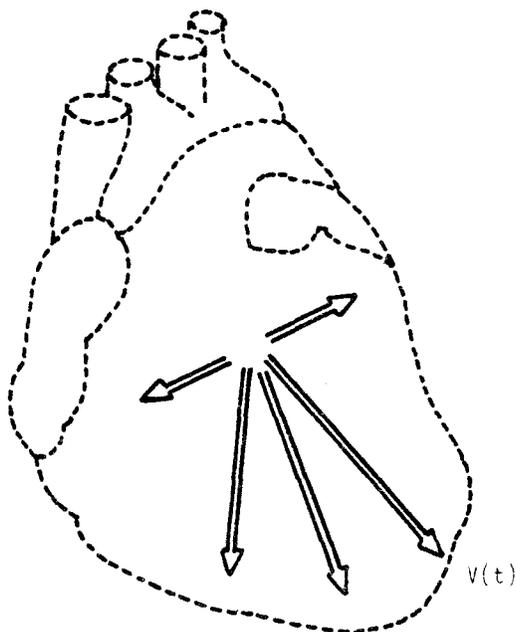


Figure 3.13. (d'après /9/)

Dans un second cas, on suppose que l'examen est effectué sur un patient dont l'état a nécessité l'admission dans une unité de soins intensifs en réanimation respiratoire. Ici, le but essentiel peut être de détecter rapidement les signes électriques d'un coeur dit "pulmonaire aigu", c'est-à-dire d'un coeur dont le fonctionnement est perturbé ou altéré par une augmentation soudaine de la pression dans la petite circulation /9/. Il apparaît que, dans un tel contexte, le champ des investigations à effectuer peut être singulièrement réduit. Pratiquement on se contente d'examiner un simple tracé électrocardiographique, c'est-à-dire la projection de la trajectoire définie précédemment sur une droite de l'espace. L'orientation de cette droite est choisie de manière à obtenir des résultats significatifs du point de vue de cet examen particulier. Par contre et dans l'esprit d'une surveillance en continu il faut pouvoir, dans ce cas, effectuer l'examen très rapidement, en temps réel, et dans des conditions parfois difficiles (sujet agité, sujet non coopératif,...).

Ces deux exemples se rapportant l'un et l'autre à la classification des événements "cycles cardiaques" montrent combien la méthodologie et les critères de travail peuvent être influencés par la finalité de l'opération à effectuer. Dans ce sens, il apparaît que les modalités de la classification doivent être soumises à un cahier des charges très précis. Ce cahier des charges initialement élaboré par l'utilisateur (ici le médecin) doit ensuite être amélioré par un échange de points de vue entre le concepteur et l'utilisateur. Les objectifs essentiels du cahier des charges sont alors :

- i) définir le contexte de l'observation.
- ii) préciser l'ensemble des situations $\{S_j, j = 1, L\}$ à détecter dans le contexte défini en i).
- iii) préciser les critères, indices ou paramètres, permettant de caractériser chacune des situations définies en ii). Ces critères, paramètres ou indices peuvent être qualitatifs ou quantitatifs.

- iv) analyser de manière aussi détaillée que possible la démarche selon laquelle l'utilisateur exploite les critères, paramètres ou indices pour la détection des situations.

Cette méthodologie est guidée par le fait que, pratiquement, l'étude de la genèse des événements (et particulièrement des événements biologiques) conduit le spécialiste à définir un nombre important de paramètres visant à décrire le processus observé aussi finement que possible. Dès lors, l'établissement du cahier des charges tend à simplifier le problème de la classification en le ramenant au traitement d'un lot parfaitement défini de situations potentielles. Sans cette simplification initiale, la multiplicité des grandeurs mises en jeu conduirait à des solutions dont la complexité serait sans commune mesure avec la clarté des objectifs habituellement recherchés.

La figure 3.14. illustre ces principes en mettant en évidence :

- l'événement à analyser.
- l'ensemble initial des paramètres caractéristiques de l'événement définis par le spécialiste.
- les différents lots de situations potentielles. Chacun de ces lots correspond à un cahier des charges et à un contexte.
- les procédures de classification associées à chacun des lots de situations.

. REMARQUE : L'élaboration de l'ensemble initial des paramètres caractéristiques de l'événement a été présentée comme un résultat des recherches effectuées par le spécialiste. On peut également envisager, à ce niveau, la collaboration d'un intervenant extérieur dont le rôle serait de choisir, parmi tous les paramètres possibles, ceux qui constituent l'ensemble initial optimal. Des méthodes mathématiques statistiques telles que l'analyse en composantes principales permettent de guider efficacement un tel choix /10/.

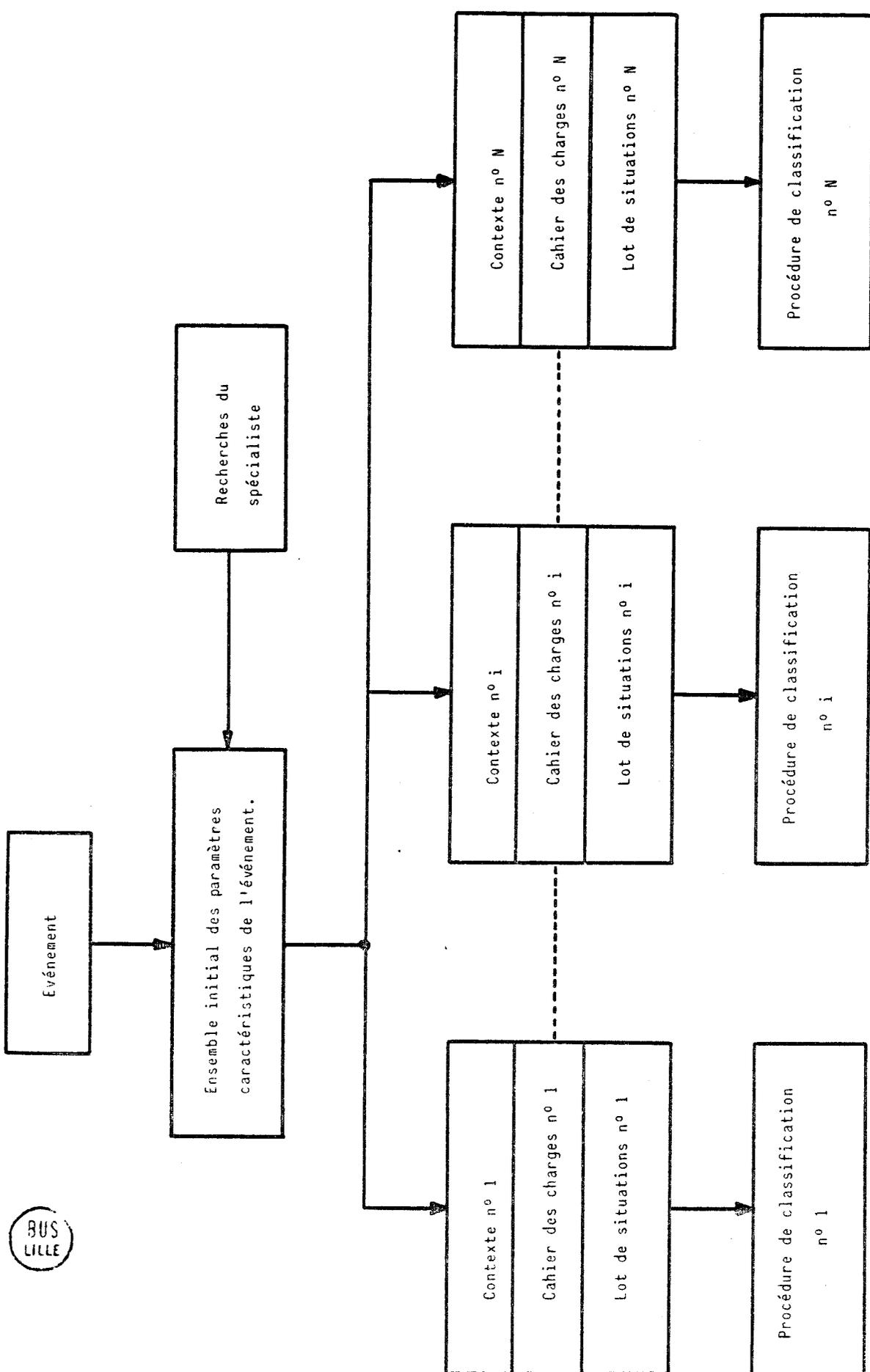


Figure 3.14.



3.3. Les situations prototypes

3.3.1. Introduction. L'établissement du cahier des charges tel qu'il a été défini précédemment conduit à une procédure interactive d'apprentissage impliquant à la fois le concepteur et l'utilisateur. Le double but de cet apprentissage est :

- différencier un lot de situations prototypes S_i , $i = 1, L$, recensées par le spécialiste.
- faire référence au lot ainsi défini pour affecter tout nouvel événement, survenant après la phase d'apprentissage, à l'une des situations S_i .

Un tel schéma ne tient pas compte du fait que la plupart des phénomènes appréhendés dans le cadre de cette étude ne sont pas stationnaires et qu'un prototype peut évoluer au cours d'une observation. Ainsi, le prototype de l'arythmie cardiaque peut évoluer d'un individu à l'autre, puisqu'il est défini à partir du rythme de base. Il peut même évoluer, pour un même individu, selon les conditions de l'observation (repos, effort, etc...) Dès lors, le contrôle et la remise à jour des prototypes apparaissent comme des opérations indispensables à l'efficacité d'une bonne observation. La formulation du problème de classification doit pouvoir tenir compte de ces divers aspects.

3.3.2. Formulation du problème.

Soit $\{e_n, n = -\infty, \dots, +\infty\}$ une suite d'événements définissant une chaîne chronologique. Si c est le nombre de paramètres caractérisant un événement, on peut représenter cet événement par un point d'un espace euclidien de dimension c , noté E^c . Dans ces conditions, soit $p(e)$ la fonction de distribution d'un ensemble d'événements appartenant à E^c . En général, cette fonction de distribution est multimodale et chaque mode peut être associé à une situation S_i /11, 12/. A titre d'exemple, le figure 3.15. donne l'illustration d'un espace à deux dimensions ($c = 2$) dans lequel apparaît un nuage d'événements pouvant, lui-même, être partitionné en

deux sous nuages SN1 et SN2 associés à deux situations S_1 et S_2 . Plus précisément, le nuage de points considéré a une distribution $p(e)$ bimodale et chacun des modes représente une situation.

On appelle alors noyau prototype de la situation S_i un sous ensemble de SN_i contenant les événements représentatifs de cette situation. C'est en se référant à ces noyaux, notés P_i sur la figure 3.15, que l'on affecte tout nouvel événement incident à l'une des situations S_i .

Pratiquement, le problème fondamental de la détermination des noyaux prototypes se pose à deux niveaux :

- i) au niveau de la phase d'apprentissage qui permet de déterminer les noyaux prototypes initiaux.
- ii) au niveau du régime permanent durant lequel on réactualise les caractéristiques des noyaux prototypes à chaque fois qu'un nouvel événement est affecté à l'une des situations S_i . Dans ce sens, les règles de réactualisation constituent des éléments fondamentaux de cette seconde phase.

Ces deux niveaux de travail sont examinés dans la suite du développement.

3.4. Détermination des noyaux initiaux (d'après /13/)

3.4.1. Principes. Durant la phase d'apprentissage, l'observateur appréhende un ensemble de N événements qui doit permettre d'aboutir à la génération des noyaux prototypes, initiaux notés P_i^0 ($i = 1, \dots, L$). D'autre part, on ne nuit pas à la généralité en supposant que les N événements considérés sont : e_j , $j = -(N-1), \dots, 0$.

Au nuage ainsi constitué correspond une fonction de distribution $p(e)$ et le problème posé revient à réaliser une partition de E^C en sous ensembles P_i^0 ($i = 1, \dots, L$) de telle sorte qu'à l'intérieur de chacun de ces sous ensembles la fonction $p(e)$ soit unimodale. Pratiquement, $p(e)$ est inconnue et c'est donc sur une estimation $\hat{p}(e)$ de $p(e)$ qu'il convient de travailler /14, 15, 16, 17/. Une méthode possible de partition

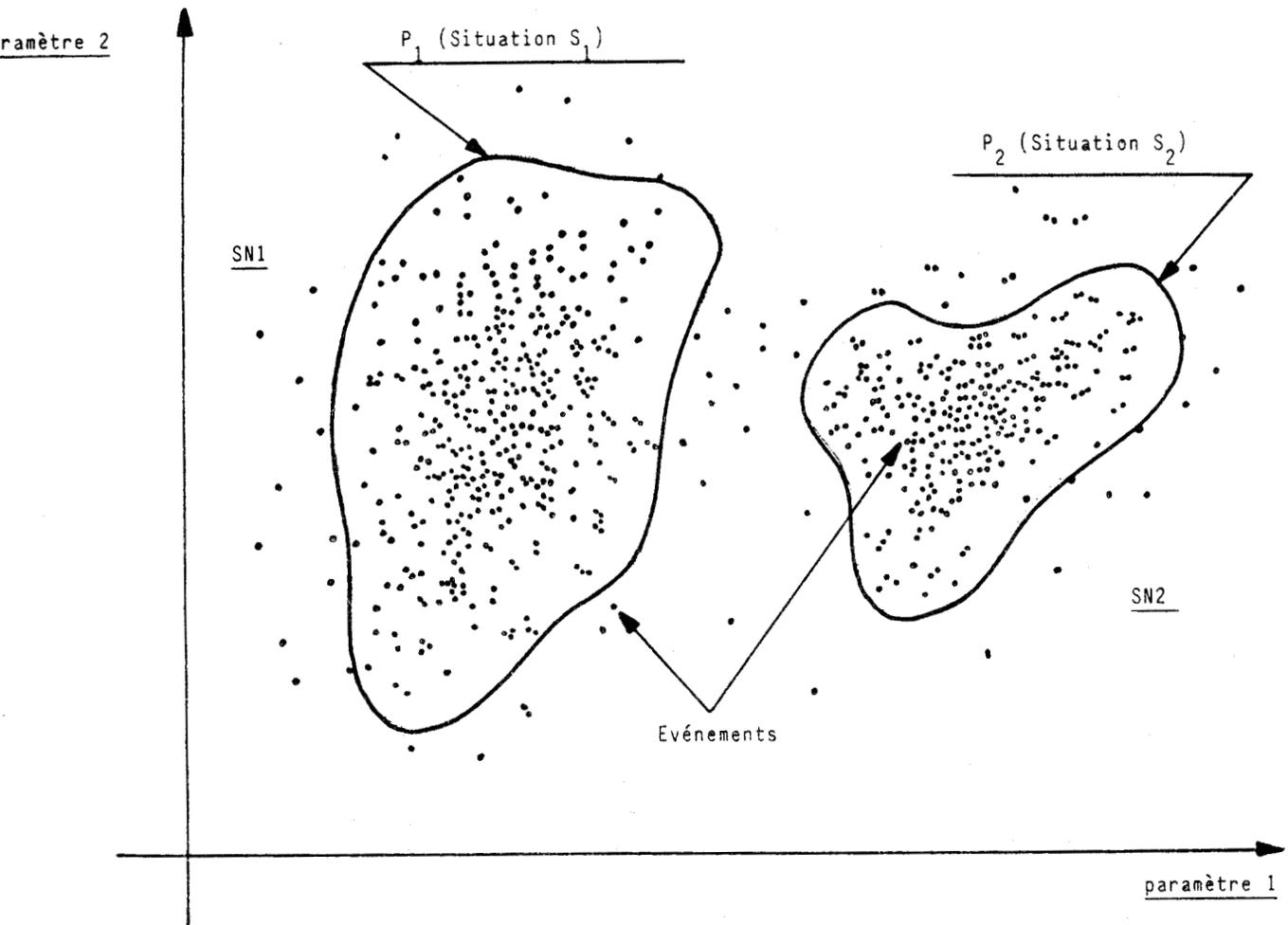


Figure 3.15.

s'appuie sur l'observation suivante : à quelques exceptions près caractérisant davantage des hypothèses d'école que des cas concrets, la fonction d'estimation $\hat{p}(e)$ peut être choisie concave au voisinage de ses modes et convexe dans les vallées séparant ces modes. Compte-tenu de cette observation, on peut séparer les modes, non pas en recherchant une fonction d'estimation $\hat{p}(e)$, mais simplement en testant la structure de cette fonction (concave ou non concave). La séparation découle ensuite immédiatement des tests de concavité effectués.



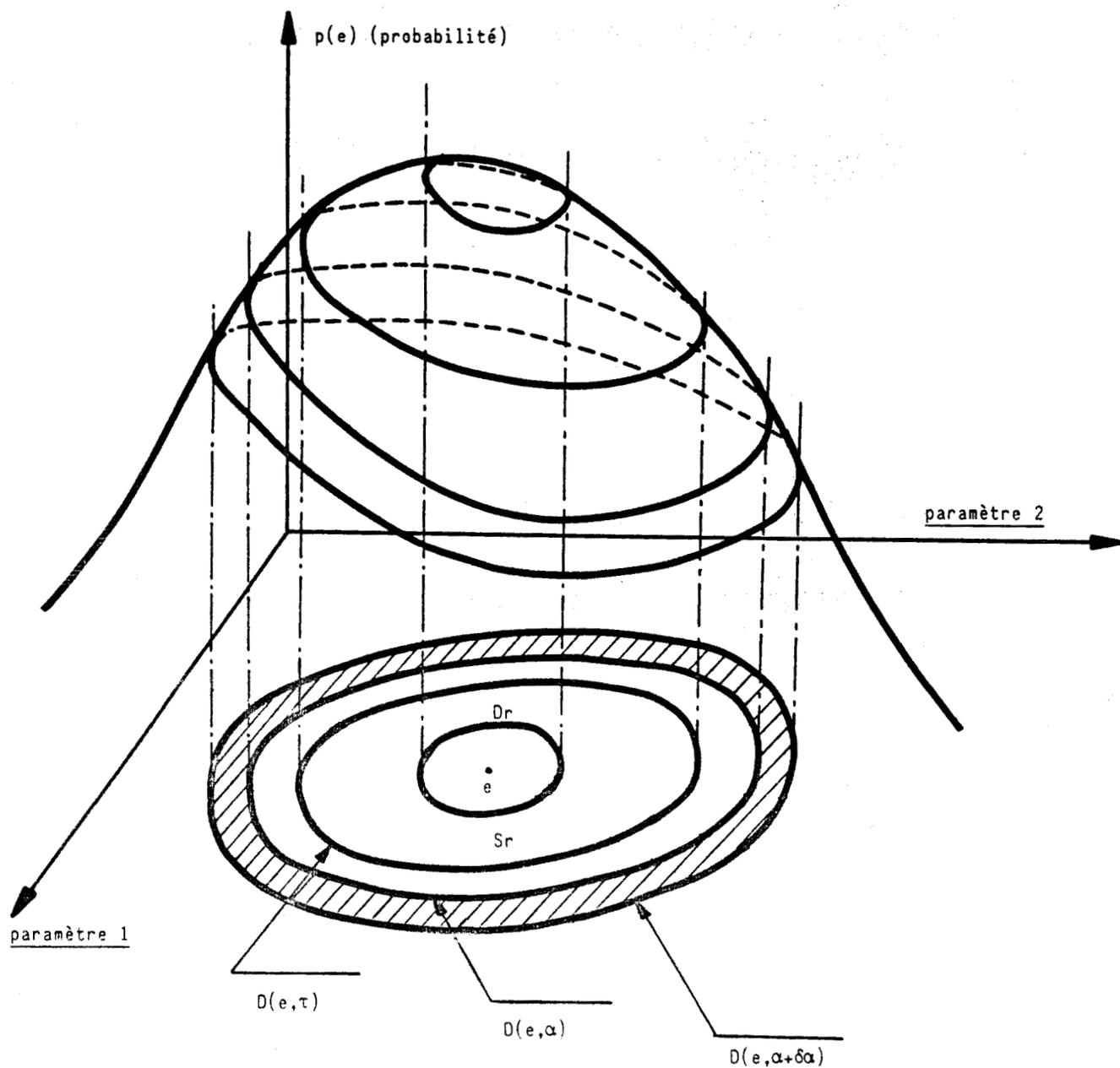


Figure 3.16.

3.4.2. Définitions de base. Les tests de concavité sont fondés sur l'analyse des variations de la valeur moyenne de la densité de probabilité calculée sur des domaines d'observation de dimensions variables. La figure 3.16. donne une illustration de tels domaines pour $c = 2$.

Soit D_r un domaine convexe de E^c appelé domaine de référence. D_r présente un centre de symétrie et sa frontière se caractérise par une hypersurface S_r . Dans ces conditions, on peut associer à chaque point e de E^c une famille de domaines notés $D(e, \alpha)$ centrés en e et homothétiques du domaine de référence D_r également centré en e . L'homothétie est caractérisée par son centre e et son rapport réel positif α .

Les domaines tels que $D(e, \alpha)$ sont appelés domaines d'observations.

3.4.3. Propriétés fondamentales des domaines d'observation.

i) Evaluation de la valeur moyenne de $p(e)$ sur $D(e, \alpha)$. Cette valeur moyenne est donnée par l'expression :

$$\text{Moy } \{p(e)\}_{D(e, \alpha)} = \frac{\int_{D(e, \alpha)} p(\xi) d\xi}{\int_{D(e, \alpha)} d\xi} \quad (7)$$

Les intégrations apparaissant dans l'expression (7) se font par rapport au domaine $D(e, \alpha)$, de telle sorte que, α variant, la quantité $\text{Moy } \{p(e)\}_{D(e, \alpha)}$ peut être considérée comme une fonction de α .

. REMARQUE : Si on assimile $p(e)$ à une masse volumique, le numérateur de l'expression (7) représente la masse $M\{D(e, \alpha)\}$ du domaine $D(e, \alpha)$ tandis que le dénominateur de (7) en représente le volume $V\{D(e, \alpha)\}$. L'équation (7) évalue alors la masse volumique moyenne $\rho\{D(e, \alpha)\}$ de $D(e, \alpha)$:

$$\text{Moy } \{p(e)\}_{D(e,\alpha)} = \rho\{D(e,\alpha)\} = \frac{M\{D(e,\alpha)\}}{V\{D(e,\alpha)\}} \quad (8)$$

ii) THEOREME 1 : Le volume $V\{D(e,\alpha)\}$ du domaine d'observation $D(e,\alpha)$ a pour expression :

$$V\{D(e,\alpha)\} = \alpha^c V(D_r),$$

dans laquelle c et $V(D_r)$ représentent respectivement la dimension de l'espace E^c et le volume du domaine de référence D_r .

iii) THEOREME 2 : $\rho\{D(e,\alpha)\}$ est une fonction monotone décroissante (resp. croissante) de $\alpha > 0$, pour tout domaine de $D(e,\alpha)$ inclus dans une portion D de E^c à l'intérieur de laquelle $p(e)$ est concave (resp. non concave).

Afin de ne pas alourdir l'exposé par un développement mathématique qui n'apporterait rien à la compréhension de l'étude, nous faisons figurer les démonstrations de ces théorèmes dans l'annexe A2.

3.4.4. Séparation des modes. Elle résulte immédiatement des propriétés définies précédemment. On effectue une scrutation de l'espace E^c en associant à chaque point e de cet espace une famille de domaines d'observation $D(e,\alpha)$. L'étude des variations de $\rho\{D(e,\alpha)\}$ dans un voisinage donné de e rend alors compte de la concavité de $p(e)$ dans ce voisinage. Plus précisément, si $\rho\{D(e,\alpha)\}$ est décroissante dans le voisinage $V(e)$ de e correspondant à des valeurs de α variant de 0 à α_M , alors il est possible d'adopter pour $p(e)$ une estimation $\hat{p}(e)$ concave dans ce voisinage. De la même manière, si $\rho\{D(e,\alpha)\}$ est croissante on adopte pour $p(e)$ une estimation $\hat{p}(e)$ non concave dans le voisinage $V(e)$.

Les régions unimodales, c'est-à-dire les noyaux prototypes initiaux, sont alors obtenues en regroupant les voisinages concaves non séparés par des voisinages non concaves. Par nature, ce regroupement ou chaînage, permet de construire des noyaux prototypes de tailles et de contours très variés.

3.4.5. Implantation sur calculateur numérique.

i) test de concavité.

Il est réalisé très simplement en découpant l'espace E^C en un réseau d'hypercubes élémentaires définis selon la procédure suivante. Soit N le nombre d'événements observés. Chaque événement e_i est représenté dans E^C par un vecteur :

$$e_i = (e_i^1, e_i^2, \dots, e_i^c) \quad i = 1, N$$

La première opération effectuée consiste à normaliser l'ensemble des coordonnées des événements de telle sorte que :

$$\max_i e_i^j - \min_i e_i^j = 1 \quad \forall j = 1, c$$

Dans ces conditions, les N événements e_i sont contenus dans un hypercube de côté 1. Chaque côté de cet hypercube est alors divisé en K intervalles égaux de manière à réaliser dans E^C un réseau de K^C hypercubes élémentaires. La figure 3.17. illustre un tel réseau pour $c = 2$, avec le nuage des N événements à analyser.

Chacun des hypercubes élémentaires de côté $1/K$ noté $C_{1/K}^m$ ($m = 1, K^C$) constitue un domaine d'observation. Le test de concavité consiste alors à évaluer, pour un hypercube donné, la densité moyenne d'événements à l'intérieur de cet hypercube puis la densité moyenne à l'intérieur de l'hypercube homothétique de côté $3/K$: $C_{3/K}^m$.

Si la valeur moyenne décroît lors du passage de $1/K$ à $3/K$, alors on adopte un modèle concave pour la distribution des événements à l'intérieur de l'hypercube élémentaire. Dans le cas contraire on adopte un modèle convexe. Le mécanisme de ce test est illustré figure 3.17.

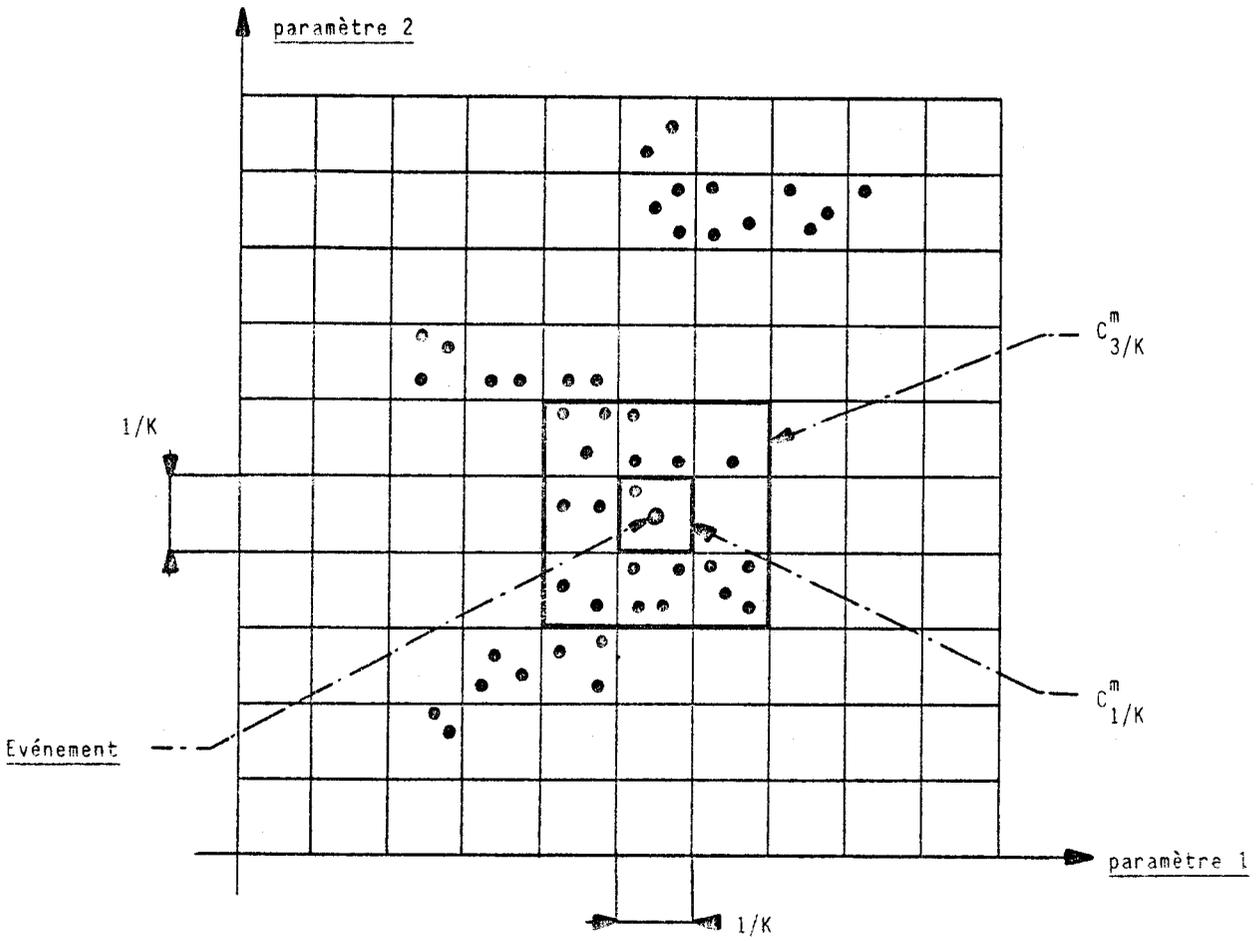


Figure 3.17.



ii) génération des noyaux prototypes initiaux.

Le principe en est illustré figure 3.18. Soit Π l'ensemble des H hypercubes élémentaires à l'intérieur desquels une estimation concave de $p(e)$ a été adoptée. On note :

$$\Pi = \{C_{1/K}^1\} \quad l = 1, H$$

Si l'échantillon analysé contient L noyaux prototypes P_i^0 ($i = 1, L$), ces noyaux réalisent une partition de Π :

$$\Pi = \{P_i^0\} \quad i = 1, L$$

avec

$$P_i^0 = \{C_{1/K}^{1i}, C_{1/K}^{2i}, \dots, C_{1/K}^{v_i i}\}$$

Dans cette dernière expression, v_i désigne le nombre d'hypercubes élémentaires constituant P_i^0 et :

$$\sum_{i=1}^L v_i = H$$

Les noyaux prototypes sont alors caractérisés par les propriétés suivantes :

- un noyau P_i^0 ne peut contenir d'hypercube isolé sauf si $v_i = 1$
- étant donnés deux noyaux quelconques $P_{i_1}^0$ et $P_{i_2}^0$, il n'est pas possible de trouver un hypercube élémentaire commun ou adjacent à $P_{i_1}^0$ et $P_{i_2}^0$.

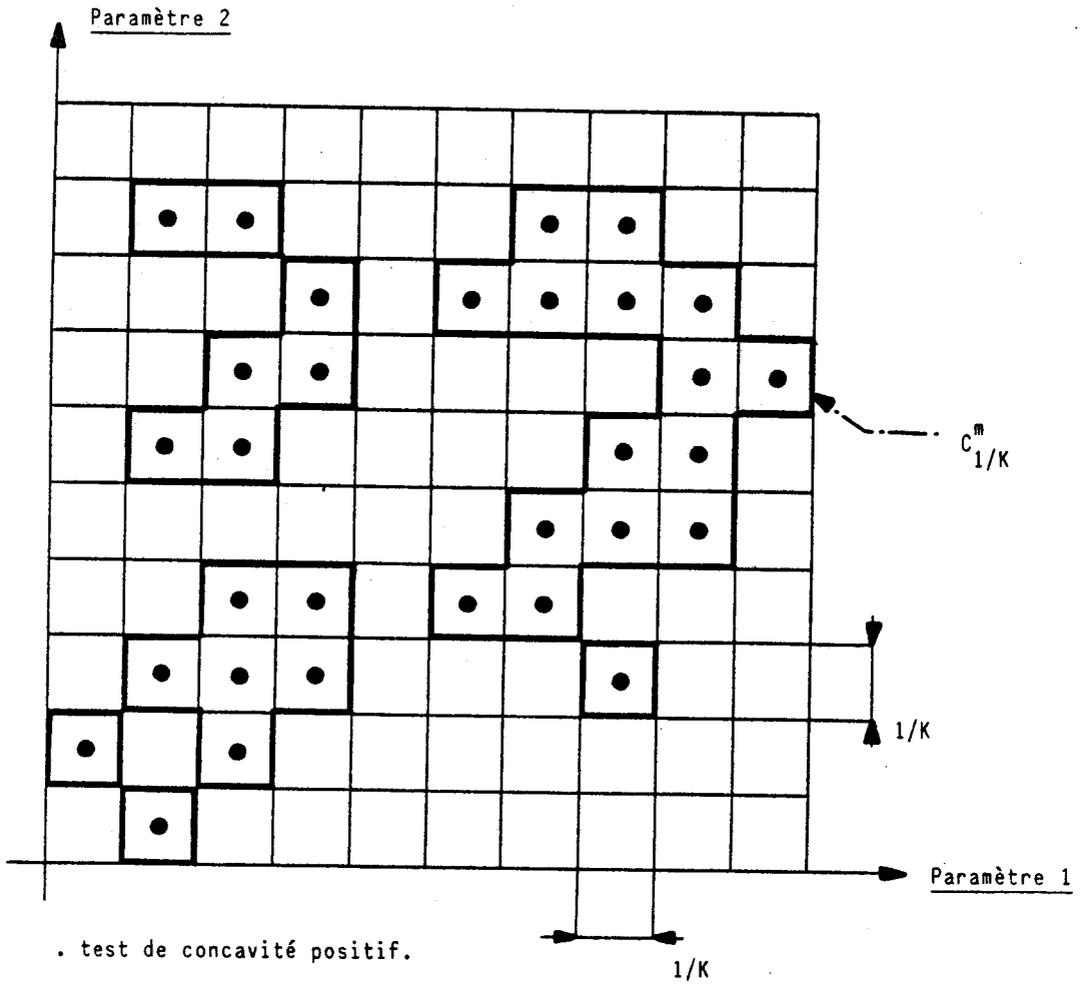


Figure 3.18.

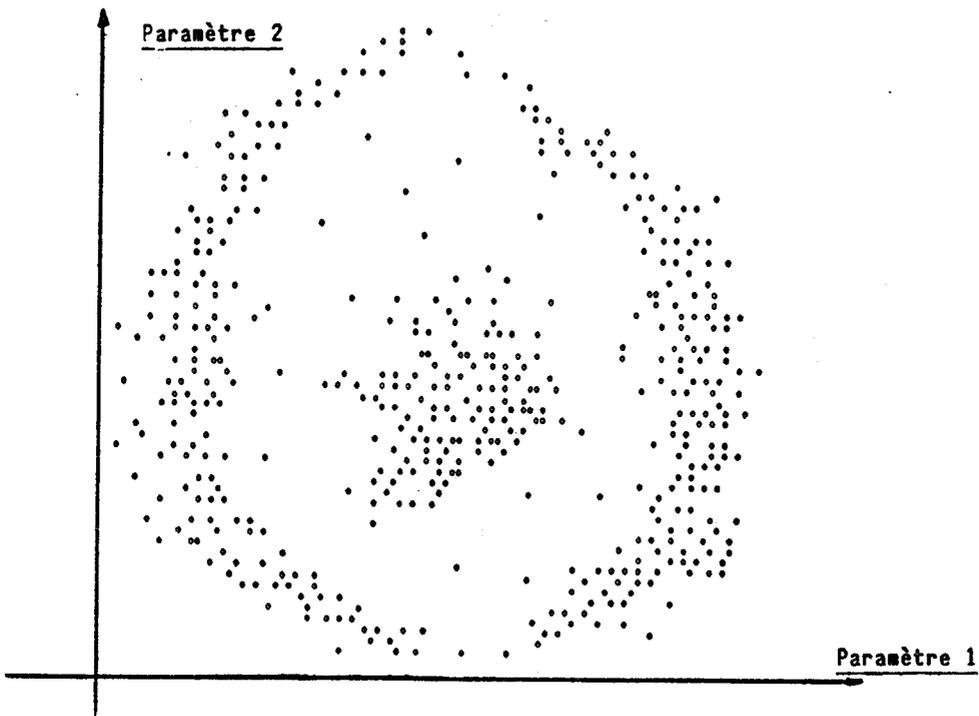


Figure 3.19.

BUS
LILLE

La partition de Π ainsi réalisée permet de détecter des noyaux de tailles et de formes quelconques. Le facteur de découpage K influe sur la définition des contours. Pour de faibles valeurs de K on obtient des contours grossiers, tandis que pour des valeurs élevées de K il est possible de mettre en évidence des contours très découpés.

La figure 3.19. donne l'illustration d'une distribution à trois modes non linéairement séparables. Enfin la figure 3.20. donne les résultats obtenus pour quelques valeurs de K .

. REMARQUE : D'autres procédures telles que la méthode des k plus proches voisins permettent d'estimer les variations de la densité moyenne de probabilité autour d'un point de l'espace des caractéristiques. Elles conduisent à des résultats analogues qu'on pourra trouver dans la référence /18/.

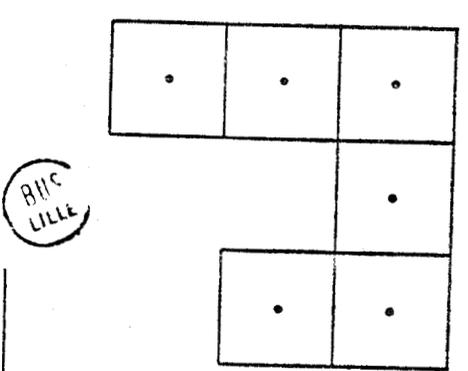
3.4.6. Conclusion. La méthode de génération de noyaux prototypes décrite ici fait essentiellement appel à des procédures de comptage et de décisions logiques. Il en résulte, lors de l'implantation sur ordinateur une grande économie de temps de calcul.

A titre indicatif, pour $c = 2$ on analyse 500 événements en quelques secondes sur un ordinateur de puissance moyenne équipé de la multiplication/division câblée.

Dès lors, il est possible, par cette technique, d'élaborer très rapidement les noyaux prototypes et de les caractériser :

- par leurs contours
- par les densités moyennes d'événements affectées à chacun des hypercubes élémentaires constitutifs.

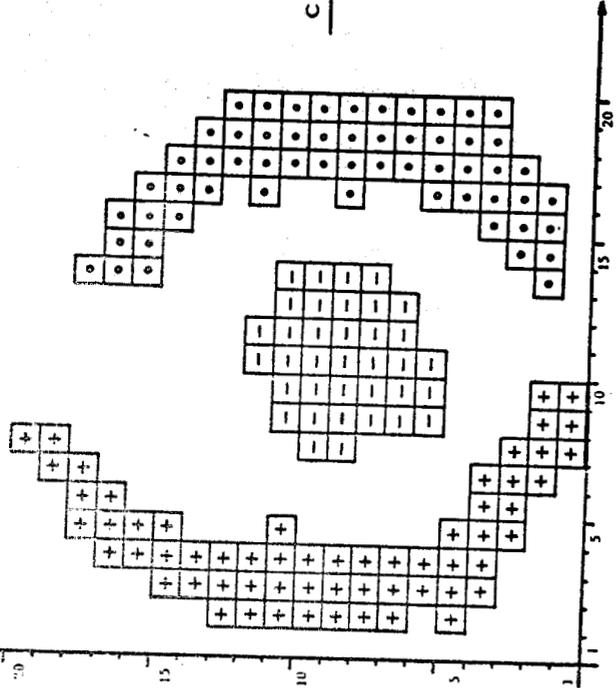
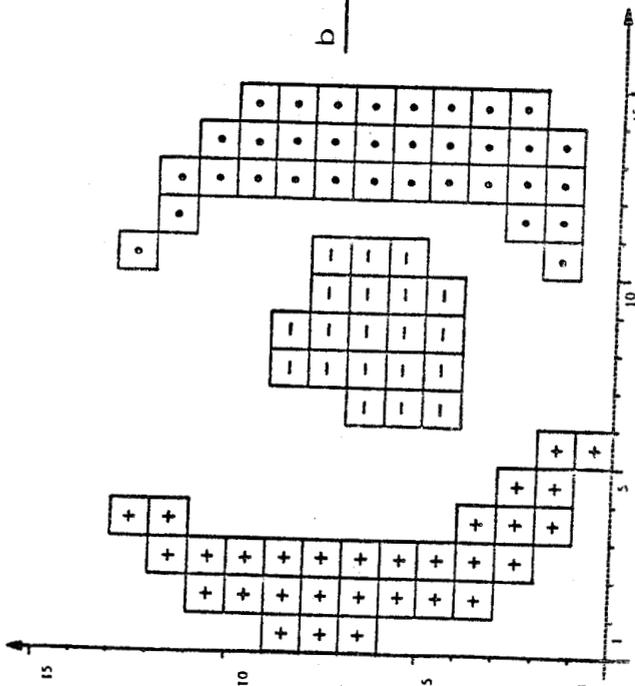
Paramètre 2



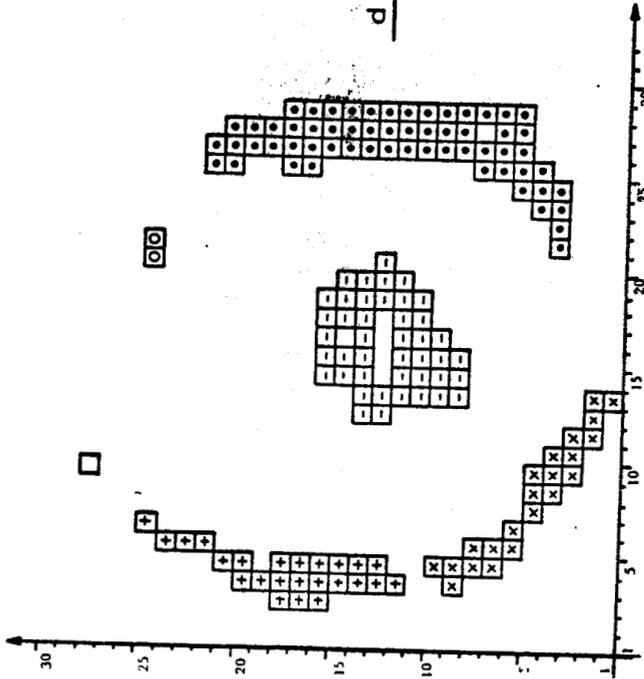
a : K = 5

Paramètre 1

b : K = 15



c : K = 20



d : K = 30

Figure 3.20.

La suite du développement vise à montrer comment les prototypes eux-mêmes peuvent évoluer lorsque de nouveaux événements apparaissent dans le cadre d'un comportement non stationnaire.

3.5. Evolution des prototypes

Connaissant les noyaux prototypes P_i^0 ($i = 1, L$), élaborés à partir des événements e_j ($j = -(N-1), 0$), il convient de définir les opérations à effectuer lors de l'apparition de l'événement suivant e_1 . Ces opérations se résument à deux actions :

- i) décider de l'appartenance de e_1 à l'une des situations S_i ($i = 1, L$) associées aux prototypes P_i^0 ($i = 1, L$).
- ii) remettre à jour les prototypes à partir de l'information supplémentaire apportée par l'événement e_1 . On génère de cette manière de nouveaux prototypes notés P_i^1 ($i = 1, L$).

Cette procédure est réitérée à chaque fois qu'un nouvel événement apparaît, de telle sorte qu'à l'occurrence de l'événement e_n , les prototypes de référence et les prototypes générés sont respectivement P_i^{n-1} et P_i^n ($i = 1, L$).

3.5.1. Affectation des nouveaux événements. Cette affectation peut se faire selon une procédure bayésienne utilisant les caractéristiques statistiques de chacun des prototypes /19/.

Dans un premier temps on considère que la densité de probabilité caractérisant l'ensemble des événements étudiés est un mélange des densités de probabilité caractérisant chacun des prototypes. Plus précisément on adopte les notations suivantes :

- i) $p(e)$: densité de probabilité de l'ensemble des événements $n-1$ survenus dans E^c jusqu'à e_n exclus.

- ii) $p_{n-1}(e/P_i^{n-1})$: densité de probabilité caractérisant le prototype P_i^{n-1}
- iii) $p_{n-1}(P_i^{n-1})$: probabilité a priori du prototype P_i^{n-1} .

Ces trois éléments sont liés par la relation

$$p(e) = \sum_{i=1}^L p_{n-1}(e/P_i^{n-1}) \cdot p_{n-1}(P_i^{n-1}) \quad (9)$$

De plus la fonction $p_{n-1}(e/P_i^{n-1})$ est caractérisée par un paramètre généralisé noté α_i^{n-1} . Par exemple si le mélange est gaussien, ce paramètre généralisé est constitué d'un événement moyen \bar{e}_i^{n-1} et d'une matrice de covariance Σ_i^{n-1} , de telle sorte que $p_{n-1}(e/P_i^{n-1})$ s'écrit :

$$p_{n-1}(e/P_i^{n-1}) = \frac{1}{(2\pi)^{c/2} |\Sigma_i^{n-1}|^{1/2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (e - \bar{e}_i^{n-1})^T (\Sigma_i^{n-1})^{-1} (e - \bar{e}_i^{n-1}) \right] \quad (10)$$

On pourra d'ailleurs trouver dans /20/ une méthode permettant d'estimer \bar{e}_i^{n-1} et Σ_i^{n-1} à partir des noyaux prototypes tels qu'ils ont été définis précédemment.

Dans un deuxième temps, on définit une fonction de coût notée $c(S_i/S_j)$ qui évalue la pénalité accordée pour avoir affecté à une situation S_i , un événement appartenant en fait à la situation S_j . Cette fonction permet d'évaluer un coût moyen de classification relatif à une situation S_j donnée. Le coût, noté $K^{n-1}(e, S_j)$, s'écrit :

$$K^{n-1}(e, S_j) = \sum_{i=1}^L c(S_j/S_i) \cdot p(P_i^{n-1}/e) \quad (11)$$

expression dans laquelle $p(P_i^{n-1}/e)$ représente la probabilité d'occurrence de la situation S_i lorsqu'on observe l'événement e . On peut interpréter $K^{n-1}(e, S_j)$ comme la moyenne des coûts individuels $c(S_j/S_i)$, chacun d'entre eux étant pondéré par $p(P_i^{n-1}/e)$.

Dans ces conditions, la règle d'affectation d'un nouvel événement e_n survenant dans E^C s'énonce comme suit :

" e_n est affecté à la situation S_k qui minimise le coût $K^{n-1}(e_n, S_j)$, ($j = 1, L$)".

Cette proposition s'écrit encore :

$$e_n \in S_k \text{ telle que } K^{n-1}(e_n, S_k) \leq K^{n-1}(e_n, S_j), \forall j = 1, L \quad (12)$$

. EXEMPLE : Examinons ce que devient l'expression (11) lorsqu'on adopte une fonction de coût de la forme :

$$c(S_j/S_i) = 1 - \delta_{ij}, \quad \text{où } \delta_{ij} = 1 \text{ si } i = j \\ \delta_{ij} = 0 \text{ si } i \neq j$$

Cette fonction est telle que lorsque la classification est correcte (c'est-à-dire lorsque $i = j$), le coût d'affectation est nul. Par contre lorsque l'affectation est erronée, la pénalité vaut 1. Dans ces conditions, l'expression (11) peut s'écrire :

$$K^{n-1}(e, S_j) = \left[\sum_{i=1}^L p(P_i^{n-1}/e) \right] - p(P_j^{n-1}/e) \quad (13)$$

D'autre part, par application de la formule de Bayes, on sait que :

$$p(P_k^{n-1}/e) = \frac{p_{n-1}(e/P_k^{n-1}) \cdot p_{n-1}(P_k^{n-1})}{p(e)} \quad \forall k = 1, L \quad (14)$$

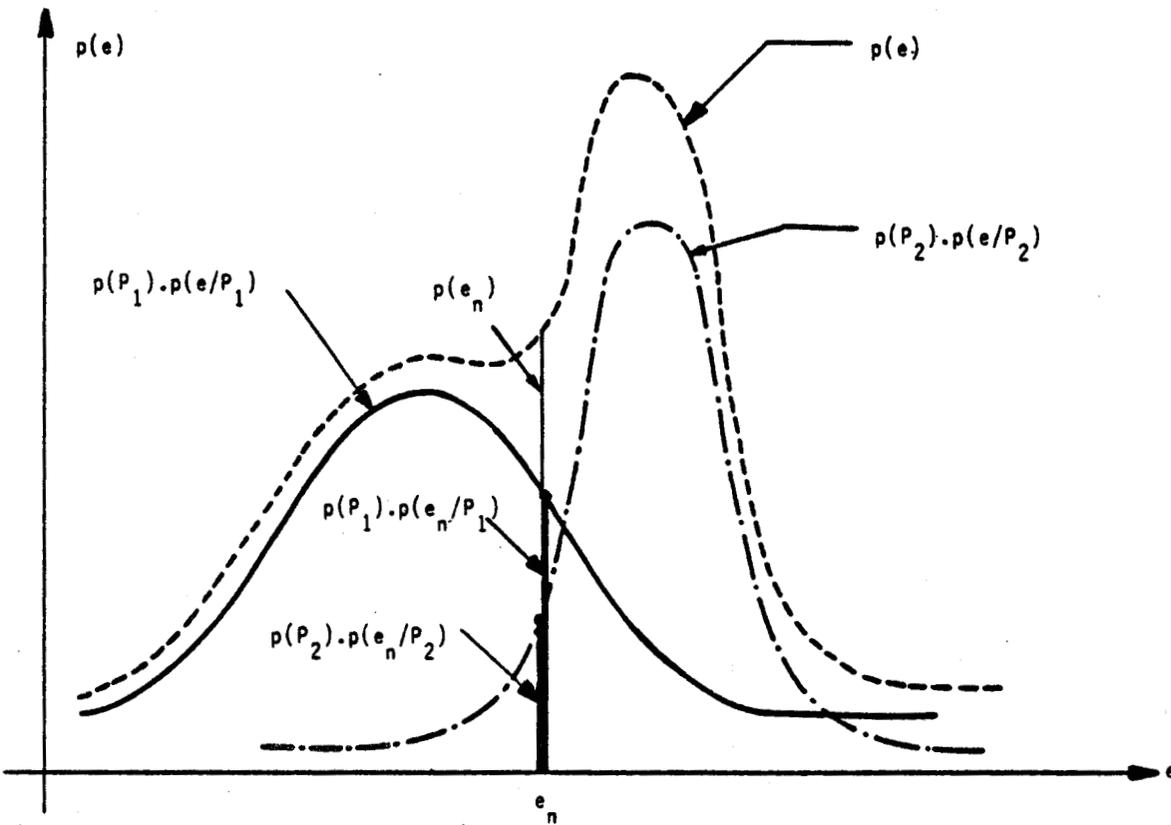


Figure 3.21.



Utilisant cette expression et l'expression (9) pour calculer (13) il vient :

$$K^{n-1}(e, S_j) = 1 - \frac{p_{n-1}(e/p_j^{n-1}) \cdot p_{n-1}(p_j^{n-1})}{p_{n-1}(e)} \quad (15)$$

Ainsi, pour un nouvel événement e_n , trouver j minimisant $K^{n-1}(e_n, S_j)$ revient à trouver j maximisant l'expression :

$$p_{n-1}(e_n/p_j^{n-1}) \cdot p_{n-1}(p_j^{n-1}) \quad (16)$$

En effet ce terme est le seul dépendant de j dans (15).

. REMARQUE : Ce résultat est évident a priori. En effet, d'après (9) l'expression (16) représente la contribution du prototype P_j^{n-1} à l'élaboration de la valeur $p_{n-1}(e_n)$. Les calculs précédents montrent alors que l'événement e_n est affecté à la situation dont le prototype contribue le plus à l'élaboration de $p_{n-1}(e_n)$. La figure 3.21. donne une interprétation géométrique de ce résultat dans le cas où $c = 1$ et $L = 2$.

3.5.2. Remise à jour des prototypes. L'affectation des nouveaux événements ne doit pas se faire en référence à des prototypes figés une fois pour toute, lors de la phase d'apprentissage. Une telle démarche serait dangereuse, d'abord parce qu'elle ne tiendrait pas compte de l'aspect parfois non stationnaire des phénomènes observés, ensuite parce que l'information apportée par chaque nouvel événement resterait inexploitée. Afin de remettre à jour constamment les prototypes utilisés, il convient de procéder par récurrence. Dans ce sens, la contribution d'un nouvel événement e_n à l'évolution de l'ensemble des prototypes se traduit de deux manières :

- i) d'abord par modification du paramètre généralisé α_k^{n-1} caractérisant le prototype de la situation à laquelle est affecté e_n .

- ii) ensuite par modification de toutes les probabilités a priori $p_{n-1}(p_i^{n-1})$.

Si on note S_k la situation à laquelle est affecté e_n , les évolutions de prototypes peuvent se traduire par des expressions de la forme :

$$\left. \begin{aligned} \alpha_j^n &= \alpha_j^{n-1} \quad \text{si } j \neq k & (16.a.) \\ \alpha_k^n &= f_k(\alpha_k^{n-1}, \alpha_k^{n-2}, \dots, \alpha_k^{n-q_k}, e_n) & (16.b.) \end{aligned} \right\} \text{pour les paramètres généralisés}$$

$$\left. \begin{aligned} p_n(p_j^n) &= (1-\phi^2) \cdot p_{n-1}(p_j^{n-1}) \quad \text{si } j \neq k & (17.a.) \\ p_n(p_k^n) &= (1+\lambda^2 \phi^2) \cdot p_{n-1}(p_k^{n-1}), \phi^2 \leq 1 & (17.b.) \end{aligned} \right\} \text{pour les probabilités a priori}$$

INTERPRETATION :

- i) la fonction f_k apparaissant dans la relation (16.b.) est une fonction filtre travaillant sur un horizon de q_k paramètres généralisés et ayant pour entrée l'événement e_n . L'utilisation d'un tel filtre permet d'effectuer un traitement sur une fenêtre de longueur finie, c'est-à-dire de tenir compte des non stationnarités de la séquence e_n (cf. Chapitre 2). D'autre part le choix de f_k permet d'adapter les procédures de modification à chacune des situations S_i ($i = 1, L$).
- ii) les relations (17) mettent en évidence deux opérations :
- pour les prototypes non touchés par e_n , les probabilités a priori sont corrigées en baisse (relation 17-a). Pour des raisons de symétrie elles le sont toutes de la même manière par utilisation d'un facteur correctif de la forme : $(1-\phi^2)$ avec $\phi^2 \leq 1$.

- pour le prototype p_k^{n-1} touché par e_n , on corrige la probabilité a priori en hausse en utilisant un facteur multiplicatif de la forme : $(1 + \lambda^2 \phi^2)$.

Les paramètres λ et ϕ doivent être calculés compte-tenu des propriétés que doivent vérifier les probabilités a priori :

$$p_{n-1}(P_i^{n-1}) \leq 1 \quad \forall i = 1, L \text{ et } \forall n \quad (18.a.)$$

$$\sum_{i=1}^L p_{n-1}(P_i^{n-1}) = 1 \quad \forall n \quad (18.b.)$$

Utilisant la relation (18-b) et les relations (17) il vient :

$$\sum_{i=1}^L p_n(P_i^n) = (1-\phi^2) \cdot \left[\sum_{i=1}^L p_{n-1}(P_i^{n-1}) \right] + \phi^2 \cdot (1+\lambda^2) \cdot p_{n-1}(P_k^{n-1})$$

$$\text{soit } 1 = (1-\phi^2) + \phi^2 \cdot (1+\lambda^2) \cdot p_{n-1}(P_k^{n-1})$$

$$\text{et } \lambda^2 = \frac{1}{p_{n-1}(P_k^{n-1})} - 1 \quad (19)$$

Enfin, il convient de vérifier la contrainte 18-a pour la probabilité qui a été augmentée soit $p_n(P_k^n)$:

$$p_n(P_k^n) \leq 1 \rightarrow (1+\lambda^2 \phi^2) \cdot p_{n-1}(P_k^{n-1}) \leq 1$$

C'est-à-dire en utilisant le résultat de l'équation (19) :

$$\lambda^2 \cdot \phi^2 \leq \lambda^2 \quad (20)$$

Cette relation est vérifiée compte-tenu de l'hypothèse : $\phi^2 \leq 1$. Par conséquent, bien que le paramètre λ^2 soit dépendant de $p_{n-1}(P_k^{n-1})$, l'utilisateur peut moduler les variations qu'il apporte aux probabilités a priori, en jouant sur le paramètre ϕ^2 qui peut être choisi sur le segment $[0,1]$.

En conclusion, par le jeu du choix des fonctions f_k et du paramètre ϕ , cette méthode offre à l'utilisateur la possibilité d'agir comme un filtre qui peut influencer, c'est-à-dire orienter, la stratégie d'observation ou de classification.

. INITIALISATION : L'initialisation des récurrences définies par les relations (16) et (17) s'effectue à l'issue de la phase d'apprentissage. Les paramètres généralisés α_i^0 ($i = 1, L$) sont obtenus en adoptant un modèle de structure pour chaque densité de probabilité $p_0(e/P_i^0)$ ($i = 1, L$) (par exemple un modèle gaussien), et en estimant les paramètres de la structure à partir des données initiales /20/.

En ce qui concerne les probabilités a priori $p_0(P_i^0)$ ($i = 1, L$) elles sont estimées en comptabilisant les événements de la phase d'apprentissage appartenant à chacun des noyaux prototypes initiaux. Il vient alors

$$p_0(P_i^0) = \frac{\text{card } p_i^0}{\sum_{j=1}^L \text{card } p_j^0} \quad i = 1, L \quad (21)$$

. EXEMPLE : Reprenons l'exemple de l'arythmie cardiaque. Celle-ci se définit en référence au rythme cardiaque normal du sujet. Si pour schématiser on définit trois types de rythmes : normal, trop lent, trop rapide, on est amené à définir trois situations : S_1, S_2, S_3 correspondant respectivement à l'état normal, la bradycardie et la tachycardie. Dans ces conditions, la procédure de classification peut être réalisée de la manière suivante :

- ① dans une première phase d'apprentissage, évaluer le rythme du patient, en calculant le rythme moyen sur quelques dizaines de secondes. Soit n_0 la valeur obtenue. Cette valeur constitue l'estimation initiale du paramètre généralisé relatif à la situation S_1 .

- ② évaluer les paramètres généralisés initiaux notés b_0 et t_0 relatifs respectivement aux situations S_2 et S_3 . Si, pour cela, on estime que le sujet est bradycarde lorsque son rythme chute de 25 % de la normale et qu'il est tachycarde lorsque son rythme augmente de plus de 25 % de la normale, on obtient tout simplement :

$$b_0 = 0,75 n_0 \text{ et } t_0 = 1,25 n_0$$

- ③ à l'occurrence du cycle cardiaque suivant, effectuer les opérations d'affectation du cycle à l'une ou l'autre des situations S_1 , S_2 ou S_3 :

- a) calculer le rythme instantané r_1
 b) si $b_0 < r_1 < t_0$, alors le rythme est normal
 si $r_1 \leq b_0$, alors bradycardie
 si $r_1 \geq t_0$, alors tachycardie

- ④ remettre à jour les paramètres généralisés en tenant compte des résultats obtenus en ③ :

a) si le rythme est normal : $n_1 = \frac{n_0 + qr_1}{1+q}$

Le paramètre q peut être réglé par l'utilisateur. Par exemple, si $q = 0$, le prototype de la situation normale S_1 reste figé avec un paramètre généralisé gardant quelque soit les circonstances la valeur fixe n_0 . Dans ce cas on ne remet pas en cause l'apprentissage.

Inversement, la nouvelle valeur n_1 du paramètre généralisé est d'autant plus influencée par la dernière observation effectuée, que q est grand. Ce dernier cas est particulièrement intéressant car il permet de tenir compte des variations du rythme de base du patient. Ainsi si, à un instant donné, le sujet est au repos,

son rythme de base sera faible (70 par exemple) et l'occurrence d'un rythme instantané de 100 permet de conclure à une tachycardie. Par contre, dans d'autres circonstances cliniques (repas, toilette du malade, émotion) le rythme de base peut monter à 90, auquel cas la détection d'un rythme instantané de 100 n'aboutit plus à la conclusion : tachycardie.

Dans les mêmes circonstances, il faut ensuite calculer b_1 et t_1 :

$$b_1 = 0,75 n_1$$

$$t_1 = 1,25 n_1$$

b) si bradycardie ou tachycardie :

$$n_1 = n_0$$

$$b_1 = b_0$$

$$t_1 = t_0$$

- ⑤ remettre à jour les probabilités a priori de chacune des situations S_1 , S_2 et S_3 . Cette opération consiste simplement ici à comptabiliser le nombre d'événements de chaque type survenus depuis le début de l'observation.
- ⑥ recommencer les opérations ③, ④, ⑤ à l'occurrence de tout nouvel événement "cycle cardiaque" e_p . Dans le cas général, les indices 0 et 1 utilisés ci-dessus sont à remplacer par $(p-1)$ et p .

L'exemple précédent montre comment on peut moduler les processus de décision par le biais de prototypes mouvants ou évolutifs. Il apparaît en outre que l'utilisateur peut lui-même agir sur cette modulation par le jeu d'un ensemble d'éléments (fonctions de filtrage f_k paramètre ϕ) dont il a la pleine maîtrise. De tels outils confèrent à la méthode une souplesse suffisante pour tenir compte du caractère non stationnaire

de certains phénomènes observés.

3.6. L'aspect temps réel

Ainsi que l'illustre l'exemple précédent, il importe d'envisager l'implantation des méthodes précédentes, en temps réel, sur calculateur numérique. De cette manière, à chaque fois qu'un événement apparaît, on peut prendre une décision d'affectation et envisager des procédures de traitement en continu. Une telle démarche peut être particulièrement avantageuse dans un processus de surveillance intensive en milieu clinique.

Toutefois, dans l'esprit de la réalisation d'une instrumentation intégrée fortement microinformatisée, il faut pouvoir accélérer les opérations de décision tout en utilisant des matériels aussi simples que possible (cartes microprocesseur standard par exemple). Pour cela, il faut tenir compte, lors de l'implantation des méthodes temps réel sur microprocesseur, de deux impératifs essentiels :

- i) limiter le traitement temps réel à des opérations aussi simples et rapides que possible : additions/soustractions, comptage, opérations logiques, tests.
- ii) conséquemment, éluder les calculs compliqués. Pour cela on peut utiliser de manière avantageuse des solutions tabulées complétées d'interpolations et/ou d'extrapolations linéaires effectuées en temps réel.

. EXEMPLE : A partir d'une valeur θ lue au convertisseur analogique-digital toutes les 2 ms, on veut calculer une fonction de la forme $f(\theta) = \int_0^\theta e^{|\sin \alpha|} d\alpha + |\cos \theta|$. L'évaluation, en temps réel, de $f(\theta)$ est grande consommatrice de temps. Il faut donc l'éluder en consignnant dans un tableau des valeurs de $f(\theta)$ prédéterminées : $f(\theta_i)$ ($i = 1, N$) (Ces valeurs peuvent d'ailleurs être calculées hors ligne sur un calculateur performant). A la lecture d'une valeur θ , il suffit alors de consulter le tableau et d'interpoler pour obtenir $f(\theta)$, très rapidement.

. REMARQUE : Les méthodes qui sont suggérées ici ne visent pas seulement à compenser les handicaps dûs aux limitations actuelles de certains composants microinformatiques (absence de multiplication, de division....). Elles visent surtout à effectuer un maximum d'opérations efficaces en un minimum de temps. Les économies de temps réalisées, qui sont parfois spectaculaires (rapport de 1 à 50), permettent alors d'affiner et de multiplier des opérations fondamentales telles que le contrôle logique, les tests de vraisemblances..., qui contribuent à améliorer la fiabilité logicielle des algorithmes mis en jeu.

4 - CONCLUSION :

Les objectifs de ce chapitre étaient de mettre en évidence les spécificités propres aux deux opérations fondamentales effectuées lors de la caractérisation d'une chaîne chronologique :

- la détection des événements,
- l'affectation de ces événements à des situations prédéfinies.

En ce qui concerne les techniques de détection il apparaît que l'on peut compenser leur caractère parfois empirique en utilisant un jeu de méthodes très simples telles que les tests de seuils, l'utilisation de la dérivée et l'utilisation de l'enveloppe du signal. La mise en oeuvre de combinaisons et/ou de recouvrements permet en outre de renforcer avantageusement l'efficacité de ces méthodes.

La classification des événements pose, quant à elle, un double problème :

- la première difficulté est de définir de manière aussi précise que possible les situations observées. Ceci implique l'établissement d'un cahier des charges parfaitement défini visant d'une part à affiner la description des situations et d'autre part à favoriser l'établissement d'un processus d'échange de points de vue entre l'utilisateur (c'est-à-dire l'homme de l'art) et le concepteur.

- le second problème posé est : comment tenir compte, lors de la procédure d'affectation des événements aux situations, du caractère souvent non stationnaire des phénomènes observés ? La réponse proposée consiste à mettre en oeuvre des noyaux prototypes de situations adaptatifs dont les modifications sont laissées à la maîtrise de l'utilisateur lui-même.

A ces problèmes théoriques s'ajoute celui de l'implantation temps réel sur machine informatique. Indépendamment du fait que cet aspect peut être pris en compte dès la conception des algorithmes de traitement, nous examinons au chapitre suivant quelles sont les structures matérielles s'adaptant le mieux aux méthodes qui ont été définies ci-dessus.

- DEUXIEME PARTIE -

ARCHITECTURE DISTRIBUÉE ET INSTRUMENTATION
MICROINFORMATISÉE.

C H A P I T R E 4

LES STRUCTURES MICROINFORMATISÉES

1 - INTRODUCTION :

Détection et classification ont permis de mettre en évidence des structures logiques de traitement parfaitement définies. Le cadencement en temps réel de ces traitements est réalisé par l'apparition d'événements décrits dans un cahier des charges aussi précis que possible.

Le but de ce chapitre est de présenter les structures matérielles et logicielles découlant des analyses effectuées précédemment. Dans ce cadre, la microinformatique dispose d'atouts déterminants : compacité, souplesse d'utilisation, bonne puissance de calcul, excellent rapport performances/prix. De tels atouts facilitent la mise en oeuvre de traitements répartis et autorisent ainsi une certaine décentralisation au niveau des opérations de décision. Cet aspect sera mis en relief dans le développement.

Le deuxième élément important de la structure de traitement est constitué de l'ensemble des outils permettant la communication entre l'homme (le médecin, l'infirmière,...) et l'instrument. Dans ce sens, l'imagerie peut ici jouer un rôle déterminant pour la clarté et la concision de présentation des résultats.

Le dernier aspect relatif aux structures microinformatisées concerne les problèmes de fiabilité et de maintenance. Dans ce sens, nous nous bornerons essentiellement à examiner dans quelle mesure l'organisation logicielle contribue à la fiabilité d'un système, compte-tenu des contraintes temps réel.

2 - LES STRUCTURES DE TRAITEMENT :2.1. Les structures conventionnelles

Ces structures sont centralisées autour d'un seul élément de traitement relié à des organes périphériques de prise, de stockage ou de transfert de l'information. Chacun de ces organes ne fait que véhiculer des données sans jamais les traiter. De telles structures conduisent à une organisation semblable à celle présentée figure 4.1.

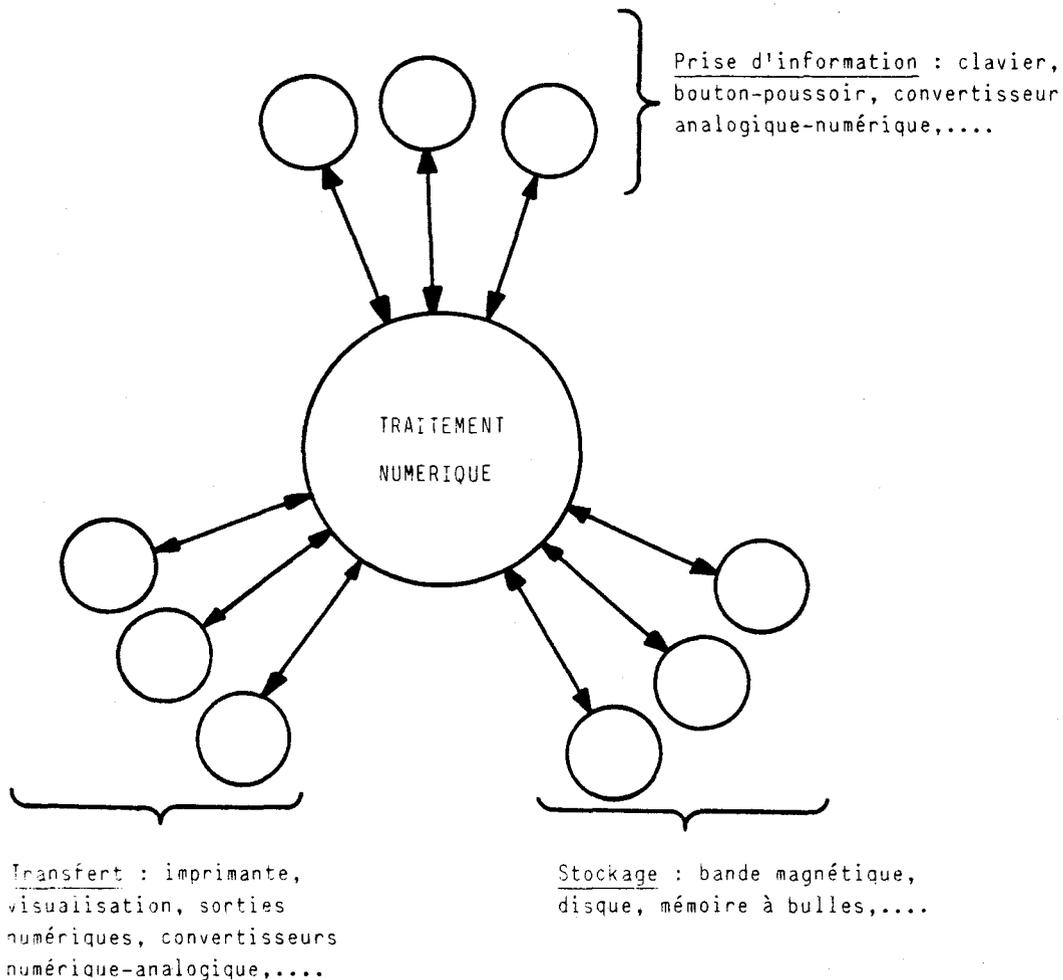


Figure 4.1.

Le dispositif de traitement numérique reçoit ici la charge de tous les périphériques. De ce fait, il est astreint à réaliser une gestion permanente des échanges d'information. Cette situation ne présente pas d'inconvénient lorsque le rythme des échanges n'est pas élevé. Par contre, lorsque la densité de ces échanges augmente, le temps consacré à la gestion devient important, voire prépondérant vis à vis du temps consacré au traitement effectif. Le système est alors sclérosé par les tâches "administratives" : validations, contrôles, attentes....

De telles configurations sont encore utilisées, voire implantées, dans certains services hospitaliers. C'est ainsi que quelques constructeurs proposent des "machines à tout faire" (monitoring, gestion, analyse automatique....) dotées de logiciels impressionnants et impénétrables qui sont souvent des modèles d'organisation. Ces systèmes, au même titre que les administrations exemplaires et bien huilées, sont en général fermés et supportent difficilement les modifications.

2.2. Les structures fonctionnelles réparties

Le phénomène de sclérose induit par la centralisation des traitements est particulièrement sensible à la densité des échanges de données. Afin de pallier cette difficulté, il convient de réduire ces échanges à leur stricte nécessité. Les structures réparties permettent d'obtenir une solution acceptable à ce problème, dans la mesure où elles visent à traiter un maximum d'informations dès la saisie avant de procéder aux échanges.

2.2.1. Exemple. Considérons, à titre d'illustration, la structure de la figure 4.2. Elle est destinée à réaliser, en milieu hospitalier, la surveillance d'un groupe de N lits. Plus précisément, il s'agit d'analyser en temps réel le signal d'impédance thoracique du nouveau-né, afin d'en contrôler en permanence la mécanique ventilatoire (rythmes amplitudes, apnées...) /1, 2/. Les tâches de traitement sont partagées entre deux types d'éléments :

- les unités de saisie et de prétraitement (U.S.P.) implantées au pied des lits (c'est-à-dire sur le site). Ces unités réalisent en temps réel l'analyse du signal en procédant d'abord à une conversion analogique-numérique à la fréquence d'échantillonnage de 100 Hz, puis en réalisant sur chacune des ondes respiratoires l'extraction des paramètres caractéristiques : temps et amplitudes d'inspiration et d'expiration.
- une unité pilote (U.P.) chargée de collecter l'ensemble des résultats élaborés par les U.S.P. et de gérer un ensemble de ressources communes : mémoire de masse, console, écran....

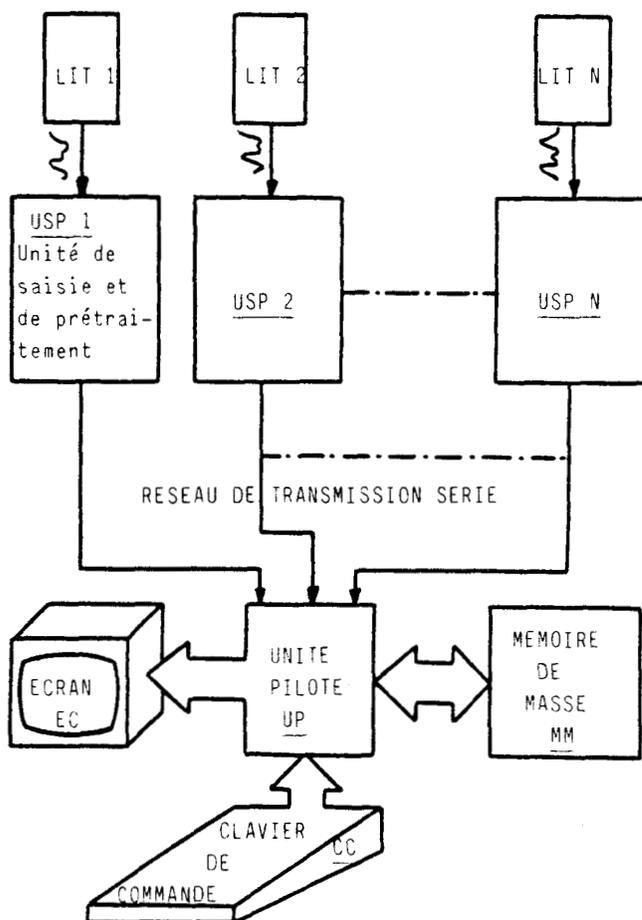


Figure 4.2.

Dans une telle structure, les U.S.P. sont cadencées en entrée par l'horloge 100 Hz des convertisseurs analogique-numérique. Ce cadencement correspond à l'occurrence d'événements élémentaires (les prises d'échantillons) dont le traitement permet à l'U.S.P. de réaliser une analyse fine du signal incident. En sortie, les U.S.P. sont cadencées par les événements "cycles respiratoires" de telle sorte que les échanges d'information entre une U.S.P. et l'unité pilote ne se produisent que lorsqu'un vecteur de paramètres caractéristiques est disponible. La tâche de l'unité pilote est alors de réaliser la synthèse des données valorisées par chaque U.S.P. Cette synthèse consiste à organiser la présentation des résultats, à constituer éventuellement une base de données ou bien encore à reprendre l'ensemble des résultats pour effectuer un traitement supplémentaire, le but restant évidemment de fournir au médecin un outil efficace d'aide à la décision.

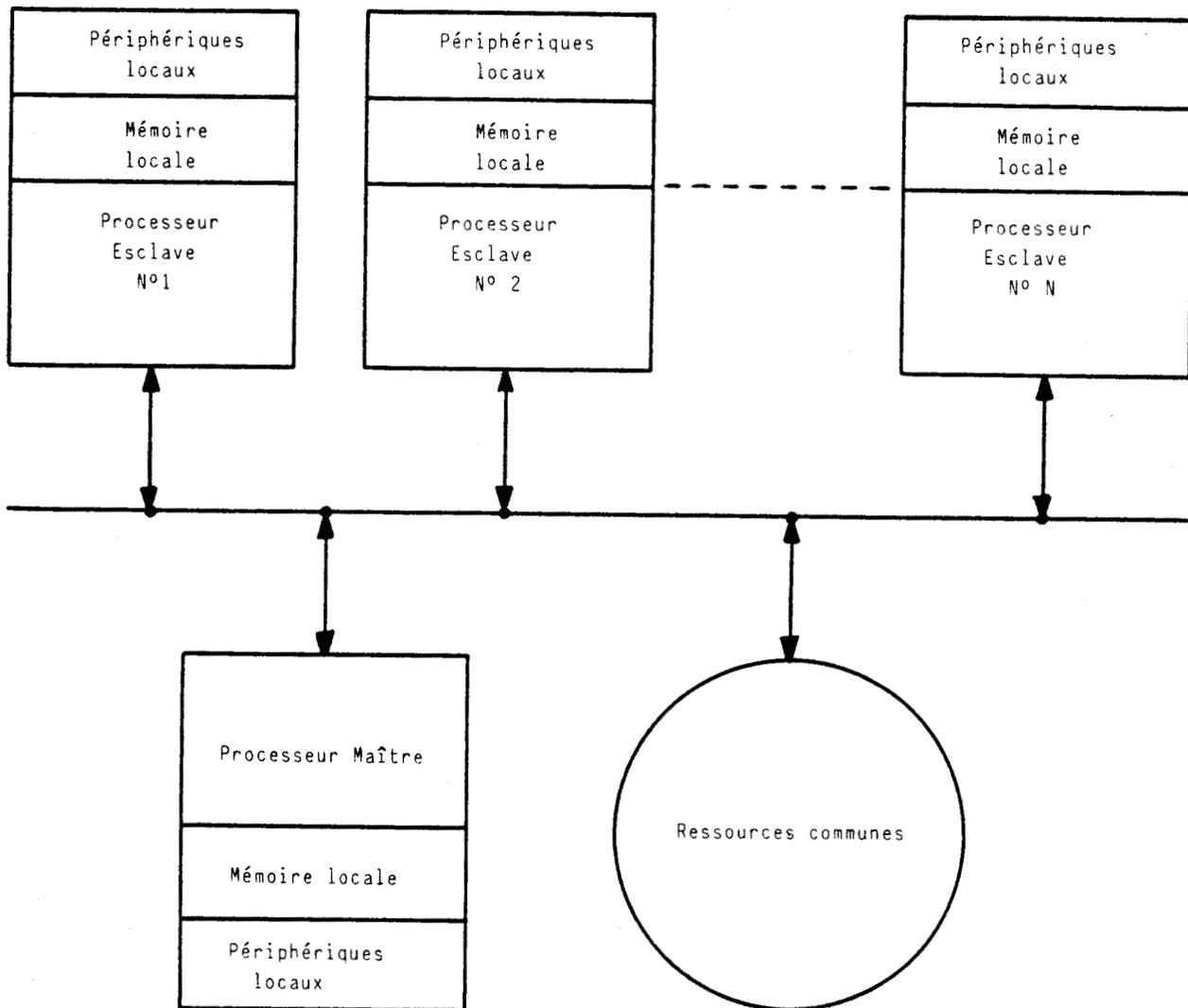
. REMARQUE : Dans une structure conventionnelle, les N lits sont branchés, par l'intermédiaire d'un multiplexeur et d'un convertisseur analogique-numérique, à un seul organe de traitement dont la charge est alors étendue au point qu'elle peut aussi bien nécessiter la gestion des échanges élémentaires de prise d'échantillons que des calculs de classification automatique. De plus il apparaît clairement, dans ce cas, que le traitement monoprocesseur, séquentiel par nature, peut pénaliser la réalisation temps réel de tâches simultanées.

Ce simple exemple montre comment la structuration décentralisée permet de séparer clairement les éléments fonctionnels d'un système : éléments d'analyse, éléments de synthèse, etc... Il existe toutefois d'autres moyens de répartir les traitements à l'intérieur d'une structure. Ces moyens sont examinés dans la suite du développement.

3.2.2. Cas général. Les systèmes répartis peuvent être élaborés à partir de deux types de structures de base :

- la structure en étoile,
- la structure série ou pipe-line.

- i) la structure en étoile, dont l'exemple précédent est une illustration sommaire, présente, dans le cas général, la configuration de la figure 4.3.



BUS
LILLE

Figure 4.3.

Cette structure met en jeu un ensemble de processeurs esclaves reliés à un processeur maître. Chaque processeur (maître ou esclave) peut disposer, de manière autonome, de mémoires et de périphériques locaux : RAM, ROM, convertisseurs, claviers,....

Le processeur maître a pour fonction de gérer l'ordonnancement des tâches exécutées par les processeurs esclaves. De plus, il collecte les résultats fournis et les exploite pour son propre compte. Enfin, il est chargé de gérer l'ensemble des ressources communes à tous les processeurs : mémoires de masse, imprimantes....

. REMARQUE : La fonction de coordination du processeur maître est telle que chaque processeur esclave exécute sa tâche indépendamment des tâches exécutées par les esclaves voisins. Dans ce sens, il peut arriver que deux processeurs esclaves travaillent de manière coopérative, sans en être informés, l'organisation de la coopération revenant au maître. On peut toutefois assouplir cette procédure en organisant la coopération directe de deux processeurs esclaves sans passer par l'intermédiaire du maître. Ceci peut impliquer la création de liaisons inter-processeurs-esclaves (BUS, mémoires communes,...), indépendantes des liaisons esclaves-maître.

ii) la structure série illustrée figure 4.4., permet, quant à elle, de réaliser des tâches "à la chaîne", de la même manière qu'en construction automobile. Deux propriétés caractérisent une telle structure.

- le flot des données est unidirectionnel, de l'amont vers l'aval, c'est-à-dire de la source initiale d'informations au résultat définitif du traitement.

- chaque processeur, qui est un maillon de la chaîne, a besoin, pour réaliser sa propre tâche, des informations fournies par le processeur situé immédiatement en amont.

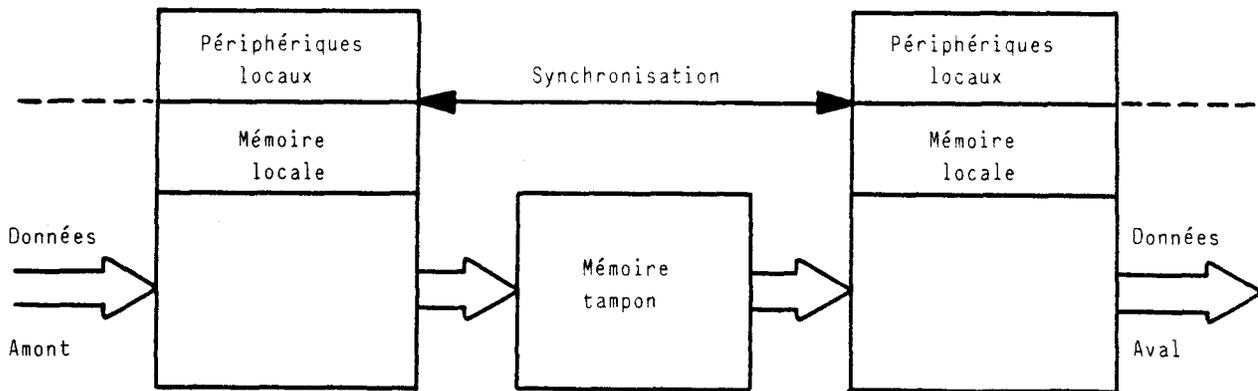


Figure 4.4.

Dans cette structure, chaque processeur dispose, de manière autonome, de mémoires et de périphériques locaux. De plus, on peut insérer, entre deux maillons successifs, une mémoire tampon ou mémoire boîte aux lettres accessible en écriture pour le processeur amont et en lecture pour le processeur aval. Cette mémoire permet de régulariser le flot des données, par stockage temporaire. Il est dès lors évident que toutes ces opérations nécessitent l'établissement de procédures de synchronisation entre les processeurs successifs.

. REMARQUE : La figure 4.5. illustre comment on peut enrichir la structure série en connectant chaque processeur, non seulement à son prédécesseur immédiat, mais encore à d'autres sources de "matières premières" (périphériques, processeurs n'appartenant pas à la chaîne, etc...)

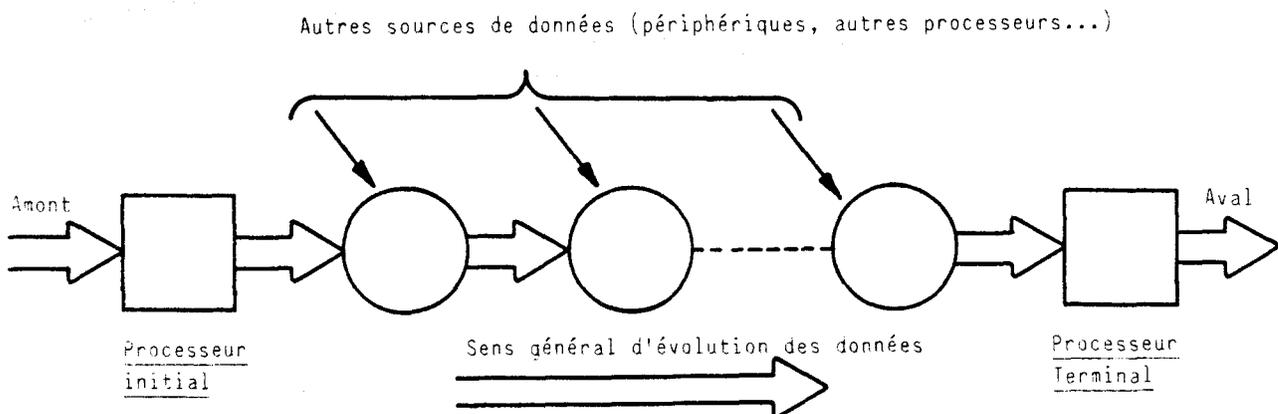


Figure 4.5.

Dans ce cas, chaque processeur de la chaîne constitue un poste de traitement situé au confluent d'un flot primaire de données issu du processeur immédiatement situé en amont et d'un/de flot(s) supplémentaire(s) généré(s) à l'extérieur de la chaîne.

2.2.3. Applications. La structure série est particulièrement bien adaptée au traitement des chaînes chronologiques à l'intérieur desquelles la succession des différentes tâches peut être facilement mise en évidence :

- acquisition, filtrage et conditionnement de l'information.
- détection des événements (cycles cardiaques, cycles respiratoires, contractions utérines, etc...).
- extraction des paramètres caractéristiques de chaque événement.
- classification, élaboration de prototypes.
- présentation des résultats.

Dès lors la gradation qui s'effectue de la prise d'échantillons élémentaires (processeur initial) à la présentation des résultats issus de traitements de plus en plus élaborés (processeur terminal) coïncide parfaitement avec le schéma de la figure 4.5.

La structure en étoile, quant à elle, est beaucoup plus appropriée à la réalisation des traitements de synthèse. A ce titre, on peut imaginer de synthétiser, à l'aide d'un processeur maître, les résultats fournis par un ensemble de structures séries. Les propositions faites, dans le dernier chapitre, pour la réalisation d'un système intégré de surveillance des principales fonctions physiologiques de l'Homme s'inspirent d'un tel schéma.

- chaque chaîne chronologique d'origine physiologique est analysée par une structure série.
- les résultats élaborés par les structures séries sont collectés, synthétisés et présentés par un processeur maître.

L'hybridation de ces deux structures fournit, pour sa part, une solution intéressante à la réalisation du compromis analyse-synthèse caractéristique des techniques de traitement que nous avons adoptées.

2.3. Aspects matériels

Compte-tenu de la rapide évolution des technologies, il serait illusoire de dresser un catalogue détaillé des éléments constituant les structures définies précédemment. Toutefois, il importe de souligner à quel point la diversification des produits et des possibilités offertes par ces produits permet au concepteur de moduler de plus en plus finement l'utilisation des composants microinformatiques. A ce titre, trois types de choix doivent être opérés lors de la conception d'un système microinformatisé :

- i) le choix des processeurs,
- ii) le choix des liaisons interprocesseurs,
- iii) le choix des éléments de stockage.

2.3.1. Les processeurs. Les constructeurs offrent maintenant la possibilité d'adapter très finement le choix des processeurs aux fonctions qui leurs sont dévolues. C'est ainsi qu'à côté des microprocesseurs universels sont apparus certains types de processeurs spécialisés. A titre d'exemple, le microprocesseur INTEL 2920 est un élément complètement orienté vers le traitement en temps réel des signaux analogiques /3/. Pour cela, il intègre ses propres convertisseurs analogique-numérique et numérique-analogique lui permettant de manipuler 4 entrées et 8 sorties analogiques. En outre, son jeu d'instructions est spécifique du traitement de signal et sa mémoire de programme est complètement intégrée au circuit. Dès lors, cet élément permet de réaliser un système autonome et transparent de conditionnement des signaux analogiques.

D'une manière plus générale les processeurs spécialisés, voués à des tâches spécifiques, sont placés en amont de la chaîne de traitement (dans une structure série par exemple), près des générateurs d'événements.

Inversement, les tâches de synthèse reviennent à des processeurs universels dont la puissance de calcul doit être d'autant plus grande que les traitements de synthèse sont élaborés. C'est à ce niveau que se situe le choix de la taille et de l'efficacité des instructions (8, 16, 32 bits), ainsi que celui des performances spécifiques du processeurs (opérations entières câblées, opérations flottantes câblées, modes d'adressage, utilisation d'un coprocesseur, etc...)

2.3.2. Les liaisons. Le choix des liaisons interprocesseurs est guidé par les quelques considérations suivantes :

- i) les liaisons rapprochées (quelques dizaines de centimètres à quelques mètres) se font généralement en parallèle. Ceci est, par exemple, le cas pour les processeurs d'une structure série. Inversement, les liaisons éloignées (à partir de quelques mètres) se font en série.
- ii) en ce qui concerne les liaisons parallèles, il peut être intéressant de mettre en oeuvre un bus standard (type IEEE 488), surtout si on envisage de connecter à ce bus des appareils utilisant eux-mêmes ce standard. Par contre, si la liaison parallèle est spécifique (bus interne, bus privé), il est inutile de faire appel à la solution standardisée qui, dans ce cas, est lourde et onéreuse.
- iii) les impératifs de vitesse d'échange peuvent conduire à la mise en oeuvre de procédures spéciales telles que l'Accès Direct Mémoire (A D M). Inversement, chaque fois que les contraintes de vitesse le permettent, on peut remplacer l'échange parallèle par l'échange série, plus lent mais moins onéreux.

iv) l'utilisation de réseaux de communication existants peut, dans certaines circonstances, apporter des solutions efficaces et économiques au problème des liaisons inter-processeurs. Ces solutions sont déjà largement adoptées au niveau de l'utilisation de réseaux publics (téléphone, télévision) /4/. Elles peuvent être transposées aux réseaux privés tels que, par exemple, le câble de télé-distribution d'un hôpital.

Ces quelques indications permettent de résoudre assez simplement le problème du choix des liaisons à l'intérieur d'une structure légère. Toutefois, ce problème peut singulièrement se compliquer lorsqu'il s'agit de mettre en oeuvre des structures plus lourdes. On débouche, dans ce cas, sur l'utilisation des réseaux de processeurs, pour lesquels les constructeurs offrent des solutions très élaborées : bus standardisés, procédures d'échange standardisées, etc..../5, 6/.

Enfin, et en ce qui concerne les problèmes de protection des liaisons (traitement du parasitage), on pourra utilement consulter les références /7/ et /8/.

2.3.3. Le stockage de l'information. Nous n'envisageons ici que le seul problème de l'archivage des données, c'est-à-dire des mémoires de masse, pour lequel il existe actuellement deux classes de solutions.

La première englobe tous les supports magnétiques dont la mise en oeuvre nécessite des mouvements mécaniques de moteurs et/ou de têtes de lecture. La bande magnétique, la cassette, le disque et la disquette appartiennent à cette catégorie.

La seconde classe englobe les systèmes utilisant les mémoires à bulles qui ont la particularité de ne nécessiter aucun mouvement mécanique.

Même si dans l'état actuel des technologies, la première classe est la seule à offrir des capacités de stockage confortables (25 M octets en moyenne pour un disque contre 256 K octets pour un système à bulles), il semble que la seconde classe soit vouée à un développement important au niveau des applications moyennes, pour les raisons suivantes :

- les gages de fiabilité sont importants, même en environnement défavorable, du fait de l'absence complète de pièces mécaniques en mouvement.
- les constructeurs offrent maintenant la possibilité d'utiliser des cassettes à bulles amovibles et interchangeables, alors que les premiers systèmes ne donnaient pas cette possibilité /9/. Dès lors ces cassettes donnent la même souplesse d'utilisation que les disquettes.

Bien que, pour les systèmes à bulles, des capacités de stockage de l'ordre de quelques M octets soient déjà annoncées, seules les applications moyennes peuvent actuellement être envisagées. A titre d'illustration, considérons de nouveau l'exemple du suivi de la mécanique respiratoire du nouveau-né par le biais de l'impédance thoracique. Si on admet que le rythme moyen est de 40 cycles par minute, 60 000 cycles environ seront analysés en 24 heures. Ceci représente une nécessité de stockage de 240 K octets lorsque 4 paramètres sont extraits de chaque cycle et représentés chacun sur un octet.

Cette simple et grossière analyse d'une application moyenne, ne tient évidemment pas compte de la probable compression d'information supplémentaire que pourrait apporter un traitement plus élaboré que le simple stockage. Elle fournit donc, a fortiori, une bonne appréciation de nécessités de stockage parfaitement compatibles avec les systèmes à bulles.

2.4. Conclusion

Les composants microinformatiques démultiplient, au travers des structures réparties, les possibilités de traitement rapide de l'information. Ce nouveau pouvoir doit permettre à l'opérateur de réagir beaucoup plus

efficacement à l'apparition des données, en ce sens que l'accent peut être mis sur le traitement immédiat, c'est-à-dire en temps réel. Ainsi peuvent être évités les amassages inconsiderés d'informations dont le traitement finit par devenir inutile, à force d'être différé. Cette situation se produit encore trop fréquemment dans certains services hospitaliers pourtant parfaitement bien pourvus en appareillage de prise d'informations.

Les structures de traitement microinformatique constituent, dans une large mesure, les leviers du cerveau humain pour toutes les tâches répétitives et analytiques. Toutefois, même si ces structures renferment également des éléments de synthèse (processeurs maîtres), il est évident que seul l'opérateur humain possède la capacité d'intégrer et de synthétiser les résultats, au plus haut niveau. Dès lors, pour donner à l'opérateur la possibilité d'exploiter au mieux cette capacité, il importe de donner aux structures un haut niveau d'interactivité. C'est cet aspect qui est examiné dans la suite du développement.

3 - LA COMMUNICATION HOMME-MACHINE :

3.1. Introduction

Vis à vis de l'opérateur, le problème de l'interactivité se résume à deux questions :

- i) Comment, c'est-à-dire sous quelles formes, lire les résultats ?
- ii) Comment piloter le système de traitement ?

Le schéma conventionnel de traitement de l'information, illustré figure 4.6., se traduit, en boucle ouverte, par le séquençement : entrée des données, traitement des données, édition des résultats.

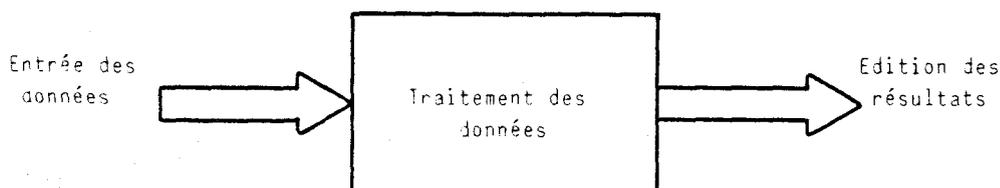


Figure 4.6.

Le traitement interactif conduit, quant à lui, à l'établissement d'une boucle fermée telle que celle illustrée figure 4.7.

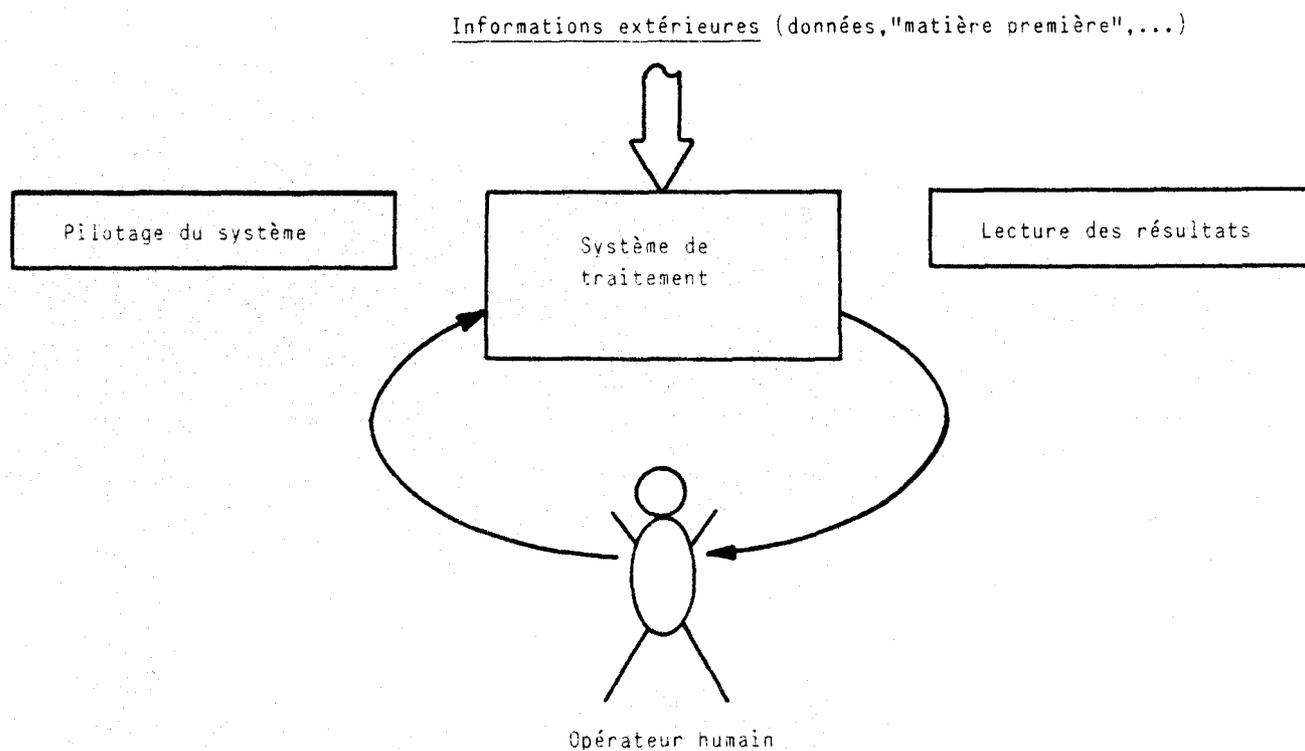


Figure 4.7.

Ce schéma cybernétique appelle les considérations suivantes :

- i) Le système de traitement se comporte comme un processus physique en constante évolution. Ce processus est soumis à des informations extérieures incontrôlables mais mesurables (les données) auxquelles il réagit selon des procédures parfaitement définies (le logiciel).
- ii) Le dispositif de lecture des résultats placé en sortie du système de traitement est le seul élément permettant à l'opérateur d'apprécier à chaque instant, l'état d'évolution du système de traitement.

- iii) L'opérateur humain pilote le système en lui fournissant des informations qui, elles, sont contrôlables. Ces informations permettent de moduler le traitement, et conséquemment les résultats, compte-tenu des observations effectuées.

Globalement, les deux partenaires, que sont l'homme et le système de traitement, doivent réaliser un ensemble de tâches complexes leurs permettant de rentrer en communication. Toutefois, l'interactivité n'est efficace que si elle privilégie l'opérateur humain en le déchargeant de toutes les "tracasseries" résultant des spécificités propres au système de traitement. Ainsi, du côté opérateur, les traits fondamentaux sont : la capacité d'interprétation, la capacité d'approximation, le caractère synthétique et la non unicité (l'opérateur peut changer). Inversement, du côté système, les traits fondamentaux sont : la démarche binaire, la grande précision, la rapidité d'exécution, le caractère analytique.

Dès lors, l'action prioritaire est de canaliser les ressources offertes par la machine pour valoriser les capacités de l'opérateur. L'exploitation des organes d'entrée-sortie doit notamment se faire dans ce sens.

3.2. Les résultats, rôle de l'imagerie

3.2.1. Introduction et exemple préliminaire. La présentation de résultats sous forme de tableaux impressionnants de chiffres donnant une précision parfois illusoire est, en soit, contraire à ce que recherche le plus souvent l'opérateur. Ainsi, lors d'une analyse biologique, l'important n'est pas tellement d'évaluer tel taux avec une précision de cinq chiffres après la virgule, mais bien de connaître les tendances (statiques et/ou dynamiques) vis à vis d'une fourchette de normalité.

A titre d'exemple, considérons la représentation illustrée figure 4.8.

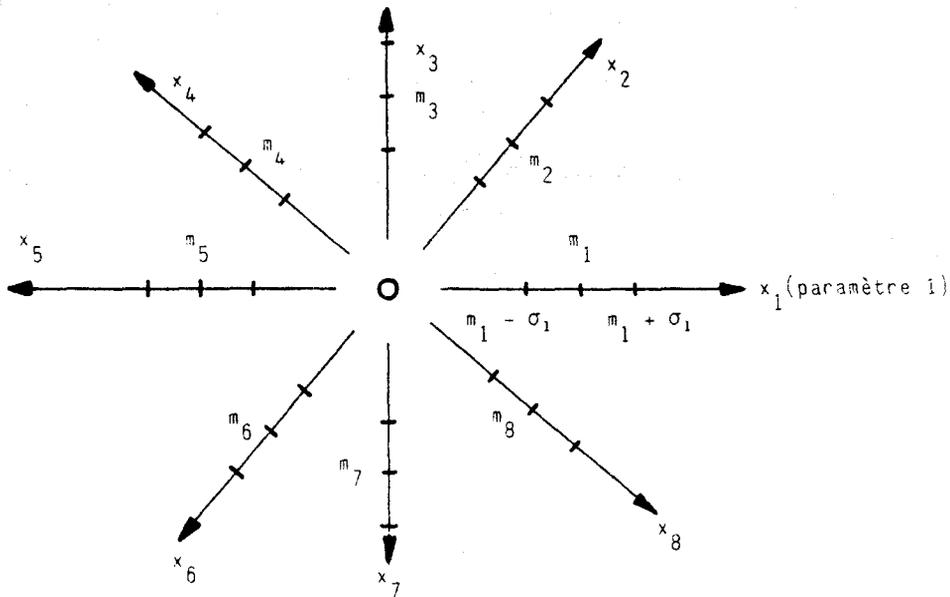


Figure 4.8.

Ce schéma met en évidence huit variables (d'un bilan biologique par exemple). De plus, afin d'améliorer et de clarifier la présentation, on applique les règles suivantes /10/ :

- sur chacun des axes x_i , l'origine des graduations est choisie de telle sorte que les moyennes m_i (ou valeurs normales) de chacune des variables x_i soient distribuées sur un cercle de centre 0.

- les échelles de graduation, sur chacun des axes x_i , sont choisies de telle sorte que les points $m_i + \sigma_i$ et $m_i - \sigma_i$ (σ_i étant l'écart type de la variable x_i) soient, eux aussi, distribués sur des cercles concentriques au cercle des m_i .

- l'ordre dans lequel on dessine les axes x_i est choisi de telle sorte que, si un ensemble de mesures effectuées sur les x_i est caractéristique d'un état particulier (par exemple, telle ou telle pathologie), on obtienne, graphiquement, une représentation qui soit, elle aussi, caractéristique. La figure 4.9. illustre ces principes.

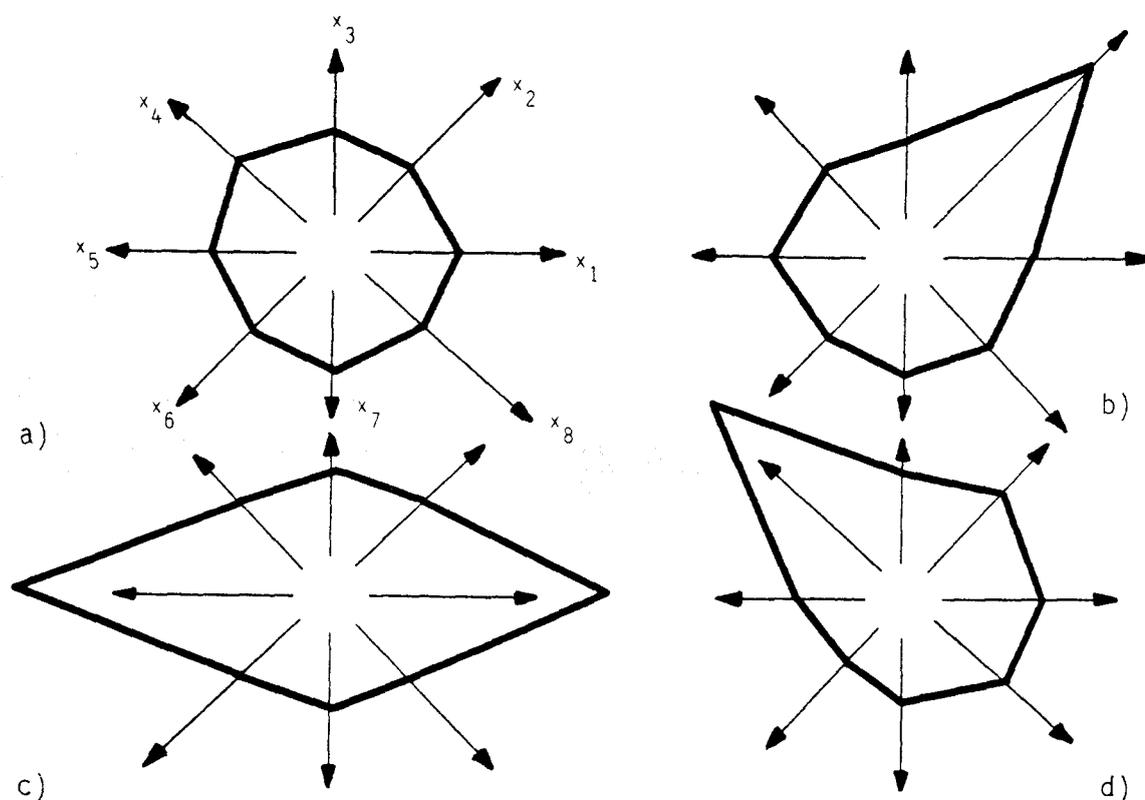


Figure 4.9.

Les représentations de la figure 4.9., effectuées pour quatre sujets différents, indiquent quatre états possibles :

- a) les résultats sont normaux, on obtient un polygone régulier inscrit à l'intérieur du cercle $(m_i + \sigma_i)$ et $(m_i - \sigma_i)$.

- b) résultats faisant apparaître une pathologie de type 1.
Le graphique est orienté vers le NORD-EST.

- c) pathologie de type 2 : double orientation EST-OUEST.

- d) pathologie de type 3 : orientation NORD-OUEST.

Ce simple exemple montre qu'un bon croquis vaut mieux qu'un long discours et cette vérité vaut également en analyse de l'information. Ainsi, le développement des moyens graphiques modernes associés à l'informatique (écran cathodique, hard copy, table traçante,...) doit inciter l'analyste à dessiner les résultats plutôt qu'à les écrire. L'oeil possède, en effet, une faculté d'intégration des images qu'il faut exploiter pour la présentation des résultats de traitements. La suite du développement fournit quelques éléments de formalisation permettant de construire une bonne représentation graphique.

3.2.2. Les variables visuelles /11/. Construire une représentation graphique consiste à transcrire chaque composante de l'information par une variable visuelle de telle sorte que la lecture n'exige qu'un nombre minimum d'instantants de perception. Les variables visuelles sont au nombre de huit :

- les deux dimensions du plan (x, y),
- les six autres variables sont utilisées pour donner du relief à l'image (dimension z). Ce sont :

* la taille	* le grain
* la valeur (clair - foncé)	* l'orientation
* la couleur	* la forme.

L'utilisation judicieuse de ces variables permet alors de représenter des espaces à plus de 3 dimensions.

Les huit variables visuelles traduisent en outre certaines relations telles que :

IV-20

- la ressemblance : =
- la différence : ≠
- l'ordre : 0
- la proportionnalité : Q

Le tableau ci-dessous donne les relations traduites par chacune des variables visuelles (d'après /11/) :

	=	≠	0	Q
2 dimensions x et y	X	X	X	X
taille		X	X	X
valeur		X	X	
grain	X	X	X	
couleur	X	X		
orientation	X	X		
forme	X			

. REMARQUE : Aux possibilités offertes par les variables visuelles, il faut évidemment ajouter les ressources de la géométrie perspective et analytique déjà largement exploitée en C.A.O. et dont l'examen dépasse le cadre de cette étude. Cet aspect peut-être examiné dans la référence /12/.

3.2.3. Analyse de l'information à représenter. Le premier travail à effectuer est de définir le nombre de paramètres à décrire. Il faut ensuite analyser chaque composante pour savoir :

* en combien de catégories elle peut être divisée :

ex : sexe : 2 catégories : F et H

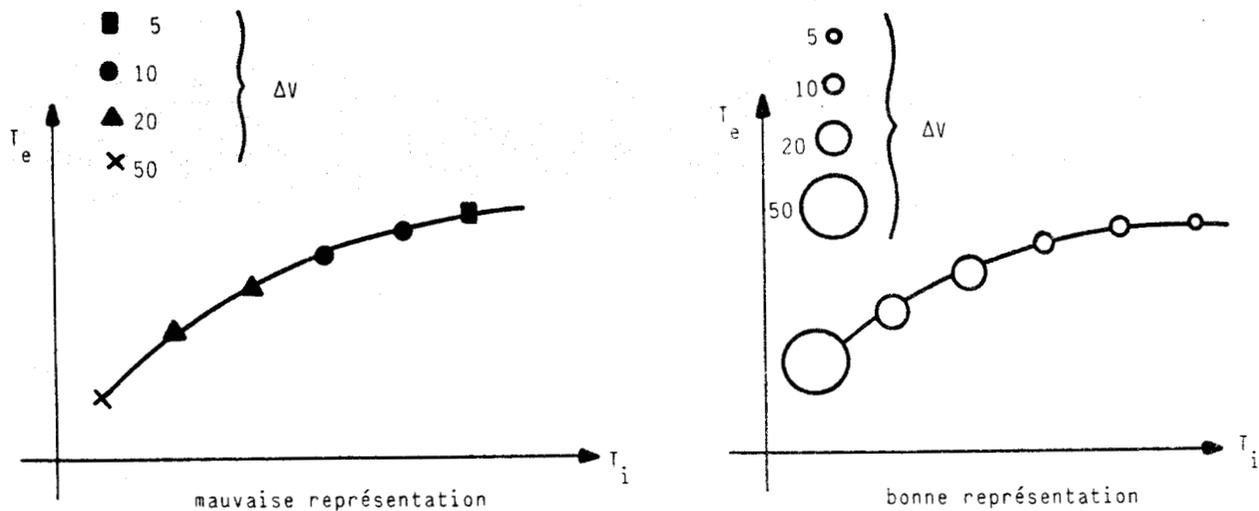
âges : 10 tranches d'âges, etc...

* si ces catégories sont ordonnables ou ordonnées :

ex : le temps, le taux de CO2 sont ordonnés,

le sexe, les types de pathologie sont ordonnables.

Vouloir représenter une composante ordonnée par une variable non ordonnée empêche la perception spontanée de la relation et oblige le lecteur à faire un effort d'interprétation qui rend l'image mauvaise. La figure 4.10. donne l'illustration de ce qu'il faut et ne faut pas faire.



T_i : temps d'inspiration
 T_e : temps d'expiration
 ΔV : amplitude.

Figure 4.10.

Selon le but recherché, les types de représentation peuvent être différents :

- si la représentation est une mémoire associative (type plan du métro), elle doit contenir de multiples images élémentaires pour permettre la précision et l'exhaustivité.

- si c'est une image à mémoriser rapidement (croquis, caricature), elle doit avoir une grande simplicité visuelle au dépend de la précision éventuellement.

- si c'est un outil de travail elle doit mettre immédiatement en évidence les relations existant entre les variables.

Compte-tenu de ces principes fondamentaux, l'exploitation des moyens de visualisation et de traitement modernes permettent une présentation rapide et claire de résultats issus de traitements souvent très élaborés.

3.2.4. Applications. L'application des principes élémentaires énoncés précédemment, donne des possibilités innombrables laissées à la seule imagination du concepteur. La représentation radiale décrite dans l'exemple préliminaire en est une illustration simple. L'histogramme, quant à lui, demeure un instrument efficace d'édition graphique des résultats. De plus il est facilement accepté par un grand nombre d'utilisateurs. Dans ce sens, il offre deux possibilités :

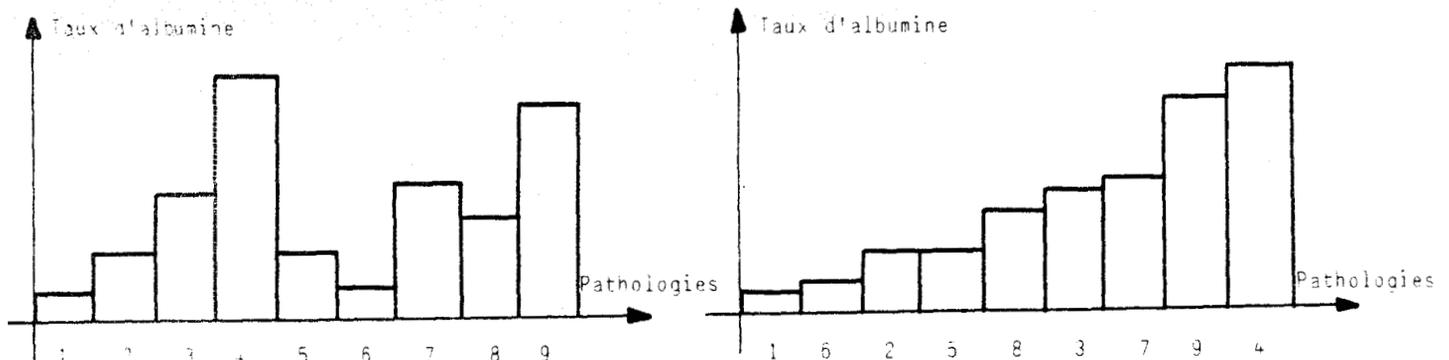
* il permet de représenter la fréquence d'apparition d'un événement à l'intérieur des diverses catégories d'une composante ordonnée.

Exemple : . Fréquence cardiaque instantanée,
. Rythmes respiratoires.

* il permet également de représenter une information relative à une composante non ordonnée.

Exemple : . Valeur d'un taux d'albumine en fonction de diverses pathologies.

On peut dans ce cas ordonner la composante non ordonnée de manière à réaliser une image plus facilement mémorisable. La figure 4.11. illustre ce principe (selon un exemple purement imaginaire).



4.11.a.

4.11.b.

.Figure 4.11.

L'image de la figure 4.11.b. est beaucoup plus efficace, dans la mesure où elle permet à l'opérateur de mémoriser l'information selon un schéma simple : les pathologies sont classées selon l'ordre croissant des taux d'albumine.

3.2.5. Conclusion. L'imagerie plane est un domaine de prédilection des géographes, ou plus particulièrement des cartographes, qui en ont fait une discipline solidement fondée tenant parfaitement compte des comportements sensoriels et intellectuels de l'individu face à l'image /11/. Les principes qui sont alors dégagés vont exactement dans le sens des capacités de synthèse de l'opérateur humain. En outre, s'il est évident que les vertus de l'image peuvent être facilement exploitées pour des entités physiques telles que les cartes ou les pièces mécaniques, il est non moins évident qu'elles peuvent également constituer un outil puissant de représentation synthétique d'entités abstraites.

Ces aspects, caractéristiques de la relation Machine → Homme, sont complétés, dans la suite du développement, par l'examen des éléments caractéristiques de la relation Homme → Machine.

3.3. La relation Homme → Machine

3.3.1. Introduction. La conception d'une instrumentation microinformatisée implique la réalisation d'une console de pilotage qui, dans l'interactivité, vient compléter le dispositif de présentation des résultats.

D'un point de vue fonctionnel, on peut allouer à la console deux types d'utilisations :

- i) une utilisation dite spécialisée qui revient à un personnel normalement peu familiarisé avec les techniques de l'informatique : infirmière, ambulancier, etc....
Ce premier type d'utilisation ne nécessite pas un niveau important d'interactivité entre l'opérateur et l'instrument.

- ii) une utilisation dite universelle dans laquelle un véritable dialogue peut s'instaurer entre l'opérateur et l'instrument. Dans ce cas, l'interactivité doit pouvoir jouer à plein sans, pour cela, être gênée par les tracasseries matérielles et surtout logicielles inhérentes à l'informatique.

Cette distinction fonctionnelle doit pouvoir se retrouver au niveau de la réalisation, soit en mettant en oeuvre deux consoles distinctes, soit en définissant des procédures d'accès et/ou de verrouillage. Dans tous les cas, et c'est une règle d'or, il faut éviter l'amalgame qui rend l'utilisation de l'instrument délicate voire compliquée, et qui, finalement, alimente les sentiments de frustration de l'utilisateur.

3.3.2. Les deux types de consoles. D'une manière générale la conception des consoles d'utilisation doit tenir compte des trois impératifs suivants : simplification, banalisation, transparence, de telle sorte, qu'à la limite, l'opérateur ne puisse pas réaliser qu'il utilise un instrument informatisé.

En ce qui concerne les consoles spécialisées, et compte tenu des impératifs précédents, aucune initiative ne doit être laissée à l'opérateur. La console est alors simplement constituée d'un ensemble de touches fonctions. Afin d'empêcher toute ambiguïté dans l'utilisation de l'appareil, on peut, en outre, rendre certaines fonctions (c'est-à-dire certaines touches) exclusives l'une de l'autre. On aboutit à un tableau de bord du type "récepteur de télévision" dont le maniement ne nécessite aucune compétence particulière. Les instruments de monitoring conventionnel sont pilotés de cette manière et disposent de clés du type : E C G, pression veineuse, gel de la trace, etc...

En ce qui concerne les consoles dites universelles, elles apparaissent beaucoup plus proches du clavier informatique standard, dans la mesure où elles sont étroitement impliquées dans la relation opérateur - processeur. Et c'est finalement à ce niveau que se situe la difficulté qui se traduit par la question :

- Comment mettre en oeuvre un organe d'entrée/sortie typiquement informatique sans faire "faire de l'informatique" à l'utilisateur ?

La réponse à cette question est connue :

- En mettant en oeuvre un logiciel "indulgent" capable de digérer facilement les erreurs (syntaxiques par exemple) que ne manque pas de commettre l'opérateur non spécialiste d'informatique.

Compte-tenu de ce principe, la console universelle permet une grande souplesse d'utilisation, entièrement dédiée à l'interactivité et à l'aide à la décision. De manière annexe, elle peut également être utilisée pour tester le système, le mettre au point et même, dans certains cas, pour en modifier le logiciel.

Du point de vue matériel, deux options sont possibles pour le choix des consoles de pilotage.

La solution la plus économique consiste à utiliser un seul clavier du type universel verrouillable dans l'une des deux positions : SPECIALISE - UNIVERSEL. La première position valide un sous-ensemble de clés qui sont alors débanalisées et deviennent touches-fonctions. La seconde position banalise toutes les touches. Cette solution, qui est entièrement supportée par logiciel, implique, évidemment, un double marquage des touches qui peut nuire à la clarté du tableau de bord.

La seconde solution consiste à doter le système de deux consoles distinctes. Ceci permet évidemment de réaliser des tableaux de bord plus clairs donc moins "frustrants". Par contre cette solution nécessite la mise en oeuvre d'interfaces d'entrée/sortie supplémentaires.

3.3.3. Implications logicielles. L'utilisation d'une console spécialisée, pour laquelle aucune initiative n'est laissée à l'opérateur, simplifie considérablement le logiciel. Dans ce cas, en effet, l'activation d'une touche fonction entraîne simplement le branchement à un sous programme traitant la tâche associée à la fonction. La relation

Homme-Machine se fait à sens unique et n'implique que la simple gestion d'entrées numériques.

La mise en oeuvre d'une console dédiée à l'interactivité est supportée, quant à elle, par un logiciel très important que l'on ne peut d'ailleurs pas dissocier du logiciel chargé de gérer le système de représentation des résultats. Ce logiciel d'interactivité représente parfois, à lui seul, l'essentiel du logiciel total de l'instrument. En effet, bien qu'il n'implique, en général, aucun traitement mathématique élaboré, il nécessite de nombreuses manipulations de données (chaînes de caractères, modules graphiques, etc...), dont la programmation est souvent très lourde.

Il existe quelques méthodes simples permettant d'établir un dialogue efficace entre la machine et l'opérateur. Ces méthodes ont essentiellement pour principe de supprimer toute ambiguïté dans la relation Homme-Machine.

- i) La méthode par questions-réponses permet de progresser efficacement dans un dialogue. Pour cela, la machine pose une question et propose à l'opérateur de répondre par OUI ou par NON. En fonction de la réponse donnée une nouvelle question est posée et ainsi de suite jusqu'à ce que le système active une tâche de traitement correspondant aux désirs de l'opérateur. Cette démarche binaire, un peu simpliste, permet d'évoluer rapidement tout en respectant l'initiative de l'opérateur.
- ii) La méthode des menus est un raffinement de la technique précédente. Pour cela, dans un premier temps, la machine propose un certain nombre d'options de travail (le menu) et demande à l'opérateur d'en choisir une et une seule. L'opérateur ayant donné sa réponse, la machine propose un certain nombre de sous-options découlant de l'option choisie, et ainsi de suite jusqu'à ce que, comme précédemment, une tâche de traitement soit activée.

Ces méthodes peuvent encore être enrichies en offrant à l'opérateur la possibilité de revenir sur certaines décisions (c'est-à-dire sur certaines réponses), ou bien encore en l'autorisant à interrompre une tâche en cours. Enfin, le logiciel offre la possibilité d'introduire à tous les niveaux du traitement un certain nombre d'éléments supplémentaires tels que la confidentialité, la sécurité, etc... A cet égard, les développements peuvent être considérables.

3.4. Conclusion

Trouver une solution simple au problème de la communication Homme-Machine, ou plus exactement ici au problème de l'interactivité, est un élément clé de la conception d'un instrument (micro) informatisé. Il est, en effet, incontestable qu'une console de pilotage mal réalisée, laissant des ambiguïtés sur l'utilisation et/ou d'un maniement sophistiqué dévalorise considérablement un appareillage dont les performances de traitement peuvent, par ailleurs, être excellentes.

Perdre une heure devant une console de calcuïateur pour avoir frappé au clavier une virgule plutôt qu'un point est une brimade que seul l'informaticien accepte aisément. Par contre, une telle frustration serait nécessairement dévastatrice dans un contexte non informatique. A ce titre, un instrument informatisé devant lequel une importante rotation de personnel est envisageable (tours de garde, remplaçants, internes), dans le contexte clinique, doit offrir un maniement tel que l'opportunité d'une adaptation immédiate soit fournie aux utilisateurs potentiels.

Nous avons ignoré, dans le développement, certains éléments parfaitement connus tels que les alarmes visuelles ou sonores. L'exhaustivité, en la matière, est impossible et ce paragraphe visait surtout à fournir quelques éléments de réflexion au problème de l'interactivité. Nous donnons, dans la suite, quelques éléments concernant la fiabilité et la maintenance des instruments (micro) informatisés.

4 - FIABILITE ET MAINTENANCE :

4.1. Introduction

Alors qu'en instrumentation conventionnelle les problèmes de fiabilité et de maintenance s'identifient strictement à des problèmes technologiques, il n'en va pas de même en instrumentation microinformatisée. Les notions de fiabilité et de maintenance peuvent, en effet, être étendues au logiciel. Ainsi il semble facile d'admettre qu'on puisse corriger, améliorer, mettre à jour un programme ou bien encore rendre un traitement plus efficace, plus fiable, etc... Ces aspects, qui prennent une importance croissante alors que la fiabilité technologique des composants électroniques est de plus en plus grande, sont doublés, dans le cadre de cette étude, de problèmes inhérents au traitement temps réel. Nous nous attacherons essentiellement à mettre ces particularités en relief.

4.2. Aspects matériels

4.2.1. Fiabilité. La fiabilité matérielle d'un instrument repose sur les éléments suivants :

- *qualité des composants électroniques,*
- *qualité des composants mécaniques.*

Les composants électroniques ont atteint une fiabilité de fonctionnement dont le très haut niveau est confirmé par des études statistiques très précises, effectuées aussi bien sur les taux de défaillance que sur la durée de vie. Une abondante documentation spécialisée peut d'ailleurs être consultée à ce sujet /13, 14/ et notre but n'est pas ici de refaire ce type d'étude.

Les composants mécaniques sont, quant à eux, les principaux éléments susceptibles de faire chuter la fiabilité d'un système. A cet égard, les sources d'ennuis sont multiples : platine de disquettes, imprimante, clavier, etc... Dès lors, à chaque fois qu'une solution électronique peut remplacer, à un coût raisonnable, une solution mécanique, il faut en saisir l'opportunité. Les touches sensibles, les écrans cathodiques, les mémoires

à bulles sont, par exemple, des solutions électroniques sûrement plus fiables que les solutions électromécaniques correspondantes : clavier, imprimante, disquettes....

D'une manière plus générale on augmente la fiabilité de la structure en introduisant une certaine redondance au niveau des éléments à fiabiliser /15/.

4.2.2. Maintenance. La maintenance matérielle constitue à elle seule un problème qu'il est bon d'appréhender dès la conception de l'instrument. Les principes à observer pour aboutir à une maintenance efficace et peu onéreuse sont simplement les suivants :

- i) Donner beaucoup de poids aux solutions simples, voire frustes.
- ii) Concevoir le système de manière aussi modulaire que possible, chaque module représentant, à son niveau, une fonction ou une sous fonction de l'instrument.
- iii) Apporter un grand soin à la documentation, en lui donnant un abord didactique susceptible de ne pas rebuter l'utilisateur.

D'une manière plus générale, il faut ne pas perdre de vue que, plus que les coûts en composants et en matériel, ce sont les coûts de main-d'oeuvre qui rendent la maintenance onéreuse. Ceci explique, en particulier, l'intérêt des systèmes modulaires, pour lesquels les réparations peuvent être effectuées par remplacement pur et simple du module défectueux, c'est-à-dire en minimisant l'intervention humaine.

La suite du développement vise à mettre en relief les spécificités propres à la fiabilité de certains logiciels temps réel.

4.3. Fiabilité et maintenance logicielle

4.3.1. Généralités. Le logiciel est un produit (on pourrait dire un composant) susceptible d'évolutions et d'améliorations, au même titre que le matériel. Dans ce sens, tout ce qui tend à faire de cette discipline une forme d'artisanat (les astuces de programmation par exemple) doit être manipulé avec une certaine circonspection.

Tout produit, c'est-à-dire tout programme, est, en effet, appelé à évoluer dans un contexte qui va bien au delà de la conception et de la "fabrication". C'est ainsi qu'on peut être amené à corriger une erreur n'apparaissant pas immédiatement parce qu'elle correspond à une partie de programme rarement exploré. Cette correction est alors une opération de maintenance. On peut également être amené à reprendre un programme six mois ou un an après sa première utilisation, sans toucher au moindre composant de l'instrument. Cette modification apparaît alors comme une opération d'amélioration de l'instrument. Dans d'autres circonstances, les modifications logicielles peuvent entraîner des simplifications matérielles donc un moindre coût et une meilleure fiabilité, et ainsi de suite.... Toutes ces situations montrent clairement l'importance du logiciel et par conséquent la nécessité d'en organiser rigoureusement la production.

Dans ce but, les principes à respecter sont analogues à ceux qui ont été énoncés précédemment pour le matériel :

- i) Donner beaucoup de poids à une programmation simple et systématique.
- ii) Concevoir les programmes de manière aussi modulaire que possible, chaque module représentant, à son niveau, une tâche ou une sous-tâche de traitement.
- iii) Apporter un grand soin à la documentation, en lui donnant un abord didactique susceptible de ne pas rebuter l'utilisateur.

Les méthodes et les langages de programmation dite structurée s'appuient largement sur ces principes. Ils permettent ainsi d'éviter l'artisanat et facilitent la production de programmes simples à relire et reflétant parfaitement les structurations envisagées lors de la phase d'analyse.

Il est en dehors du cadre de cette étude de réaliser l'examen des différentes méthodes de programmation structurée et le lecteur pourra, à ce sujet, consulter des documents spécialisés /16, 17, 18, 19/.

4.3.2. Les contraintes temps réel. Un élément important de la fiabilité des logiciels concerne la confiance que l'on peut accorder à un traitement. Cette notion, qui semble inutile pour les traitements à caractère déterministe ou purement mathématique (par exemple, la résolution d'une équation du second degré), prend toute sa signification lorsqu'on aborde les traitements empiriques ou fondés sur l'expérience.

Dans ce cas, et d'une manière générale, la fiabilité est améliorée en introduisant une certaine forme de redondance dans le traitement des données. C'est ainsi qu'on peut multiplier les méthodes de vérification, de recoupement et de comparaison, au niveau de l'analyse des résultats. Tous les tests de validation relèvent de ce principe /20/.

Dans ce contexte, le traitement en temps réel d'une suite d'échantillons pose le problème de la validation des méthodes. Soit, par exemple, à analyser l'E C G, en mesurant, à chaque cycle cardiaque, la largeur du complexe Q R S (figure 4.12.). Cette mesure est obtenue, sur un cycle idéal, en considérant deux changements de signe successifs de la dérivée du négatif au positif, ainsi que l'illustre la figure 4.12.a. Toutefois cette situation idéale est susceptible d'accidents ou d'anomalies. Ainsi, lors de la descente R S, si un parasite provoque un changement de signe de la dérivée intempestif, la méthode de mesure précédente devient fautive. De même si l'onde T, qui suit le complexe Q R S, est déformée.

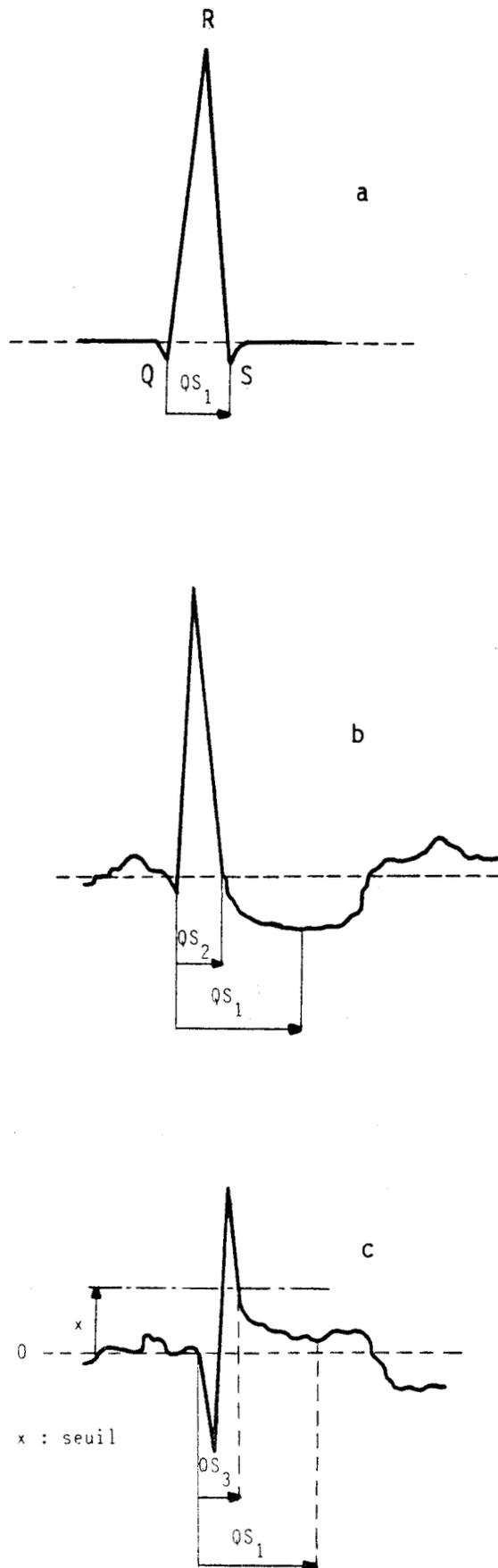


Figure 4.12.

Dès lors, pour fiabiliser le résultat du traitement donnant la largeur $Q S$, la solution consiste à se donner plusieurs méthodes de calcul donnant des éléments de recoupement et de comparaison. La figure 4.12. illustre ce principe.

Dans ces traitements, on suppose que le point Q s'identifie à un début d'impulsion électrique et que par conséquent sa position est déterminée avec précision. Ainsi, seul le point S fait l'objet de la procédure de fiabilisation /21/.

Dans la première méthode d'évaluation de $Q S$, on considère que le complexe $Q R S$ est idéal et que les tests sur la dérivée suffisent à déterminer avec précision le point S . On obtient ainsi une première solution notée $Q S_1$ (figure 4.12.a.).

Dans la seconde méthode, on suppose que la déformation de la fin du complexe ne permet pas de s'appuyer sur un test de la dérivée. Le point S est alors déterminé en cherchant, à partir de R , l'intersection de l' $E C G$ avec sa ligne de base (figure 4.12.b.). On obtient ainsi une solution $Q S_2$.

Enfin la troisième méthode suppose que non seulement la fin du complexe est déformée, mais qu'en plus l' $E C G$ ne repasse pas par sa ligne de base. Dans ce cas, la solution $Q S_3$ est obtenue en cherchant, à partir de R , l'intersection de l' $E C G$ avec sa ligne de base augmentée d'un seuil (figure 4.12.c.).

Dans ces conditions, le système d'analyse calcule à chaque cycle cardiaque les valeurs $Q S_1$, $Q S_2$ et $Q S_3$ qui constituent, dans cet ordre, les trois candidats possibles à la solution finale. Si $Q S_1$ est une valeur cohérente, vis à vis des résultats obtenus sur les cycles normaux précédents, alors $Q S_1$ est la solution définitive. Sinon on teste $Q S_2$ puis $Q S_3$ si $Q S_2$ est lui aussi incohérent. Si les trois valeurs $Q S_1$, $Q S_2$ et $Q S_3$ ne sont pas comparables aux résultats des cycles normaux précédents,

il est possible que le complexe soit anormal. Dans ce cas l'analyse se poursuit dans le sens de la caractérisation de l'anomalie, à partir d'autres types de tests, et ainsi de suite...Cet exemple montre comment on peut introduire une certaine redondance au niveau des traitements (ici calculs de $Q S_1$, $Q S_2$ et $Q S_3$) et comment, par recoupements, on augmente la fiabilité du système.

D'une manière plus générale, à chaque acquisition de données, le système temps réel augmente sa quantité d'information, de telle sorte qu'il peut effectuer deux types de traitements :

- i) les traitements a priori qui permettent d'établir de nouveaux résultats,
- ii) les traitements de validation de méthodes qui permettent, a posteriori, de confirmer ou d'infirmer des résultats antérieurs admis a priori.

Si la première démarche correspond à une phase constructive parfaitement comprise des analystes, la seconde, souvent moins bien appréhendée, joue un rôle clé dans la fiabilité et la sûreté de fonctionnement des instruments microinformatisés.

5 - CONCLUSION :

Les problèmes posés par la conception et la réalisation d'une instrumentation microinformatisée sont très nombreux et le but de ce chapitre était de donner un éclairage particulier susceptible de dégager les difficultés essentielles que sont :

- i) le choix d'une structure de traitement,
- ii) la conception des liaisons opérateur-instrument,
- iii) la prise en compte des éléments de fiabilité et de maintenance.

En ce qui concerne le premier point, il est apparu que la structure hybride du type étoile-série est bien adaptée aux méthodes de traitement temps réel proposées aux chapitres 2 et 3 (détection et classification dynamique d'événements).

L'examen des liaisons opérateur-instrument a permis, quant à lui, de mettre en évidence le rôle de l'interactivité dans l'instrumentation microinformatisée. A ce niveau, les difficultés viennent essentiellement de la nécessité de valoriser les capacités de synthèse de l'opérateur tout en banalisant l'instrument. Dans ce sens, il apparaît que la mise en oeuvre d'une imagerie synthétique constitue un élément clé de la solution.

Enfin, en ce qui concerne les problèmes de fiabilité et de maintenance, il est clair que les implications logicielles sont considérables. A cet égard, structurer et organiser la production des logiciels est devenu une nécessité de premier ordre, non seulement pour des raisons de rentabilité, mais aussi pour permettre la réalisation de traitements de plus en plus élaborés, s'inscrivant dans des projets de plus en plus vastes.

A partir de ces principes énoncés tout au long de cette étude, le dernier chapitre propose une solution pour la réalisation d'un système intégré de surveillance des principales fonctions physiologiques, en réanimation respiratoire.

CHAPITRE 5

PROPOSITIONS POUR UNE INSTRUMENTATION INTEGREE

1 - GENERALITES :

Le projet que nous proposons dans ce dernier chapitre se place dans le contexte de la réanimation et de la surveillance respiratoires. A ce titre, il a trouvé son support initial au Centre de Pathologie Néonatale d'Arras où un premier appareillage d'analyse en temps réel de l'impédance thoracique du nouveau-né a été développé /1, 2, 3/. Actuellement, les efforts de notre groupe de travail se portent vers la réalisation d'un système intégré de surveillance des principales fonctions physiologiques, chez l'adulte. A ce niveau, notre support se situe au Centre de Réanimation Respiratoire de l'Hôpital Calmette de Lille, grâce auquel plusieurs réalisations micro-informatisées ont déjà vu le jour /4, 5/. Dès lors, et à partir de ces premiers résultats, notre but est de réaliser une synthèse aboutissant à un appareillage compact et simple d'utilisation.

Ce qui frappe le non initié, lorsqu'il pénètre dans une chambre de réanimation respiratoire, c'est le caractère hétéroclite des appareillages entourant le malade : respirateur, écrans, tuyaux, câbles, alarmes lumineuses, alarmes sonores, etc... Certes, il est clair que chacun des appareils doit remplir une fonction qui vient compléter les fonctions remplies par les appareils voisins, et cette nécessité est sûrement la source d'une certaine multiplicité. Toutefois, et de l'avis même des médecins, il arrive fréquemment que les appareillages utilisés soient non seulement complémentaires l'un de l'autre, mais encore redondants l'un par rapport à l'autre. Et si, dans d'autres circonstances, il est apparu que la redondance était un gage de fiabilité, il n'en va pas de même dans ce cas. En effet, les redondances apparaissant dans une chambre de réanimation, loin d'être le résultat d'une organisation et d'une concertation des constructeurs, sont simplement des états de faits. Dès lors elles engendrent nécessairement

des difficultés, non pas sur le plan de l'utilisation de chacun des appareils pris isolément, mais plutôt sur le plan de l'utilisation globale de l'ensemble des appareils. Ainsi, si les critères de déclenchement d'une alarme diffèrent d'un appareil à l'autre, ne risque-t-on pas, par des déclenchements intempestifs et incohérents, de dérouter le personnel soignant ? Ces éléments tendent à montrer que l'intégration d'un certain nombre de fonctions de surveillance permet d'apporter une plus grande cohérence donc une plus grande efficacité dans l'utilisation des appareillages.

Indépendamment de ce qui précède, certaines argumentations très élémentaires permettent de plaider en faveur des solutions intégrées. Ainsi, l'intégration permet de réaliser de substantielles économies sur des éléments aussi triviaux qu'onéreux : coffrets de tôlerie, connecteurs, câbles, boutons poussoirs, graphismes, transformateurs d'alimentation, etc...

Certains constructeurs tels que Hewlett-Packard proposent déjà des solutions intégrées. Ainsi, le système PIC 78500 (Patient Information Center) apporte une solution multi-microprocesseurs au problème de la surveillance en réanimation cardiaque. Il offre la possibilité de surveiller huit patients et visualise pour cela des signaux tels que l'E C G, les pressions cardiaques instantanées avec possibilité de gel de la trace, ainsi que les variations du rythme cardiaque jusque sur 24 heures. De plus il fournit les alarmes habituelles.

En ce qui concerne notre propre projet, nous envisageons de lui donner une orientation différente dont les caractéristiques sont les suivantes :

- i) l'appareil intégré est dédié à un seul patient.
- ii) à la notion de monitoring il faut ajouter les notions de bilan électrophysiologique et d'aide à l'examen clinique.
- iii) le point ii) implique la nécessité de donner une grande importance à l'interactivité : visualisation des résultats, console de pilotage.
- iv) le système doit être modulaire et extensible.

Dans un premier volet, la présentation d'un cahier des charges nous permettra de développer ces éléments. Nous présenterons ensuite les solutions envisagées. Enfin, un développement particulier sera consacré aux éléments de pilotage.

2 - LE CAHIER DES CHARGES :

2.1. Introduction

Plutôt que de définir un cahier des charges, il serait plus approprié de parler ici d'un ensemble de cahiers des charges. Cet ensemble, structuré et hiérarchisé, fournit différents niveaux de contraintes allant de l'organisation générale de l'instrument (niveau global) à la conception des éléments d'acquisition des signaux (niveau local). Il est clair que compte tenu de la spécificité de chacun des signaux à traiter il est illusoire de détailler le cahier des charges au niveau local. A ce titre, nous rappelons que chaque signal est considéré comme un générateur d'événements traités localement pour élaborer les deux informations suivantes :

- un vecteur de paramètres caractérisant l'événement,
- le résultat d'une classification affectant l'événement à une situation.

Nous effectuerons donc une approche descendante de la structure en définissant au niveau global les rôles et les fonctions de l'instrument.

2.2. Descriptif général

2.2.1. Synoptique de l'instrument. Le synoptique de la figure 5.1. fait apparaître trois types de modules constituant l'appareil :

- i) les modules M_j chargés d'effectuer l'acquisition et le traitement local des signaux.
- ii) le module MS chargé de collecter et de synthétiser les résultats fournis par les modules M_j

- iii) la console de dialogue constituée d'un clavier et d'un écran permettant à l'opérateur d'interroger l'instrument.

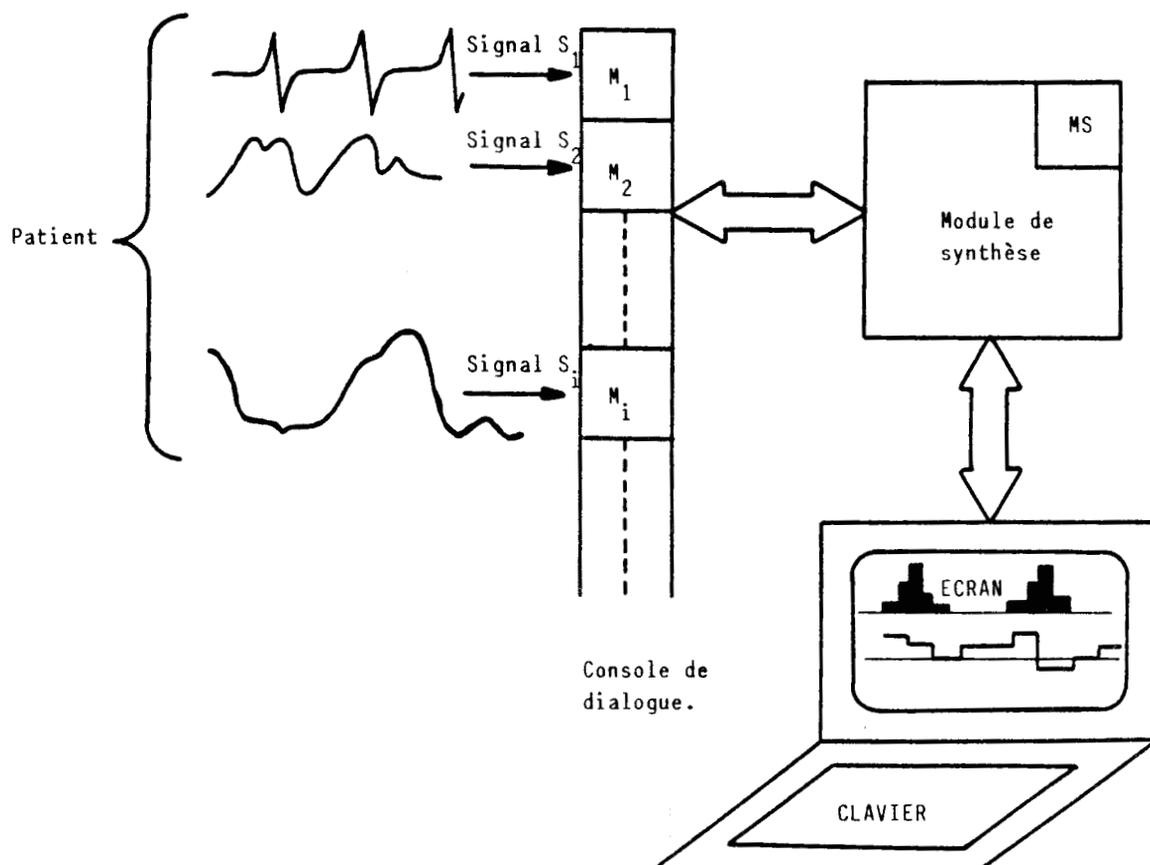


Figure 5.1.

2.2.2. Les signaux du bilan. La liste des signaux à traiter n'est pas exhaustive. Elle doit pouvoir être complétée et modifiée facilement du fait de la modularité de l'instrument. Toutefois on estime à un maximum de dix le nombre de signaux électrophysiologiques pouvant intervenir dans le bilan.

Dans le cadre de cette étude, on envisage les traitements suivants :

- volume expiré,
- concentration en CO₂ du gaz expiré,
- évolution des pressions de gaz,
- évolution des débits de gaz
- E C G : analyse clinique élémentaire,
- température.

. REMARQUE : Certains traitements locaux peuvent nécessiter l'examen simultané de plusieurs signaux. L'analyse de la courbe débit-volume en est un exemple. Pour ces traitements particuliers un module M_j peut donc avoir à capter plusieurs signaux.

2.2.3. Fonctions de base. Outre certaines fonctions supplémentaires qui seront définies ultérieurement, l'appareil doit remplir une première fonction de base permettant :

- de mémoriser le passé électrophysiologique du patient sur 24 heures,
- de délivrer, sur ordre de l'opérateur, une image synthétique du bilan électrophysiologique. Un tel bilan doit permettre de réaliser deux types d'observations :

* *le présent,*

* *une fenêtre quelconque du passé. On admet toutefois que la largeur minimale de la fenêtre est de 1/4 d'heure.*

Pour cela, chaque module M_j réalise de manière autonome :

- i) l'acquisition et le prétraitement d'un signal générateur d'événements,
- ii) la génération des vecteurs de paramètres caractéristiques de chaque événement,
- iii) la classification des événements,
- iv) la mémorisation du passé récent (quart d'heure en cours) sous la forme d'histogrammes de répartition des paramètres, pour chaque situation.

Le module de synthèse est alors chargé :

- i) de prendre en compte les tranches élémentaires d'un quart d'heure élaborées au niveau des modules M_1 ,
- ii) de réaliser l'assemblage des tranches élémentaires de manière à synthétiser le bilan sur une fenêtre de temps définie par l'opérateur.

Enfin, la console de dialogue permet :

- i) de sélectionner le signal dont on désire observer le bilan,
- ii) de préciser le type d'observation désirée : présent ou fenêtre dans le passé.

Le graphique de la figure 5.2. illustre cette première fonction de l'appareil.

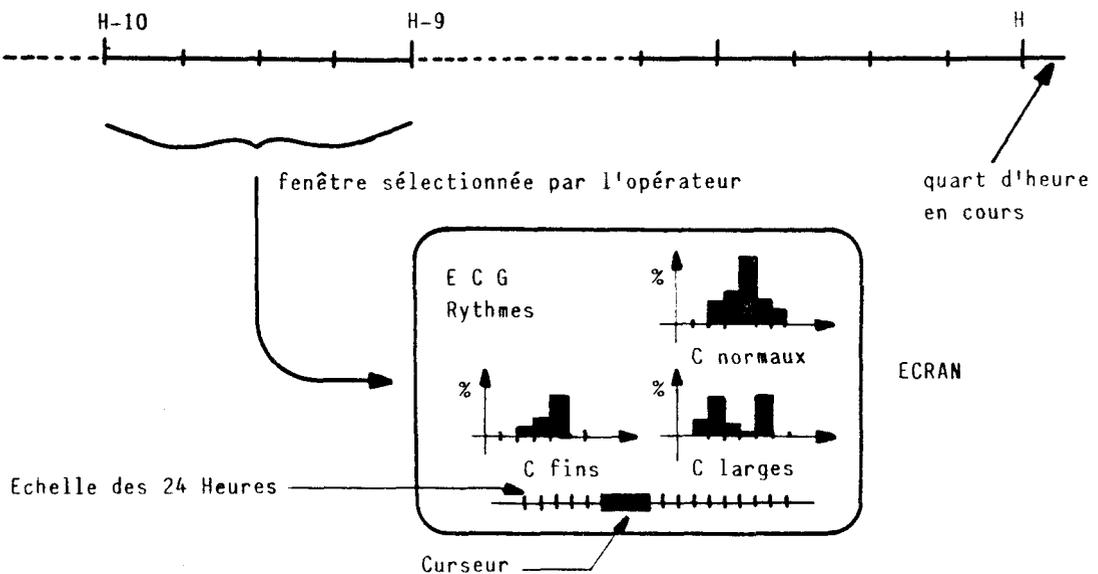


Figure 5.2.

A titre d'exemple le bilan présenté couvre la 10^{ème} heure précédant le quart d'heure en cours. Le signal analysé est l'E C G pour lequel sont visualisées trois situations : cycles cardiaques à complexes Q R S normaux, arythmie à complexes larges et arythmie à complexes fins. Pour chacune des situations, on donne un bilan statistique sommaire sous forme d'histogrammes. L'opérateur doit pouvoir déplacer à volonté la fenêtre d'observation et en modifier la largeur. Ceci peut se réaliser en mettant en oeuvre un curseur graphique se déplaçant sur l'échelle des 24 heures.

Cette première fonction de base permet d'établir un bilan isolé de chacun des signaux. Une seconde fonction de base doit permettre à l'opérateur d'établir d'éventuelles corrélations entre les signaux. Pour cela, l'utilisateur doit pouvoir visualiser simultanément les différentes situations traversées par chacun des signaux. La figure 5.3. illustre cette seconde fonction de base.

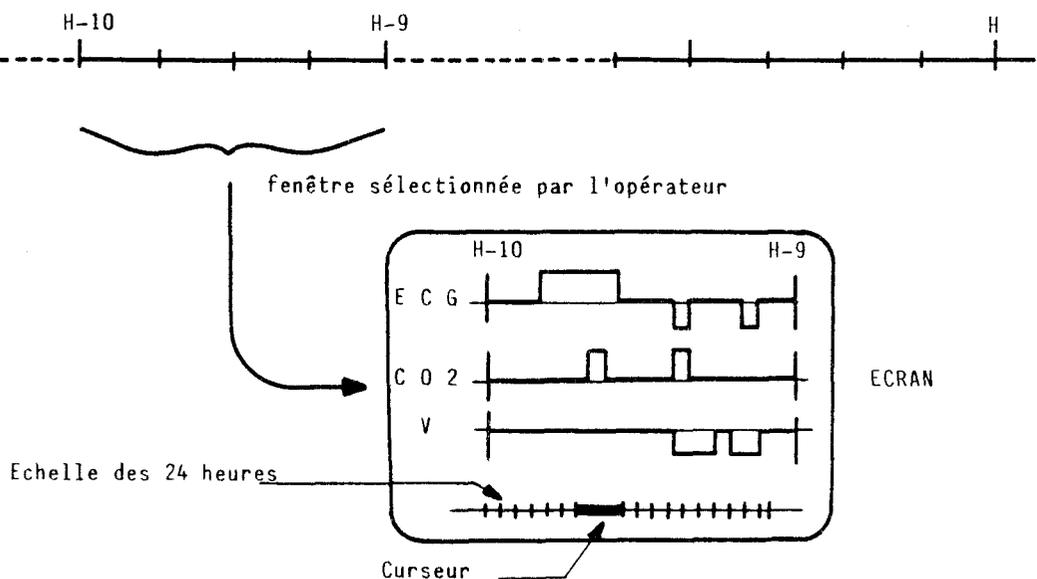


Figure 5.3.

Afin de préciser la signification de chacune des traces de l'écran de la figure 5.3., nous donnons, figure 5.4., l'illustration de ce que pourrait être la trace relative à l'E.C.G., pour lequel on considère les trois situations définies précédemment.

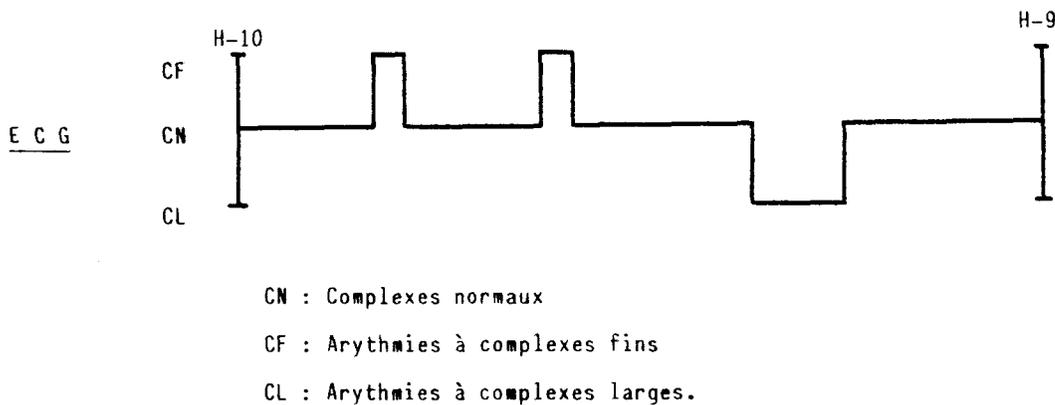


Figure 5.4.

Une dernière fonction de base de l'appareil est évidemment la fonction d'alarme. Toutefois, il est ici possible de concevoir l'alarme, non pas comme le résultat de l'examen d'un seul signal, mais comme le résultat de la scrutation de l'ensemble des signaux. Plus précisément, supposons que le module M_k présente une situation susceptible de déclencher une alarme. Le module de synthèse peut alors décider de confirmer ou d'annuler cette alarme d'après la situation présentée par le module M_j . Ainsi la décision revient au module de synthèse après consultation de l'ensemble des modules M_j . Cette possibilité permet, en outre, de définir plusieurs types d'alarmes et même de programmer une gradation dans la gravité des alarmes.

. REMARQUE : Il faut prévoir la possibilité d'inclure dans les alarmes certaines défaillances techniques telles que, notamment, les défauts d'électrodes (arrachement, mauvais contacts, parasites, etc...). L'analyse de ces défauts, qui est effectuée au niveau des modules M_i , doit alors être envisagée dans les cahiers des charges locaux.

2.2.4. Modes de fonctionnement :

Deux modes de fonctionnement sont prévus :

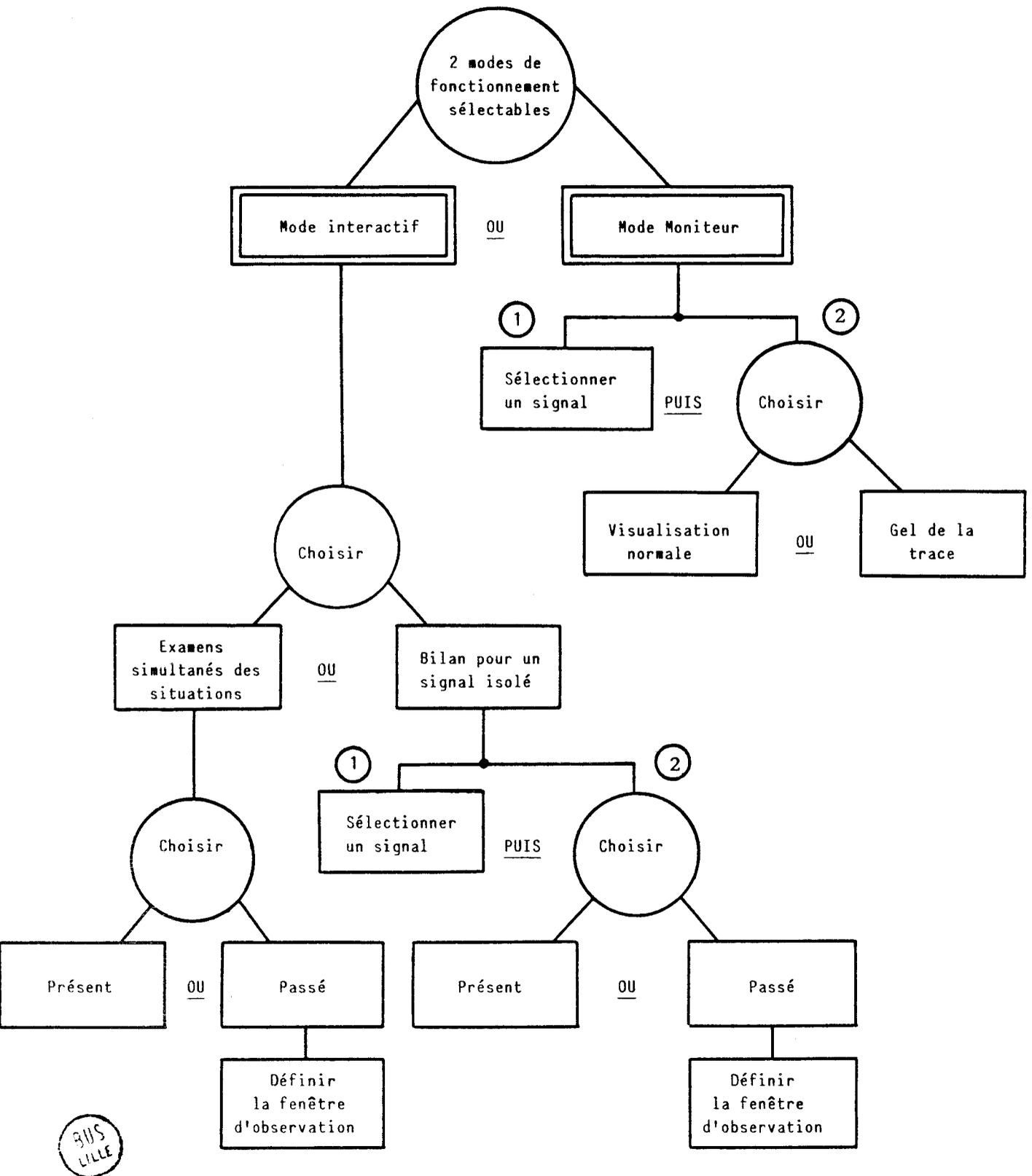
- le mode interactif correspondant aux fonctions définies précédemment. Dans ce mode, l'appareil fonctionne en outil d'aide à l'examen clinique.
- le mode moniteur conventionnel permettant la visualisation pure et simple des signaux, avec, éventuellement, gel de la trace.

Quel que soit le mode de fonctionnement sélectionné, la fonction d'alarme est évidemment toujours opérante.

2.2.5. Modularité : L'appareil doit posséder, comme nous l'avons déjà précisé, une excellente modularité matérielle de manière à ce que l'on puisse facilement lui adjoindre les modules M_i supplémentaires pour le traitement de nouveaux signaux. Toutefois, cette modularité matérielle doit nécessairement s'accompagner d'une modularité logicielle tout aussi excellente. De cette manière, l'adjonction d'un module M_i ne doit pas remettre en cause toute la gestion de l'appareil. En outre cette façon de procéder facilitera d'éventuelles modifications de modules déjà existants.

2.3. Récapitulatif

Compte-tenu du descriptif précédent, les diagrammes de la figure 5.5. donnent le récapitulatif des fonctionnements possibles de l'appareil.



BUS LILLE

Figure 5.5.a. : Les modes de fonctionnement sélectables.

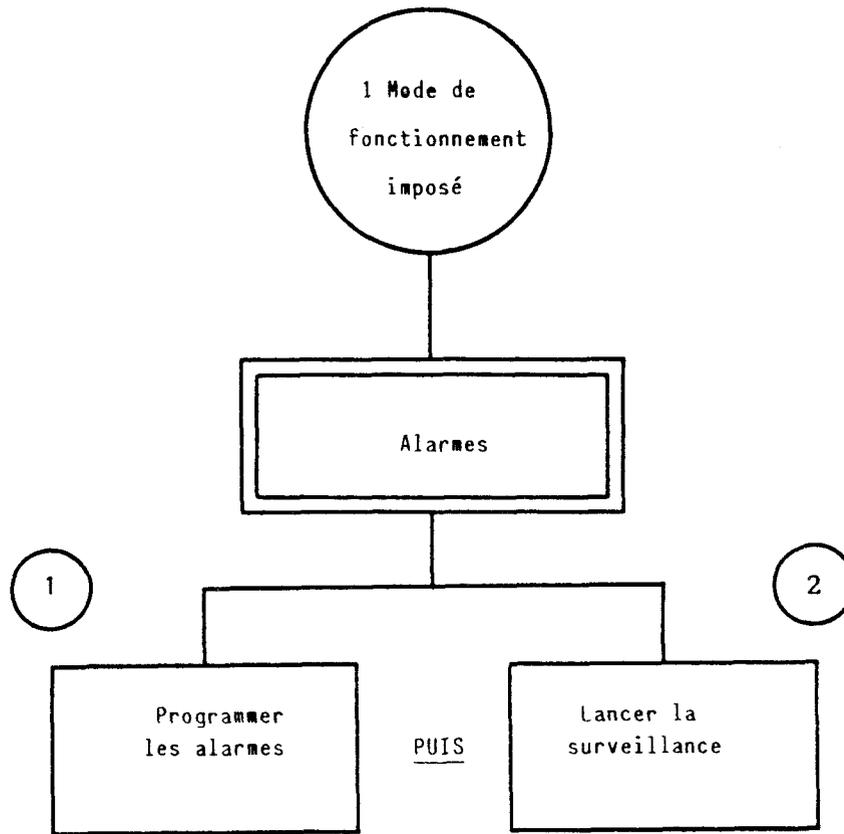


Figure 5.5. b : Le mode Alarme.

La console de dialogue doit permettre dévoluer sans ambiguïté à l'intérieur des diagrammes de la figure 5.5.. En ce qui concerne les alarmes, elles sont normalement programmées par l'opérateur au début de toute nouvelle surveillance. En l'absence de programmation, l'appareil utilisera des alarmes standard .

3 - SOLUTIONS PROPOSEES :

3.1. Généralités

Les solutions que nous proposons pour le cahier des charges défini précédemment s'appuient largement sur les principes énoncés au chapitre précédent. L'utilisation d'une architecture répartie a déjà fait l'objet, en France, d'un certain nombre de travaux, notamment en commande des processus /6/. Dans un tel contexte, le processeur maître a essentiellement pour fonction d'assurer l'ordonnancement, l'enchaînement et la synchronisation d'un ensemble de tâches qui coopèrent à la conduite d'un processus. Ces tâches qui ne sont donc pas indépendantes l'une de l'autre, sont assurées par des processeurs esclaves.

Dans le cas qui nous intéresse, le processeur maître a pour fonction de synthétiser des résultats provenant de traitements asynchrones et indépendants a priori. Dès lors, le problème de la gestion des modules esclaves se pose essentiellement en termes de prise en compte de données, dès leur élaboration, plutôt qu'en termes d'ordonnancement. De plus, les signaux à analyser évoluant sans discontinu, chacun des modules esclaves doit pouvoir, lui aussi, travailler sans discontinu et de manière totalement indépendante. Il est clair que ces aspects vont influencer sur le mode de travail du maître, pour lequel nous envisageons deux possibilités : scrutation cyclique des modules esclaves ou bien encore gestion d'une file d'attente.

3.2. Architecture d'ensemble

Dans son ensemble, l'appareil possède l'architecture de la figure 5.6.. Sur ce schéma apparaissent :

- i) les modules M_i définis précédemment et chargés du traitement local de chacun des signaux,
- ii) le module de synthèse qui est, lui-même, constitué de trois éléments :

- * le système scrutateur dont le rôle est de surveiller les modules M_i et de préparer la visualisation interactive,
- * le système de pilotage permettant de sélectionner les différentes fonctions de l'appareil et de réaliser le traitement interactif,
- * la mémoire de masse sur laquelle sont stockés les tranches successives d'un quart d'heure, ainsi que certains logiciels de l'appareil.

iii) le module moniteur simple qui prépare la visualisation des signaux (avec gel éventuel), lorsque l'appareil fonctionne en moniteur simple.

Ces trois composantes s'articulent autour d'un ensemble de trois bus généraux appelés BUS1, BUS2 et BUS3. Chacun de ces bus généraux intègre évidemment les trois fonctions habituelles :

- contrôle et synchronisation : C bus
- adressage : A bus
- transfert de données : D bus
- BUS1 réalise la liaison entre les modules M_i et le module de synthèse par l'intermédiaire du système scrutateur
- BUS2 est le bus interne du module de synthèse
- BUS3 réalise une liaison directe entre la console de pilotage et le module moniteur simple.

Nous donnons, dans la suite du développement, quelques détails complémentaires sur le fonctionnement de chacun de ces éléments. Ainsi seront successivement examinés :

- les modules M_i et la liaison M_i - système scrutateur,
- le système scrutateur et la liaison système scrutateur - système de pilotage,
- le système de pilotage,
- le module moniteur simple.

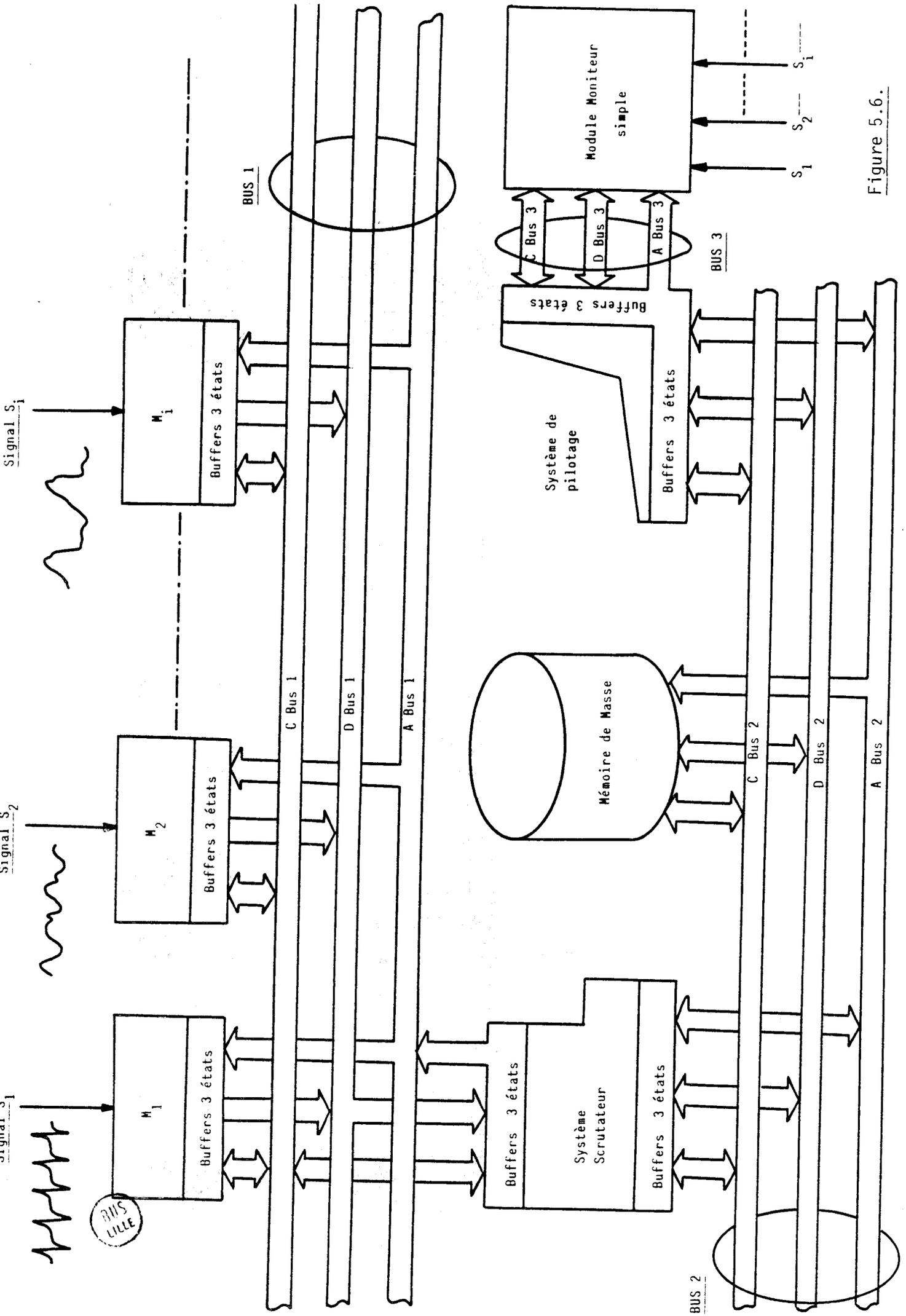


Figure 5.6.

3.3. Les modules M_i

3.3.1. Présentation. Chaque module M_i possède la structure de la figure 5.7., sur laquelle on distingue :

- ①. une carte analogique utilisée pour l'amplification, le filtrage et la mise en forme du ou des signaux reçus.
- ②. un convertisseur analogique digital travaillant à la période d'échantillonnage T_e . Ce convertisseur fonctionne éventuellement avec un multiplexeur lorsque le module doit traiter plusieurs signaux en simultanéité.
- ③. un ensemble de traitement conventionnel composé des éléments habituels : microprocesseur, ROM de programme, RAM locale, interfaces d'entrées/sorties. Ces éléments sont articulés autour d'un bus général : A bus, D bus, C bus.
- ④. une mémoire RAM boîte aux lettres par laquelle transitent les résultats de M_i destinés au module scrutateur. Cette mémoire est connectée, par un système de buffers trois états, soit sur le bus général de M_i lorsqu'elle est utilisée par le microprocesseur de M_i , soit sur le bus général BUS1 lorsqu'elle est utilisée par le système scrutateur.
- ⑤. un ensemble d'éléments de contrôle (indicateur, mots d'état) permettant de réaliser la gestion de la mémoire boîte aux lettres.

Nous n'examinerons que les points ④ et ⑤, les points ①, ② et ③ faisant l'objet d'un cahier des charges local.

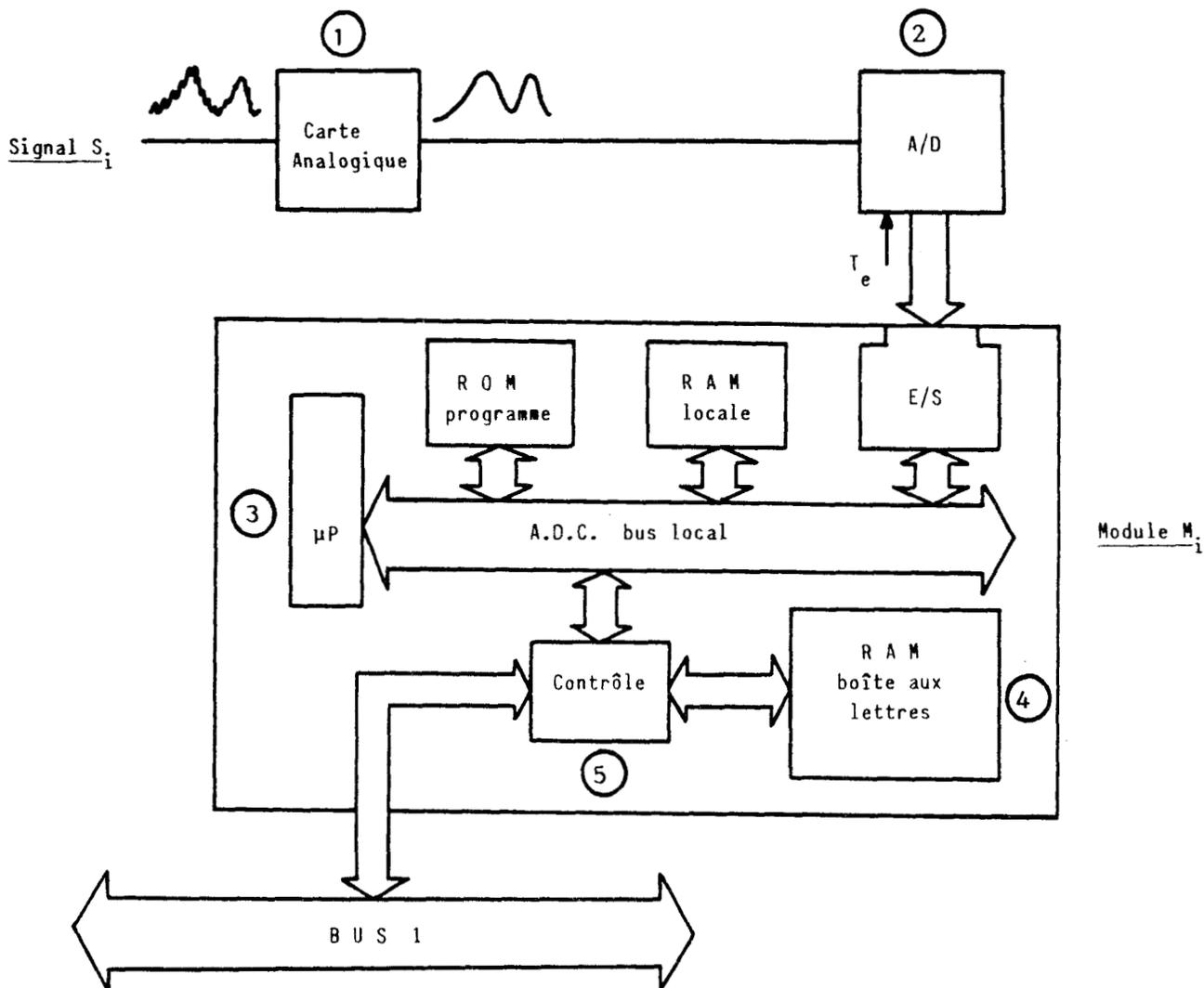


Figure 5.7.

3.3.2. La liaison M_i - système scrutateur. L'ensemble contrôle-RAM boîte aux lettres du module M_i ainsi que les liaisons aux différents bus généraux peuvent être détaillés selon le schéma de la figure 5.8. Nous ne faisons apparaître sur cette figure que l'aspect fonctionnel des solutions proposées. Les interprétations et les aménagements techniques correspondants sont évidemment multiples et se situent en dehors du cadre de cette étude.

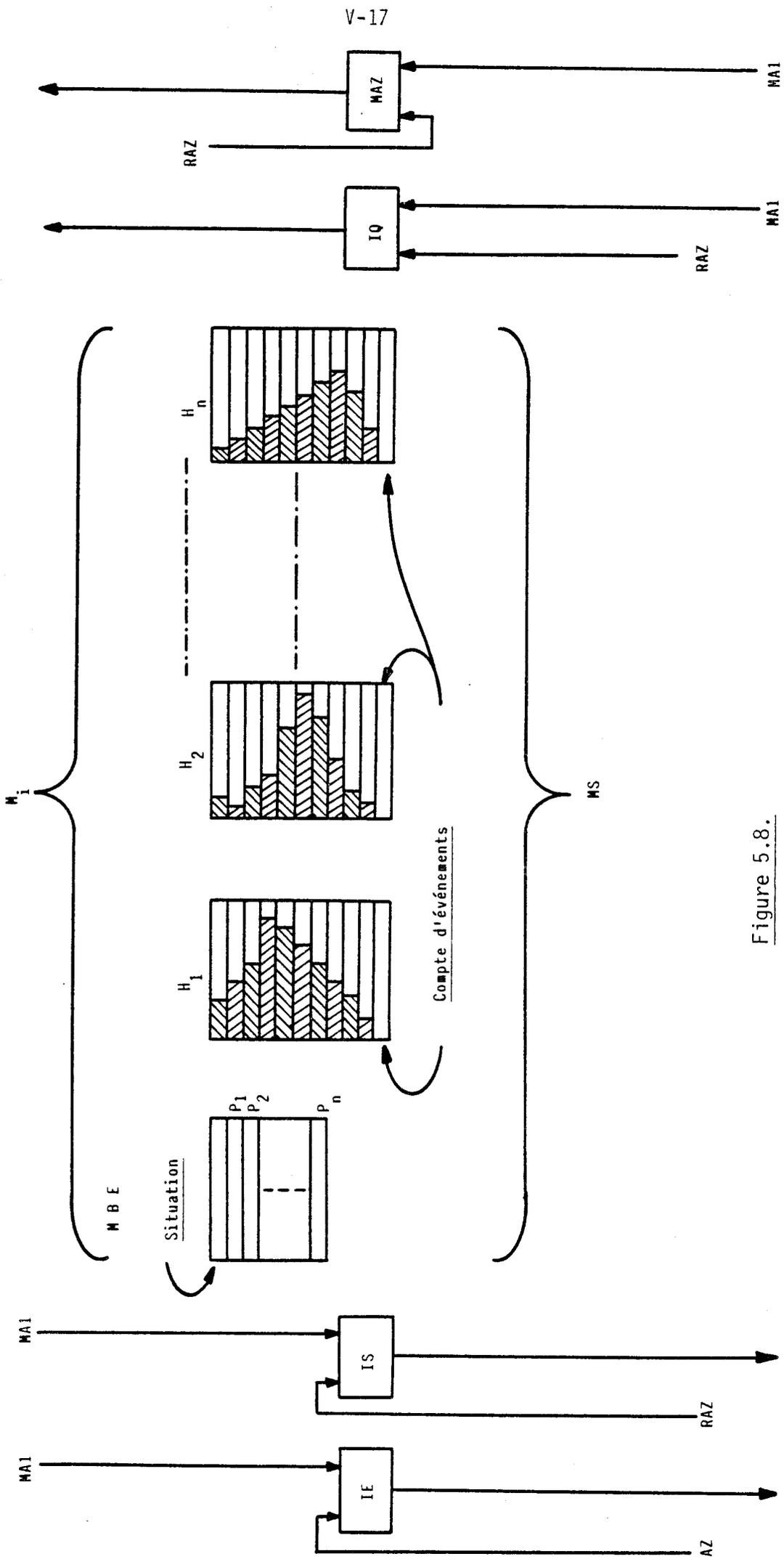


Figure 5.8.

La mémoire proprement dite est découpée en plusieurs zones :

- les zones telles que H_1, H_2, \dots, H_n qui contiennent les histogrammes relatifs à chacune des situations relevées. Ces histogrammes sont générés, en temps réel, par le module M_i et par tranches d'un quart d'heure. A titre d'exemple l'histogramme de rythme correspondant aux E C G normaux peut avoir l'allure de la figure 5.9.

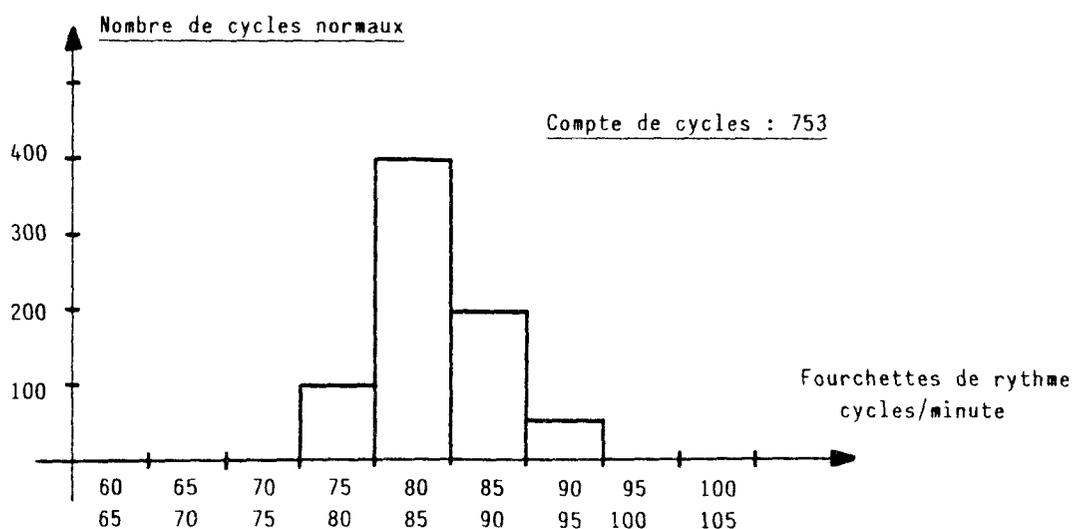


Figure 5.9.

A l'occurrence d'un nouveau cycle normal, le compte de cycles passe à 754 et la raie, c'est-à-dire le case mémoire correspondant au rythme détecté est incrémentée de une unité, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'un quart d'heure complet soit écoulé.

- la zone M B E ou Mémoire de Bilan d'Événement. Cette zone contient le résultat des traitements effectués par M_i sur le dernier événement survenu. On y trouve ainsi la situation en

cours et les valeurs des paramètres caractéristiques du dernier événement détecté. Nous examinerons ultérieurement le rôle particulier joué par M B E dans la visualisation du quart d'heure en cours.

Ce découpage fait évidemment partie des caractéristiques logicielles du module M_i . A ce titre il lui correspond un jeu d'adresses d'implantation mis à la disposition du module de synthèse MS.

Par ailleurs, les principaux éléments de contrôle de la mémoire boîte aux lettres sont les suivants (cf. Figure 5.8.) :

- IE : Indicateur d'événement.
 - * mis à 1 par le module M_i à chaque nouvel événement,
 - * remis à 0 par MS après lecture de M B E.
- IS : Indicateur de situation.
 - * mis à 1 par le module M_i à chaque changement de situation,
 - * remis à 0 par MS après lecture de la situation inscrite dans M B E.
- IQ : Indicateur de fin de quart d'heure.
 - * mis à 1 par MS à la fin de chaque quart d'heure, ou bien encore lorsque MS demande l'accès aux zones H_j ,
 - * remis à 0 par MS après lecture des zones H_j .
- MAZ : Autorisation de remise à zéro des zones H_j .
 - * mis à 1 par MS pour autoriser M_i à réinitialiser les zones H_j ,
 - * remis à 0 par M_i après réinitialisation.

Nous allons maintenant examiner comment sont utilisés ces divers éléments, selon les fonctionnements envisagés.

3.3.3. Fonctionnement. Conformément au diagramme de la figure 5.5.a. nous envisageons ici le fonctionnement en mode interactif, soit pour examens simultanés des situations, soit pour le bilan d'un signal isolé. Dans les deux cas, il faut distinguer deux types de tâches : d'une part l'élaboration des tranches d'un quart d'heure qui est une opération

continue et prioritaire et d'autre part les opérations de transfert des données de M_j vers MS qui se font de manière discontinue.

Par ailleurs pour expliquer le fonctionnement nous supposons que le module de synthèse fonctionne en scrutation cyclique simple des modules M_j . Nous envisagerons ultérieurement la possibilité de définir une prise en compte des modules M_j au moyen d'une file d'attente.

FONCTIONNEMENT EN EXAMENS SIMULTANES DES SITUATIONS

i) Elaboration des tranches d'un quart d'heure (tâche continue).

Cette élaboration est effectuée par le module scrutateur, de la manière suivante :

- si $IS = 0$, alors le module M_j correspondant n'est pas pris en compte.
- si $IS = 1$, il y a eu changement de situation. Dès lors le module scrutateur lit la nouvelle situation de M_j dans M B E, acquitte en remettant IS à 0, repère l'heure et finalement range ces informations dans sa propre mémoire. Au bout d'un quart d'heure le module scrutateur dispose ainsi de l'image d'évolution des situations de chacun des modules M_j . Cette image peut être rangée en mémoire de masse pour un assemblage ultérieur.

ii) Visualisation (tâche interactive).

Deux cas sont possibles : visualisation du quart d'heure en cours et visualisation d'une fenêtre dans le passé.

- pour le quart d'heure en cours, le système de pilotage doit lire la mémoire du système de scrutation.

- pour une fenêtre du passé, le système de pilotage rappelle, sur la mémoire de masse, les quarts d'heure antérieurs et les assemble.

iii) Traitement des alarmes (tâche continue).

Le système scrutateur dispose, à chaque instant, de l'ensemble des situations relatives aux modules M_i . C'est donc lui qui est chargé, à partir de ces informations, d'élaborer les différentes alarmes. Plus précisément on peut assimiler la détection des alarmes à la reconnaissance d'une séquence de vecteurs de situations, ainsi que l'illustre le schéma de la figure 5.10.

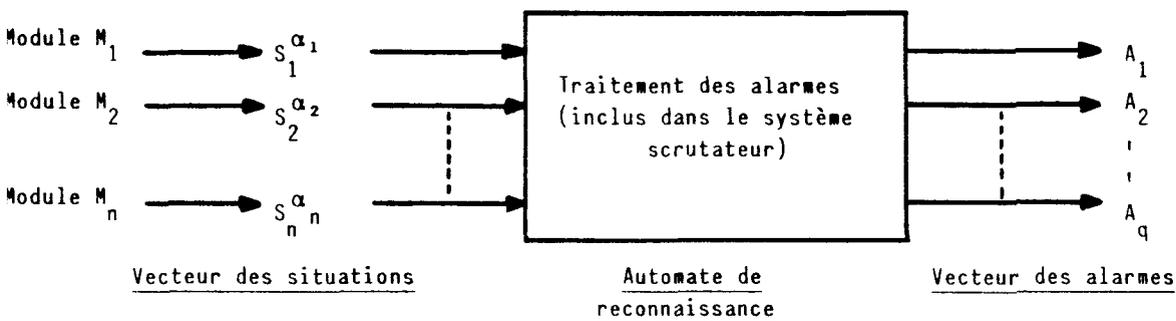


Figure 5.10.

La programmation des alarmes revient alors à la définition des équations logiques de fonctionnement de l'automate de reconnaissance.

FONCTIONNEMENT EN BILAN ISOLE D'UN SIGNAL

i) Elaboration des tranches d'un quart d'heure (tâche continue).

Cette élaboration est effectuée par les modules M_i qui se chargent, chacun en ce qui le concerne, de construire les histogrammes H_j (cf. Figure 5.8.). Lorsqu'un quart d'heure est écoulé, le système scrutateur demande l'accès aux histogrammes H_j en mettant à 1 l'indicateur

IQ. Lorsque l'échange est terminé, le système scrutateur remet à zéro IQ et met à 1 l'indicateur MAZ d'autorisation de remise à zéro des zones H_j . Dès lors, le module M_j peut réinitialiser ses histogrammes et entamer une nouvelle tranche d'un quart d'heure. M_j acquitte l'indicateur MAZ en le mettant à zéro, et ainsi de suite.

ii) Visualisation.

- En ce qui concerne la visualisation d'une fenêtre du passé, la procédure est simple. Elle consiste, pour le système de pilotage, à rappeler, sur la mémoire de masse, les quarts d'heure antérieurs pris en compte par le système scrutateur et à effectuer un assemblage.

- En ce qui concerne la visualisation du quart d'heure en cours, la procédure est plus délicate et s'opère en deux temps :

* d'abord le système scrutateur lit les histogrammes en cours de construction dans le module M_1 . Pour cela, il met IQ à 1, effectue la lecture des zones H_j , remet IQ à zéro mais laisse MAZ à zéro. Ainsi M_1 pourra continuer normalement la construction de l'histogramme en cours.

* ensuite le système scrutateur met à jour l'histogramme qu'il vient d'acquérir en scrutant la mémoire M B E du module M_1 observé. Pour cela, il procède de la manière suivante :

- si IE = 0, alors on passe à un autre module,
- si IE = 1, le système scrutateur acquiert la mémoire M B E pour mise à jour des histogrammes à visualiser en temps réel. L'acquisition est ensuite acquittée par remise à 0 de l'indicateur IE, et ainsi de suite.

3.4. Le système scrutateur

3.4.1. Généralités. Ce système, dont certaines fonctions ont déjà été décrites précédemment possède la structure de la figure 5.11.

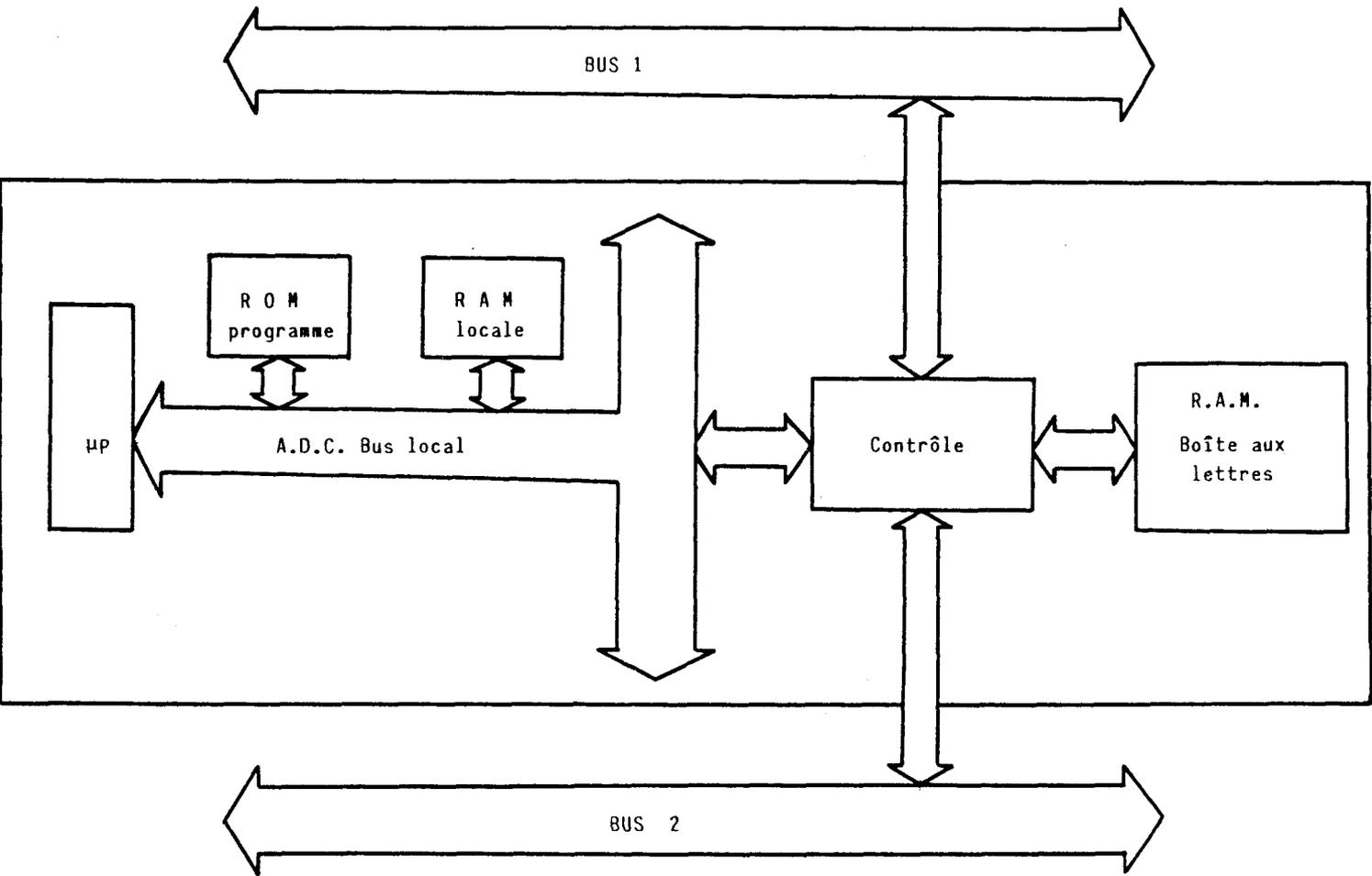


Figure 5.11.

Cette structure est assez voisine de celle d'un module M_i . Les éléments de contrôle gérés par le microprocesseur, ont essentiellement pour fonction de mettre la mémoire boîte aux lettres en liaison soit avec BUS1 pour la communication avec les modules M_i , soit avec BUS2 pour la communication avec la mémoire de masse ou le système de pilotage.

La gestion et le contrôle de BUS1 ayant été examinés lors de l'étude des modules M_i , nous n'analyserons ici que la liaison avec BUS2.

3.4.2. Connexion à BUS2. Cette liaison peut être schématisée selon l'illustration de la figure 5.12.

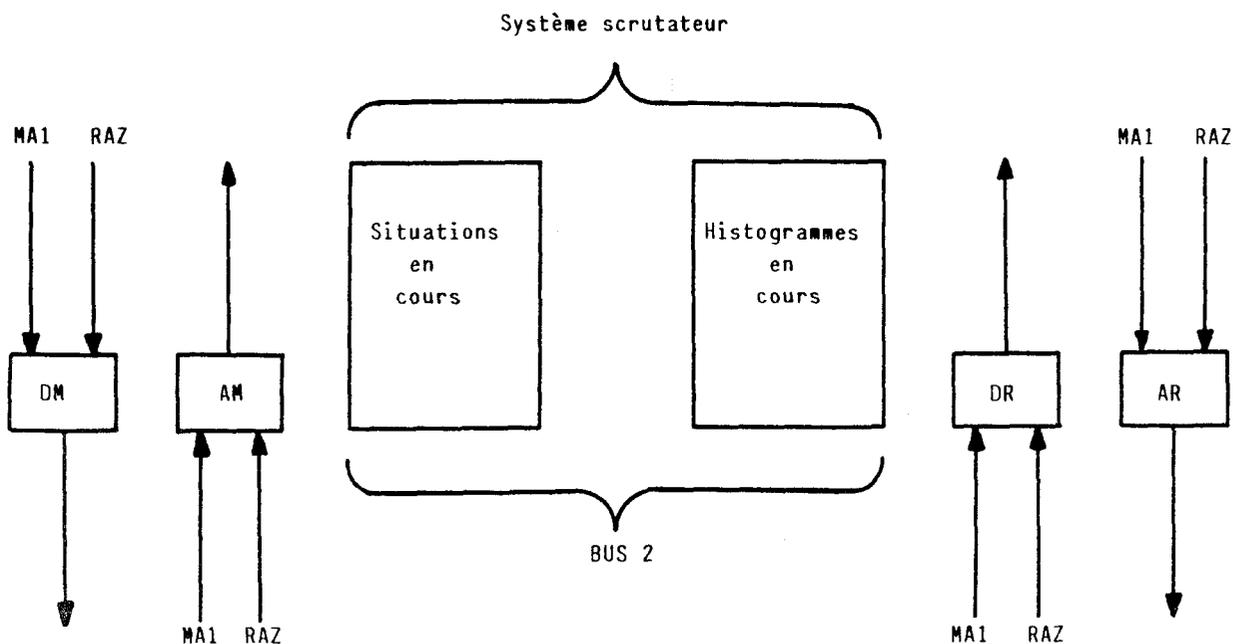


Figure 5.12.

La mémoire boîte aux lettres est découpée en deux zones :

- une zone réservée au fonctionnement en "examens simultanés des situations". Cette zone, qui est utilisée en permanence par le système scrutateur, est transférée sur la mémoire de masse à la fin de chaque tranche d'un quart d'heure. De plus, elle est prise en compte par le système de pilotage lorsque l'opérateur veut visualiser en temps réel l'évolution du quart d'heure en cours relatif à l'ensemble des situations.

- une zone réservée au fonctionnement en "bilan isolé d'un signal". Cette zone n'est utilisée que pour visualiser, en temps réel, le quart d'heure en cours d'un signal isolé sélectionné par l'opérateur.

Les principaux éléments de contrôle permettant la connexion à BUS2 sont alors les suivants :

- DM : Demande d'accès à la mémoire de masse. Cet indicateur est positionné par le système scrutateur et envoyé sur BUS2.
- AM : Autorisation d'accès à la mémoire de masse. Cet indicateur, positionné par le système de pilotage, est l'acquittement de DM.
- DR : Demande d'accès à la mémoire boîte aux lettres du système scrutateur. Cet indicateur est positionné par le système de pilotage.
- AR : Autorisation d'accès à la mémoire boîte aux lettres du système scrutateur. Cet indicateur est l'acquittement de DR, positionné par le système scrutateur.

3.4.3. Fonctionnement. Ce fonctionnement est conventionnel. Il permet d'une part, de réaliser les transferts de données entre le système scrutateur et le système de pilotage, d'autre part, de partager la ressource commune que constitue la mémoire de masse.

i) tranfert de données.

Le système de pilotage n'accède à la mémoire boîte aux lettres du système scrutateur que lorsque l'opérateur désire visualiser le quart d'heure en cours. Pour cela la demande d'accès est réalisée par mise à 1 de l'indicateur DR. Lorsque le scrutateur a reconnu cette demande, il peut autoriser l'accès à sa mémoire boîte aux lettres en mettant à 1 l'indicateur AR. Cette autorisation peut être continue durant tout l'échange ou rendue discontinue par mises à 1 et mises à 0 successives de AR. Lorsque l'échange est terminé, DR est remis à 0 par le système de pilotage et cette remise à 0 est acquittée côté scrutateur par la remise à 0 de AR.

ii) accès à la mémoire de masse.

Le partage de la mémoire de masse entre le système scrutateur et le système de pilotage se fait de manière tout à fait analogue. Le demandeur est ici le scrutateur qui gère DM, tandis que l'autorisation est délivrée par le système de pilotage via AM.

3.5. Le système de pilotage

Ce système est, quant à lui, partagé entre trois sources d'informations :

- la mémoire boîte aux lettres du système scrutateur,
- la mémoire de masse,
- le module moniteur simple.

La gestion de l'accès aux deux premières sources a été examinée précédemment. Il reste donc simplement à analyser la liaison avec le module moniteur simple. Nous envisageons cette liaison de manière totalement indépendante en considérant la fonction moniteur simple comme un instrument dans l'instrument. Ce principe est illustré figure 5.13.

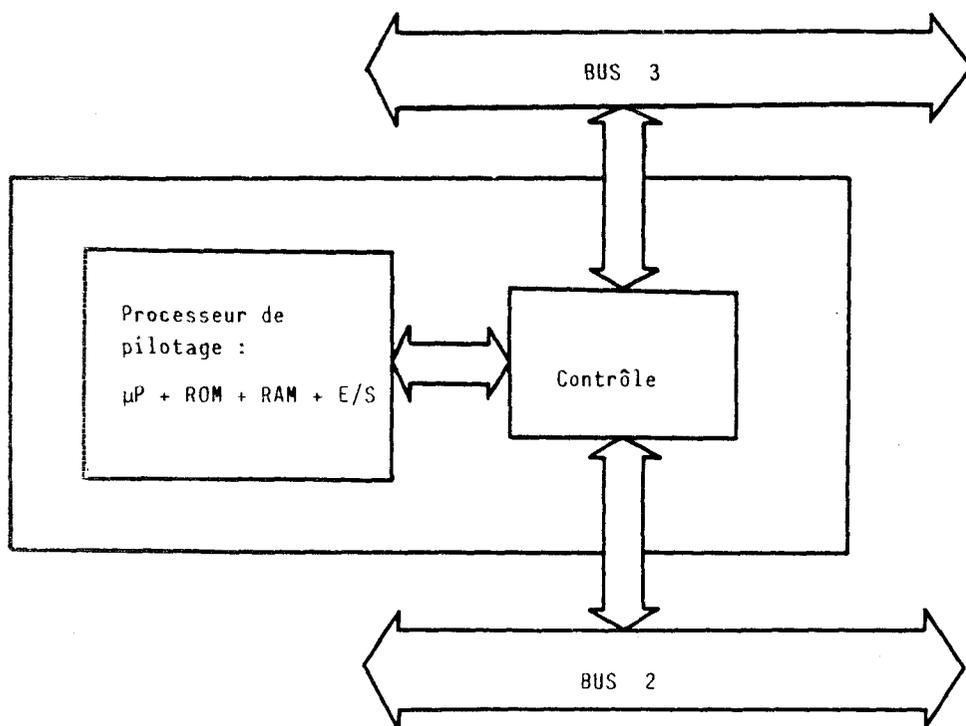


Figure 5.13.

Lorsque l'instrument travaille en mode moniteur simple, le système de pilotage se déconnecte de BUS2 (par des buffers 3 états par exemple) et se met en liaison avec le module moniteur simple via BUS3. Dans ce cas, l'ensemble système de pilotage - module moniteur simple constitue un instrument indépendant qui visualise les signaux sélectionnés pendant que, pour sa part, l'ensemble modules M_i - système scrutateur - mémoire de masse travaille à des traitements plus élaborés.

. REMARQUE1 : Lorsque le système de pilotage se déconnecte de BUS2, il doit mettre à 1 l'indicateur AM défini précédemment. Ainsi l'autorisation d'accès à la mémoire de masse devient permanente pour le scrutateur.

. REMARQUE 2 : Le système de pilotage supporte également le "tableau de bord" de l'instrument qui intègre de nombreux éléments importants. Ces éléments feront l'objet d'un développement particulier et nous donneront ainsi l'opportunité de réaliser le récapitulatif du fonctionnement de l'appareil.

3.6. Le module moniteur simple

Il peut posséder la structure de la figure 5.14. qui intègre :

- des éléments de conversion analogique digitale,
- des RAM de stockage contenant l'image des signaux à visualiser. Ces RAM sont accessibles par le module de pilotage via BUS3.

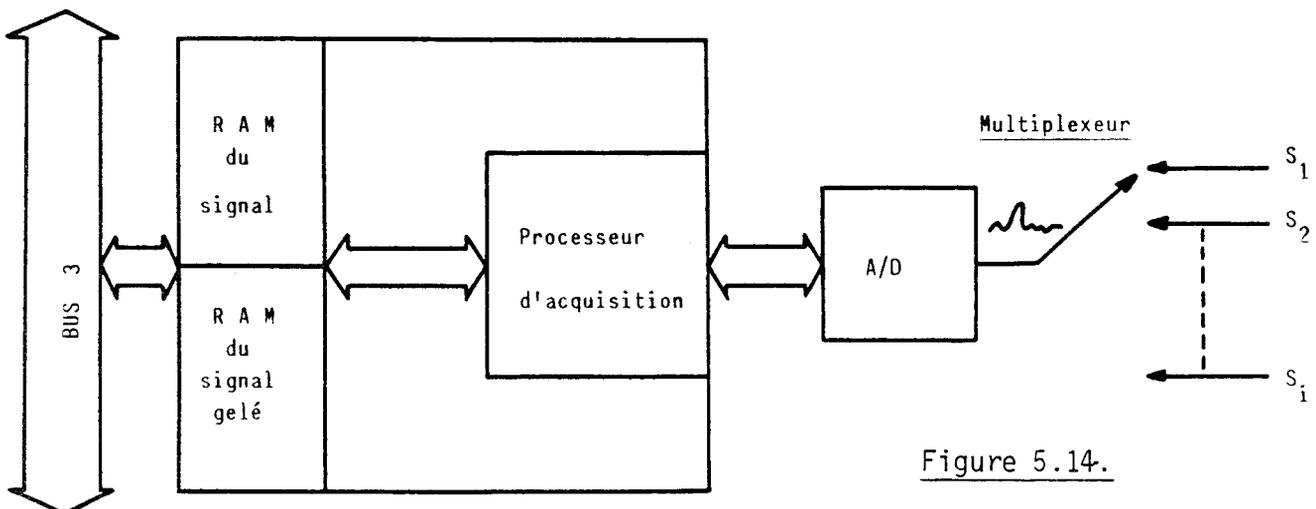


Figure 5.14.

Le multiplexeur placé à l'entrée du dispositif permet de sélectionner un signal à visualiser. Le processeur d'acquisition est alors chargé, d'une part de gérer le convertisseur analogique-digital (A/D) et d'autre part d'alimenter la RAM de stockage. Cette RAM est, elle-même, découpée en deux zones :

- une zone réservée au stockage des échantillons observés en temps réel. Cette zone peut-être traitée comme une mémoire tournante.
- une zone permettant de geler le signal, pour observation d'un phénomène particulier.

La mémoire de stockage est ensuite transférée par BUS3 dans la mémoire d'écran du système de pilotage, pour visualisation.

3.7. Autres caractéristiques

Pour compléter ce descriptif, deux points restent à préciser :

- la nature et la capacité de la mémoire de masse,
- le type de scrutation des modules M_i par le module de synthèse MS.

3.7.1. La mémoire de masse. Afin d'évaluer sa capacité, nous allons de nouveau considérer le traitement clinique de l'E C G. Si le cycle moyen est de 80 cycles/mn, ceci représente 1 200 événements par quart d'heure. Dans ces conditions les trois situations envisagées précédemment sont facilement représentables sur trois histogrammes pour chacun desquels 15 fourchettes de rythme suffisent largement. Dès lors, si chaque fourchette occupe deux octets de mémoire, la capacité nécessaire au stockage d'un quart d'heure d'E C G est la suivante :

$$\text{Capacité} = 3 * 15 * 2 = 90 \text{ octets}$$

octets/fourchette

↙
↘
↗

situations fourchettes/situation

Ceci représente approximativement une nécessité de stockage de 9 K octets pour 24 heures.

. REMARQUE : Cette estimation est, en fait, très large. En effet, chaque fourchette doit pouvoir supporter les 1 200 événements de la tranche d'un quart d'heure. Or un octet ne peut contenir au maximum que 256 événements. Par contre deux octets ont un potentiel, largement excessif, de 65 536 événements. Dès lors il existe sûrement une solution intermédiaire permettant de réduire sensiblement le volume de stockage envisagé.

Indépendamment de ceci, on peut estimer à une centaine de K octets le volume nécessaire au stockage des histogrammes d'un ensemble de 10 signaux observés sur 24 heures. Ainsi, même si on ajoute à ceci le volume nécessaire au stockage des données pour le fonctionnement en mode "examens simultanés des situations", il est clair qu'une mémoire de masse du type disquette de 256 K octets suffit à l'appareil. Toute solution équivalente (type mémoire à bulle par exemple) peut donc être sérieusement envisagée.

3.7.2. Scrutation des modules M_i . Nous n'avons envisagé, dans la gestion des modules M_i , qu'un mode de scrutation cyclique simple. Cette gestion peut être améliorée en adoptant une prise en compte des modules M_i au moyen d'une file d'attente. Pour cela, à chaque fois qu'un module M_i désire être pris en compte par le module scrutateur, il "s'inscrit" sur une liste d'attente en précisant :

- son adresse,
- le type d'appel : appel pour un événement ou appel pour un changement de situation. Ces deux types d'appels correspondent, nous le rappelons, aux indicateurs IE et IS de la figure 5.8..

Ce principe est illustré figure 5.15.

<u>premier inscrit</u>	M_{α_1}	IE/IS
	M_{α_2}	IE/IS
<u>dernier inscrit</u>	M_{α_n}	IE/IS

Figure 5.15.

Le fonctionnement est du type "premier inscrit premier servi". Pour cela le système scrutateur est sollicité (c'est-à-dire interrompu), chaque fois que la liste contient au moins un inscrit. Si l'appel a lieu pour un changement de situation (indicateur IS), alors le traitement s'effectue normalement (lecture de la situation, de l'heure,...). Par contre si l'appel a lieu pour l'occurrence d'un événement, deux cas sont possibles :

- ou bien l'opérateur a demandé la visualisation des histogrammes du module appelant, pour le quart d'heure en cours et le traitement a lieu normalement (transfert de la mémoire M B E,...).

- ou bien l'opérateur n'a pas demandé cette visualisation et aucun traitement n'est nécessaire. Dans ce cas on peut passer au module M_i suivant inscrit sur la liste d'attente et ainsi de suite...

. REMARQUE : La liste d'attente est constituée d'une mémoire RAM qui est une ressource partagée par les modules M_i et le système scrutateur. La gestion de cette RAM nécessite deux tâches :

- le traitement en mémoire FIFO par un jeu de pointeurs tournants,
- le partage par le jeu de BUS1.

Ces deux opérations constituent, en elles-mêmes, un traitement particulier que l'on pourrait dédier à un module spécialisé dans la gestion de BUS1.

3.8. Conclusion

Les solutions énoncées au travers de ce descriptif rassemblent un ensemble de propositions constituant une large base pour la réalisation d'une structure définitive. La construction de chacun des modules de la structure et même l'assemblage de certains de ces modules (modules M_i - visualisation) ont déjà fait l'objet de réalisations très avancées /2, 5, 7/. La synthèse qui a été proposée constitue l'aboutissement normal de ces réalisations.

Le paragraphe suivant fournit, en même temps que le descriptif du "tableau de bord" de l'appareil, un récapitulatif de fonctionnement.

4 - LA CONSOLE DE PILOTAGE :

4.1. Généralités

Le tableau de bord doit fournir deux possibilités :

- faire apparaître clairement les différentes fonctions de l'appareil en éliminant toute ambiguïté.
- permettre les opérations de programmation.

Par ailleurs, deux types d'accès sont définis :

- un accès simplifié pour les opérations de routines confiées au personnel soignant.

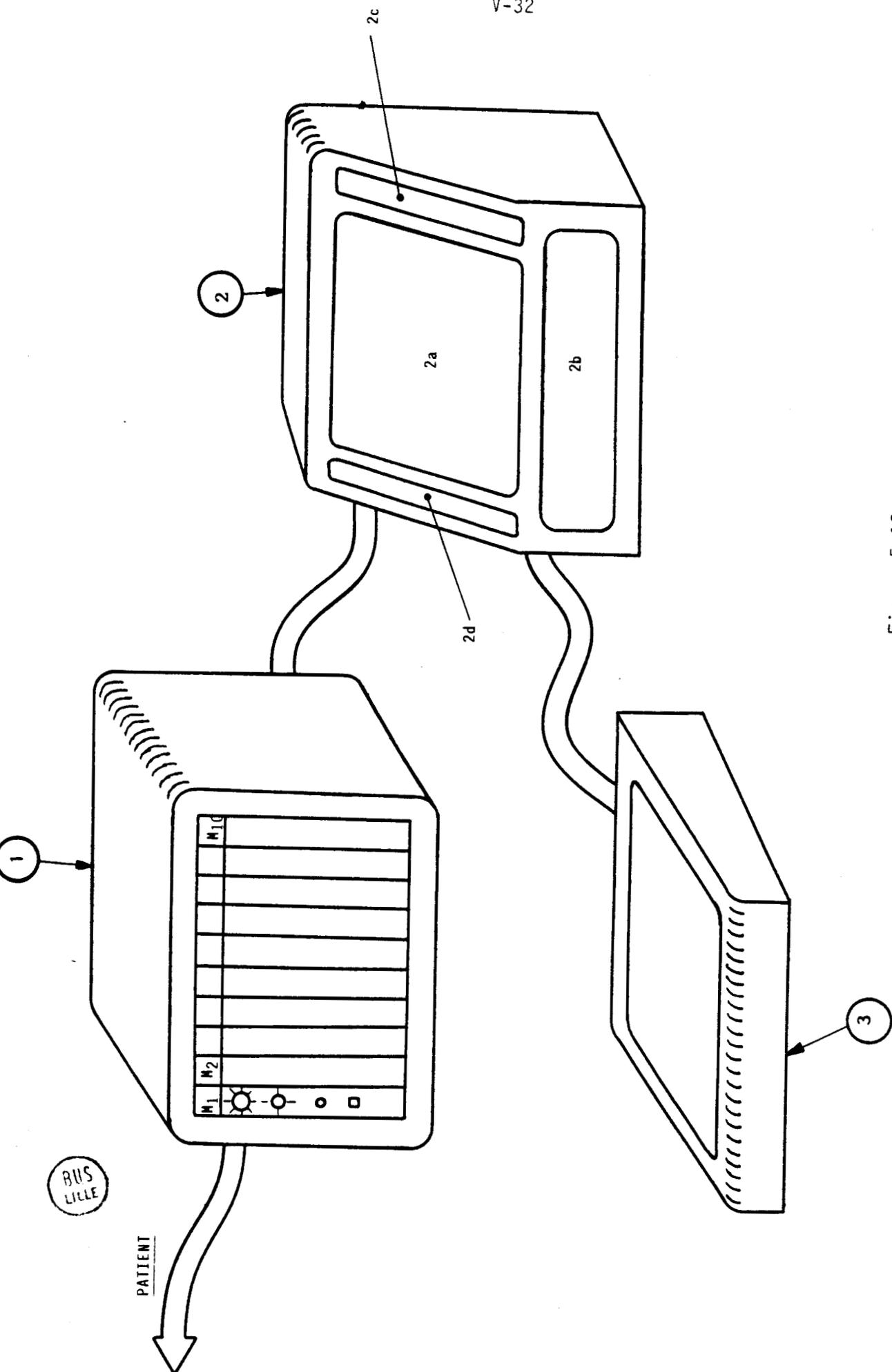


Figure 5.16.

- un accès plus élaboré réservé à l'examen interactif.
Cet accès demandant une plus grande technicité, un verrouillage est prévu afin d'éviter toute fausse manipulation.

Dans ces conditions, le dispositif, illustré figure 5.16., comporte trois éléments :

- ①. un premier coffret supporte les différents modules M_i enfichés par l'avant et disposant éventuellement d'éléments de réglage (potentiomètre, boutons de calibration, etc...). Ce coffret est d'une part relié au patient pour la captation des signaux, d'autre part relié à l'élément ②
- ②. un ensemble regroupant :
 - 2a - l'écran de visualisation
 - 2b - l'accès à la mémoire de masse
 - 2c - le bandeau de pilotage pour le fonctionnement en moniteur simple
 - 2d - le bandeau de lecture des alarmes.
- ③. un clavier amovible relié à l'élément ②.

4.2. Fonctionnement

4.2.1. L'élément ①. Outre les modules M_i qui sont apparents, le coffret ① contient également le module moniteur simple défini précédemment (Figure 5.6.). Dès lors ce module peut reprendre les amplifications et les mises en forme analogiques effectuées au niveau de chaque module M_i . De la même manière, il peut bénéficier des réglages analogiques effectués par l'opérateur sur les modules M_i . Nous verrons que cette possibilité, conjuguée avec l'utilisation de l'écran permet une mise au point rapide des branchements au patient.

4.2.2. Le pilotage du moniteur simple. Lorsque le clavier amovible (3) est déconnecté de l'élément (2), le dispositif travaille automatiquement en mode moniteur simple. Dans ce cas, deux possibilités sont offertes :

- la visualisation temps réel d'un signal, avec possibilité de gel,
- la lecture et l'interprétation des alarmes délivrées par l'appareil.

La Figure 5.17., qui reprend les éléments 2a, 2c et 2d de la Figure 5.16, donne le détail du pilotage de ce mode de fonctionnement.

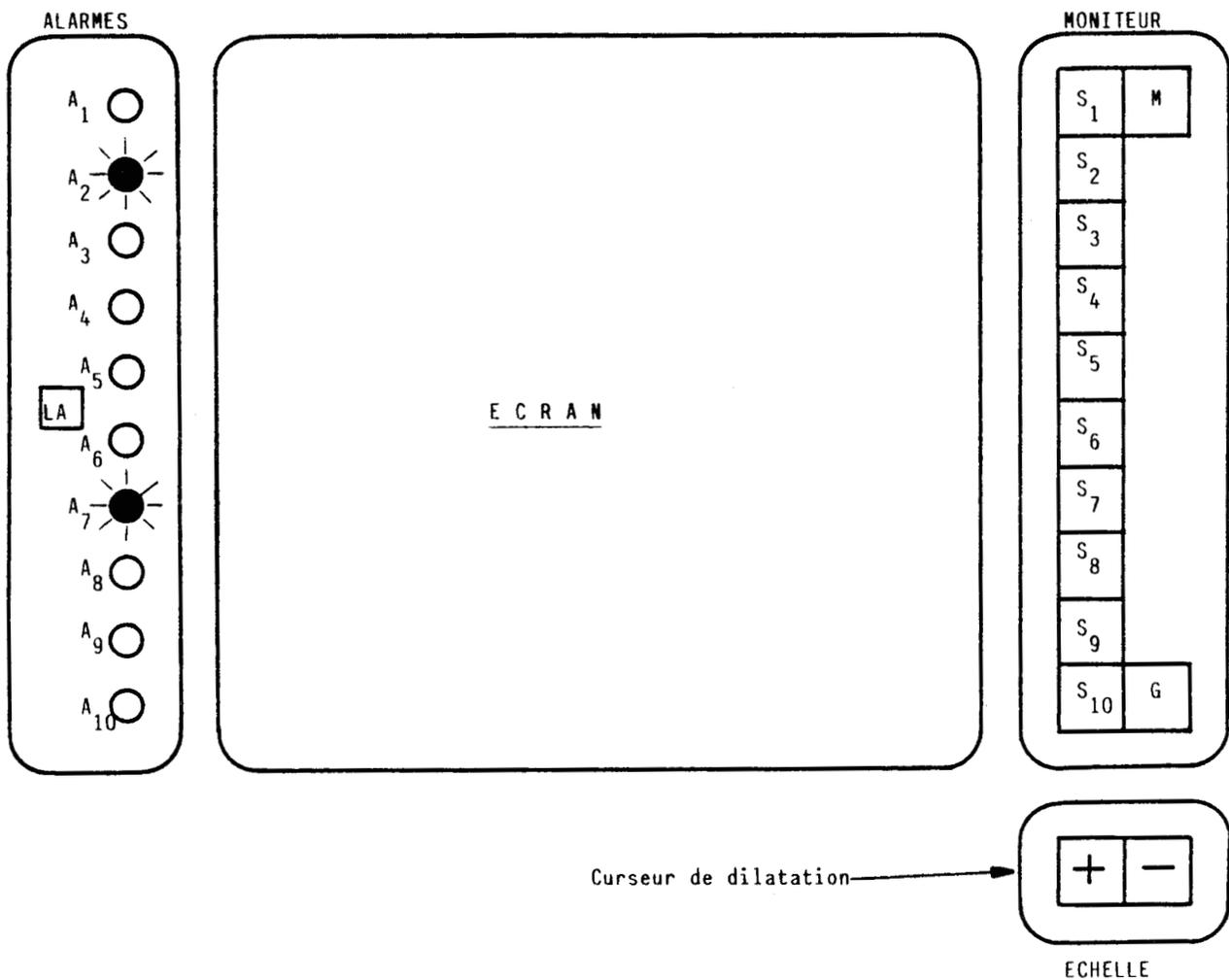


Figure 5.17.

En MONITEUR, l'utilisateur dispose d'un clavier regroupant trois types de boutons :

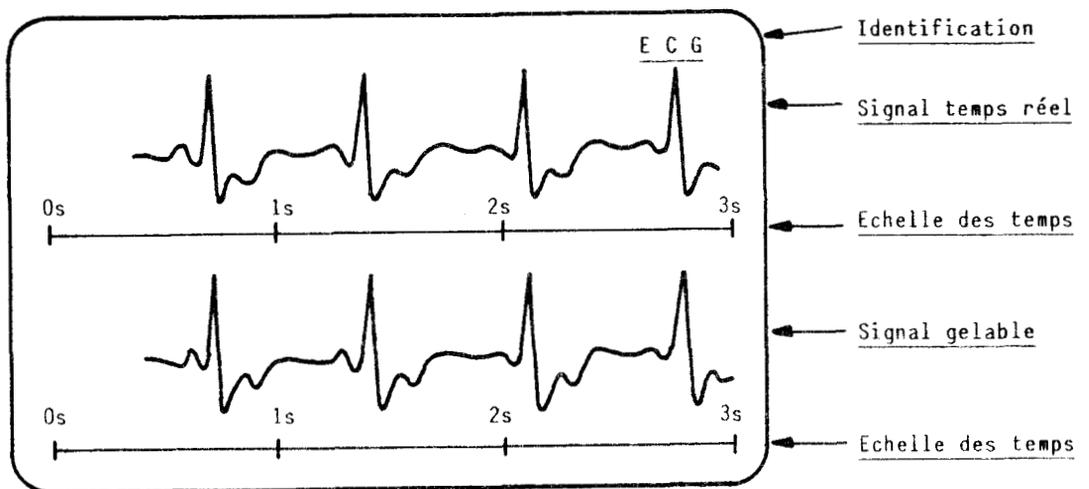
- le bouton M permettant de visualiser sur l'écran la liste des signaux disponibles (Menu).
- le bouton S_i permettant de sélectionner un parmi dix signaux possibles.
- le bouton G permettant de geler la trace d'un signal.

Le menu étant défini au préalable en mode interactif, grâce au clavier amovible, le fonctionnement est le suivant :

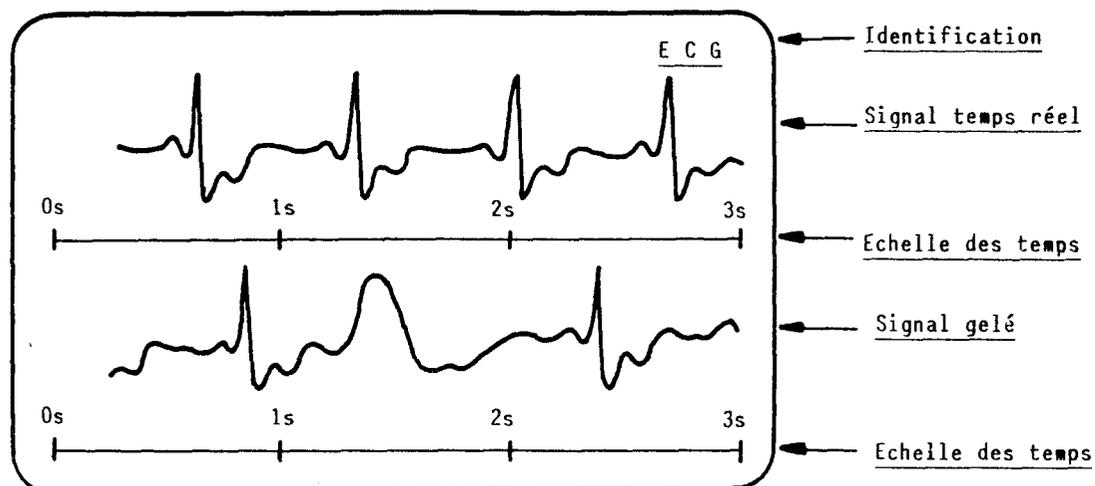
- l'action sur M visualise sur l'écran un texte du type :

S1 : E C G
 S2 : Non connecté
 S3 : Pression à l'expiration
 '
 '
 '

- connaissant cette liste, l'opérateur sélectionne grâce aux boutons S_i un signal de son choix et fait apparaître sur l'écran une image du type :



- l'action sur G provoque le gel de la trace gelable pour observation d'un événement particulier, tandis que la trace temps réel continue son évolution. On obtient alors une image du type :



. REMARQUE : Le signal gelé étant obtenu à partir de la relecture cyclique d'une zone mémoire, on peut envisager, sur ce signal, des modifications de l'échelle des temps (dilatation), permettant de réaliser un effet de zoom sur certains détails de l'information. Ces modifications seraient alors obtenues en adjoignant au bouton G, un curseur de dilatation.

En ALARMES, l'opérateur dispose :

- d'un bandeau de voyants lumineux visualisant les alarmes en cours (A1, A2, ..., A10)
- d'un bouton LA permettant la lecture des alarmes.

La programmation des alarmes ayant été effectuée en mode interactif, le fonctionnement est simplement le suivant :

- dès que les conditions d'une alarme programmée A_i sont vérifiées, le voyant A_i correspondant se met à clignoter, l'alarme visuelle s'accompagnant éventuellement d'une alarme sonore.
- une action sur LA permet alors à l'opérateur d'obtenir, sur l'écran, un commentaire explicatif sur l'origine de l'alarme.

4.2.3. Le fonctionnement interactif. Ce mode de fonctionnement, qui exige une plus grande technicité de la part de l'opérateur est obtenu par un double déverrouillage :

- le premier consiste simplement à connecter le clavier (3) à l'élément (2). Il est clair que la connexion doit être rapide et simple, du type enfichage d'une prise à détrompeur.
- le second déverrouillage est obtenu par action sur une clé du clavier (3).

Dans ces conditions, la figure 5.18. fait apparaître les deux zones de travail disponibles sur le clavier :

- une zone de touches standard du type clavier de programmation,
- une zone regroupant les touches fonctions permettant la réalisation des opérations spécifiques.

La zone spécifique comporte cinq secteurs :

- i) la CLE de verrouillage. En position "verrouillé" (V), l'appareil fonctionne en moniteur simple. En position "non verrouillé" (NV), l'utilisation en mode interactif est autorisée.

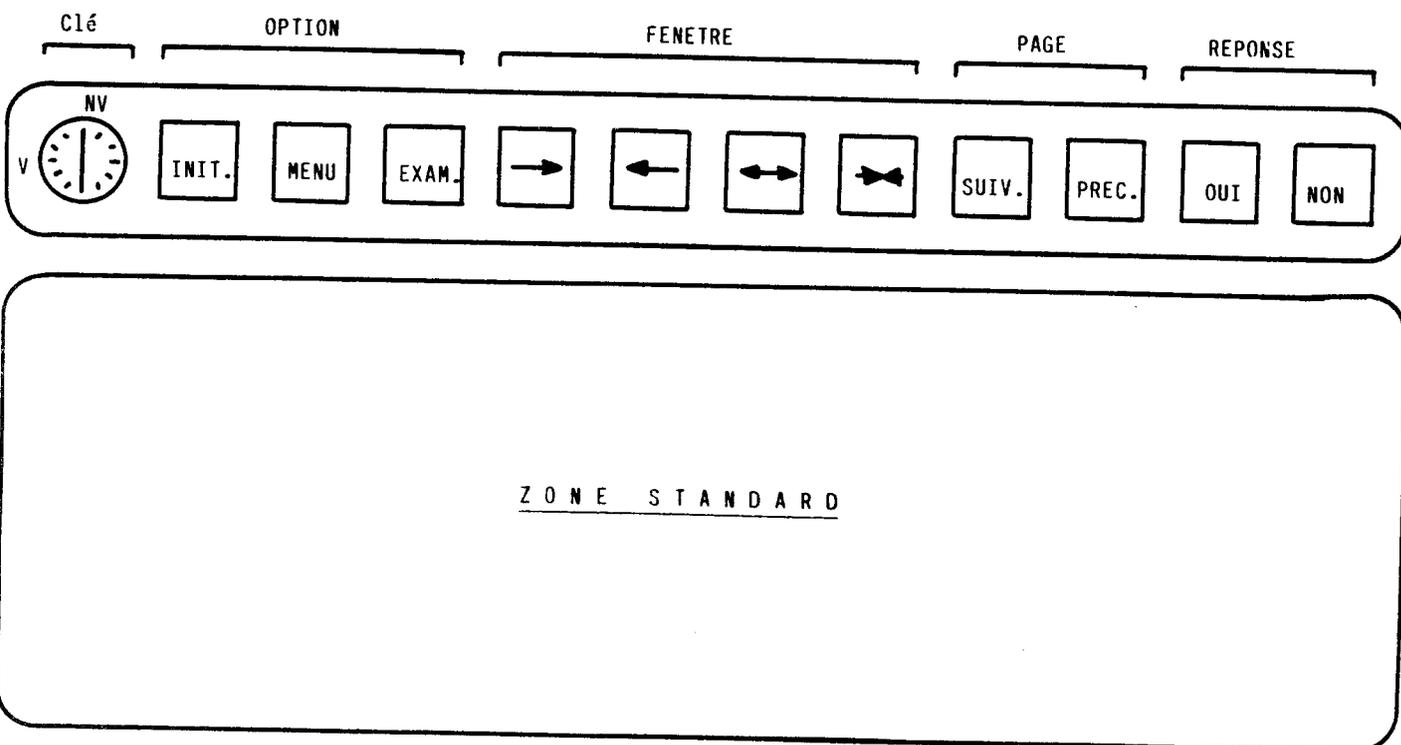


Figure 5.18.

- ii) les touches d'OPTION. Elles permettent de choisir parmi trois options de travail possibles qui seront détaillées par la suite :
- INIT. : initialisation de l'appareil
 - MENU. : lecture du menu, c'est-à-dire des possibilités offertes à l'initialisation
 - EXAM. : réalisation de l'examen interactif.
- iii) les touches de modification de FENETRE. Elles permettent de faire varier la fenêtre d'observation lors de l'examen clinique :

-  : déplacement à "droite", c'est-à-dire vers le présent.
 -  : déplacement à "gauche", c'est-à-dire vers le passé.
 -  : agrandissement de la largeur de la fenêtre d'observation.
 -  : réduction de la largeur de la fenêtre d'observation.
- iv) les touches PAGE. Elles permettent de "tourner les pages" du menu, lors de la lecture de celui-ci. Ces pages peuvent être tournées dans un sens ou dans l'autre (SUIV. ou PREC.)
- v) Les touches REPONSE permettent à l'opérateur de répondre rapidement (OUI ou NON) aux questions posées lors du dialogue avec l'instrument.

La zone standard contient, quant à elle, toutes les touches alphanumériques auxquelles on peut ajouter, éventuellement, des touches-fonctions d'aide à l'écriture sur l'écran : curseur d'écriture, effacement d'un caractère, etc....

Dans ces conditions, les différentes étapes d'utilisation de l'appareil sont les suivantes :

1ère ETAPE Le clavier étant branché, l'opérateur tourne la CLE en position NV et le dialogue peut commencer. Toutefois, même dans cette position, la lecture des alarmes (bouton LA du moniteur simple) reste possible.

2ème ETAPE L'appareil se met en attente de l'une des trois touches d'option.

1ère Option L'action sur la touche INIT provoque le déroulement suivant :

* Si une initialisation a déjà été effectuée précédemment, l'appareil le signale par un bref message et demande à l'opérateur s'il désire consulter le menu. L'opérateur peut alors agir sur les touches REPONSE :

- si la réponse est OUI, l'appareil passe automatiquement à la 2ème Option (MENU).

- si la réponse est NON, on effectue l'initialisation selon la procédure définie dans le paragraphe suivant.

* Si l'initialisation n'a pas encore été effectuée ou si l'opérateur a indiqué son intention d'en effectuer une nouvelle, l'appareil déclenche la séquence suivante :

- affichage sur l'écran de la table des matières de l'initialisation. Cette table numérotée PAGE-0 peut être du type :

PAGE-1 : Fichier du patient,

PAGE-2 : Définition des branchements,

PAGE-3 : Définition des alarmes.

La PAGE-0 reste affichée aussi longtemps que l'opérateur n'appuie pas sur la touche SUIV, pour faire apparaître la PAGE-1 décrite ci-après.

- affichage de la PAGE-1 qui va constituer le fichier du patient. Cette page apparaît comme un formulaire que l'opérateur doit modifier ou compléter selon que l'initialisation a déjà été faite ou non. Ce formulaire peut être du type :

NOM

PRENOM

AGE

,

,

,

L'écriture se fait à l'aide d'un curseur d'écran manipulé au clavier.

Lorsque le formulaire est complété, une action sur la touche SUIV permet de passer à la PAGE-2.

- affichage de la PAGE-2 qui permet de préciser les branchements effectués. Cette page se présente, comme la précédente, sous la forme d'un imprimé à compléter ou à modifier :

QUELS SIGNAUX DESIREZ-VOUS TRAITER ?

(REPENDRE OUI OU NON)

S1 (E C G) :

S2 (Pression à l'expiration) :

'
'
'

Comme précédemment l'action sur la touche SUIV permet de passer à la PAGE-3.

- réalisation de la PAGE-3, c'est-à-dire de la définition des alarmes.

Dans un premier temps, l'appareil affiche la liste des signaux traités et pour chacun d'eux il décrit les défauts qu'il est capable de détecter :

S1 (E C G) : D1S1, arythmie à complexes larges,

D2S1, arythmie à complexes fins,

D3S1, défaut d'électrode.

S3 (Volume expiré) : D1S3 - - -

'
'
'

Chacune des variables $D_i S_j$ désignant le défaut n°i du signal n°j peut alors être traitée comme une variable logique indiquant la présence ($D_i S_j = 1$) ou l'absence ($D_i S_j = 0$) de défaut. Dès lors, chaque alarme A_k peut apparaître comme la

sortie d'un automate de reconnaissance de séquences de défauts. Dans ces conditions, il est clair que le traitement des alarmes peut conduire à des développements importants que nous ne traiterons pas ici. Pour simplifier, nous pouvons proposer les deux types de solutions suivants :

+ l'appareil propose un choix d'alarmes mis à la disposition de l'opérateur (Menu d'alarmes).

Exemple :

1er Menu $\left\{ \begin{array}{l} A1 = (D1S1 \text{ ou } D2S1) \text{ pendant plus de 15 secondes.} \\ A2 = D3S1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{array} \right.$

2ème Menu $\left\{ \begin{array}{l} A1 = D1S1 \text{ pendant plus de 10 secondes} \\ A2 = D3S1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{array} \right.$

+ l'opérateur programme lui-même les alarmes selon des règles simples :

Exemple :

A1 = D1S1(15) + D2S1(30)

A2 = D3S1

A3 = D4S3(10).D2S1

A4 =

Expressions dans lesquelles :

D1S1(15) signifie : défaut D1S1 pendant plus de 15 secondes.

+ opérateur logique OU

. opérateur logique ET.

Lorsque les programmations sont terminées, une action sur la touche SUIV a pour double effet, d'une part de valider l'initialisation et ainsi de lancer l'appareil dans sa tâche de surveillance, d'autre part de se placer de nouveau en début de 2ème ETAPE (attente de l'une des trois touches d'option).

Commentaires sur la 1ère Option

- * L'action sur la touche SUIV permet d'aller écrire une nouvelle page. Inversement, une action sur la touche PREC permet de "revenir en arrière". Ainsi l'opérateur peut feuilleter le cahier d'initialisation aussi longtemps que nécessaire. La validation définitive de l'initialisation n'est réalisée qu'après l'action sur la touche SUIV effectuée en fin de PAGE-3.
- * L'entrée dans la procédure d'initialisation dévalide toute initialisation précédente et donc désactive toute surveillance en cours.

2ème Option L'action sur la touche MENU permet de visualiser les pages élaborées lors de l'initialisation. Le fonctionnement, analogue au précédent, est le suivant :

- * l'appareil affiche sur l'écran la table des matières.
- * les actions sur les touches SUIV.ou PREC. permettent de feuilleter le menu.
- * l'action sur la touche SUIV. après visualisation de la dernière page (PAGE-3 dans notre exemple), replace le système en début de 2ème ETAPE (attente de l'une des trois touches d'option).

Commentaires sur la 2ème Option

- * L'option MENU, contrairement à l'option INIT, ne permet ni d'écrire sur l'écran, ni de valider ou dévalider une tâche.

3ème Option L'action sur la touche EXAM permet de réaliser l'examen interactif selon la séquence suivante :

* l'appareil pose une série de questions, afin de connaître la nature de l'examen (cf. Figure 5.5.a.) :

- QUEL EXAMEN CHOISISSEZ-VOUS ?

1 . EXAMENS SIMULTANES DES SITUATIONS.

2 . BILAN D'UN SIGNAL ISOLE.

(REPONDRE 1 OU 2)

Si la réponse est 2 l'appareil pose la question intermédiaire suivante :

- QUEL SIGNAL CHOISISSEZ-VOUS ?

1 . E C G

2 . PRESSION A L'EXPIRATION

'

'

N - - - -

(REPONDRE 1, 2,.....OU N)

La série continue ensuite par :

- QUELLE TRANCHE DE TEMPS DESIREZ-VOUS OBSERVER ?

1 . QUART D'HEURE EN COURS

2 . FENETRE DU PASSE

(REPONDRE 1 OU 2)

Si la réponse est 1, l'appareil visualise le quart d'heure en cours (Courbes de situations pour l'examen 1, histogramme de représentation pour l'examen 2). Si la réponse est 2, l'appareil visualise une fenêtre initiale (par exemple le dernier quart d'heure achevé), puis l'opérateur prend la main pour faire glisser ou pour modifier cette fenêtre initiale, à l'aide des touches FENETRE : →, ←, ↔, ⇄.

- * Une action sur la touche SUIV., en cours d'examen, replace l'appareil en début de 2ème ETAPE (attente de l'une des trois touches d'option).

3ème ETAPE Le positionnement de la CLE en position V (verrouillé) ou bien la déconnexion du clavier replace l'appareil en mode moniteur simple.

. REMARQUE : Tel que présenté, le dispositif ne dispose d'aucun support papier. Cette facilité peut être ajoutée en donnant à l'opérateur la possibilité de copier l'écran (Hard Copy) grâce à une touche fonction supplémentaire (COPIE).

5 - CONCLUSION :

Les propositions faites dans ce dernier chapitre n'ont nullement la prétention d'apporter une solution définitive au problème de l'instrumentation intégrée. Elles constituent toutefois une trame qui doit faciliter l'assemblage d'éléments déjà réalisés.

Outre cette démonstration de faisabilité, nos objectifs ont été les suivants :

- i) montrer la nécessité d'aborder les problèmes de traitement des informations, de manière globale.
- ii) mettre en évidence les possibilités offertes par la micro-informatique en matière de traitements répartis.
- iii) montrer la nécessité d'accorder une attention toute particulière aux éléments de pilotage de l'instrument.

En ce qui concerne le premier point, il doit être clair qu'aucune incompatibilité n'existe entre la solution globale et la modularité de l'appareil. Tout au contraire, la recherche d'une synthèse nous a conduit à la réalisation de modules homogènes et bien adaptés. Par ailleurs, cette façon de procéder nous a permis de bien différencier les cahiers des charges intervenant aux différents niveaux de la structure (niveau local, niveau global,....)

Pour ce qui est du deuxième point, il s'est confirmé que les structures matérielles offertes par la microinformatique sont parfaitement bien adaptées aux traitements découlant de la notion d'événement.

En troisième point, il est apparu que la console de pilotage est le seul élément de liaison entre l'univers hyperspécialisé de la microinformatique et l'environnement d'utilisation de l'appareil. Dans ce sens, la mise en oeuvre d'une console trop simplifiée ne permettrait pas d'exploiter toutes les possibilités offertes par la microinformatique (notamment l'interactivité). Afin de résoudre le dilemme simplicité d'utilisation/exploitation optimale des possibilités offertes, nous avons opéré une différenciation au niveau des utilisateurs : utilisateurs "ordinaires", utilisateurs "initiés". Cette différenciation se traduit sur le plan matériel par la mise en oeuvre d'un clavier amovible et verrouillable qui lève toute ambiguïté d'utilisation.

CONCLUSION GENERALE

On peut considérer que la réalisation d'un système automatisé de traitement et d'analyse des informations prélevées sur un processus physique s'opère habituellement en deux phases :

- une phase de conception des méthodes aboutissant à la réalisation de programmes de traitement testés sur calculateurs universels performants.
- une phase de mise en oeuvre et d'adaptation aboutissant à la réalisation d'appareils spécialisés et faciles d'emploi.

Toutefois, avec l'avènement des microprocesseurs, les problèmes peuvent être abordés sous un angle différent. Il se trouve, en effet, que la grande souplesse offerte par la micro-informatique au niveau de la conception des architectures matérielles, peut influencer fortement sur la conception logique des systèmes. Dès lors, c'est dans l'esprit de cette symbiose permanente entre le matériel et le logiciel que nous avons développé notre étude.

Pour cela, et en prenant pour support le traitement et l'analyse d'informations prélevées sur un processus particulier - l'Homme - nous avons proposé une méthodologie de travail essentiellement fondée sur l'exploitation des aspects sémantiques. Dans ce sens, nous avons d'abord montré que l'observation du processus physique, en continu et en temps réel, pouvait se ramener à la détection d'une séquence d'événements. Dès lors l'analyse du comportement du processus revient à situer chacun des événements détectés, à la fois dans un contexte spatial (par classification et affectation à une situation caractéristique) et dans un contexte temporel (par traitement des

c.2.

séquences de situations). Cette approche appelle trois observations :

- les définitions relatives aux événements et aux situations conditionnent fortement les critères de classification automatique. Il est donc clair que ces définitions ne peuvent être établies qu'en instaurant une concertation étroite entre le concepteur et l'utilisateur. Cette concertation doit elle-même se traduire par l'établissement de cahiers des charges très précis, modifiés et améliorés par allers et retours successifs entre le concepteur et l'utilisateur.
- il faut considérer que les critères ainsi que les grandeurs de référence, auxquels on fait appel pour réaliser la classification des événements, peuvent eux mêmes subir des modifications, soit dans le temps, soit d'un processus à l'autre. En conséquence, il est indispensable de conférer aux méthodes de traitement un bon degré d'adaptativité.
- un processus complexe peut contenir plusieurs générateurs d'événements. Chacun de ces générateurs peut alors être traité et pris en charge pour une première analyse dite analyse locale. L'observation complète du processus est ensuite réalisée en opérant la synthèse des analyses locales.

Une telle méthodologie peut être immédiatement mise en oeuvre à l'aide d'une structure microinformatique répartie dont chacun des éléments reprend les différentes étapes de l'observation et de l'analyse : traitement au niveau local pour chaque chaîne d'événements, puis synthèse au niveau global. Cette mise en oeuvre débouche, elle même, sur la conception d'une instrumentation intégrée dédiée au processus. Par ailleurs, l'utilisation des microprocesseurs apporte une double implication :

c.3.

- les possibilités d'interactivité, c'est-à-dire de dialogue entre l'opérateur et l'instrument, sont considérables. Dès lors l'instrument n'apparaît plus seulement comme un outil permettant à l'opérateur d'appréhender un environnement physique mais aussi comme un outil d'aide à la décision.

- une interactivité efficace nécessite la conception d'une console de pilotage facilement exploitable par l'utilisateur. Dans cette optique, le concepteur doit tout particulièrement tenir compte du contexte d'utilisation et de la nature des utilisateurs.

Les propositions que nous avons faites ont trouvé leur support dans le contexte difficile de l'information électrophysiologique, où les problèmes d'analyse du signal, de classification et d'établissement de cahiers des charges restent très aigus. Il n'est pas douteux que ces propositions puissent trouver un champ d'application en dehors du milieu médical. Ainsi l'étude des différents régimes de fonctionnement d'une machine ou d'un processus de fabrication s'apparente assez bien à la surveillance en continu des fonctions physiologiques de l'homme. C'est donc dans un cadre industriel que nous proposons de développer la méthodologie présentée dans cette étude.

- BIBLIOGRAPHIE -

- INTRODUCTION GÉNÉRALE -

- /1/ VASSEUR C. *et al.*
Postprandial Bowel Sounds
- 5 th Conference. Canadian Medical and Biological Engineering Society
Montreal, 3-6 Sept.1974
- /2/ POLITZER J.P., VASSEUR C., THIBAUT R., DEVROEDE G.
The Genesis of Bowel Sounds : a Computerized Study of Influence
of Viscus and Gastrointestinal Contents
- 11 th International Conference on Medical and Biological Engineering
Ottawa, 2-6 Aug.1976
- /3/ POLITZER J.P., DEVROEDE G., VASSEUR C., THIBAUT R.
The Genesis of Bowel Sounds : Influence of Viscus and Gastrointestinal
Contents
- Gastroenterology, 71, n°2, 1976
- /4/ POSTAIRE J.G., VASSEUR C., ARHAN P., PERSOZ B.
Modèle Cybernétique d'un Processus Biodynamique Adaptatif :
Analyse et Simulation du Réflexe Recto-anal Inhibiteur
- 8ème Congrès International de Cybernétique - NAMUR - 6-11 Sept.1976
- /5/ VASSEUR C. *et al.*
An adaptive Control Function of the Recto-Anal Inhibitory Reflex
in Humans : Model and Simulation
- IFAC Symposium on Control Mechanisms in Bio and Eco systems
Leipzig, 11-16 Sept.1977
- /6/ VASSEUR C. *et coll.*
Segmentation du Signal d'Impédance Thoracique : Application au
Monitoring Respiratoire du Nouveau-né
- Journées WAMI, Versailles, 19-22 Mars 1979

- /7/ *VASSEUR C. et al.*
A Microprocessor Oriented Segmentation Technique : an Efficient Tool
for Electrophysiological Signal Analysis
- IEEE - EEMTIC 79, Ottawa, 15-17 Mai 1979
- /8/ *VASSEUR C. et al.*
New Concepts for a Microprocessor Oriented Long Term Intelligent
Monitoring of Newborns
- IFIP - IMIA Conference on Changes in Health Care Instrumentation
Due to Microprocessor Technology, Rome, 7-9 Mai 1980
- /9/ *LECERE J.M.*
Traitement Automatique de l'EKG : Détection et classification
- Mémoire de DEA, Centre d'Automatique de Lille, Juin 1981
- /10/ *VASSEUR C.*
L'analyse de structure en Traitement du Signal
- Traitement Numérique des Signaux Biologiques, Lille, 21 Mai 1981
- /11/ *VASSEUR C. et coll.*
Signaux Physiologiques et Microinformatique : Exemple de Réalisation
d'une Instrumentation Intégrée
- Innov. Tech. Biol. Méd., 1 , 92-104, 1980

- C H A P I T R E 1 -

- /1/ RAJ REDDY D.
Speech Recognition by Machine : A review
- Proc. of the IEEE, vol.64, n°4, April 1976
- /2/ HATON J.P.
Contribution à l'Analyse, la Paramétrisation et la Reconnaissance
Automatique de la Parole
- Thèse d'Etat, Université de Nancy 1, Janvier 1974
- /3/ QUINTON P.
Reconnaissance Structurale et Algorithmes Heuristiques : Application
à la Reconnaissance de la Parole en Continu
- Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle : 2ème Congrès
AFCET - IRIA - Toulouse 12-14 Sept.1979, Tome 2
- /4/ TOU J.T.-GONZALES R.C.
Recognition of Handwritten Characters by Topological Feature
Extraction and Multilevel Categorization
- IEEE trans. on Computers, July 1972
- /5/ ITO M.R.-CHUI T.L.
On line Computer Recognition of Proposal Standard ANSI (USA SI)
Handprinted Characters
- Pattern Recognition, vol.10, pp 341-349, 1978
- /6/ GROSS M. -LENTIN A.
Notions sur les grammaires Formelles
- Gauthiers - Villars - Paris 1967
- /7/ FU K.S.-BOOTH T.L.
Grammatical Inference : Introduction and Survey
- IEEE trans. on S.M.C., vol SMC 5, pp 95.111, Jan.75 et vol SMC 5,
pp 409-423, Juil.75

- /8/ MICLET L.
Inférence de Grammaires Régulières
- Thèse de Docteur Ingénieur, ENST Déc.79
- /9/ FU K.S.
Syntactic Methods in Pattern Recognition
- Academic Press, 1974
- /10/ HATON J.P.-PIERREL J.M
Interactions entre les Niveaux Lexical, Syntaxique et Sémantique
en Reconnaissance de la Parole Continue
- 7ème JEP, Nancy, Mai 1976
- /11/ NASH WERBER B.
Semantic Support for a Speech Understanding System
- IEEE trans on ASSP, vol.23, pp 124-128, 1975
- /12/ SHANNON C.E.
The Mathematical Theory of Communication
- The University of Illinois Press, Urbana, 1949
- /13/ DUBUS J.P.-WATTRELOT F.
Interpréteur - Editeur Braille Automatique Autonome avec Clavier
de Machine à Ecrire
- Le Nouvel Automatisme, Juin-Juillet 79
- /14/ HATON M.C.-HATON J.P.
SIRENE, un Système pour la Rééducation Vocale Assistée par
Ordinateur des Mal-Entendants
- 8ème Congrès International de Cybernétique - Namur - Sept.76
- /15/ KALMAN R.E.
A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems
- Trans ASME, J.Basic Eng., Series D82, 35-45, 1960

- /16/ WIENER N.
Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time
Series With Engineering Applications
- MIT Press, Cambridge, Mass, 1949
- /17/ MAKHOUL J.
Linear Prediction : A Tutorial Review
- Proceedings of the IEEE, 63, n°4, 561-580, 1975
- /18/ DURBIN J.
The Fitting of Time Series Models
- Rev. Inst. Int. Statist., 28, n°3, 233-243, 1960
- /19/ RADIX J.C.
Introduction au filtrage numérique
- Eyrolles, Paris, 1970
- /20/ LABARRERE M., KRIEF J.P. et GIMONET B.
Le filtrage et ses applications
- CEPADUES, Toulouse, 1978
- /21/ SELBY S.M.
CRC Standard Mathematical Tables
- CRC Press, Inc., Cleveland
- /22/ PAVLIDIS T. and HOROWITZ S.L
Segmentation of Plane Curves
- IEEE transactions on Computer, C-23, n°8, 860-870, 1974
- /23/ TOMEK I.
Two Algorithms for Piecewise-Linear Continuous Approximation of
Functions of One-Variable
- IEEE transactions on Computer, C-23, 445-448, 1974
- /24/ HOESCHELE D.F.
Analog to Digital/Digital to Analog Conversion Techniques
- J.WILEY and Sons, Inc., 1968

- /25/ MAX J.
Méthodes et Techniques de Traitement du Signal et Application aux
Mesures Physiques
- MASSON, Paris, 1977.
- /26/ BROGAN W.L.
Modern Control Theory
- QPI, New-York, 1974
- /27/ WEINMAN J. and SAPOZNIKOV D.
Equipment for Continuous Measurements of Pulse Wave Velocities
- Med. and Biol. Engng, Vol.9, pp 125-138, n°2, 1971
- /28/ BRAFMAN J.P. et al.
An Approach to the Implementation of Digital Filters Using
Microprocessors
- IEEE trans. on ASSP, Vol.26, n°5, October 1978
- /29/ ZVEREV A.
Handbook of Filter Synthesis
- Wiley, New-York, 1967
- /30/ LYNN P.A.
Recursive Digital Filters for Biological Signals
- Med. and Biol. Engng, Vol.9, pp 37-43, 1971
- /31/ PAPOULIS A.
The Fourier Integral and its Applications
- Mc Graw Hill Book Company, 1962
- /32/ BEAUCHAMP K.G.
Walsh Functions an their Applications
- Academic Press, London, New-York, 1975
- /33/ LIFERMANN J.
Les méthodes rapides de transformation du signal : FOURIER, WALSH,
HADAMARD, HAAR
- Masson 79.

- /34/ VALENZUELA W.R., KLINGER A. and Mc DONALD J.S.
Pattern Recognition Applied to Monitoring Waveforms
- IEEE transactions on Biomedical Engineering, BME-22, 18-24, 1975
- /35/ PAVLIDIS T.
Structural Pattern Recognition
- Springer Verlag, Berlin, 1977
- /36/ SIMON J.C., BACKER E., SALLANTIN J.
A Structural Approach of Pattern Recognition
- Signal Processing, Vol.2, pp 5-22, 1980
- /37/ MAKHOUL J.
Linear Prediction : A Tutorial Review
- Proceedings of the I.E.E.E., 63, n°4, 561-580, 1975.

- CHAPITRE 2 -

- /1/ *LENEGRE J. et SOULIE P.*
Maladies de l'Appareil Cardiovasculaire
- Paris 1968
- /2/ *VIDAL P.*
Systèmes Echantillonnés non Linéaires
- Gordon and Breach. Science Publishers, 1969
- /3/ *SEVELY Y.*
Systèmes et Asservissements linéaires échantillonnés
- DUNOD, Université, Paris, 1973
- /4/ *BODENSTEIN G. and PRAETORIUS H.M.*
Feature Extraction from the Electroencephalogram by Adaptive
Segmentation
- Proceedings of the IEEE, 65, 642-652, May 1977
- /5/ *GUIASU S.*
Information Theory With Applications
- Mc Graw Hill International Book Company, 1977
- /6/ *EBERHARD A.*
An Optimal Discrete window for the Calculation of Power Spectra
- IEEE Trans. Audio Electroacoust., Au 21, 37-43, Fév.1973
- /7/ *DUBOIS O. LEFEBVRE C.*
La Mesure des Variations d'Impédance Thoracique dans l'Etude et la
Surveillance de la Respiration chez le Prématuré
- Pédiatrie, XXV, 387-415, 1970
- /8/ *BUNELLE J.*
Théorie de l'information
- Cours de l'Ecole Supérieure d'Electricité

- /9/ ZAHN J.
Machines Séquentielles
- Editions Georgi, Traité d'Electricité, Tome 11, 1980
- /10/ BOOTH
Sequential Machines and Automata Theory
- WILEY, 1968
- /11/ BENZECRI J.P. et coll.
L'analyse des données : T1 la Taxinomie
T2 l'Analyse des correspondances
- DUNOD, 1973
- /12/ *Analyse des Données et Informatique*
Cours de la Commission des Communautés Européennes
- INRIA éditeur, 1980

- CHAPITRE 3 -

- /1/ KANAL L.
Patterns in Pattern Recognition : 1968-1974
- IEEE trans. on Inform. Théory, IT.20, n°6, Nov.1974
- /2/ SANDERSON A.C. et al.
Hierarchical Modeling of EEG Signals
- IEEE trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-2,
n°5, Sept.1980
- /3/ CASASENT D.
Electronic Circuits
- QPI Series, Quantum Publishers Inc., 1973
- /4/ SAGE A.P. and MELSA J.L.
Estimation Theory with Application to Communication and Control
- Mc Graw Hill Book Company, 1971
- /5/ RAJAGOPALAN C.V.
Segmentation des suites temporelles: Application à l'extraction
heuristique des paramètres fondamentaux du cardiorespirogramme en patho-
logie néonatale.
- Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Lille 1, 27 Mars 1979
- /6/ VASSEUR C. et al.
A Microprocessor oriented segmentation Technique : an Efficient Tool
for Electrophysiological Signal Analysis
- IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, IM-28, n°4, 259-262,
Dec.1979
- /7/ KTONAS P.Y. and PAPP N.
Instantaneous Envelope and Phase Extraction from Real Signals :
Theory, Implementation and an Application to EEG Analysis
- Signal Processing, 2, n°4, 373-385, Oct.1980

- /8/ *DALLE D. et al.*
Computer Analysis of Bowel Sounds
- *Comput. Biol. Med.*, Pergamon Press, V.24, 247-256, 1975
- /9/ *SCHAUB F.K.*
Précis d'Electrocardiographie Clinique
- Documenta GEIGY, Bâle, 1966
- /10/ *MORRISON D.F.*
Multivariate Statistical Methods
- Mac Graw Hill Book Company, 1967
- /11/ *FUKUNAGA K.*
Introduction to Statistical Pattern Recognition
- Academic Press, New-York, 1972
- /12/ *GITMAN I. and LEVINE M.D.*
An Algorithm for Detecting Unimodal Fuzzy Sets and its Application
as a Clustering Technique
- *IEEE Trans. on Computer*, C 19, 1970
- /13/ *VASSEUR C. et POSTAIRE J.G*
Convexité des Fonctions de Densité : Application à la Détection des
Modes en Reconnaissance des Formes
- *RAIRO Automatique*, 13, n°2, 171-188, 1979
- /14/ *CACOULOS T.*
Estimation of a Multivariate Density
- *Ann. Inst. Statist. Math.*, n°18, p.179, 1976
- /15/ *PARZEN E.*
On Estimation of a Probability Density Function and Mode
- *Ann. Math. Statist.*, 33, 1065-1076, 1962
- /16/ *Second International Joint Conference on Pattern Recognition*
IEEE 1974

/17/ BANON G.

Sur un Estimateur non Paramétrique de la Densité de Probabilité
- Revue de Statistique Appliquée, 24, n°4, 61-73, 1976

/18/ VASSEUR C.P.A. and POSTAIRE J.G.

A Convexity Testing Method for Cluster Analysis
- IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, SMC-10, n°3, 145-149, 1980

/19/ ANDREW H.C.

Introduction to Mathematical Techniques in Pattern Recognition
- WILEY, New-York, 1972

/20/ POSTAIRE J.G. and VASSEUR C.P.A.

An Approximate Solution to Normal Mixture Identification with
Application to Unsupervised Pattern Classification
- IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-3,
march 1981

- CHAPITRE 4 -

- /1/ VASSEUR C. *et al.*
New Concepts for a Microprocessor Oriented Long Term Intelligent
Monitoring of Newborns.
- J. Biomed. Engng., 2, 185-192, July 1980
- /2/ VASSEUR C. *et coll.*
Signaux Physiologiques et Microinformatique : Exemple de Réalisation
d'une Instrumentation Intégrée
- Innov. Tech. Biol. Med., 1, 92-104, 1980
- /3/ INTEL CORPORATION
Component Data Catalog.
- Intel 1980
- /4/ BERTRAND M. *et al.*
Microprocessor Application for Numerical ECG Encoding and Transmission
- Proceedings of the IEEE, 65 n°5, 714-722, May 1977
- /5/ Journées Multiprocesseurs et Multiordinateurs en Temps Réel
- Temps Réel, AFCET, Paris 22 & 23 Mai 1978
- /6/ LESEA A. *et* ZAKS R.
Techniques d'interface aux Microprocesseurs
- Sybex Europe, 1978
- /7/ TEMPIER J.
Miniordinateurs dans la Gestion Industrielle et le Contrôle des Processus
- Dunod Bordas 1973
- /8/ TOULOTTE J.M.
Dispositifs de Commande en Temps Réel
- Dunod Université, 1975

/9/ FUJITSU LIMITED

Fujitsu Bubble Memory

/10/ WILLIAMS B.T ,HOLL J.E and ELSTON J.

Pattern Interpretation in Laboratory Data via Computer Graphics

- Biosigma 1978, tome 1, Paris 24-28 Avril 1978

/11/ BERTIN J.

Représentation Graphique

- Encyclopaedia Universalis, VOL.7, 1979

/12/ MICAD 80

Première Conférence Européenne sur la Conception Assistée par

Ordinateur dans les Moyennes et Petites Industries

- SICOB, Paris, 23-26 Sept.1980

/13/ SCHWOB M.

Traité de Fiabilité

- Masson, Paris

/14/ BAJANESCO T.I.

Problèmes de la Fiabilité des Composants Electroniques Actifs Actuels

- Masson, Paris

/15/ *Sûreté de fonctionnement des systèmes informatiques*

- Monographie d'informatique de l'AFCEP, Edition hommes et techniques,
1980

/16/ PETERS L.J.

Software Design : Methods and Techniques

- Yourdon Press, New York, 1981

/17/ JENSEN R.W. and TONIES C.C.

Software Engineering

- Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1979

.../...

/18/ YOURDON E. and CONSTANTINE L.L.

Structured Design : Fundamentals of a Discipline of Computer
Program and Systems Design, 2nd ed.

- YOURDON Press, New York, 1978

/19/ CHABANNE F.

Programmation Structurée : des résultats chiffrés

- 01 Informatique, n°126, 90-92, déc.78 jan 79

/20/ GENTILINI J.L, et MORIN C.

Validation Automatique au Laboratoire

- Journées Lilloises de Biologie Clinique, Lille 11 et 12 Juin 1981

/21/ LECERF J.M.

Traitement Automatique de l'ECG : Détection et Classification

- Rapport de DEA, Centre d'Automatique de Lille, Juin 1981

- CHAPITRE 5 -

/1/ VASSEUR C. et Coll.

Segmentation du Signal d'Impédance thoracique : Application au Monitoring Respiratoire du Nouveau-Né
- Journées WAMI, VERSAILLES, 19-22 Mars 1979

/2/ VASSEUR C. et Coll.

Monitoring Evolué : Présentation de μ OB, Moniteur d'Impédance Microinformatisé
- Foire Internationale de Lille, Lille, Mai 1980

/3/ COUVREUR M.

Application du Traitement Temps Réel à la Constitution d'une Structure d'Aide à la Décision dans un Service Hospitalier
- Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Lille 1, 2 Décembre 1981

/4/ CHAMBRIN M.C.

Réalisation à l'Aide de Microprocesseurs d'un Système de Surveillance de l'Efficacité Ventilatoire en Réanimation Respiratoire
- Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Lille 1, Déc.1979

/5/ LECERF J.M.

Traitement Automatique de l'ECG : Détection et Classification
- Mémoire de DEA, Centre d'Automatique de Lille, Juin 1981

/6/ MUSSE J.P., DRAPIER J.P., DOUCHIN O.

Système Modulaire Multitâches pour Commande de Processus
- le Nouvel Automatisme, 51-58, Sept.Oct. 1979

/7/ CHAMBRIN M.C. et Coll.

Surveillance en Temps Réel par Microcalculateur de l'Etat Pulmonaire en Réanimation Respiratoire
- BIOSIGMA 78, Paris, 24-28 Avril 1978

- A N N E X E S -

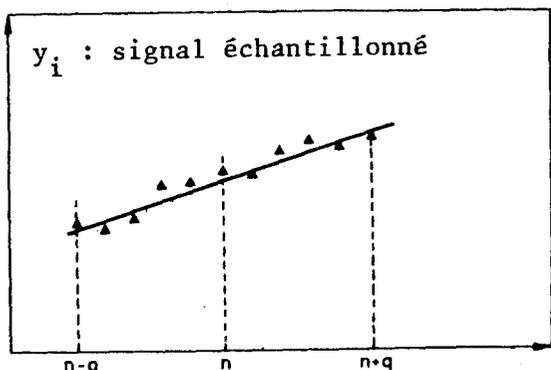


Figure 1 : Principe de la segmentation.

Il existe plusieurs manières d'envisager la segmentation d'une fonction temporelle. Une première méthode consiste à considérer le signal comme une succession de segments de droites de longueurs, pentes et ordonnées à l'origine variables.

Une seconde méthode consiste à faire "glisser", le long du signal analysé, un segment de droite de longueur fixée et de pente et ordonnée à l'origine variables.

La figure 1 illustre le principe de cette technique particulière appelée segmentation récursive. A chaque instant d'échantillonnage n sont associés les q instants précédents et les q instants suivants. De cette manière un ensemble de $(2q + 1)$ points de la courbe est constitué.

$$\{y_{n+i}\}; i = -q, \dots, 0, \dots, +q$$

Le choix du paramètre entier positif q permet de régler l'effet de filtrage du dispositif.

La méthode consiste alors à associer à la suite temporelle n , une suite de segments de droite S_n de pente a_n et d'ordonnée b_n en n . Les coefficients a_n et b_n sont simplement obtenus en minimisant l'erreur quadratique moyenne entre le segment S_n et l'ensemble des points y_{n+i} défini précédemment. Si l'instant n est choisi comme origine des temps, cette erreur quadratique moyenne a pour expression

$$E_n^2 = \frac{1}{2q+1} \cdot \sum_{i=-q}^{+q} (y_{n+i} - a_n i T_e - b_n)^2 \quad (1)$$

où T_e est la période d'échantillonnage.

La minimisation de E_n^2 par rapport à a_n et b_n conduit aux résultats suivants :

$$b_n = \frac{1}{2q+1} \cdot \sum_{i=-q}^{+q} y_{n+i} \quad (2)$$

$$a_n = \frac{3}{q(q+1)(2q+1) T_e} \cdot \sum_{i=-q}^{+q} i \cdot y_{n+i}$$

Par définition, il apparaît alors que la suite S_n a pour enveloppe géométrique la courbe engendrée par la suite b_n . Dans ces conditions, b_n réalise une estimation filtrée de y_n tandis que a_n est la dérivée exacte de b_n .

Evaluant a_{n+1} et b_{n+1} à l'instant $(n+1)$, on définit un ensemble d'équations de récurrence :

$$b_{n+1} = b_n + \frac{y_{n+q+1} - y_{n-q}}{2q + 1} \quad (3)$$

$$a_{n+1} = a_n - \frac{3b_n}{q(q+1)T_e} + \frac{3}{q(q+1)(2q+1)T_e} \left[q y_{n+q+1} + (q+1)y_{n-q} \right]$$

Il est possible de simplifier considérablement les équations en effectuant les changements de variables suivants :

$$B_n = (2q + 1) b_n \quad (4)$$

$$A_n = \frac{q(q+1)(2q+1)T_e}{3} a_n$$

Les expressions (3) deviennent alors :

$$B_{n+1} = B_n + \Delta_n \quad (5)$$

$$A_{n+1} = A_n - B_n + q \Sigma_n + y_{n-q}$$

avec

$$\Delta_n = y_{n+q+1} - y_{n-q}$$

$$\Sigma_n = y_{n+q+1} + y_{n-q}$$

Les équations (5) sont particulièrement bien adaptées à un traitement en temps réel. En effet, le calcul de B_{n+1} et A_{n+1} nécessite simplement la réalisation de six additions/soustractions et une multiplication par q .

BUS LILLE

La figure 2 donne le schéma d'évaluation en temps réel de B_{n+1} et A_{n+1} .

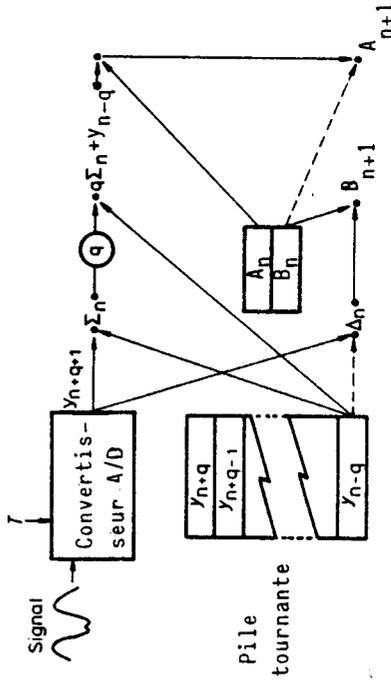


Figure 2 : Calcul Temps Réel de A_{n+1} et B_{n+1}

--- Soustraction
 — Addition.

ANNEXE 2 : Démonstration des théorèmes sur la structure des fonctions de densité de probabilité.

(d'après RAIRO Automatique, Vol. 13, n° 2, 1979).

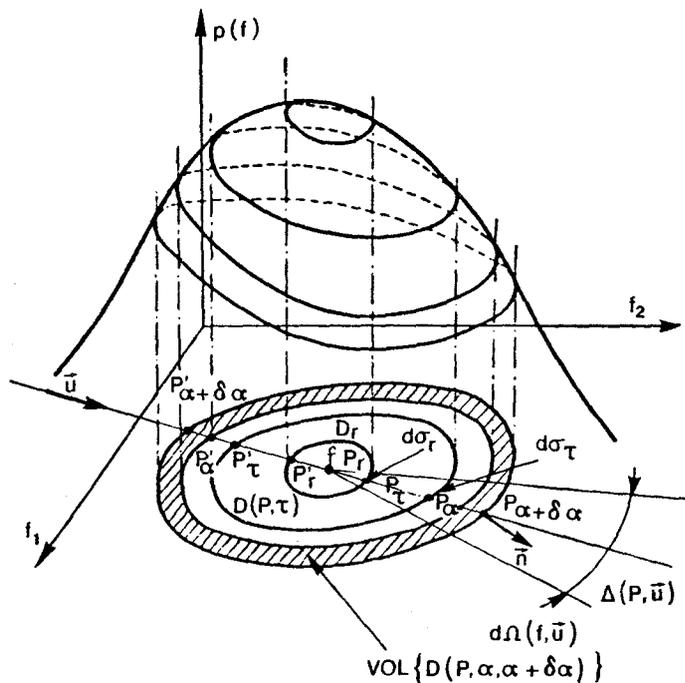


Figure 1. — Domaines de référence et d'observation d'un espace à 2 dimensions.

THÉORÈME 1 : Le volume $V\{D(f, \alpha)\}$ du domaine d'observation $D(f, \alpha)$ est donné par l'expression :

$$V\{D(f, \alpha)\} = \alpha^c \cdot V(D_r),$$

dans laquelle c et $V(D_r)$ représentent respectivement, la dimension de l'espace F^c et le volume du domaine de référence D_r .



Démonstration (cf. fig. 1) : Soit $\Delta(f, \mathbf{u})$ une droite passant par f et dont la direction est donnée par le vecteur unitaire \mathbf{u} . Cette droite coupe la frontière S_r du domaine convexe D_r en deux points P_r et P'_r symétriques par rapport à f de telle sorte que

$$f P_r = -f P'_r = l(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{u}. \quad (1)$$

Le scalaire $l(\mathbf{u})$ positif ou nul caractérise la géométrie de D_r . De la même façon, si τ est le rapport d'homothétie définissant le domaine $D(f, \tau)$ à partir de D_r , $\Delta(f, \mathbf{u})$ coupe la frontière de $D(f, \tau)$ en deux points P_τ et P'_τ tels que :

$$f P_\tau = -f P'_\tau = \tau \cdot l(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{u}. \quad (2)$$

Considérant maintenant un élément de surface $d\sigma_r$ de S_r entourant P_r , il lui correspond, sur la frontière de $D(f, \tau)$, un élément de surface $d\sigma_\tau$. Ces deux éléments $d\sigma_r$ et $d\sigma_\tau$ sont vus de f sous le même angle solide $d\Omega(f, \mathbf{u})$ de telle sorte que :

$$d\Omega(f, \mathbf{u}) = \frac{(\mathbf{u} \times \mathbf{n}) \cdot d\sigma_r}{\{l(\mathbf{u})\}^{c-1}} = \frac{(\mathbf{u} \times \mathbf{n}) \cdot d\sigma_\tau}{\{\tau \cdot l(\mathbf{u})\}^{c-1}}. \quad (3)$$

Expression dans laquelle \mathbf{n} représente le vecteur unitaire normal à S_r en P_r , dirigé vers l'extérieur. La quantité $(\mathbf{u} \times \mathbf{n})$ représente le produit scalaire des vecteurs \mathbf{u} et \mathbf{n} .

De (3) on déduit immédiatement :

$$d\sigma_\tau = \tau^{c-1} \cdot d\sigma_r. \quad (4)$$

Dans ces conditions, une variation $d\tau$ de τ engendre une variation $df P_\tau$ de $f P_\tau$. Il en résulte un déplacement élémentaire de $d\sigma_\tau$ générant un élément de volume $d^2 \omega_\tau$ d'expression :

$$d^2 \omega_\tau = (\mathbf{n} \times df P_\tau) \cdot d\sigma_\tau. \quad (5)$$

De (2) on déduit :

$$df P_\tau = l(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{u} \cdot d\tau.$$

Tenant compte de (4) il vient :

$$d^2 \omega_\tau = l(\mathbf{u}) \cdot (\mathbf{u} \times \mathbf{n}) \cdot d\sigma_r \cdot \tau^{c-1} \cdot d\tau. \quad (6)$$

La double intégration de (6) sur S_r d'une part et pour τ variant de 0 à α d'autre part, conduit à l'expression de $V\{D(f, \alpha)\}$:

$$V\{D(f, \alpha)\} = \int_0^\alpha \left\{ \int_{S_r} l(\mathbf{u}) \cdot (\mathbf{u} \times \mathbf{n}) \cdot d\sigma_r \right\} \cdot \tau^{c-1} d\tau. \quad (7)$$

Soit :

$$V\{D(f, \alpha)\} = \frac{\alpha}{c} \int_{S_r} l(\mathbf{u}) \cdot (\mathbf{u} \times \mathbf{n}) \cdot d\sigma_r. \quad (8)$$

Évaluant (8) pour $\alpha = 1$, on en déduit immédiatement :

$$V(D_r) = \int_{S_r} l(\mathbf{u}) \cdot (\mathbf{u} \times \mathbf{n}) \cdot d\sigma_r \quad (9)$$

et :

$$V\{D(f, \alpha)\} = \alpha^3 \cdot V(D_r) \quad (10)$$

THÉORÈME 2 : $\rho\{D(f, \alpha)\}$ est une fonction monotone décroissante (resp. croissante) de $\alpha > 0$, pour tout domaine $D(f, \alpha)$ inclus dans une portion D de F^c à l'intérieur de laquelle $p(f)$ est concave (resp. convexe).

Démonstration : (Établie dans le cas où $p(f)$ est concave dans D .)

Soit $\Delta\rho$ la variation de $\rho\{D(f, \alpha)\}$ résultant d'un accroissement $\Delta\alpha$ de α .

$$\Delta\rho = \rho\{D(f, \alpha + \Delta\alpha)\} - \rho\{D(f, \alpha)\} \quad (11)$$

Par définition on peut écrire :

$$\Delta\rho = \frac{M\{D(f, \alpha + \Delta\alpha)\}}{V\{D(f, \alpha + \Delta\alpha)\}} - \frac{M\{D(f, \alpha)\}}{V\{D(f, \alpha)\}} \quad (12)$$

Considérant le volume et la masse du domaine, noté $D(f, \alpha, \alpha + \Delta\alpha)$, compris entre les domaines $D(f, \alpha)$ et $D(f, \alpha + \Delta\alpha)$, il est possible d'effectuer les décompositions suivantes :

$$\left. \begin{aligned} M\{D(f, \alpha + \Delta\alpha)\} &= M\{D(f, \alpha)\} + M\{D(f, \alpha, \alpha + \Delta\alpha)\}, \\ V\{D(f, \alpha + \Delta\alpha)\} &= V\{D(f, \alpha)\} + V\{D(f, \alpha, \alpha + \Delta\alpha)\}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Dans ces conditions, (12) peut s'écrire :

$$\Delta\rho = \frac{V\{D(f, \alpha, \alpha + \Delta\alpha)\}}{V\{D(f, \alpha + \Delta\alpha)\}} \cdot \left[\frac{M\{D(f, \alpha, \alpha + \Delta\alpha)\}}{V\{D(f, \alpha, \alpha + \Delta\alpha)\}} - \frac{M\{D(f, \alpha)\}}{V\{D(f, \alpha)\}} \right] \quad (14)$$

ou encore :

$$\Delta\rho = \frac{V\{D(f, \alpha, \alpha + \Delta\alpha)\}}{V\{D(f, \alpha + \Delta\alpha)\}} \cdot [\rho\{D(f, \alpha, \alpha + \Delta\alpha)\} - \rho\{D(f, \alpha)\}]. \quad (15)$$

Le signe de $\Delta\rho$ est donc le même que le signe de la différence :

$$\Delta\rho' = \rho\{D(f, \alpha, \alpha + \Delta\alpha)\} - \rho\{D(f, \alpha)\}. \quad (16)$$

Nous allons maintenant utiliser les propriétés de symétrie des domaines d'observation et les propriétés de concavité de $p(f)$ pour déterminer le signe de $\Delta\rho$:

Tout d'abord, l'évaluation de $M\{D(f, \alpha)\}$ s'effectue en utilisant les notations et les résultats obtenus lors de la démonstration du théorème 1. En particulier, l'élément de masse est obtenu simplement en multipliant

l'élément de volume $d^2\omega_r$ calculé en (6) par la masse volumique au point $P_r, p(P_r)$. Par intégration sur S_r et pour τ variant de 0 à α , il vient :

$$M\{D(f, \alpha)\} = \int_0^\alpha \left\{ \int_{S_r} p(P_r) \cdot l(\mathbf{u}) \cdot (\mathbf{u} \times \mathbf{n}) \cdot d\sigma_r \right\} \cdot \tau^{\alpha-1} \cdot d\tau. \quad (17)$$

Faisant intervenir le point P'_r symétrique de P_r par rapport à f , on peut encore écrire :

$$M\{D(f, \alpha)\} = \frac{1}{2} \cdot \int_0^\alpha \left\{ \int_{S_r} (p(P_r) + p(P'_r)) \cdot l(\mathbf{u}) \cdot (\mathbf{u} \times \mathbf{n}) \cdot d\sigma_r \right\} \cdot \tau^{\alpha-1} \cdot d\tau. \quad (18)$$

D'autre part, si P_a et P'_a sont les points d'intersection de $\Delta(f, \mathbf{u})$ avec la frontière de $D(f, \alpha)$, compte tenu des propriétés de symétrie des domaines d'observation, il est toujours possible de trouver pour chaque valeur de τ ($0 \leq \tau \leq \alpha$) un couple de réels positifs u et v tels que :

$$\left. \begin{aligned} u + v &= 1, \\ P_1 &= u \cdot P_a + v \cdot P'_a, \\ P'_1 &= v \cdot P_a + u \cdot P'_a, \\ 0 &\leq \tau \leq \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Enfin, $p(f)$ étant concave dans la région D considérée, on peut écrire, par définition de la concavité (12) :

$$\left. \begin{aligned} p(P_1) &= p(u \cdot P_a + v \cdot P'_a) \geq u \cdot p(P_a) + v \cdot p(P'_a), \\ p(P'_1) &= p(v \cdot P_a + u \cdot P'_a) \geq v \cdot p(P_a) + u \cdot p(P'_a). \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

L'addition des deux inégalités de (20) permet alors d'écrire :

$$p(P_1) + p(P'_1) \geq p(P_a) + p(P'_a) \quad (21)$$

et l'inégalité (21) reportée dans (18) conduit à :

$$M\{D(f, \alpha)\} \geq \frac{I(\alpha)}{2} \cdot \int_0^\alpha \tau^{\alpha-1} \cdot d\tau \quad (22)$$

avec

$$I(\alpha) = \int_{S_r} \{p(P_a) + p(P'_a)\} \cdot l(\mathbf{u}) \cdot (\mathbf{u} \times \mathbf{n}) \cdot d\sigma_r.$$

Finalement, en reprenant l'expression de $V\{(Df, \alpha)\}$ donnée en (10), on aboutit à la nouvelle inégalité :

$$\rho\{D(f, \alpha)\} = \frac{M\{D(f, \alpha)\}}{V\{D(f, \alpha)\}} \geq \frac{I(\alpha)}{2 \cdot c \cdot V(D_r)}. \quad (23)$$



Des considérations analogues faites pour des valeurs de τ comprises entre α et $\alpha + \Delta\alpha$ conduisent à une autre inégalité :

$$\rho\{D(f, \alpha, \alpha + \Delta\alpha)\} = \frac{M\{D(f, \alpha, \alpha + \Delta\alpha)\}}{V\{D(f, \alpha, \alpha + \Delta\alpha)\}} \leq \frac{I(\alpha)}{2.c.V(D_r)}. \quad (24)$$

De (23) et (24) on déduit immédiatement :

$$\rho\{D(f, \alpha, \alpha + \Delta\alpha)\} - \rho\{D(f, \alpha)\} \leq 0. \quad (25)$$

Par conséquent $\Delta\rho \leq 0$ et $\rho\{D(f, \alpha)\}$ est une fonction décroissante de α lorsque $p(f)$ est concave dans D .

Dans le cas $p(f)$ convexe dans D , un raisonnement en tous points analogue conduit évidemment à $\Delta\rho \geq 0$.