



# Codage, représentation et traitement du geste instrumental. Application à la synthèse de sons musicaux par simulation de mécanismes instrumentaux

Sylvie Gibet

► **To cite this version:**

Sylvie Gibet. Codage, représentation et traitement du geste instrumental. Application à la synthèse de sons musicaux par simulation de mécanismes instrumentaux. Interface homme-machine [cs.HC]. Institut national polytechnique de Grenoble, 1987. Français. <tel-01267452>

**HAL Id: tel-01267452**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01267452>**

Submitted on 4 Feb 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THESE

*présentée par*

**Sylvie GIBET**

pour obtenir le titre de **DOCTEUR**

**de l'Institut National Polytechnique de Grenoble**

(arrêté ministériel du 5 Juillet 1984)

Spécialité : Informatique

**CODAGE, REPRESENTATION ET TRAITEMENT DU GESTE INSTRUMENTAL**

***APPLICATION A LA SYNTHÈSE DE SONS MUSICAUX PAR SIMULATION DE  
MECANISMES INSTRUMENTAUX***

Thèse soutenue le 3 Décembre 1987 devant la commission d'examen

**L. BOLLIET**

Président

**C. CADOZ**

**S. GENTIL**

**Y. GUIARD**

**Ph. JORRAND**

**J.C. RISSET**

Examineurs

*Thèse préparée à l'Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression au sein du Laboratoire d'Informatique Fondamentale et d'Intelligence Artificielle*



## Résumé

Dans le cadre de la conception et de l'élaboration d'un outil informatique pour la création musicale, on s'intéresse au geste instrumental, pour contrôler en temps réel des processus de synthèse sonore par simulation de mécanismes instrumentaux, et pour étudier sa relation à la composition musicale. Deux aspects de cette étude sont abordés :

Une analyse préliminaire sur la typologie du geste instrumental conduit à proposer un codage du geste qui traduit une organisation spatiale et temporelle des données gestuelles captées. Ces fondements nous servent de support pour concevoir et réaliser un système matériel et logiciel, permettant la capture, le codage et le prétraitement en temps réel des signaux gestuels.

L'étude est ensuite focalisée vers la recherche d'un espace de représentation structurelle du geste, qui traduit une certaine forme d'expressivité de l'action gestuelle. Nous proposons une méthode qui consiste à identifier l'action gestuelle humaine sur un objet physique à un modèle mécanique simple mais évolutif. Ce principe conduit à une description homogène du geste et de l'instrument qui tient compte de la cohérence de l'interaction homme-objet manipulé, et peut constituer un point d'entrée à une approche structurelle de composition par gestes.

## Abstract

This work, mainly concerned with the conception and the elaboration of an informatic tool for musical creation deals with instrumental gesture in order to control in real time sound-synthesis processes, and to analyse its relationship with musical composition. This work is in two parts :

A preliminary analysis of instrumental gesture typology leads to propose a coding which takes into account a spatial and temporal organization of gestural information. We used these principles to conceive and realize an informatic system, which enables the coding and the pre-processing of gestural signals in real time.

The study then focusses on searching a structural representation of gesture, which brings out some expressive features of gesture. A method which consists of identifying the gestural human action on a physical object with a simple but time-varying mechanical model, is proposed. This approach leads to a homogeneous description of both gesture and instrument which takes into account the coherency of the man-instrument interaction and can be used as a new way to manipulate structural characteristics of gesture.



*à Pierre-François, ...*

Le travail de ces trois années de doctorat a été réalisé à l'ACROE, Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression, au sein du LIFIA, Laboratoire d'Informatique Fondamentale et d'Intelligence Artificielle de l'ENSIMAG (Ecole Nationale Supérieure d'Electronique et de Mathématiques Appliquées de Grenoble).

*Je remercie Messieurs Bouis Bolliet, Claude Cadoz, Madame Sylviane Gentil, Messieurs Yves Guiard, Philippe Jorrand, Jean-Claude Risset, qui ont accepté de s'intéresser à ce document et de faire partie du Jury,*

*Je remercie Monsieur Philippe Jorrand, Directeur du LIFIA, d'avoir bien voulu m'accepter au sein de ce laboratoire et d'avoir permis l'accomplissement de ce travail,*

*Je remercie Claude Cadoz, Directeur de l'ACROE, et son équipe pour l'accueil qu'ils m'ont réservé, et pour m'avoir donné les moyens de travailler dans leur domaine de recherche,*

*Je tiens à remercier tout particulièrement*

*Jean-Loup Florens, auquel je dois la seconde partie de ce document ; par la part active qu'il a prise à ce travail, les discussions passionnantes, la complicité qui nous ont réunis quotidiennement, il m'a communiqué son attachement et sa foi en la recherche,*

*Sylviane Gentil, du Laboratoire d'Automatique de Grenoble, qui m'a fait bénéficier de sa précieuse expérience dans le domaine des méthodes d'identification en Automatique,*

*Christian Abry, Louis-Jean Boé de l'Institut de Phonétique de Grenoble et Pascal Perrier de l'Institut de la Communication Parlée, pour les conseils, les critiques et les encouragements qu'ils ont su me prodiguer dans les moments difficiles,*

*Aimé Razafindrakoto, trop vite parti, pour sa gentillesse et son dévouement incomparables,*

*Enfin, je n'oublierai pas ma famille, mes amis, dont le soutien moral m'a été d'un secours inestimable, et qui, de près ou de loin, ont largement contribué à l'achèvement de ce travail ...*

Ces travaux ont été soutenus financièrement par la Direction de la Musique et de la Danse au Ministère de la Culture et de la Communication.

# Sommaire

## Introduction

## Chapitre 1 - Typologie du geste instrumental

### I. Nature intrinsèque du geste

- I.1. Action et perception gestuelle
- I.2. Différentes formes de la perception gestuelle
  - I.2.1. Toucher objectif - toucher subjectif
  - I.2.2. Catégorisation des perceptions au niveau de l'activité des récepteurs
    - I.2.2.1. Localisation des récepteurs
    - I.2.2.2. Toucher actif et passif

### II. Le geste dans la représentation de la situation instrumentale

- II.1. Description simplifiée du couplage homme-instrument
- II.2. Le geste dans le contexte de la simulation d'objets instrumentaux
  - II.2.1. Simulation d'objets instrumentaux
  - II.2.2. Signaux gestuels captés

### III. Tentative de classification du geste instrumental

- III.1. Classification suivant la nature intrinsèque du geste
- III.2. Classification du geste suivant sa fonction à l'égard de l'instrument
  - III.2.1. Le geste d'excitation
  - III.2.2. Le geste de modification
  - III.2.3. Réflexions sur le geste de sélection
  - III.2.4. Conclusion

### IV. Utilisation du geste instrumental par rapport à l'outil de création

- IV.1. Les utilisations du geste instrumental
  - IV.1.1. Utilisation directe pour la synthèse sonore
  - IV.1.2. Mémorisation du geste
  - IV.1.3. Représentations du geste
  - IV.1.4. Transformations du geste
- IV.2. Geste et outil de création
  - IV.2.1. Les deux modes de fonctionnement de l'outil de création
  - IV.2.2. Utilisations du geste instrumental par rapport à l'outil de création

## Chapitre 2 - Conception et réalisation d'un système de codage et de prétraitement des signaux gestuels

### I. Codage du geste instrumental

- I.1. Organisation spatiale et fonctionnelle des données gestuelles
  - I.1.1. Construction de scènes instrumentales complexes
  - I.1.2. Organisation des signaux gestuels suivant des contraintes liées à la cohérence du couplage geste/instrument
    - I.1.2.1. Partitionnement des voies gestuelles en canaux
    - I.1.2.2. Organisation des canaux gestuels en "unités gestuelles"



- I.2. Solution proposée pour le codage dynamique des signaux gestuels
  - I.2.1. Définition du problème
  - I.2.2. Critères de codage du geste
    - I.2.2.1. Exigences par rapport à la simulation
    - I.2.2.2. Stockage du geste
    - I.2.2.3. Représentations et traitements
  - I.2.3. Solution adoptée
    - I.2.3.1. Réduction de l'information gestuelle stockée
    - I.2.3.2. Prise en compte de l'organisation spatio-temporelle des données gestuelles
- II. Etude de la synchronisation**
  - II.1. Synchronisation de l'ensemble du système
    - II.1.1. Retards dûs aux chaînes de conversion et aux temps de traitements de la simulation
    - II.1.2. Synchronisation des signaux assurant la liaison avec l'extérieur
    - II.1.3. Conservation du flux de données
    - II.1.4. Critères perceptifs
  - II.2. Multiprocessus au niveau du frontal gestuel
    - II.2.1. Introduction
    - II.2.2. Affectation des tâches concourantes à des processeurs particuliers
    - II.2.3. Gestion de la communication entre processeurs
      - II.2.3.1. Communication entre processeurs
      - II.2.3.2. Représentation de la synchronisation par réseaux de Pétri
- III. Structure et implantation du logiciel**
  - III.1. Fonctions temps réel du frontal gestuel
    - III.1.1. Répartition des tâches s'exécutant en temps réel
      - III.1.1.1. Système multi-tâches
      - III.1.1.2. Définition et synchronisation des tâches
    - III.1.2. Codage spatio-temporel des données du geste
  - III.2. Description interactive de l'instrument et des configurations de jeu
    - III.2.1. Interactivité du frontal gestuel
    - III.2.2. Modes de fonctionnement des entrées
    - III.2.3. Configuration statique du couplage geste/instrument
    - III.2.4. Structuration des entrées gestuelles
    - III.2.5. Dialogue avec l'utilisateur
    - III.2.6. Conclusion
- IV. Editeur de geste**
  - IV.1. Introduction
  - IV.2. Fonctions de base de l'éditeur
    - IV.2.1. Exemples de représentations temporelles
    - IV.2.2. Exemple de représentation atemporelle
  - IV.3. Réalisation de l'éditeur
- V. Conclusions relatives au codage spatio-temporel des signaux gestuels**
  - V.1. Intérêts du codage par échantillonnage adaptatif
  - V.2. Difficultés soulevées par le codage adaptatif des signaux
  - V.3. Quelques réflexions sur le problème de la représentation

## Chapitre 3 - Vers une modélisation structurelle du geste

- I. Modélisation du comportement gestuel de l'opérateur**
  - I.1. Limites à la caractérisation du geste à partir des signaux gestuels captés
  - I.2. Retour sur la notion de geste
    - I.2.1. Les variables d'observation

- I.2.2. Hypothèses de l'identification
- I.2.3. Réflexions sur la démarche modélisatrice
- I.3. Perspectives par rapport à l'outil de création
  - I.3.1. Représentation
  - I.3.2. Traitements compositionnels
  - I.3.3. Mémorisation du geste en temps réel
- I.4. Ebauche d'une démarche expérimentale
  - I.4.1. Démarche expérimentale
    - I.4.1.1. Evaluation des méthodes à partir de l'application d'un signal de test en entrée
    - I.4.1.2. Situation instrumentale générale
  - I.4.2. Environnement matériel
- II. Théorie de l'identification**
  - II.1. Principe d'une méthode non paramétrique
  - II.2. Méthodes paramétriques
    - II.2.1. Choix de la structure du modèle déterministe
    - II.2.2. Critères de ressemblance modèle-procédé
      - II.2.2.1. Erreur de sortie
      - II.2.2.2. Erreur d'équation
      - II.2.2.3. Choix de l'erreur
    - II.2.3. Modélisation des composantes stochastiques
    - II.2.4. Solution explicite par la méthode des Moindres Carrés Simples
    - II.2.5. Propriétés statistiques de l'estimateur
    - II.2.6. Méthodes de la variable instrumentale
    - II.2.7. Choix de variables instrumentales
      - II.2.7.1. Un cas théorique idéal
      - II.2.7.2. Variable instrumentale à partir d'un modèle auxiliaire
      - II.2.7.3. Variable instrumentale de Young
      - II.2.7.4. Variantes applicables pour des systèmes en boucle fermée
    - II.2.8. Méthode des Moindres Carrés Pondérés
    - II.2.9. Méthode des Moindres Carrés Etendus
    - II.2.10. Méthode de Landau
  - II.3. Formulation itérative unifiée des méthodes hors-lignes précédentes
  - II.4. Analyse théorique du problème d'identification en boucle fermée
    - II.4.1. Position du problème
    - II.4.2. Identification indirecte sans signal de test
    - II.4.3. Identification directe sans signal de test
    - II.4.4. Identification directe avec signal de test
    - II.4.5. Conclusions
  - II.5. Méthodes adaptatives de suivi de paramètres
    - II.5.1. Techniques Bayésiennes
    - II.5.2. Techniques de suivi de paramètres à partir des algorithmes dérivés de la méthode des Moindres Carrés
      - II.5.2.1. Facteur d'oubli
      - II.5.2.2. Analyse détaillée du problème de pondération
- III. Modèle mécanique du geste - Corrélation avec certaines hypothèses de la psychomotricité**
  - III.1. Objectifs
  - III.2. Regard sur les hypothèses de la Psychomotricité
    - III.2.1. Gestes simples
      - III.2.1.1. Définition du programme moteur
      - III.2.1.2. Structure du programme
    - III.2.2. Gestes complexes - Phénomènes cycliques
      - III.2.2.1. Rôle du temps dans le programme moteur
      - III.2.2.2. Structures coordinatives

- III.3. Corrélations possibles avec un modèle mécanique du geste
  - III.3.1. Gestes simples
    - III.3.1.1. Analogie modèle identifié à court-terme/modèle masse-ressort
    - III.3.1.2. Evolution temporelle du modèle mécanique
  - III.3.2. Gestes cycliques

## Chapitre 4 - Application des méthodes d'identification au geste

### I. Expériences d'identification

- I.1. Modèle du simulateur d'instrument
  - I.1.1. Partie mécanique de la touche
  - I.1.2. Moteur équivalent
  - I.1.3. Représentation générale sous forme de fonction de transfert
  - I.1.4. Représentations équivalentes pour l'identification
- I.2. Méthodes d'identification employées
  - I.2.1. Détermination de l'ordre du système
  - I.2.2. Choix de la méthode
  - I.2.3. Evaluation post-optimisation de la méthode
    - I.2.3.1. Critères relatifs
    - I.2.3.2. Gain statique
    - I.2.3.3. Calcul des pôles et des zéros
    - I.2.3.4. Calculs de précision
    - I.2.3.5. Outils graphiques
    - I.2.3.6. Re-synthèse
- I.3. Identification en boucle ouverte
  - I.3.1. Description de l'expérience
  - I.3.2. Caractéristiques du signal exciteur
    - I.3.2.1. Fréquence d'horloge
    - I.3.2.2. Longueur de la séquence binaire pseudo-aléatoire
  - I.3.3. Etalonnage de la méthode, sans l'opérateur
    - I.3.3.1. Sensibilité de la méthode à la fréquence d'échantillonnage des signaux captés
    - I.3.3.2. Sensibilité de la méthode à l'amplitude (a) du bruit d'excitation
    - I.3.3.3. Sensibilité de la méthode aux caractéristiques statiques de la touche
    - I.3.3.4. Conséquences
- I.4. Identification en boucle fermée
  - I.4.1. Analyse de gestes de manipulation en présence d'un signal de test
    - I.4.1.1. Mise en oeuvre expérimentale
    - I.4.1.2. Gestes statiques et passifs
    - I.4.1.3. Gestes actifs et dynamiques
  - I.4.2. Analyse de gestes de manipulation sans signal de test
  - I.4.3. Corrélation entre la structure du geste et ses effets sonores...

### II. Résultats de l'identification

## Conclusion et perspectives

## Bibliographie

- B.1. Identification, traitement du signal, modélisation
- B.2. Psychologie, physiologie
- B.3. Informatique musicale

## **Annexe : Structure matérielle du frontal gestuel**

- A.1. Description de l'environnement matériel général
- A.2. Mise en oeuvre de la configuration matérielle du frontal gestuel
- A.3. Unité de traitement gestuel
  - A.3.1. Constitution d'une unité gestuelle
  - A.3.2. Principe de la communication entre les deux processeurs
    - A.3.2.1. Accès au bus VME
    - A.3.2.2. Gestion des interruptions
  - A.3.3. Modules périphériques d'entrées sorties
    - A.3.3.1. Transducteurs et types d'interfaces associées
    - A.3.3.2. Les modules d'entrée et de sortie
    - A.3.3.3. Localisation des modules d'acquisition et de sortie
- A.4. Etude et réalisation d'interfaces d'acquisition temps réel spécialisées
  - A.4.1. Introduction
  - A.4.2. Fonctions des modules d'acquisition d'entrée
  - A.4.3. Réalisation d'un module d'acquisition d'entrées analogiques



# Introduction

## Maîtriser le phénomène sonore

L'essor de la technologie et en particulier de l'informatique a profondément modifié les données matérielles propres à la pratique et à l'expérimentation musicale.

Ce bouleversement crée une situation nouvelle, qui se traduit par l'expansion brutale de l'univers sonore. Il devient alors possible de synthétiser n'importe quel événement audible au moyen de l'ordinateur. Le son n'est plus forcément une trace acoustique produite par une cause physique "naturelle", qui s'extériorise par l'intermédiaire du geste humain ... Les chaînes mécaniques de production du son disparaissent, à partir du moment où il devient possible de le mémoriser, de l'analyser, de le construire ou de le transformer à des fins musicales. En particulier, est apparue pour la première fois la possibilité d'agir directement sur la structure microscopique du matériau sonore.

*"C'est seulement avec l'ordinateur que le type de contrôle qu'on pourra avoir au niveau de la micro-structure du son, sera de même nature, du même degré de raffinement que celui qu'a l'habitude d'exercer le compositeur sur la macro-structure." [Risset 77]*

Mais il n'y a pas que le phénomène acoustique qui soit touché par l'irruption de l'informatique dans le domaine musical. C'est la relation même entre le musicien et "l'outil de production" des sons qui est transformée...

*"La mutation technologique ne touche pas que la science et la connaissance du phénomène sonore, elle transforme le "mode opératoire", la relation ergonomique du créateur à l'outil, (...). C'est "le niveau poétique" qui est foncièrement "remis en cause". Et si des solutions de continuité sont imaginables et réalisables entre les anciennes catégories sonores et le nouvel espace, les catégories de la facture traditionnelle des sons, il faut entendre par là tout ce qui intervient depuis la lutherie jusqu'à l'exécution en passant par l'apprentissage expérimental et la composition, s'évanouissent." [Cadoz 87]*

Face à cette mutation technologique, le musicien est habité par deux sentiments contradictoires : il est d'une part séduit devant la richesse du monde sonore et l'universalité de son outil ; mais en

même temps, il réalise son impuissance devant cet infini qu'il ne saisit plus. Il ne suffit pas en effet d'avoir accès à un flux de paramètres physiques, encore faut il comprendre leur signification par rapport aux formes constitutives des sons ... encore faut il savoir à quoi tient "*la vie et l'identité des sons de type instrumental.*" [Risset 87]

Depuis la naissance de l'informatique musicale, qui remonte aux années 50 avec les premières expériences de composition automatique mises en oeuvre par Hiller et Isaacson [Hiller 58], et l'apparition de la synthèse et de l'enregistrement numérique des sons vers 1958 [Mathews 63], de nombreuses directions de recherche se sont affirmées, qui se proposent de déterminer des éléments pertinents pouvant servir de fil conducteur à la création musicale.

Un axe d'étude important concerne le développement de techniques de synthèse directe des sons. La synthèse additive et soustractive a été exploitée dans le programme Music V de Mathews [Mathews 69], [Mathews 70]. Ce programme détermine des événements sonores à partir de l'agencement de modules élémentaires, tels que oscillateurs, enveloppes, ... D'autres méthodes de synthèse, dites "globales", ont été développées, telles que la modulation de fréquence, introduite par Chowning vers 1971 [Chowning 73], ou la distorsion non-linéaire étudiée par Arfib et Lebrun [Arfib 79], [Lebrun 79] ; ces méthodes ont été utilisées avec Music V et des programmes dérivés (Music 10, Music 11, Cmusic, ...). On peut citer d'autres principes qui découlent des techniques utilisées dans le cadre de l'analyse-synthèse de la parole telles que la prédiction linéaire [Moorer 78], la synthèse par ondes formantiques (programme CHANT de Rodet [Rodet 84]).

La psychoacoustique semble offrir un moyen intéressant de guider la synthèse directe des sons. Cette discipline tente d'établir une corrélation entre l'espace physique des sons, et leurs effets perceptifs.

*"La psychoacoustique musicale doit s'attacher à cerner les effets perceptifs "robustes", pouvant rester pregnants en dehors de conditions de la musique et jusqu'au sein d'un flux musical ; au-delà du son isolé, elle doit s'intéresser aux rapports que l'audition est susceptible d'établir entre les sons, à la quête de formes au sein d'un discours sensible."*  
[Risset 87]

Les utilisations de l'ordinateur ne se bornent pas à produire des sons. Une voie de recherche consiste à développer des langages spécifiques qui se prêtent bien à des manipulations logiques, et peuvent servir d'aide à la composition. Le projet FORMES notamment à l'IRCAM par Rodet, Cointe et al. [Rodet 84] illustre une application plus récente utilisant les principes de la synthèse par règles.

Pendant les années 70, une préoccupation majeure est apparue, concernant le temps réel, qui a donné le jour à des machines spécialisées ultra-rapides : citons, par exemple, la 4X de l'IRCAM [Di Giugno 81], le SYTER de l'INA-GRM [Allouis 79], le processeur de LUCASFILM [Moorer 82], le QUATRON de Roncin et Prévot. Le problème le plus délicat reste cependant la commande de ces processeurs, qui doit être efficace et performante. Généralement, ce sont les gestes d'un opérateur humain qui permettent de contrôler et d'influencer en temps réel certains aspects du son.

La mise en oeuvre de systèmes de synthèse rapides, contrôlés gestuellement n'est cependant pas suffisante pour maîtriser le phénomène sonore. Le temps réel ne dispense pas en particulier de comprendre une certaine logique perceptuelle...

*"Le musicien pressé s'imagine qu'il pourra accorder le son à la main - et à l'oreille - suivant ses désirs : mais le temps réel ne lui permet d'accorder que quelques aspects du son choisis à l'avance ; et l'errance aveugle permet rarement d'arriver où l'on veut, pour peu qu'il faille ajuster plusieurs paramètres."*  
[Risset 87]

Les hypothèses qui guident la recherche à l'ACROE consistent à reconnaître le rôle déterminant de l'apprentissage sensori-moteur dans les processus d'élaboration de formes sonores musicales. Je ne chercherai pas à justifier les fondements de cette démarche originale. Une analyse détaillée de cette justification a déjà fait l'objet de plusieurs travaux [Cadoz 78], [Cadoz 79], [Luciani 85], [Cadoz 87]. Je vais essayer toutefois de rappeler les conditions dans lesquelles l'activité de création est ici envisagée.

### **Fondements et hypothèses de l'approche**

La démarche adoptée s'inscrit dans le cadre d'un programme de recherche qui a pour objectif la réalisation d'un outil informatique pour la création musicale et d'images animées. L'enjeu est double. Le premier consiste à définir un concept général d'outil de création qui résulte d'une part d'une réflexion théorique sur l'activité de création elle-même, et d'autre part de l'exploitation des fonctions de l'ordinateur à des fins créatives. Le second conduit à l'élaboration d'un système intégrant le plus justement possible ces concepts et permettant le développement d'expériences et de réalisations créatives.

Dans le propos "comment faire de la musique avec un ordinateur", on s'intéresse tout d'abord aux fonctions de la machine, en tant que dispositif de production des sons, et aux fonctions de contrôle et de commande de cette machine. Cela suppose la prise en charge par l'ordinateur des processus



de synthèse, et de la commande de ces processus. Mais il faut aller plus loin, et donner au musicien les moyens de maîtriser la signification de ces fonctions. Il convient alors d'établir une relation entre les processus de production et des représentations mentales inhérentes à l'activité de création artistique.

La démarche adoptée se fonde sur une hypothèse déterminante : la nécessité de prendre en compte le jeu instrumental : d'une part en ayant recours à des modèles physiques pour simuler le comportement vibratoire d'objets mécaniques ; d'autre part en accordant une importance privilégiée au geste instrumental pour contrôler ces objets manipulables. Cette approche vise alors à réhabiliter l'expérience instrumentale, dans laquelle l'appréhension sensorielle de l'objet met en jeu une perception globale touchant plusieurs modalités : la vue, l'ouïe, le "toucher". A cet effet, la restitution d'une relation de type "instrumentale" entre l'artiste et la machine doit tenir compte des "boucles" actions/perceptions qui relient directement les conduites motrices à l'ensemble des perceptions qui en résultent. En particulier, il faut noter l'importance de la nature bilatérale du geste, caractérisée par le fait que l'action gestuelle et la perception tactile et kinesthésique sont intimement corrélées.

C'est par le recours à des processus simulant le comportement mécanique de l'instrument, et par l'introduction d'organes physiques, ou transducteurs, jouant le rôle d'intermédiaires entre l'homme et la machine, qu'il est possible de rétablir une relation complète, programmable, entre l'opérateur et l'instrument.

*"L'activité de création est avant tout un dialogue entre ce que l'on peut appeler d'un côté la pensée (du créateur) et de l'autre, dans un sens très général, un matériau, qui permet à cette pensée de se constituer, de s'extérioriser et d'être communiquée. Nous entendons par matériau quelque chose qui se présente comme un ensemble de contraintes qui préexistent à une certaine phase de la relation. (...) les contraintes en question peuvent être les contraintes d'un corps matériel, d'un processus de production sonore, aussi bien que celles d'un système de règles compositionnelles." [Cadoz 87]*

Mais l'activité de création ne met pas seulement en jeu cette relation instrumentale, où le musicien est en prise directe avec les comportements sensibles de l'objet manipulé. Plus qu'un outil de production d'objets gestes, sons, ou images, l'outil de création doit permettre une certaine distanciation par rapport aux contingences des phénomènes physiques, se déroulant dans la réalité du temps. L'objectif consiste alors à dégager des représentations significatives des objets mémorisés lors d'expériences instrumentales, en faisant émerger des formes intelligibles pour le musicien.

De la même manière que l'on met en avant, pour produire des sons, des procédés de synthèse utilisant des modèles physiques, et contrôlables par des gestes, on envisage des représentations et des traitements compositionnels au niveau des causes génératrices des phénomènes perceptibles ; ces causes sont constituées à la fois par les gestes et par les mécanismes instrumentaux auxquels ils s'appliquent. Cette approche est duale de celle des Psychoacousticiens, qui tentent d'analyser et de traiter les effets sensibles des sons plutôt que les causes qui les génèrent.

On réintègre donc la représentation de la causalité comme logique de production du son, et d'expression musicale. Pour simuler des objets, la référence prise est celle du monde naturel, ce qui n'exclut pas la possibilité de s'en écarter à des fins d'exploration d'espaces inédits (sonores,...).

*Même face à des objets inédits, comme ceux que peut produire, par synthèse, un ordinateur, l'homme tente de les interpréter et de les manipuler comme des émanations du monde réel, de leur trouver une cause plausible dans l'univers réel." [Luciani 85]*

Le geste instrumental, auquel on attache une importance privilégiée, est l'objet de ce travail. On peut bien sûr se demander qu'elle est la contribution du geste dans l'élaboration de structures sonores musicales. Dans le cadre de la synthèse directe des sons, le geste apparaît le plus souvent comme une fonction de commande assujettie à la composition préalable des sons. L'étude qui suit ne prétend pas répondre totalement à cette question concernant la relation du geste à la composition. Elle vise cependant à mieux connaître les processus qui entrent en jeu dans l'expérience instrumentale, et va dans le sens d'une confrontation possible des comportements sensibles de l'objet physique, aux conduites qui lui sont appliquées.

## **Le geste instrumental**

L'expérience instrumentale telle qu'on la perçoit à travers la simple observation d'instrumentistes en action, à travers l'écriture musicale aussi, ou encore à travers des improvisations nées du jeu instrumental, peut nous inciter à considérer le geste comme participant activement aux processus de création musicale.

### **Détente et tension gestuelle**

C'est la compréhension toute innée et instinctive des pulsions musicales profondes qui fait naître des dynamiques précises et intentionnelles du geste, imprimant au matériau sonore des formes en mouvement, qui dépendent à la fois du geste effecteur et de la structure de l'instrument. Ainsi,

l'idée musicale abstraite peut contenir implicitement une forme d'intention motrice qui préexiste au geste, et le geste acteur permet, dans l'expérience musicale, d'extérioriser les tensions-détentes, les ruptures ; c'est lui qui rythme les événements, alternant le temps de l'attente et celui de la résolution. Le rythme musical a donc son essence dans les schémas d'organisation motrice, alternant contraction et relaxation, inspiration et expiration. La dynamique imprimée au son révèle la tension de l'instrumentiste et est directement reliée à l'état émotionnel du musicien.

Prenons l'exemple du pianiste ; il acquiert une maîtrise de plus en plus fine de la mécanique de ses muscles, lui permettant d'obtenir une sûreté du doigté, une agilité et une indépendance des doigts. A ce geste contrôlé et discipliné vient se superposer un geste expressif, traduction instinctive et stylisée de tensions et sensations internes profondes en phénomènes corporels, conférant au son sa qualité de "musicalité". Ainsi, le "toucher" du pianiste est tenu pour une qualité appréciable, exprimant des nuances subtiles du jeu instrumental, et qui échappe à la traduction sous forme de signes conventionnels.

On peut évoquer également le geste du chef d'orchestre, qui ne s'exerce plus, cette fois-ci sur un objet inerte, mais qui a prise sur un "instrument complexe" constitué d'un ensemble d'instrumentistes contrôlant chacun un instrument. L'action physique des instrumentistes, la tension et la détente de leurs muscles est accordée au geste du chef d'orchestre ; celui-ci semble pouvoir traduire un mouvement musical en rythme et expression gestuelle.

A chaque instant, deux choses se conjuguent : la main droite, munie d'une baguette, émet des ordres explicites, transmis par des signaux convenus ; la main gauche est animée de gestes expressifs, qui sont des suggestions s'adressant à l'attention et à la musicalité de l'orchestre.

### **Représenter le son ... ou le geste**

L'écriture musicale défie le temps qui passe. Elle permet de fixer des phénomènes musicaux ayant un déroulement dans le temps, de les explorer, de les transmettre et de les faire évoluer. On peut alors s'interroger sur la nature de ces événements "musicaux" ...

A l'origine, la notation musicale est issue de l'expérience instrumentale.

*"L'écriture musicale occidentale est partie du geste qui permettait au chef de chœur de se remémorer une courbe mélodique à sa chorale, ou au peuple chantant (chironimie)."*  
[Marie 73]

Cette notation a subi de profondes mutations au cours de l'histoire ; elle s'est donnée différentes formes en fonction de l'évolution technologique et de la pensée musicale du moment. Ainsi, le

système d'écriture musicale traditionnelle en Occident code essentiellement deux types de paramètres : la hauteur des sons et leur durée. D'autres éléments de notation indiquent les tonalités, les modes, les altérations. A cela, il faut ajouter les symboles exprimant les nuances tels que piano, crescendo, forte etc. L'écriture musicale mélange en fait des indications concernant les caractéristiques du son produit, et celles relatives au jeu instrumental (éléments rythmiques, expression gestuelle, mode opératoire, ...).

Aujourd'hui, on voit apparaître la nécessité d'élargir le "corpus musical" ; de nouveaux paramètres du son se sont révélés (couleur, espace, timbre, ...) ainsi que des paramètres du geste (nature de l'attaque, partie du corps impliquée, articulation et enchaînement des mouvements ...). Des partitions graphiques substituent aux signes conventionnels d'autres symboles, comme par exemple des lignes, des courbes, des mots du langage, qui suggèrent à l'interprète des lignes d'action, des dispositions mentales et motrices d'où naîtra une forme musicale.

*"Un des éléments fondamentaux du langage expressif de la musique réside dans la parenté du schème rythmique et mélodique et des schèmes gestuels qui accompagnent le comportement(...). Les états psychiques fondamentaux (calme, excitation, tension-détente, exaltation, dépression) (...) se traduisent ordinairement par des formes gestuelles ayant un rythme donné, par des tendances et des directions spatiales (ascension, dépression, horizontalité) par des modalités d'organisation des formes partielles au sein de formes globales (répétition obstinée, diversité, périodicité, évolution, etc.)"* [Francès 72]

Si l'on restitue le geste comme intermédiaire entre la pensée musicale et le son produit, on peut imaginer introduire une contribution aux systèmes d'écriture fondée sur une représentation du geste.

### **Composer avec les gestes, composer les gestes ...**

L'idée musicale peut naître du jeu. Le jeu instrumental sous-entend en effet une organisation spontanée dans l'espace et dans le temps qui n'a de signification que dans le déroulement de l'action. Il y a quelque chose qui se crée au fur et à mesure de l'évolution du jeu. Aujourd'hui ressurgissent des interprètes-compositeurs, qui éprouvent le besoin de revaloriser le geste et de le considérer comme participant de manière active à la création. Dans certaines tentatives de free-jazz, par exemple, la maîtrise spatiale et temporelle du geste fait émerger des structures sonores organisées. Il se peut alors que s'établisse un consensus cohérent entre l'intention motrice et la perception du son produit.

*"L'invention mentale est donc un achèvement, elle émerge lentement de l'invention motrice, à l'aide de suggestions de l'activité elle-même, surtout lorsque celle-ci est modifiée par l'ambiance ou l'abaissement de tension ludique. (...) Mais toujours l'invention gardera quelques traits de cette exploration primitive, toute motrice dont elle est née, et c'est à elle qu'elle reviendra bien souvent."* [Chateau 75]

L'idée musicale peut émerger également de schémas d'organisation issus de représentations d'une autre nature (images, jeux de symboles, ...). Ainsi, l'écriture de structures sonores musicales autorise, grâce à son support visuel, une certaine autonomie par rapport au phénomène sonore, qui peut conduire à la création de structures musicales nouvelles. Il en est de même pour la représentation du geste instrumental qui permet de s'échapper de la réalité physique du geste. Ceci conduit à des manipulations abstraites qui creusent l'écart entre la pratique instrumentale et inventive de l'interprète, et l'activité conceptuelle du compositeur.

### **Objet et plan de ce travail**

On se propose, dans le cadre de la conception et de la réalisation d'un outil informatique pour la création musicale, d'étudier le geste instrumental et de mettre en oeuvre un système permettant la mémorisation, la représentation et le traitement des signaux gestuels. L'exposé comporte deux parties :

La première partie, décrite dans les chapitres 1 et 2, concerne les utilisations du geste instrumental capté par rapport aux fonctions temps réel de l'outil de création. Une étude préliminaire sur le geste et sur la morphologie des transducteurs gestuels nous a conduit à proposer une typologie du geste instrumental, et à dégager des éléments de structuration du geste. A partir de ces critères de classification, nous nous sommes d'emblée lancés, préalablement à toute forme d'analyse expérimentale, dans l'élaboration d'un système, considéré comme "frontal" d'un système de synthèse de sons musicaux, permettant de capter, de coder et de prétraiter les données de contrôle gestuel.

La seconde partie, décrite dans les chapitres 3 et 4, met en oeuvre une réflexion plus approfondie sur la nature structurelle du geste, visant à extraire des éléments de représentation plus significatifs pour le compositeur. Cela a donné lieu à des investigations théoriques et expérimentales. Nous développons des méthodes utilisées dans les techniques de l'Automatisation des Systèmes, qui consistent à identifier l'action gestuelle de l'opérateur sur l'objet manipulé à un modèle mécanique simple évoluant lentement dans le temps. L'identification laisse entrevoir de nouvelles possibilités en ce qui concerne les traitements compositionnels sur le geste.

## Chapitre 1

# Typologie du geste instrumental

### I. Nature intrinsèque du geste

Si le geste intéresse certaines sciences humaines et de la communication Homme/Machine, - on peut citer : la Psychologie expérimentale, la Physiologie, et plus récemment la Robotique, la Phonétique, etc. - il n'en demeure pas moins que les travaux sur le sujet sont peu nombreux. Il est vrai que l'investigation de l'espace gestuel nécessite la plupart du temps l'élaboration de dispositifs complexes adaptés à l'organisme humain.

*"... nous rencontrons au niveau même de la définition de notre champ expérimental les mêmes obstacles que dans toute tentative de contrôle de processus incluant l'individu humain pour lequel les modèles cybernétiques sont actuellement trop limités."*

[Florens 78]

Une étude approfondie sur la typologie du geste instrumental doit conduire à dégager différentes catégories de gestes, qui permettent de mieux appréhender les problèmes en cause, et éventuellement de limiter notre champ expérimental. Ce chapitre s'appuie essentiellement sur certains éléments de catégorisation du geste qui sont d'une part des données de base de la Psychologie expérimentale, et d'autre part des notions intuitives dégagées lors de travaux antérieurs sur le geste [Cadoz 81], [Cadoz 84], ces travaux ayant constitué jusqu'à présent des hypothèses de travail.

#### I.1. Action et perception gestuelle

*"Dans sa définition la plus générale, le geste instrumental est un ensemble d'actions (ou de conduites) motrices appliquées à un objet."* [Cadoz 84]

Par geste "instrumental", on entend : geste qui s'exécute sur un objet du monde physique, cet objet pouvant être en particulier un instrument de musique. Il convient de souligner l'importance que revêt pour nous la nature "instrumentale" de l'action gestuelle. Il ne s'agit pas en effet d'appréhender le geste en dehors de toute finalité instrumentale immédiate, c'est-à-dire sans qu'aient lieu des actions matérielles ayant un effet sensible sur l'objet. Le geste est au contraire analysé dans un contexte d'interaction dynamique entre l'opérateur et l'objet manipulé.

Ce qui caractérise essentiellement le geste, c'est l'indissociable imbrication de sa fonction motrice avec sa fonction perceptive. En fait, toutes les "modalités sensorielles" (ou plutôt sensori-motrices) ne fonctionnent pas en purs récepteurs passifs ; elles sont dotées d'une musculature qui leur confère des propriétés motrices permettant l'exploration de l'environnement. Cependant, la motricité du geste a ceci de particulier qu'elle tend à transformer les propriétés des objets sur lesquelles elle s'applique :

*"... la main, organe perceptif, est aussi et principalement l'organe privilégié d'exécution des actions pratiques instrumentales sur le monde extérieur. Et si elle peut prendre connaissance des propriétés des objets, la main peut aussi transformer ces propriétés en agissant matériellement sur ces objets (en les cassant, en les tordant, en les pliant, etc.). Rien de tel n'est évidemment possible avec les yeux qui, si actifs qu'ils soient, restent toujours de purs organes de perception. (...) Les déplacements de l'oeil, qu'ils soient dûs à sa musculature propre ou à une rotation de la tête, du cou, du tronc, ou du corps tout entier, ..., ne peuvent jamais modifier, de quelque façon que ce soit, l'état physique ou spatial de l'environnement."*

[Hatwell 81]

La première fonction du geste est donc la motricité, par laquelle l'organisme agit sur l'environnement pour le transformer ; c'est grâce à elle que sont réalisées les opérations de saisie, de transport spatial, de transformation des objets à des fins utilitaires. La motricité engendre des mouvements destinés à modifier les propriétés mécaniques et spatiales des objets sollicités : déplacement, déformation, etc.

La seconde fonction du geste qui intervient parallèlement à l'exécution de l'action instrumentale, est la perception tactile et kinesthésique (sensation du mouvement) qui informe sur les propriétés géométriques et dynamiques de l'objet manipulé. Cette information perceptive joue un rôle déterminant dans le contrôle du geste, et son adaptation à l'objet.

## I.2. Différentes formes de la perception gestuelle

Plus généralement, la "perception tactile", ou "toucher", supporte un certain nombre de fonctions, dues au fait qu'elle intéresse simultanément la totalité de l'enveloppe corporelle extérieure, mais aussi les couches musculaires et articulaires profondes. On peut proposer différentes classifications de la sensibilité tactile. Le point de vue des psychologues distingue dans le toucher deux pôles complémentaires suivant l'orientation objective ou subjective des sensations reçues. Les neurophysiologues, quant à eux, proposent une discrimination perceptive suivant des critères liés à des activités de récepteurs sensoriels.

### I.2.1. Toucher objectif - toucher subjectif

En premier lieu, le toucher fonctionne en tant que mode de connaissance des propriétés objectives du monde environnant. Cette fonction ne peut être totalement dissociée de l'action motrice elle-même. Ainsi, suivant la finalité du geste, on observera une dominante motrice, ou bien une dominante perceptive.

*"... la motricité de la main permet de produire des mouvements qui sont tantôt destinés à la perception de la propriété des objets (mise en place et maintien actif des récepteurs de la source, activité exploratoire de palpation), et tantôt destinés à changer la position spatiale ou les propriétés de ces objets ( les transporter, les couper, les piler, les coller ensemble,...)."* [Hatwell 81]

En second lieu, le système perceptif tactile véhicule une multiplicité d'impressions subjectives liées à des sensations de bien-être ou de malaise, de plaisir ou de déplaisir. Ceci peut s'expliquer par le fait que

*"... les structures nerveuses chargées de la mécano-réception sont totalement imbriquées, sur le plan géographique, avec celles qui transmettent les sensations de plaisir et de douleur, c'est-à-dire avec un système hautement chargé sur le plan émotionnel et dont le fonctionnement aboutit à une catégorisation subjective des évènements sur une échelle bipolaire de valeurs (bon-mauvais)".* [Hatwell 81]

De manière plus générale, on peut distinguer au niveau du système perceptif les sensibilités de contact et les "téléréceptions".



*Si le toucher et la vision peuvent tous les deux apprécier la valeur affective des sensations reçues, ou tirer des informations objectives sur l'état de l'environnement, ils sont néanmoins orientés électivement en direction opposée : le toucher est plus adapté à la recherche et au maintien des situations engendrant des états sensoriels plaisants, alors que la vision est plus puissante en tant qu'instrument de connaissance du monde réel.*  
[Hatwell 81]

Bien que cette modalité de fonctionnement du geste ait une grande incidence sur le geste "musical", elle n'est pas directement appréhendable par nos moyens technologiques actuels, et par conséquent nous ne nous intéresserons par la suite qu'à la fonction objective du toucher.

## **I.2.2. Catégorisation des perceptions au niveau de l'activité des récepteurs**

Si l'on reprend la classification que propose Y. Hatwell, il est possible de distinguer plusieurs types de perceptions au niveau du système tactile et kinesthésique, d'une part en fonction de la localisation des récepteurs sollicités, d'autre part en fonction du mode d'excitation des récepteurs.

### I.2.2.1. Localisation des récepteurs

On sépare généralement le niveau "périphérique" externe -siège de la perception tactile cutanée- qui intéresse essentiellement la couche superficielle de la peau, et le niveau proprioceptif qui correspond à la sensibilité musculaire et articulaire.

a. La perception tactile se manifeste lors de pressions légères d'un objet sur un segment corporel. Elle se caractérise par des déformations de la peau, qui évoquent typiquement la sensation de "toucher", et ne met pas à contribution les articulations et les muscles. La sensibilité cutanée est distribuée spatialement de manière discontinue, alternant des points sensibles et des zones de moindre sensibilité. De plus, les points sensibles sont répartis suivant une densité inégale dans les diverses régions de la surface du corps. Parmi les mécanorécepteurs cutanés, on distingue ceux qui constituent des détecteurs de position, et ceux qui renseignent sur des variations de stimulus dans le temps et dans l'espace (détecteurs de vitesse ou de transitoires selon la rapidité d'adaptation du récepteur). Le tact permet, et plus particulièrement lorsque le système récepteur est volontairement déplacé, de discriminer la forme des objets, leur mouvement, leurs propriétés dynamiques (texture, rigidité/souplesse, ...).

b. La proprioception, quant à elle, informe sur les propriétés spatiales du corps et du monde environnant. Elle permet la localisation de certaines parties du corps par rapport à toutes les autres, en particulier c'est elle qui intervient dans le contrôle de la posture et de l'équilibre. Elle permet également de localiser la ou les sources de stimulation qui sollicitent le système perceptif tactile, et donc renseigne sur la position de l'objet par rapport au corps. Au niveau de l'appareil locomoteur, deux types de récepteurs sont mis à contribution : les récepteurs musculaires et tendineux, et ceux des articulations.

c. La perception tactilo-kinesthésique, qui est celle qui nous intéresse, parce qu'elle intervient lors de mouvements volontaires d'un opérateur agissant sur un objet, met en jeu à la fois des récepteurs proprioceptifs, et des récepteurs cutanés ; elle renseigne directement sur les propriétés dynamiques et spatiales de l'objet manipulé.

#### I.2.2.2 Toucher actif et passif

Les mécanorécepteurs sont généralement sensibles à des variations de la source excitatrice. En fonction des catégories de récepteurs concernés, on met en évidence des sensibilités à des variations de position, de vitesse, de traction ou de pression.

*"En effet, l'excitation nerveuse faiblit et disparaît avec l'immobilisation du fragment de tissu sur lequel un contact a été produit, et ne se maintient que si des mouvements (friction, balayage, enfoncements, torsions, etc...) renouvellent en permanence la déformation. "*

[Hatwell 81]

Une discrimination possible prend en compte les modes d'excitation des récepteurs. On parlera de :  
-toucher passif lorsque le corps, immobile, est soumis à des stimulations variables (frottement d'un objet sur le segment corporel concerné, variations de la pression, stimulus répétitif ).  
-toucher actif, lorsque le segment corporel en mouvement agit effectivement sur l'objet et en explore les propriétés spatiales et dynamiques.

## II. Le geste dans la représentation de la situation instrumentale

### II.1. Description simplifiée du couplage homme-instrument

Dans le monde concret, la situation de jeu instrumental est caractérisée par la mise en relation de deux systèmes mécaniques mutuellement couplés : l'opérateur d'une part (H), et l'instrument d'autre part (I) :

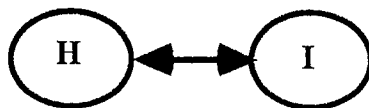


Figure 1.1 : Interaction homme-instrument

L'ensemble constitue un dipôle mécanique, qui comporte des éléments passifs et des éléments actifs, ces derniers nécessitant une certaine source d'énergie. Le musicien lui-même est générateur d'énergie : il met en jeu des forces musculaires pour appuyer et tirer un archet, il génère du souffle pour exciter un tuyau, etc. D'autres sources d'énergie peuvent intervenir pour suppléer celle de l'instrumentiste (amplificateurs, moteurs,...)

Ce dipôle mécanique est un objet susceptible de se déformer, de se transformer, par la modification dynamique du couplage homme-instrument. Les modes de liaison entre ces deux systèmes sont asservis à des contraintes physiques, liées à la fois à la morphologie humaine et à la morphologie de l'objet manipulé. Pour décrire l'évolution temporelle caractérisant ces déformations, on peut proposer le modèle discrétisé suivant [Cadoz 84] :

Pour un instrument donné, on détermine un ensemble de points de liaison (ou zones de contact) :  $\{e_i\}$ , ( $i=1, \dots, n$ ), où seront appliquées des actions gestuelles pouvant avoir une influence sur son comportement. De la même façon, l'opérateur humain, par sa morphologie peut établir un certain nombre de liaisons avec l'objet manipulé, soit  $\{h_j\}$  ( $j = 1, \dots, p$ ) :

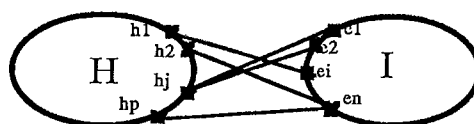


Figure 1.2 : Représentation ponctuelle des liens H-I

A chaque instant, la structure du dipôle mécanique dépend de la configuration des liaisons établies entre l'ensemble {ei} et l'ensemble {hj}. Au cours d'une expérience instrumentale, les liaisons mécaniques "se font et se défont", ce qui confère à l'ensemble un comportement dynamique variable avec une combinatoire qui dépend des propriétés géométriques et morphologiques des deux systèmes respectifs. Par exemple, il est impossible de jouer simultanément sur deux touches de piano situées à plusieurs octaves d'intervalle avec deux doigts d'une même main. Nous appellerons  $\mathcal{L}$  l'ensemble des configurations possibles entre {ei} et {hj}.

### **Etat de liaison ou de non liaison**

Lorsqu'une liaison effective est établie entre l'opérateur et l'instrument, on peut caractériser le geste par l'évolution au cours du temps de la structure mécanique du système humain ramenée au point d'observation. Les grandeurs physiques qui circulent à travers la liaison ( variables mécaniques force, position, vitesse, ... ) constituent une trace de cette manifestation gestuelle et traduisent des échanges énergétiques entre les deux systèmes. Si l'on rompt brutalement la liaison, les deux systèmes isolés continuent à évoluer suivant des lois physiques propres à leurs structures mécaniques respectives.

Vu du côté de l'instrument, on peut dire que l'excitateur n'est plus couplé au milieu extérieur, mais les vibrations du corps sonore peuvent continuer d'exister. Cependant, le comportement de ce système n'est plus significatif du geste. Il peut tout au plus traduire une partie de l'information gestuelle à l'instant de la désolidarisation des deux systèmes (la nature de l'attaque gestuelle détermine en effet les conditions initiales du mouvement de la structure vibrante).

De la même façon, le système humain ne cesse de se modifier structurellement, sans incidence, du moins à très court terme, sur l'évolution libre de l'instrument. Cependant, cette phase du geste peut influencer sur le déroulement de la séquence gestuelle globale, en configurant les différents segments corporels impliqués dans l'action qui va suivre. On qualifiera cette composante du geste de geste libre ou geste préparatoire.

## **II.2. Le geste dans le contexte de la simulation d'objets instrumentaux**

### **II.2.1 Simulation d'objets instrumentaux**

Dans la réalité du système de représentation CORDIS-ANIMA [Cadoz 79], [Luciani 85], [Razafindrakoto 86], l'instrument réel est remplacé par un "simulateur d'instrument", dont la fonction est double. La première est de capter certains paramètres physiques du geste de l'opérateur

(forces, déplacements,...) en vue du contrôle de la synthèse sonore en temps réel. La seconde consiste à opposer à l'opérateur la réaction d'un objet mécanique déterminée par le comportement d'un modèle programmé, et celui d'un dispositif physique manipulé gestuellement. Pour réaliser cette fonction, on utilise des dispositifs à contre-réaction, comportant une chaîne d'amplification motrice destinée à communiquer de l'énergie au point manipulé.

L'ensemble, vu de l'opérateur, se comporte comme un objet mécanique qui a des caractéristiques proches de celles d'un objet physique du monde réel.

Dans le contexte discret de l'ordinateur, on peut tenter de représenter la relation homme/instrument, en supposant que les deux systèmes en interaction sont constitués d'un agencement de modules mécaniques élémentaires. Les liaisons entre H et I seront alors représentées par des liaisons ponctuelles de dimension finie, comme le montre la figure 1.3 :

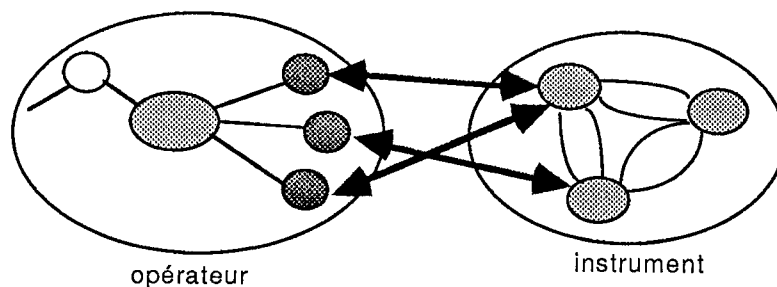


Figure 1.3. Représentation discrète de la situation instrumentale

### II.2.2. Signaux gestuels captés

Pour permettre le contrôle de l'instrument par le geste, on a recours à des appareils de mesure que l'on place au niveau des liaisons mécaniques séparant H et I. Les signaux captés ne traduisent pas exactement le geste, puisqu'ils sont accessibles par l'intermédiaire de dispositifs internes à l'instrument. Ceci peut être illustré par l'exemple suivant, où l'on compare deux types de situations: 1) celle où l'opérateur manipule un système mécanique réel (figure 1.4) :

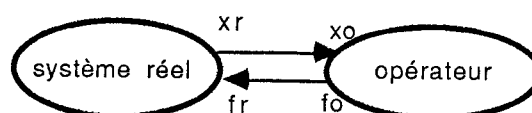


Figure 1.4 : Situation instrumentale réelle

2) et celle où l'on remplace l'objet réel par le simulateur d'instrument constitué d'un objet simulé et d'un dispositif physique (figure 1.5) :

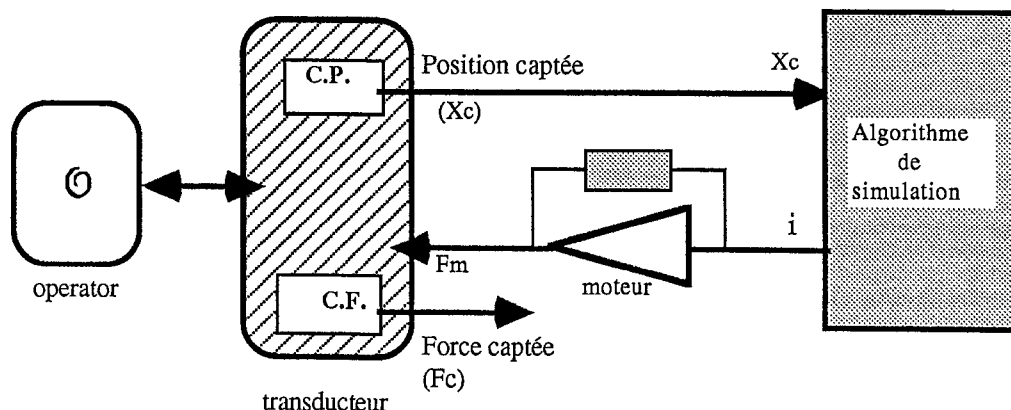


Figure 1.5 : Situation instrumentale dans le contexte de la simulation

Par conséquent, on accède au geste, sur cet exemple, soit par les couples de signaux  $(f_i, x_i)$  traités au niveau de l'algorithme de simulation, soit par les signaux captés  $(f_c, x_c)$  ; ces signaux ne traduisent pas rigoureusement les grandeurs mécaniques du geste  $(f_o, x_o)$ , à cause des caractéristiques non négligeables des dispositifs physiques constitués de la partie mécanique du transducteur, de la chaîne d'amplification du moteur, et des capteurs.

Une première conséquence de la caractérisation du geste dans le contexte de la simulation est donc l'impossibilité d'accéder directement aux grandeurs mécaniques du geste. Deux attitudes sont alors possibles. Soit l'on capte les signaux d'entrée et de sortie de l'objet simulé ; dans ce cas, les signaux "gestuels" sont en fait ceux générés par le système global "opérateur + transducteur gestuel". Soit l'on se rapproche le plus possible du système humain, c'est-à-dire que l'on mesure les signaux au niveau de capteurs directement sollicités par le geste (capteurs de force, de position, etc.) ; c'est cette solution vers laquelle on tendra et qui influera sur la conception des transducteurs gestuels.

Une seconde conséquence de la capture des signaux gestuels dans ce contexte concerne la caractérisation de l'état de la liaison entre l'opérateur et l'instrument. Les données captées étant internes à l'instrument, on perd une partie de l'information en ce qui concerne la configuration des attaches reliant l'opérateur à l'objet manipulé, puisqu'on ne sait pas quel segment corporel du système humain est impliqué dans la liaison. Il découle de cela l'impossibilité de caractériser entièrement l'information relative à l'évolution au cours du temps des éléments de l'ensemble  $\mathcal{B}$  (histoire des liaisons  $(e_i, h_j)$ ).

D'autre part, lorsque l'on caractérise le geste au moyen des signaux captés, deux cas peuvent se produire :

- 1) Si la liaison homme/instrument est établie, on peut approximer, aux erreurs de mesure près, les signaux captés à des signaux gestuels informant sur l'état du système humain à chaque instant.
- 2) Par contre, lorsque les deux systèmes se désolidarisent, les données captées ne traduisent plus le geste, mais plutôt le comportement de l'objet mécanique "modèle simulé + transducteur" à l'état libre.

Cela soulève le problème de la détection de l'état d'établissement ou de non établissement de chacun des liens potentiels entre les deux systèmes. Une solution consiste soit à introduire des capteurs spécifiques (capteurs de proximité par exemple) permettant de détecter le contact mécanique entre l'opérateur et le transducteur, soit à effectuer des traitements logiciels spécifiques adaptés à la nature du transducteur.

### **III . Tentative de classification du geste instrumental**

On ne prétend pas dès à présent proposer une typologie absolue du geste instrumental. Nous avons cependant été amenés à déterminer certains critères de classification du geste, qui peuvent avoir une incidence sur l'analyse et le traitement du geste instrumental dans le contexte de la simulation mécanique. Nous avons distingué essentiellement deux directions pour établir une classification du geste. La première tend à caractériser les aspects ergonomiques du geste, en le dissociant le plus possible de l'objet sur lequel il s'exerce. La seconde, complémentaire de la précédente, tend à rattacher le geste à la fonction qu'il remplit à l'égard de l'instrument.

#### **III.1. Classification suivant la nature intrinsèque du geste**

On s'intéresse dans ce cas à une qualification morphologique du geste par rapport au système de référence humain. En premier lieu il convient de préciser quelle partie du corps est impliquée dans le geste : s'agit-il d'un geste à caractère manuel ou corporel, ... ? En second lieu, il est possible de discriminer certains gestes suivant leurs caractéristiques dynamiques.

En fait, cette étude sera consacrée essentiellement au **geste manuel** (ou geste du membre supérieur), d'une part parce que ce type de geste constitue l'une des formes les plus perfectionnées du système gestuel humain, et d'autre part parce que l'on dispose de systèmes de mesure capables de les appréhender assez finement.

La main est un organe privilégié qui comporte un degré de liberté très grand de par la multiplicité et la disposition des attaches articulaires, ce qui lui confère une grande mobilité. Elle est dotée de plus

d'une très forte densité de récepteurs nerveux, ce qui lui donne une excellente capacité de discrimination sensorielle. Il y a deux orientations de l'activité manuelle qui coexistent en permanence. La première concerne des opérations motrices, à des fins utilitaires. La seconde traduit une sensibilité de contact, intimement liée à la fonction motrice ; elle se charge d'apporter une connaissance perceptive de l'objet manipulé. Une classification du geste manuel suivant des critères qui tiennent compte, d'une part de sa fonction préhensile ou non préhensile, d'autre part de sa nature "passive" ou "active", apporte des éléments nouveaux de classification, qui sont essentiels pour pouvoir identifier la nature structurelle du geste, dans des tâches motrices spécifiques.

### **Fonction préhensile ou "percussive" du geste manuel**

Nous distinguons :

#### *\* Les geste percussifs :*

Ce sont par exemple des gestes qui consistent à taper sur un objet, à le pousser, etc. Ces gestes provoquent généralement l'entraînement de la main dans un mouvement de transport du bras. Ils supposent la mobilité de tout ou partie du membre supérieur, sans faire participer directement les récepteurs tactiles localisés au niveau de la paume et des doigts.

#### *\* Les gestes préhensiles :*

Ils permettent de saisir et de manipuler un objet. Pour ce type de geste, qui suppose un contact durable avec l'objet, et qui met à contribution une zone sensorielle plus large, le toucher revêt une importance prépondérante par rapport à la stabilité de maintien de l'objet, et aux corrections apportées à l'action motrice elle-même.

Lyons [Lyons 85] propose une classification des gestes de préhension qui repose sur une modélisation plus qualitative de la tâche. Cette approche s'inspire en fait de travaux antérieurs sur la saisie humaine. Lyons met en évidence trois modes de préhension d'objets : le choix d'un type de saisie dépend de critères portant à la fois sur l'objet et sur la tâche. Ces critères qualitatifs mettent en jeu la forme de l'objet (objet plutôt rond ou plutôt long), la taille de l'objet (gros, petit), ainsi que la précision et la fermeté requises pour effectuer la tâche. En combinant ces différentes contraintes, on obtient trois types de prises (englobante, latérale ou de précision) liées à une certaine préconfiguration de la main (figure 1.6).

- 1- La "prise englobante" assure une bonne stabilité de l'objet agrippé, mais n'autorise pas en contre-partie sa maniabilité, à cause d'un couplage très rigide.
- 2- La "prise-précision", permet des mouvements plus fins et précis. La souplesse du couplage main/instrument autorise une mobilité relative de l'objet par rapport à la main, ce qui améliore le contrôle manuel.
- 3- La "prise-latérale" réalise en quelque sorte un compromis entre les deux prises précédentes, permettant ainsi une certaine maniabilité de l'objet tout en assurant sa stabilité.



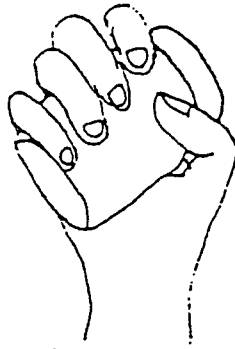


Figure 2: Encompass Grasp.

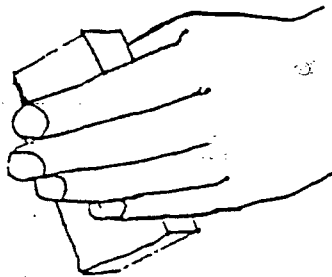


Figure 3: Lateral Grasp.

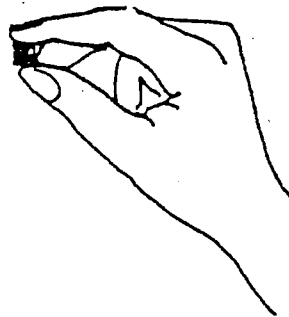


Figure 4: Precision Grasp.

Figure 1.6: Différents types de saisie [Lyons 85]

## III.2. Classification du geste suivant sa fonction à l'égard de l'instrument

On dépasse cette fois-ci l'aspect descriptif du geste pour ne retenir que l'aspect opérateur. En adoptant la description de l'instrument de musique que nous propose Schaeffer [Schaeffer 66], en termes d'excitateur ("*qui provoque la vibration*"), de vibrateur ("*qui entre en vibration*"), et de résonateur ("*destiné à ajouter ses effets à ceux du corps en vibration pour les amplifier, les prolonger, ou les modifier en quelque façon*"), on met alors en évidence deux catégories de gestes, qui font intervenir des processus énergétiques différents : les gestes d'excitation et les gestes de modification.

### III.2.1. Le geste d'excitation

Il se traduit essentiellement par une communication d'énergie mécanique au système excitateur ou vibrateur lui-même, cette énergie participant à l'énergie sonore rayonnée. Ce geste, qui produit le phénomène perceptible, la vibration sonore par exemple ou la déformation et le déplacement de l'objet, met en jeu une action et une perception gestuelles de l'objet manipulé qui sont simultanées. Dans le cas notamment de l'action de mise en vibration d'une corde par un archet, on est tenté d'émettre l'hypothèse que la perception du frottement de l'archet est essentielle à la conduite du mouvement, et permet d'infléchir le son produit. L'excitation se manifeste sous des formes diversifiées :

1) Elle peut être "impulsionnelle" ou entretenue, suivant la nature du processus énergétique en cause. Dans le cas d'un geste percussif, un seul geste suffit à donner une impulsion sonore durable, la vibration acoustique se prolongeant dans le temps après que le geste ait émis de l'énergie. Notamment, l'excitation peut être générée par l'énergie cinétique d'une masse en mouvement : celle du bras de l'opérateur. Dans le cas de gestes de percussion par exemple, l'énergie mécanique produit des phénomènes apériodiques ou quasi-périodiques. Pour le geste d'entretien, l'énergie fournie par l'opérateur se transforme en vibrations périodiques entretenues ; les sons produits sont animés continuellement par le geste : c'est le cas notamment des gestes de frottements d'archet, ou du souffle de l'opérateur dans un instrument à vent.

2) L'excitation peut agir sur un dispositif intermédiaire excitateur (marteau du piano, archet...) ou plus directement sur la structure vibrante elle-même (cordes pincées, choc sur une membrane...). Il existe toute une variété de mécanismes excitateurs qui ont évolué au cours du temps en fonction de la technologie et de la pensée musicale du moment. Le clavicorde, par exemple, était préféré au piano-forte au XVIII<sup>ème</sup> siècle, car la simplicité de la mécanique mettait l'interprète en contact direct avec la corde, permettant de mieux lier l'expression au toucher, et même d'exécuter un certain vibrato.

3) L'opérateur peut être muni ou non d'un objet pour exciter l'instrument : en ce qui concerne les gestes manuels, ou pourra distinguer ceux où la main entre directement en contact avec l'objet, et ceux qui se servent d'un instrument pour la prolonger.

### **III.2.2. Le geste de modification**

Il a pour rôle de modifier dynamiquement la structure de l'instrument, soit en modulant certains paramètres mécaniques (c'est le cas lorsque l'on module la longueur ou la tension d'une corde), soit en modifiant la constitution microscopique ou macroscopique de l'instrument. On peut imaginer, en effet, modifier en cours de jeu, le matériau du corps sonore ( modulation de paramètres constitutifs du timbre ), ou modifier la forme de l'instrument , ou bien encore la registration de l'instrument.

Généralement, ce type de geste nécessite une énergie moindre par rapport à celle mise en jeu dans le geste d'excitation. De plus, la relation entre l'action exercée sur l'instrument et la transformation qui en résulte est assez arbitraire. On peut imaginer en effet utiliser divers moyens pour moduler dynamiquement certains paramètres de l'instrument : manettes, potentiomètres, ..., occasionnant des gestes de modification de nature morphologique très différents.

### **III.2.3. Réflexions sur le geste " de sélection" ...**

Jusqu'à présent, nous avons été tentés d'introduire une autre catégorie de gestes, auxquels on ne peut associer de qualité énergétique propre. Nous les avons appelés gestes de désignation ou gestes de sélection. On peut citer comme exemple le geste qui consiste à sélectionner une touche ou un ensemble de touches sur un clavier de piano, une ou plusieurs cordes sur une harpe, etc. Ce type de geste se manifeste notamment sur des instruments multiples, ou poly-instruments, constitués de plusieurs dispositifs distincts. En fait, la notion de sélection est tout à fait abstraite. Elle traduit une forme d'opération symbolique, qui se caractérise par une information binaire du type : sélectionné/non sélectionné. Le geste physique correspondant à cette opération de désignation a généralement une détermination continue, mais le déroulement temporel de l'action ainsi que la nature de l'objet manipulé n'ont pas forcément d'incidence sur le résultat.

Dans le contexte de la simulation instrumentale, cette information de sélection, au niveau du geste capté, se manifeste de manière essentiellement variable et dépend étroitement de la nature du transducteur gestuel. Tout d'abord, elle peut ne pas être codée. C'est le cas notamment lorsque l'on ne détecte pas le contact avec l'instrument. Elle peut être représentée par un événement tout ou rien, qui traduit directement la sélection ou la non sélection. Enfin, l'opération abstraite de désignation

peut se traduire par une information continue ; dans ce cas, c'est le résultat d'un geste qui va modifier dynamiquement les liens mécaniques internes au simulateur.

L'élaboration par simulation d'objets mécaniques contrôlables par des actions gestuelles suppose la construction d'une topologie sur l'espace de simulation et la définition des modes d'interconnexion entre les objets simulés et l'environnement physique. Différents choix sont possibles dans la construction de l'instrument global, notamment en ce qui concerne la frontière qui sépare l'univers de simulation de l'univers réel, car simuler mécaniquement des objets mécaniques suppose la projection possible de tout ou partie de la réalité physique dans le simulateur. Les modes d'intervention de l'opérateur sur l'instrument dépendent donc à la fois :

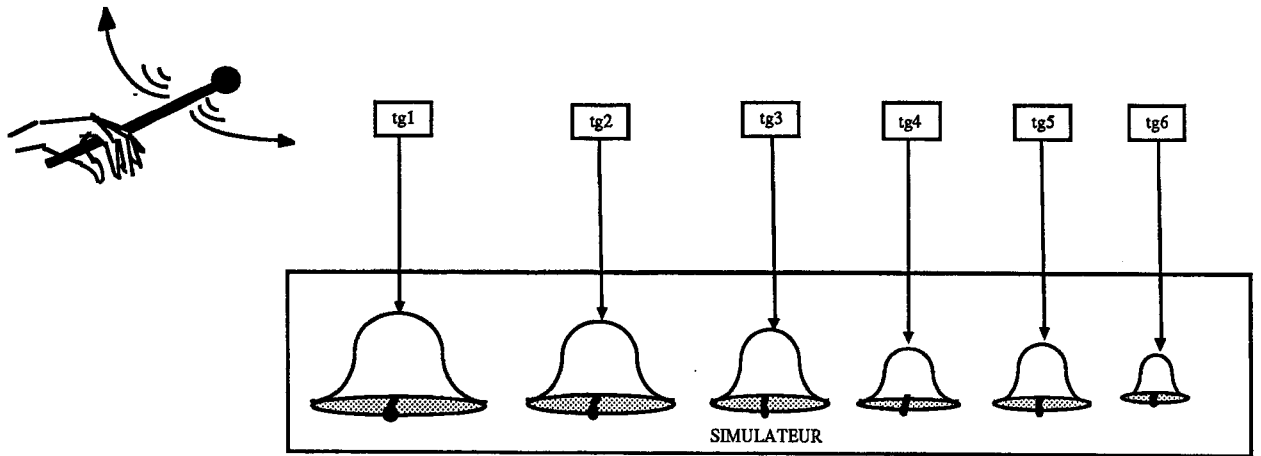
- de la répartition des objets simulés dans l'espace topologique.
- de la nature physique et de la répartition spatiale des transducteurs.
- enfin, des modes de couplage entre l'espace physique et l'espace simulé.

Prenons un exemple : Soit  $n$  objets mécaniques distincts que l'on désire simuler :  $n$  corps vibrants (gongs par exemple) dont on définit la structure microscopique et la disposition géométrique dans l'espace de simulation. La connexion de ces objets à l'environnement matériel peut être envisagée de deux manières différentes :

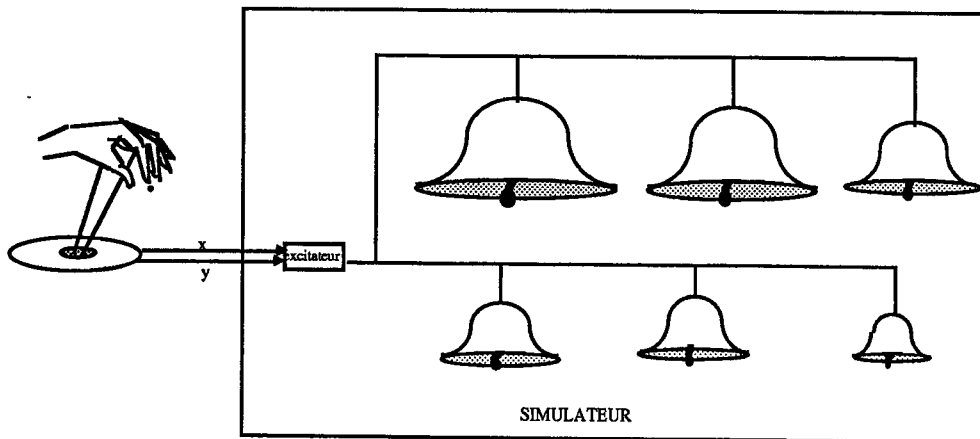
\* Soit en utilisant  $n$  transducteurs distincts reliés respectivement aux  $n$  objets vibrants (figure 1.7.a) ; dans ce cas, le geste de l'instrumentiste consistera à désigner ou sélectionner dans l'espace physique un ou plusieurs dispositifs élémentaires distincts et à exciter ces objets .

\* Soit en utilisant un transducteur unique, le déplacement de ce transducteur correspondant au déplacement dans l'espace des objets simulés (figure 1.7.b) ; ici, c'est le résultat du geste qui modifiera dynamiquement le couplage avec les corps vibrants. On peut dire, là aussi, que le geste se traduit par la sélection et l'excitation d'objets définis à l'intérieur du simulateur.

On remarque donc que si le geste de sélection correspond à des opérations mentales de désignation qui présentent des similitudes dans les deux cas de figure, la nature morphologique du geste est profondément altérée. On peut unifier et généraliser cette notion de sélection en parlant de geste de modification, responsable de la déformation globale du dipôle mécanique instrumentiste-instrument (modification au cours du temps des liens mécaniques caractérisant l'interaction mécanique homme/instrument, ou des liens associant des objets mécaniques internes au simulateur).



(a) sélection dans l'espace physique des transducteurs



(b) sélection dans l'espace topologique simulé

Figure 1.7 : Différentes manifestations du geste de sélection

### III.2.4. Conclusion

Les gestes instrumentaux se classent en deux catégories qui se différencient par leur effet sur l'instrument :

\_ les gestes d'excitation, pour lesquels la nature de l'objet manipulé influe sur l'action motrice effectuée ,

\_ les gestes de modification, pour lesquels la nature de l'objet manipulé est moins déterminante.

La notion de geste de modification, plus générale que celle mentionnée précédemment, regroupe les aspects suivants :

- \* modification de la structure quantitative de l'instrument (variation des paramètres).

- \* modification de la structure microscopique de l'instrument (modification de la forme des équations d'état, ...)

- \* modification de la structure macroscopique globale du dipôle mécanique : modification des liens physiques entre les différents objets qui interagissent, que ce soit les liens définis entre l'opérateur humain et les transducteurs, ou les liens internes au simulateur.

#### Remarque

L'établissement de ces catégories de gestes a donné lieu à une autre forme de classification, concernant les dispositifs physiques jouant le rôle d'interface entre le geste et le système de simulation, et que nous avons appelés transducteurs gestuels. Nous distinguons essentiellement deux types de transducteurs : ceux qui correspondent aux gestes nécessitant une perception tactile de l'objet manipulé, et ceux pour lesquels cette perception est moins nécessaire. Dans le premier cas, nous utiliserons des transducteurs gestuels à retour d'effort, qui permettent de restituer le comportement de l'objet, et qui mettent en jeu un couple de dispositifs capteurs-moteurs assurant la bilatéralité de la liaison mécanique avec l'opérateur. Dans le second cas, nous nous contenterons de transducteurs non rétroactifs qui permettent d'établir une liaison unilatérale avec l'opérateur, par l'utilisation de capteurs.

Ayant défini le cadre de notre étude sur le geste instrumental, nous allons tenter de préciser comment s'articulent les différentes fonctions du geste instrumental par rapport à l'outil de création.

## **IV. Utilisation du geste instrumental par rapport à l'outil de création**

On se place désormais dans le contexte informatique, et en particulier dans le système de représentation de situations instrumentales CORDIS-ANIMA.

Ce sont donc les signaux captés qui constituent en quelque sorte une projection du geste instrumental dans la machine, et que l'on va considérer comme représentatifs du geste instrumental. A partir de là, il est envisageable d'analyser les différentes utilisations du geste instrumental dans la machine, et la façon dont elles s'articulent par rapport aux fonctions de l'outil de création.

### **IV.1. Les utilisations du geste instrumental**

Nous nous intéressons à quatre utilisations du geste instrumental capté, qui vont conduire à la détermination de critères de codage étroitement imbriqués, s'influençant mutuellement :

1. L'utilisation directe en vue du contrôle de la synthèse en temps réel,
2. La mémorisation,
2. Les représentations,
3. Les traitements.

#### **IV.1.1. Utilisation directe du geste pour la synthèse sonore**

L'idée de base consiste à simuler au moyen de l'ordinateur les mécanismes traduisant le comportement physique de l'instrument, et à contrôler dynamiquement par le geste les déformations de ces mécanismes pour produire une énergie vibratoire. La situation "instrumentale" met donc en jeu une activation dynamique des processus producteurs responsables de la génération des phénomènes sonores ; cette activation se manifeste par l'interaction mutuelle de deux systèmes mécaniques : l'opérateur et l'instrument.

On peut séparer les deux causes inhérentes à ces mécanismes de production :

- \* Le geste d'une part, caractérisé par des actions physiques d'un opérateur sur un objet manipulable,
- \* L'instrument d'autre part, dont le comportement est totalement déterminé à partir de la connaissance des lois physiques qui le gouvernent.

Le phénomène sonore porte la trace de ces deux causes.

Nous nous sommes penchés plus particulièrement sur l'une de ces causes, à savoir l'action gestuelle, en essayant le plus possible de faire abstraction de l'autre.

#### IV.1.2. Mémorisation du geste

C'est l'un des intérêts ici de l'ordinateur, de maintenir une trace de l'activité de l'instrumentiste, que ce soit à un niveau statique ( configuration instrumentale), ou dynamique (information traduisant l'évolution temporelle du système homme/instrument ). De la même manière que l'enregistrement des sons sur bande magnétique a ouvert des horizons nouveaux pour la création musicale, la mémorisation du geste permet d'avoir une emprise sur les phénomènes gestuels en cause lors d'expériences instrumentales. La capture de l'information gestuelle reste donc un passage obligé pour l'outil de création.

#### IV.1.3. Représentations du geste

Une des caractéristiques de l'homme est sa faculté de se rappeler à posteriori l'acte gestuel accompli. On parlera de représentation interne du geste, susceptible d'évoquer la relation gestuelle, ou de lui substituer des images verbales, mentales, ou motrices. Le mot représentation retrouve ici son sens primitif :

*"présenter à nouveau..."*

Mettant en relation le concept et l'image, c'est une opération symbolique, qui rejoint l'idée du "signifiant et du signifié". L'image gestuelle n'est pas le geste matériel, purement physique, mais plutôt l'empreinte psychique de ce geste. Elle correspond à la fois à la représentation que nous en donne le témoignage de nos sens (représentation sensorielle) , et à l'image musculaire et articulaire de l'action motrice elle-même. Le concept est une notion plus abstraite, qui peut traduire l'idée, l'intention gestuelle, et que l'on associe à des images verbales.

L'opération de représentation inhérente à l'outil de création tente, à partir des évènements gestuels captés, d'extraire des éléments significatifs, c'est-à-dire porteurs de sens, et exprimant la pensée, l'*intention* de l'instrumentiste. On orientera alors l'étude vers l'élaboration d'espaces de représentation, qui établissent un lien entre les traitements de représentation relatifs au geste codé (dans l'espace d'analyse), et l'image interne du geste tel que le produit et le perçoit le manipulateur. En ce sens, l'ordinateur offre des facilités pour présenter automatiquement les données du geste, et ceci sous de nouveaux aspects : on pourra notamment modifier la détermination temporelle du geste (représentation atemporelle), ou bien trouver de nouveaux aspects sensoriels. ( par exemple représentation visuelle de la sensation tactilo-kinesthésique)



#### **IV.1.4. Transformations du geste**

La réalité objective du geste peut être structurée en formes, elles-mêmes constitutives d'un langage gestuel organisé, articulé. La mise en évidence de structures évolutives pertinentes dans le message gestuel conduit à la détermination "d'objets-geste" auxquels on associe des "objets-instrument".

Le compositeur, disposant d'un univers d'objets gestes ou instruments qui appartiennent au monde physique, peut tenter de s'échapper de cette référence en appliquant des transformations qui permettent de passer continûment à d'autres systèmes de représentation.

Ces traitements doivent permettre notamment le passage entre le monde concret et le monde artificiel, et doivent favoriser des manipulations permettant d'explorer de façon pertinente ces deux mondes, de les rapprocher, ou au contraire de les éloigner. Il est envisageable d'appliquer ces traitements :

- . soit aux objets geste,
- . soit aux objets instrument.
- . soit à une combinaison de gestes et d'instruments.

Les manipulations d'instruments impliquent de pouvoir construire des objets mécaniques susceptibles de produire du son, et de modeler, de sculpter, de transformer tout ou partie de l'objet manipulable. Ceci suppose l'élaboration d'un langage de spécification d'objet, qui autorise la construction d'un instrument, soit à partir de la désignation des fonctions mécaniques décrivant son comportement dynamique, soit à partir de la combinaison de processus élémentaires modulaires.

On peut définir de la même manière des opérations de transformation du geste, pourvu que le geste transformé soit toujours homogène à un geste, et qu'il soit applicable à l'instrument ou à une classe d'instruments donnés. De manière générale, l'important sera de déterminer des critères de transformation du geste permettant de conserver une certaine cohérence de l'ensemble geste/instrument.

### **IV.2. Geste et outil de création**

#### **IV.2.1. Les deux modes de fonctionnement de l'outil de création**

L'outil de création doit permettre un dialogue entre l'idée musicale abstraite et la concrétisation de cette idée qui se traduit par une extériorisation vers le monde sensible, mettant en cause trois "canaux" sensoriels : l'audition, le sens tactilo-kinesthésique, la vision.

Dans l'activité de création, coexistent en permanence deux modes particuliers de ce dialogue : le "mode compositionnel" et le "mode instrumental".

*- "Le mode compositionnel correspond avant tout à une activité dégagée des contingences matérielles, et en particulier temporelles propres à l'objet final, c'est-à-dire au phénomène sonore. Il se développe en "temps différé"..."*

*- "Le mode instrumental est son dual dans la mesure où, par essence, il se développe dans le temps du phénomène final, en "temps réel" donc et en prise directe (gestuelle entre autres) avec les processus producteurs. "*

[Cadoz 87]

#### **IV.2.2. Utilisations du geste instrumental par rapport à l'outil de création**

On peut répartir les fonctions du geste instrumental par rapport à l'outil de création de la manière suivante :

\*Pour le mode instrumental en temps réel, trois processus entrent en jeu :

- le contrôle en temps réel des mécanismes instrumentaux
- le stockage, en vue de traitements et de représentations ultérieures
- les représentations en temps réel

En effet, il est envisageable de produire, en temps réel, une représentation des traces du comportement du dipôle mécanique global soumis à des déformations. On se placera, notamment, dans l'espace d'analyse du signal acoustique ou du signal gestuel, ou bien dans des espaces intermédiaires. On ne spécifie pas la nature de ces représentations, mais les impératifs temps réel nous contraignent à opter pour des représentations mettant en oeuvre des traitements peu sophistiqués.

Il est à noter que l'on peut substituer, au geste de l'instrumentiste, un geste préalablement enregistré, et ayant subi d'éventuelles transformations.

\*Pour le fonctionnement en temps différé, on considère essentiellement deux processus :

- les représentations
- les traitements

D'autre part, les deux modes d'utilisation de l'outil de création , instrumental et compositionnel, doivent pouvoir s'articuler de manière suffisamment souple pour que l'instrumentiste ait la possibilité :

- d'une part d'explorer les champs gestuels et/ou instrumentaux, d'opérer des transformations et de les représenter dans des conditions libérées des contraintes temporelles.
- d'autre part, d'expérimenter à tout moment la configuration obtenue.

La figure 1.8 résume les principales fonctions du geste par rapport à l'outil de création et les modalités d'utilisation de cet outil :

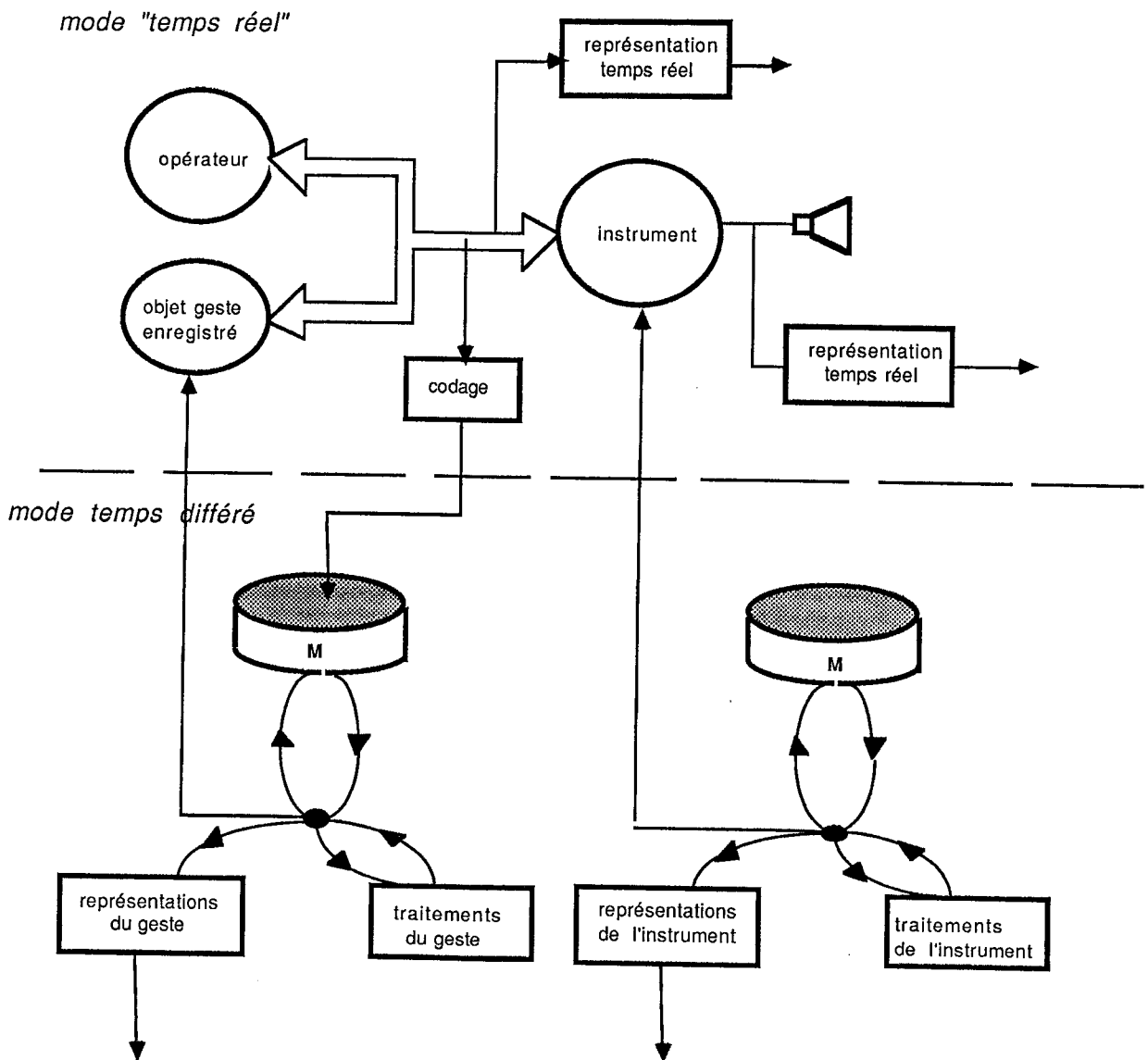


Figure 1.8 : Utilisations du geste instrumental par rapport à l'O.C.

## Chapitre 2

# Conception et réalisation d'un système de codage et de prétraitement des signaux gestuels

### I. Codage du geste instrumental

Notre principal objectif a été d'élaborer, en amont du système modulaire de synthèse de mécanismes instrumentaux, un système dédié à la capture et au traitement du geste, que l'on désigne sous le terme de "frontal gestuel", et qui s'intègre complètement au noyau de base de l'outil de création. Nous avons été amenés dans ce contexte à définir un codage des données du geste, qui réalise un compromis entre des contraintes liées :

- d'une part aux impératifs "temps réel" qui concernent essentiellement les utilisations du geste par rapport à la simulation d'objets instrumentaux.
- d'autre part aux impératifs "temps différé", liés aux fonctions de représentation et de traitement d'objets-geste plus élaborés, caractérisant une certaine forme d'activité conceptuelle du compositeur-interprète.

Le problème étant ainsi posé dans toute sa généralité, nous avons cependant privilégié, dans un premier temps, les aspects fonctionnels propres au contexte temps réel afin de parvenir assez rapidement à un système opérationnel, comportant les composantes essentielles de l'outil de création. Cette étude comporte deux parties distinctes. La première concerne la structuration des données gestuelles suivant des critères liés à l'ergonomie et à la morphologie des transducteurs gestuels. La seconde est une proposition de codage dynamique des signaux du geste dans le contexte de la simulation en temps réel.

## **I.1. Organisation spatiale et fonctionnelle des données gestuelles**

Lorsque l'instrumentiste construit une scène instrumentale, il met en relation l'espace physique de son geste à celui de l'instrument simulé. Il est par conséquent amené à projeter au niveau de l'univers simulé des éléments de structuration liés à la cohérence du couplage physique geste/instrument, qui obéissent à la fois à des spécificités technologiques des transducteurs et à des composantes significatives du jeu instrumental.

### **I.1.1. Construction de scènes instrumentales complexes**

L'outil informatique tel que nous le concevons doit permettre en premier lieu de simuler des objets, de telle façon que l'utilisateur puisse avoir avec eux une interaction sensorielle semblable à celle qu'il a avec les objets du monde physique réel. Cela suppose :

- \* d'utiliser des transducteurs de morphologie pertinente capables de convertir des grandeurs physiques captées traduisant l'action motrice en signaux numériques, et réciproquement.
- \* d'exécuter des algorithmes de simulation adaptés au modèle de l'objet souhaité.

Il doit aussi être modulaire, car il s'agit de concevoir et de réaliser des scènes instrumentales complexes, de manière essentiellement variable, ce qui implique la possibilité de construire un instrument à partir de l'assemblage d'objets ou de fonctions mécaniques élémentaires, de modéliser et d'expérimenter cet instrument à chaque étape de sa construction. Pour cela, on est amené à définir au niveau du processeur de simulation un langage de spécification d'objet permettant de combiner des modules fonctionnels élémentaires.

Pour aller plus loin, le principe de modularité de l'univers de simulation peut se généraliser à l'univers physique du geste. Ainsi, la possibilité d'un contrôle programmable de l'objet simulé à partir du geste de l'opérateur suppose une combinatoire variable entre l'ensemble des voies gestuelles d'entrée et de sortie, et l'ensemble des "points d'accès" à la structure de l'objet simulé.

Dans le contexte discret de l'ordinateur, cela peut se représenter par la figure 2.1, si l'on idéalise la situation réelle en supposant que l'on accède par la mesure aux deux variables duales force et position au niveau de chacune des liaisons entre l'opérateur et l'instrument.

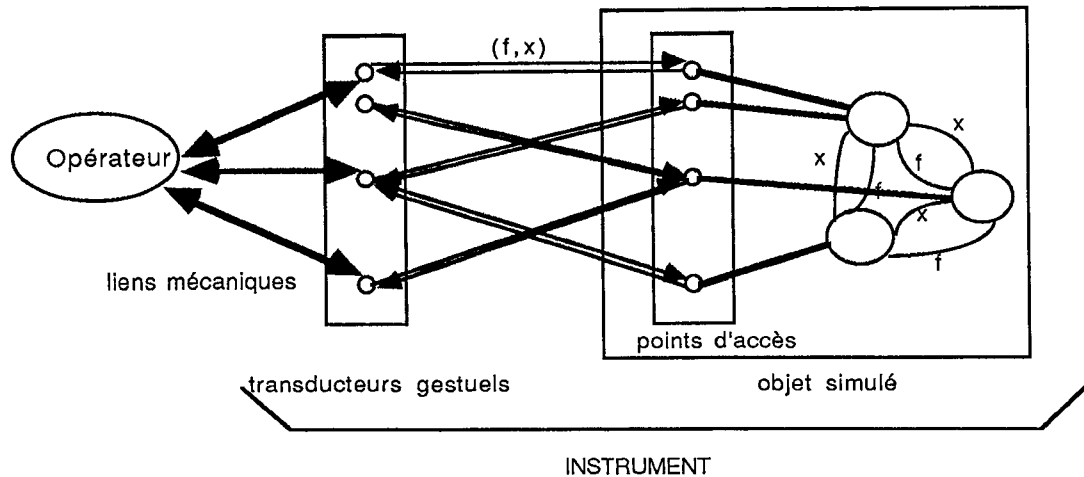


Figure 2.1. Représentation d'un instrument

Il est immédiat qu'une conception modulaire de l'instrument nécessite l'homogénéisation de l'information gestuelle véhiculée par les signaux circulant entre les transducteurs gestuels et le processeur de simulation. Or, ces signaux sont étroitement liés à la nature morphologique et technologique des transducteurs gestuels utilisés, et par conséquent sont essentiellement différents, à la fois au niveau de leur forme physique (dynamique, bande passante, ...), de leur pré-codage (format, normes de communication,...) et au niveau de leur fonction par rapport à l'instrument simulé. Pour assurer une certaine cohérence de l'action gestuelle par rapport à l'objet manipulé, on a donc été amené à définir une logique de structuration spatiale et fonctionnelle des signaux gestuels.

### **I.1.2. Organisation des signaux gestuels suivant des contraintes liées à la cohérence du couplage geste/instrument**

#### I.1.2.1 Partitionnement des voies gestuelles en canaux

Nous venons de voir que n'importe quel signal gestuel ne pouvait être associé à n'importe quel point d'entrée de la structure instrumentale simulée. La logique combinatoire dépend en effet d'un certain nombre de facteurs indissociables des dispositifs physiques utilisés :

\* Les signaux peuvent véhiculer des informations de nature différente : force, vitesse, déplacement, pression, détection de contact, etc.

\* La dynamique des signaux captés est variable : on peut citer les cas extrêmes comme le déplacement à effort négligeable, ou l'émission d'effort avec déplacement quasi-nul ( geste d'effleurement).

\* Le transducteur peut être caractérisé par sa dimension, c'est-à-dire le nombre de degrés de liberté que sa mécanique lui confère ; ainsi, à un transducteur de dimension  $n$  on associera  $n$  signaux gestuels corrélés.

\* Enfin, la nature rétroactive ou non du transducteur particularise la communication entre l'opérateur et l'instrument, et impose de gérer ( ou non ) des processus d'échange bilatéraux.

Nous avons introduit la notion de "canal gestuel" pour désigner une entité à la fois logique et matérielle assurant le lien entre un transducteur physique élémentaire et un point d'entrée de la structure instrument.

Cette définition de canal est inhérente à la notion de multi-dimensionnalité du transducteur gestuel. Elle tient compte d'une logique de regroupement des voies gestuelles liée à la morphologie du transducteur. Cette unité physique de bas niveau constitue un tout, indissociable. Ainsi, lorsque l'opérateur exerce un geste sur un dispositif de dimension  $n$ , il a une action et une perception globale de son geste, et il n'est pas forcément capable de séparer les contributions respectives de chacun des signaux traduisant la manifestation de son geste. Par exemple, l'information délivrée par un joystick à deux degrés de liberté est bidimensionnelle. Elle est constituée d'une suite de couples  $(x,y)$  ; cette représentation plane est propre au transducteur gestuel, mais ne représente pas forcément de manière pertinente l'action gestuelle elle-même : on aurait pu envisager l'utilisation des coordonnées polaires  $(r,\theta)$  à la place des coordonnées cartésiennes  $(x,y)$ .

De plus, le canal constitue une "unité fonctionnelle" par rapport à l'objet simulé. Pour que le geste conserve une cohérence par rapport à l'instrument, il faut s'assurer qu'il relie un transducteur gestuel multidimensionnel à un point d'accès de l'objet simulé de même dimension. Par exemple, un geste s'exerçant sur un dispositif de dimension trois n'a de sens que si cette action traduit la faculté d'agir sur un objet dans les trois dimensions de l'espace topologique simulé. En outre, il est nécessaire de prendre en compte la fonction du geste relativement à l'instrument. En particulier, dans CORDIS [Cadoz 79], les gestes d'excitation, comme les gestes de modification paramétrique ou structurelle, ont leur spécificité propre dans le langage instrumental, et donnent lieu à des modes d'interaction différents, et à des traitements algorithmiques distincts.

La correspondance entre l'espace physique et l'espace de simulation est présentée à la figure 2.2 :

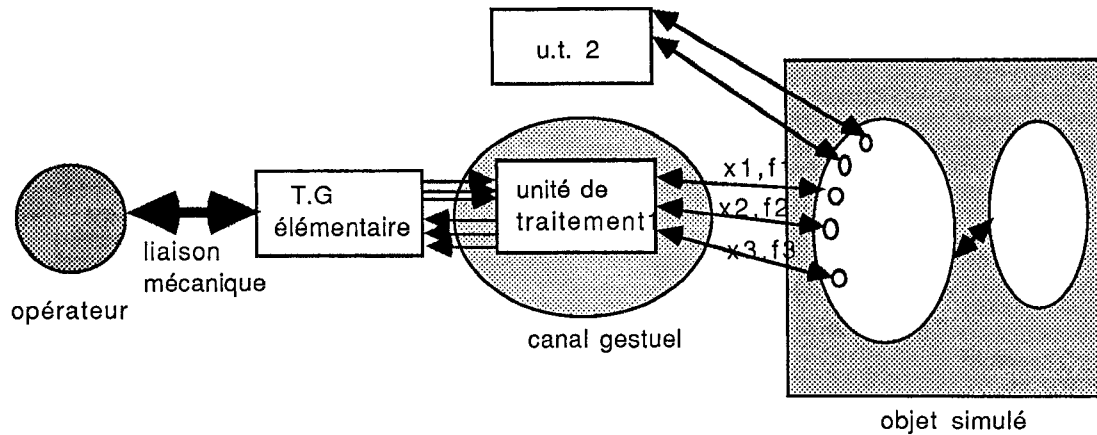


Figure 2.2 : Canal gestuel

Une "unité de traitement" constitue un module de traitement logiciel destiné à opérer la transformation des signaux réels captés en signaux véhiculant des informations de même type et obéissant à un même standard de communication.

#### I.1.2.2. Organisation des canaux gestuels en "unités gestuelles"

Un deuxième niveau d'organisation spatiale des voies gestuelles peut s'avérer intéressant pour représenter et traiter des séquences de geste instrumental. En particulier, l'instrumentiste, qui dispose d'un environnement complexe de transducteurs, peut envisager regrouper certains éléments constitutifs de cet univers concret, suivant une logique qui lui est propre.

Une classification intuitive des transducteurs gestuels pourrait s'appuyer sur certaines caractéristiques de leur technologie (clavier, archets ...). Cependant, ce type de classement n'est pas forcément significatif du jeu instrumental, dans la mesure où celui-ci peut être très varié et met en jeu une liberté d'expression qui tend vers des intentions esthétiques dépassant les possibilités technologiques d'une lutherie donnée.



Ainsi, l'opérateur, disposant d'un certain nombre de canaux gestuels, sera à même d'en regrouper plusieurs et de les associer pour former une entité qui réalise une unité par rapport à l'intention gestuelle et à la dynamique de son jeu.

Par exemple, un dispositif multiple tel un clavier, permettant de contrôler une collection d'instruments élémentaires (pas nécessairement identiques), peut être considéré par l'opérateur comme un tout sur lequel s'exercera un geste modulé, articulé, organisé ; il sera intéressant ensuite de faire apparaître dans des séquences enregistrées des éléments structurés de haut niveau constituant des fragments de langage gestuel.

La possibilité de modifier en temps réel la nature du jeu instrumental est envisageable ; cela suppose une modification dynamique de la structuration des canaux en unités gestuelles, en fonction d'instructions spécifiées par l'instrumentiste ( en particulier instructions gestuelles).

Finalement, pour une scène instrumentale donnée, le geste sera appréhendé à travers :

- 1) la structuration des voies gestuelles d'entrée en canaux et unités gestuelles, spécifiée préalablement à l'expérience instrumentale.
- 2) la spécification de la nature fonctionnelle du geste par rapport à l'instrument ( geste d'excitation ou de modification) .
- 3) l'évolution des signaux d'entrée et de sortie gestuelle, captés au moyen de dispositifs placés au niveau de chaque liaison entre l'opérateur et l'instrument.

## **I.2. Solution proposée pour le codage dynamique des signaux gestuels**

### **I.2.1. Définition du problème**

Nous allons analyser plus précisément dans cette partie le codage dynamique des signaux gestuels, en tenant compte des différentes contraintes imposées par les fonctions de base de l'outil de création, à savoir :

- l'utilisation directe pour la simulation en temps réel,
- les représentations et les traitements en temps différé.

Nous avons mis l'accent essentiellement sur les aspects fonctionnels "temps réel" de l'outil. Ce choix se justifie, dans la mesure où l'on s'intéresse à une situation instrumentale complexe, et modulaire. Dans ce contexte, on dispose pour appréhender le geste de la mesure de N signaux

gestuels d'entrée et de P signaux de sortie. Les fonctions temps réel du frontal gestuel peuvent être représentées de la manière suivante (figure 2.3) :

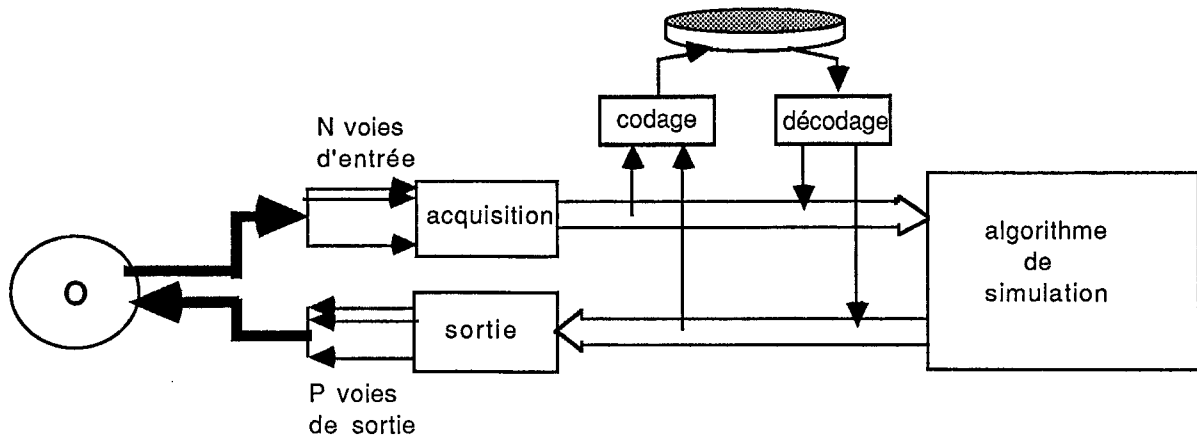


Figure 2.3. Fonctions temps réel du frontal gestuel

Les opérations de codage (et de décodage) des signaux du geste s'intègrent au dispositif global de simulation en temps réel d'objets instrumentaux. Par conséquent, nous sommes amenés à envisager des traitements peu coûteux en temps de calcul, afin de ne pas limiter les performances des algorithmes de simulation.

## I.2.2. Critères de codage du geste

### I.2.2.1. Exigences par rapport à la simulation

Les algorithmes de simulation doivent répondre à un certain nombre d'exigences, d'une part la modularité et d'autre part la qualité et l'efficacité de simulation ; ces exigences se répercutent directement sur les critères de codage du geste.

#### \* *modularité*

Nous avons vu précédemment que la fonction de modularité de l'outil informatique supposait l'**homogénéisation** de l'information gestuelle. En effet, il s'agit de pouvoir substituer à des gestes servant à contrôler le comportement de l'instrument d'autres gestes provenant de séquences gestuelles préalablement enregistrées. Cela entraîne la recherche d'un format identique des données

et d'un même standard de communication au niveau de l'algorithme de simulation, mais aussi la détermination d'un langage codifié et unifié permettant de prendre en compte :

- d'une part les informations de structuration des voies gestuelles : voies, canaux, unités gestuelles.
- d'autre part leur spécificité fonctionnelle : geste d'excitation ou de modification.

*\* qualité*

Pour que l'opérateur ait l'impression de manipuler un objet et de contrôler assez finement ses manifestations acoustiques, il est nécessaire que la simulation mécanique soit de bonne qualité. Cette contrainte a une incidence directe sur les processus de codage et de décodage. En effet, il faut que le geste restitué après relecture de séquences codées puis enregistrées contienne l'information suffisante pour que la qualité de simulation demeure acceptable. Si l'on dispose d'un critère mesurant l'erreur entre les gestes réels et les gestes "re-synthétisés", alors l'exigence de qualité s'exprime par une condition sur le critère relativement à un seuil de tolérance fixé à l'avance.

*\* efficacité*

La troisième caractéristique de l'outil de synthèse est l'efficacité de simulation. Cela implique une rapidité de calcul et de traitement suffisante au niveau des processus de codage et de décodage qui s'insèrent dans la boucle de simulation, de manière à ne pas limiter les possibilités de la simulation proprement dite.

#### I.2.2.2. Stockage du geste

La fonction de stockage du geste est essentielle pour permettre les opérations de simulation à partir de séquences gestuelles enregistrées, mais également pour autoriser les opérations en temps différé de représentation et de traitement du geste. Il est par conséquent indispensable de mémoriser l'information gestuelle en temps réel, en tenant compte de critères de compactage optimal des données. En effet, si l'on désire enregistrer une séquence gestuelle relativement longue, résultant de l'action de l'opérateur sur des dispositifs multiples et variés, il devient nécessaire d'économiser la place mémoire et d'éliminer l'information redondante.

#### I.2.2.3. Représentations et traitements

Les utilisations du geste en temps différé supposent la capture et le codage préalables de séquences gestuelles lors de la simulation en temps réel d'objets instrumentaux.

En théorie, le codage doit réaliser un compromis entre les fonctions propres au mode instrumental et au mode compositionnel. En effet, pour pouvoir manipuler le geste, on doit disposer de

représentations permettant d'extérioriser l'action produite ; cette extériorisation doit être significative, à la fois pour traduire le geste et les transformations opérées sur lui.

De plus, ces manipulations successives appliquées au geste, doivent être alternées avec des expérimentations conduisant à la production d'objets sonores. Il découle de cela la nécessité de passer d'un mode à l'autre relativement facilement, grâce à des transformations simples et cohérentes du geste.

En pratique, nous avons mis l'accent sur l'un des deux modes, à savoir le mode instrumental et tenu compte essentiellement de critères techniques liés aux contraintes temps réel de l'outil de synthèse.

### **I.2.3. Solution adoptée**

Si l'on cherche, en phase de resynthèse, à restituer le plus exactement possible le geste enregistré, une manière simple de résoudre le problème du codage est de stocker intégralement toutes les valeurs des signaux gestuels échantillonnés à chaque pas temporel.

Une telle méthode présente deux inconvénients. D'une part la place mémoire sur disque étant limitée, il est impossible d'enregistrer des séquences de geste assez longues. D'autre part, cette solution n'offre aucun compromis entre le mode instrumental et le mode compositionnel.

La solution adoptée doit viser à réduire le plus possible l'information stockée, et rendre compte de l'organisation spatiale et temporelle des données du geste.

#### **I.2.3.1 Réduction de l'information gestuelle stockée**

Pour aller dans le sens d'une compression de données, nous avons opté pour l'enregistrement des signaux gestuels d'entrée uniquement, compte tenu du fait que la connaissance de ces signaux et de l'algorithme de simulation déterminent totalement les signaux de sortie.

Nous supposons par la suite, que l'échantillonnage des signaux gestuels est tel qu'il respecte la condition de Shannon pour le signal ayant la plus grande bande passante.

Enfin, nous supposons que la capture et le codage du geste s'appliquent à N signaux numériques représentés de façon uniforme. (N élevé)

### a. Codage évènementiel (MIDI)

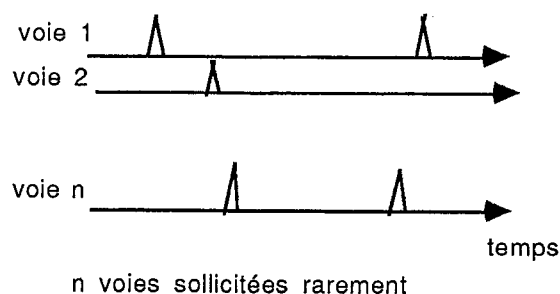
Nous nous sommes tout d'abord intéressés au standard de communication MIDI (Musical Instrument Digital Interface), qui s'est développé ces dernières années, et semble avoir été adopté unanimement au niveau des machines de synthèse sonore commandées par le geste. Midi permet un codage "évènementiel" du geste, c'est-à-dire que seuls les évènements "nouveaux" qui se produisent sont codés puis transmis. Cela présente un intérêt pour des dispositifs à grande multiplicité où l'action élémentaire est simple du point de vue de sa forme temporelle, ce qui peut être le cas dans un dispositif comme un clavier de synthétiseur.

Il est inutile alors de coder systématiquement "l'état" de toutes les touches du clavier à chaque instant (enfoncée ou relâchée) . Une solution consiste à effectuer un codage "asynchrone", qui spécifie les évènements au fur et à mesure où ils se produisent, par une succession de messages indiquant :

- l'adresse de la touche sollicitée par le geste,
- la vitesse d'attaque au moment du contact avec le doigt,
- la pression exercée sur le clavier sensible au-delà d'un certain seuil.

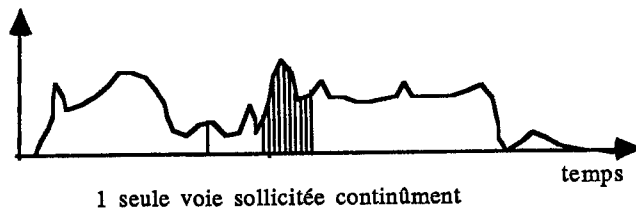
Chaque enregistrement est alors constitué d'un ensemble de mots d'état et de mots de données, le mot d'état permettant d'identifier la nature du mot à suivre.

Il est évident que plus le nombre de canaux physiques véhiculant de l'information gestuelle est grand, et plus ce type de codage se justifie :



Par contre, l'utilisation d'un dispositif gestuel unique, comportant un seul canal, et manipulé continûment par un opérateur ne nécessite pas cette communication par messages. Un codage

synchrone dans ce cas peut s'avérer beaucoup plus performant : on transmet à chaque instant la valeur de l'échantillon mesuré.



Il s'agit dans le cas général de proposer un codage qui réalise un compromis entre ces deux catégories de situation. Dans ce qui va suivre, nous privilégierons la première situation, en supposant l'existence de dispositifs à grande multiplicité, sollicités de manière occasionnelle et ponctuelle par le geste.

#### b. Codage par échantillonnage adaptatif

Le codage par "échantillonnage adaptatif" consiste à ne coder l'information sur chacune des voies que lorsqu'il y a effectivement des variations de l'amplitude du signal. A tout instant, nous évaluons un critère de variabilité qui est par exemple une fonction de l'échantillon courant et des derniers échantillons enregistrés, et nous ne stockons sa valeur que si une condition sur ce critère est vérifiée. Cette condition peut être par exemple la comparaison de la différence des échantillons à un seuil ajusté à l'avance :

$$((x_n - x_{n-j}) > \delta) \text{ et } ((x_m - x_{n-j}) < \delta, \text{ tel que } n > m \geq n-j)$$

Le codage se traduit, lorsque la non-stationnarité est détectée, par le stockage de la valeur de l'échantillon et de la durée séparant l'enregistrement courant du précédent enregistrement. Cette durée se mesure en nombre de périodes d'échantillonnage. Cela revient, de manière locale, à détecter des phases de stationnarité des signaux (figure 2.4) :

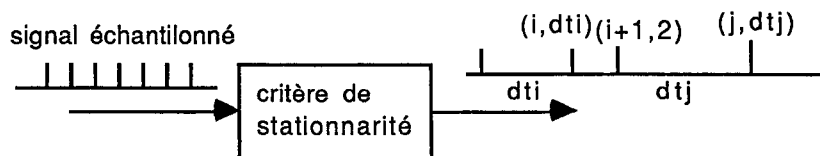


Figure 2.4 : Codage par échantillonnage adaptatif

Pour un ensemble de voies gestuelles d'entrée, la forme codée consiste alors en un signal échantillonné à fréquence variable, chaque échantillon étant caractérisé par un vecteur de paramètres et une durée ; cette durée caractérise en fait l'intervalle de temps séparant deux évènements successifs survenant sur n'importe lesquelles des voies. On parlera "d'échantillonnage adaptatif", l'adaptation se référant au suivi de variation des paramètres à très court-terme, ne spécifiant rien quant à la nature de l'évolution de ces paramètres (évolution prédictible, aléatoire,...) .

### I.2.3.2 Prise en compte de l'organisation spatio-temporelle des données gestuelles

L'organisation statique des signaux d'entrée gestuels peut se décrire suivant une structure hiérarchisée à trois niveaux. Au niveau le plus bas, indépendamment de tout arrangement et considération de structure, on dispose de N voies gestuelles captées. Une première partition de cet ensemble aboutit à la constitution de canaux. Un second niveau de catégorisation organise ces canaux en unités gestuelles.

Nous avons opté pour un codage événementiel, en ne tenant compte des phénomènes que lorsqu'une non-stationnarité est détectée. Pour optimiser le compactage des données, ce principe de codage par variation a été étendu aux entités canaux et voies.

En fait, si l'on représente l'organisation spatiale des données gestuelles sous la forme d'un arbre à trois niveaux, le codage revient à parcourir entièrement l'arbre à chaque pas temporel, en allant de feuille à feuille et en enregistrant, à chaque détection de variation, le dernier chemin parcouru.

Le principe du codage peut s'exprimer au moyen de la syntaxe suivante, traduisant la forme d'un "événement gestuel" élémentaire :

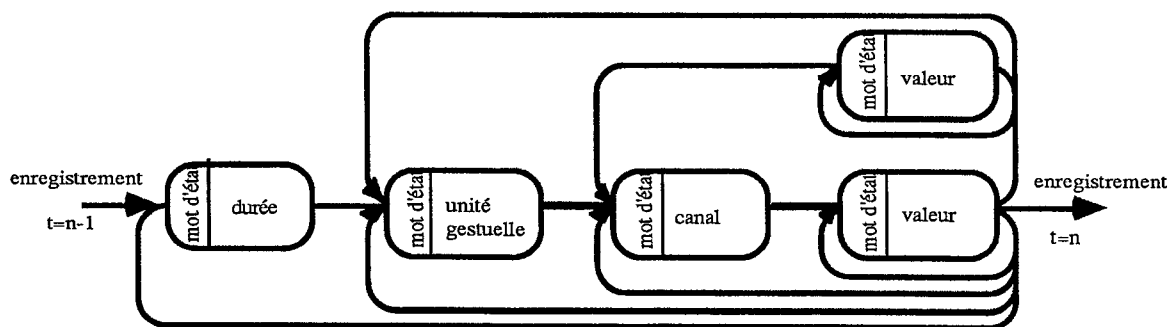
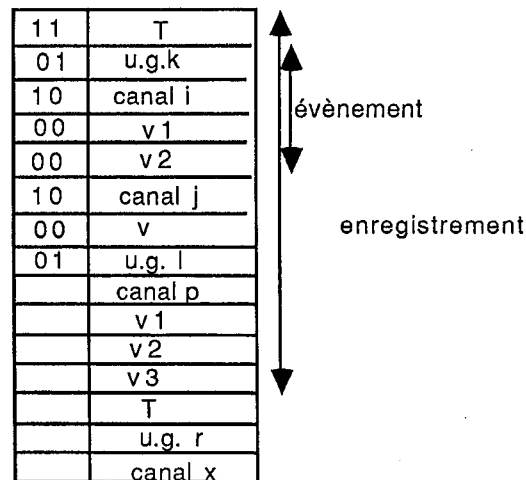


Figure 2.5. Structure syntaxique des messages gestuels

Nous appelons événement gestuel une suite de mots constituée d'un ensemble d'identificateurs, précédés chacun d'un mot d'état, qui est en fait un indicateur de la nature de l'information qui vient immédiatement après. Un événement constitue une trace élémentaire du parcours de l'arbre. Une durée est suivie obligatoirement d'un identificateur d'unité gestuelle, lui-même suivi d'un identificateur de canal et de l'ensemble des voies du canal. Une valeur (échantillon de signal), peut précéder n'importe quel autre type d'identificateur.

Un enregistrement gestuel est constitué d'un ensemble d'événements gestuels élémentaires dont l'organisation obéit à la structure syntaxique précédente. Il s'exprime par une information de durée et un vecteur de longueur variable en fonction de la complexité du geste exercé.

exemple :





## II. Etude de la synchronisation

Le frontal gestuel faisant partie d'un ensemble matériel plus général (cf. annexe : structure matérielle du frontal gestuel), il a été nécessaire dans un premier temps d'étudier un système global de communication permettant de synchroniser l'ensemble des tâches s'exécutant en parallèle sur les différents processeurs. Après avoir présenté succinctement le problème général de la synchronisation, je m'attacherai essentiellement à développer un protocole de communication possible entre les différents processeurs du frontal gestuel et du simulateur. Cela met en cause un ensemble minimum de quatre processeurs :

- les deux processeurs d'une unité de traitement gestuel
- le coupleur intelligent 68000
- le processeur vectoriel spécialisé ( AP120)

La réalisation du logiciel de base de la synchronisation a été effectuée au niveau des deux processeurs de l'unité de traitement gestuel, en accord avec les modalités de fonctionnement de ce protocole de communication.

### II.1. Synchronisation de l'ensemble du système

#### II.1.1. Retards dus aux chaînes de conversion et aux temps de traitements de la simulation (\*)

Dans le contexte de la simulation mécanique d'objets instrumentaux, il faut tenir compte de l'interaction du simulateur -constitué d'un transducteur gestuel rétroactif et d'un algorithme de simulation- avec le monde extérieur. Notamment, pour une liaison mécanique bilatérale avec l'opérateur humain, il est possible d'établir une relation entre les grandeurs physiques externes force et position :

$$\mathcal{F} \left( x, f, \frac{\partial x}{\partial t}, \frac{\partial f}{\partial t}, \dots, \frac{\partial^n x}{\partial t^n}, \frac{\partial^n f}{\partial t^n} \right) = 0$$

Ce problème peut se traduire sous une forme échantillonnée, si l'on pose :

$$X_n = x(nT)$$

$$F_n = f(nT) \quad , T \text{ étant la période d'échantillonnage.}$$

\* cf. rapport interne J.L.Florens 1986

Les chaînes de conversion analogiques numériques, et numériques analogiques, ainsi que les traitements numériques, introduisent un retard d'au moins une période d'échantillonnage. Cela se traduit, pour un transducteur à entrée force, sortie position (ce qui est le cas actuellement pour le transducteur gestuel à retour d'effort réalisé au laboratoire), par des relations entre les grandeurs mécaniques externes  $X$  et  $F$ , et les grandeurs mécaniques internes au simulateur  $\Xi$  et  $\phi$ , de la forme:

$$\Xi_n = X_n \quad \text{ou} \quad \Xi_{n-1} = X_n$$

$$\Phi_n = F_{n-1} \quad \Phi_n = F_n$$

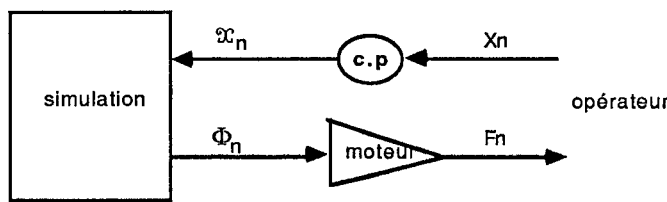


Figure 2.6 : Relation entre grandeurs physiques et simulées

### II.1.2. Synchronisation des signaux assurant la liaison avec l'extérieur

Le lien entre le simulateur et le monde physique est réalisé au moyen des signaux du geste (à double sens), et des signaux de l'onde sonore produite. Le contrôle d'un objet simulé à partir de signaux gestuels échantillonnés implique l'existence d'une source de synchronisation externe, qui fixe la fréquence d'échantillonnage, celle-ci dépendant de la bande passante des phénomènes gestuels. De la même manière, la production de phénomènes sonores cohérents avec l'évolution dynamique du comportement des deux systèmes couplés homme/instrument implique la sortie des échantillons du signal acoustique à taux régulier.

Ces contraintes nous astreignent à utiliser des dispositifs de synchronisation rigoureux aux deux extrémités de la "boucle de simulation" :

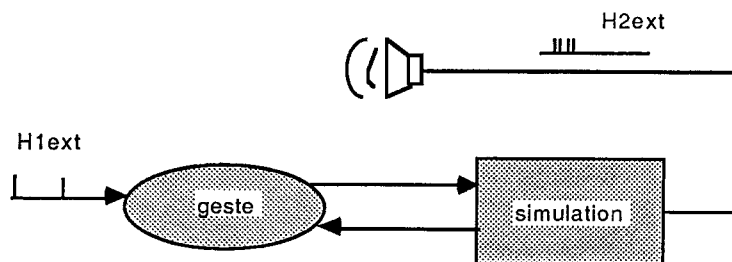


Figure 2.7 : Synchronisation aux extrémités

En effet, des fluctuations de la fréquence d'échantillonnage des signaux geste ou son conduisent à une modulation de phase de ces signaux :

\* Si les signaux du geste sont soumis à des fluctuations aléatoires de fréquence d'échantillonnage, on observe une altération sensible et non contrôlable du comportement du dipôle geste/instrument (les fluctuations pouvant être corrélées aux temps de traitement des processus de simulation). Les sons produits dans ce cas subissent des distorsions non acceptables.

\* De même, si les sons générés à partir de la simulation ne sont pas synchronisés sur une horloge suffisamment stable à fréquence correspondant à la bande passante des phénomènes acoustiques (de l'ordre de 20 kHz), on observe également des distorsions audibles.

### **II.1.3. Conservation du flux de données**

En premier lieu, il s'avère nécessaire de synchroniser les deux horloges externes entre elles.

En effet, si cette condition n'est pas vérifiée, il se produit une dérive des mécanismes de

synchronisation, ce qui entraîne la non-conservation du flux de données. Les phénomènes sonores ne présentant pas les mêmes caractéristiques de bande passante, il convient alors d'utiliser des fréquences d'échantillonnage multiples.

En second lieu, la prise en compte des retards inhérents aux processus de simulation implique pour assurer la conservation du flux de données le maintien d'un temps de retard constant. Celui-ci s'exprime, pour plus de facilité, par un nombre entier de périodes d'échantillonnage. En fait, les contraintes imposées au niveau des traitements numériques ne sont pas très strictes. Les temps de traitement peuvent fluctuer, pourvu que le retard reste le même et soit le plus faible possible. Ainsi, pour conserver une certaine souplesse dans le fonctionnement, il est souhaitable de placer des mécanismes de file d'attente, ou fifos, en divers points critiques de la boucle de simulation. Ces fifos permettent d'absorber les variations locales des temps de traitement.

### **II.1.4. Critères perceptifs**

Un deuxième niveau de contraintes imposé par le temps réel concerne la sensibilité temporelle de discrimination "perceptive" qui caractérise l'opérateur humain. En effet, le temps de réponse de l'outil de synthèse sonore doit être tel que le décalage entre les actions émises par l'opérateur et les perceptions multi-sensorielles qui en résultent ne soit pas perceptible.

- Pour la perception geste/son, le seuil de discrimination est évalué à environ 10 ms.
- Pour la perception geste/geste, il est approximativement de 100 ms.

De manière générale, ces contraintes sensorielles sont moins exigeantes que les contraintes mentionnées précédemment concernant la qualité de simulation (ces dernières peuvent être des contraintes de stabilité liées à des mécanismes d'asservissement).

## **II.2. Multiprocessus au niveau du frontal gestuel**

### **II.2.1. Introduction**

Il s'agit de gérer un système multiprocessus engendré par la cohabitation de plusieurs processeurs travaillant en parallèle. Pour réaliser un système logiciel mettant en jeu des activités concurrentes, on doit faire appel à des mécanismes de synchronisation, de signalisation et d'exclusion mutuelle gérés de manière "hardware" ou "software". La synchronisation permet d'assurer le déroulement des tâches les unes par rapport aux autres; la signalisation est un moyen qui permet à une tâche d'attendre qu'une condition soit satisfaite, et à une autre tâche, évaluant cette condition, d'émettre un signal lorsqu'elle est réalisée. La fonction d'exclusion mutuelle consiste à assurer que les ressources non partageables ne soient accessibles que par une tâche à la fois.

### **II.2.2. Affectation des tâches concourantes à des processeurs particuliers**

La plupart des fonctions temps réel du frontal gestuel peuvent être attribuées à l'un ou l'autre des processeurs d'une unité de traitement gestuel.

Le CPU1 se consacre plus spécifiquement à l'acquisition et à la sortie des données gestuelles de et vers des dispositifs externes.

Le CPU2, disposant d'une unité arithmétique de calcul flottant, est particulièrement adapté à des calculs numériques propres à la simulation; il pourra notamment prendre en charge la fonction de filtrage inter-échantillonnage. Il peut être intéressant de plus de lui confier des traitements spécifiques qui permettent d'optimiser à court terme la boucle action/retour gestuel.

En ce qui concerne les transferts de données s'effectuant entre les processeurs du frontal gestuel, ils peuvent être pris en charge indifféremment par l'un ou l'autre des processeurs. En fait, cela dépend à la fois de la charge de chacun d'eux, et des moyens dont ils disposent pour transférer ces données (existence d'interfaces DMA ...). Ces transferts consistent en :

\* des transferts de données gestuelles entre le CPU1 et le CPU2 via leur mémoire commune. Le CPU2 étant susceptible de réaliser des tâches nécessitant un coût de calcul élevé, on peut envisager de le décharger d'opérations de ce genre.

\* des transferts de données résidentes dans la mémoire globale vers le processeur vectoriel AP120, et vice-versa. Pour cela, on dispose d'une interface intelligente, comportant un processeur 68000 (CPU3), et permettant d'assurer :

- des transferts DMA entre le CPU3 et l'AP120,
- des transferts à haute vitesse entre le CPU3 et la mémoire globale, via le bus VME.

### **II.2.3. Gestion de la communication entre processeurs et représentation de la synchronisation**

#### **II.2.3.1. Communication entre processeurs**

Celle-ci s'effectue principalement au moyen de mémoires partageables. Au niveau du frontal gestuel, il existe des mémoires globales, accessibles simultanément par le bus VME, ou par les bus internes de certains processeurs. Deux problèmes se posent alors :

\* Le premier concerne les conflits d'accès à des zones mémoire communes. Ces conflits sont gérés automatiquement, par des dispositifs d'arbitrage, assurant l'exclusion mutuelle de manière hardware.

\* Le second concerne l'ordonnancement des accès aux mémoires partageables. Ce problème peut être réglé au moyen de mécanismes qui s'inspirent du modèle du "producteur et du consommateur": Un processus producteur est susceptible de déposer un message dans un tampon à destination d'une autre tâche, qui consommera cette information. Pour conserver le flux de données, il faut que le consommateur lise le tampon une seule fois, et uniquement lorsqu'un message vient d'être produit. D'autre part, le producteur ne peut déposer de message si le tampon est déjà plein.

Pour réaliser ces opérations dans de bonnes conditions, on peut faire appel à des outils software, tels que les sémaphores, qui utilisent des instructions indivisibles intégrant des cycles de lecture-modification-écriture.

Pour synchroniser des processus parallèles, le système peut gérer des interruptions hard, qui résultent d'actions externes, parfois non contrôlées, comme par exemple des impulsions de comptage. On distingue les interruptions transitant par des lignes spécifiques du bus VME, et les interruptions locales à chaque carte microprocesseur.

Remarques :

1) En fait, pour optimiser les performances globales du système, il est préférable d'éviter le plus possible ces opérations d'interruption, qui ajoutent un temps d'occupation cpu non négligeable.

2) Chaque demande d'accès au bus requiert un cycle d'arbitrage. Afin de minimiser les temps de transfert sur le bus, il est préférable d'effectuer des transferts par blocs, ce qui revient à dire que l'on a intérêt à attribuer la ressource bus à un processus de transfert jusqu'à la fin d'exécution de celui-ci, pour éviter l'occupation du bus par plusieurs processeurs en attente active.

II.2.3.2. Représentation de la synchronisation par réseaux de Pétri

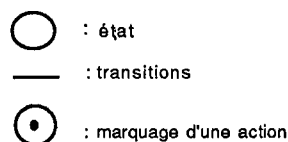
Les réseaux de Pétri permettent de représenter la synchronisation entre plusieurs tâches concurrentes. Cette représentation se décompose en états et en transitions.

Les états sont ceux que peut prendre une tâche. Dans notre cas, trois états sont possibles :

- \* non activable : la tâche ne sollicite pas l'accès à l'unité centrale ;
- \* active : la tâche est en cours d'exécution ;
- \* en attente : la tâche ne dispose pas de toutes ses ressources, et est placée dans une file d'attente ( attente pour accéder au bus VME par exemple).

Les transitions expriment les conditions de passage d'un état à un autre. Les transitions sont associées à des événements qui se matérialisent soit par des signaux externes (interruptions), soit par des opérations logicielles (primitives).

Le marquage d'une action exprime l'exécution de cette action.



On peut énumérer les différentes tâches actives coopérantes dans le logiciel du frontal gestuel et leur attribuer une place dans le réseau de Pétri. Une représentation possible de la synchronisation des tâches participant au logiciel de simulation d'objets mécaniques contrôlables par le geste est donnée à la figure 2.8.



## **III. Structure et implantation du logiciel**

### **III.1. Fonctions temps réel du frontal gestuel**

Les fonctions du frontal gestuel sont représentées à la figure 2.9, indépendamment de leur affectation à des processeurs particuliers.

Ce système prend en charge les fonctions temps réel s'intégrant au noyau logiciel de base de l'outil de création, à savoir :

- \* le traitement du geste en vue de son utilisation par des processus de simulation d'objets mécaniques producteurs de son,
- \* le traitement en vue de la mémorisation des gestes,
- \* les traitements de simulation lente.

Les processus mis en jeu dans la chaîne temps réel, et participant aux opérations de simulation proprement dites sont les suivants :

- \* acquisitions et restitutions des signaux d'entrées/sorties,
- \* transformation de format des échantillons gestuels en vue d'une homogénéisation des données échangées au niveau des processus de simulation communicants,
- \* filtrage inter-échantillonnage permettant d'adapter les traitements lents relatifs au geste , aux traitements rapides des processus producteurs de son,
- \* transferts de données de et vers le simulateur.

D'autres processus viennent s'insérer dans cette "boucle temps réel", qui ne participent pas directement à la chaîne productrice de son. Ce sont :

- \*d'une part les processus de codage et d'enregistrement du geste,
- \*d'autre part les processus de lecture et de décodage de séquences gestuelles stockées sur disque ; cela permet la substitution de gestes préalablement enregistrés à des gestes "vrais".

Pour assurer l'efficacité et la cohérence des processus coopérant au même objectif, on est amené à distribuer les diverses fonctions constituantes du logiciel du frontal gestuel sur des processeurs particuliers, conformément à des critères prenant en compte :

- \_ la spécificité des dispositifs physiques connectés,
- \_ les ressources partageables existantes,
- \_ les contraintes de synchronisation imposées par le temps réel.



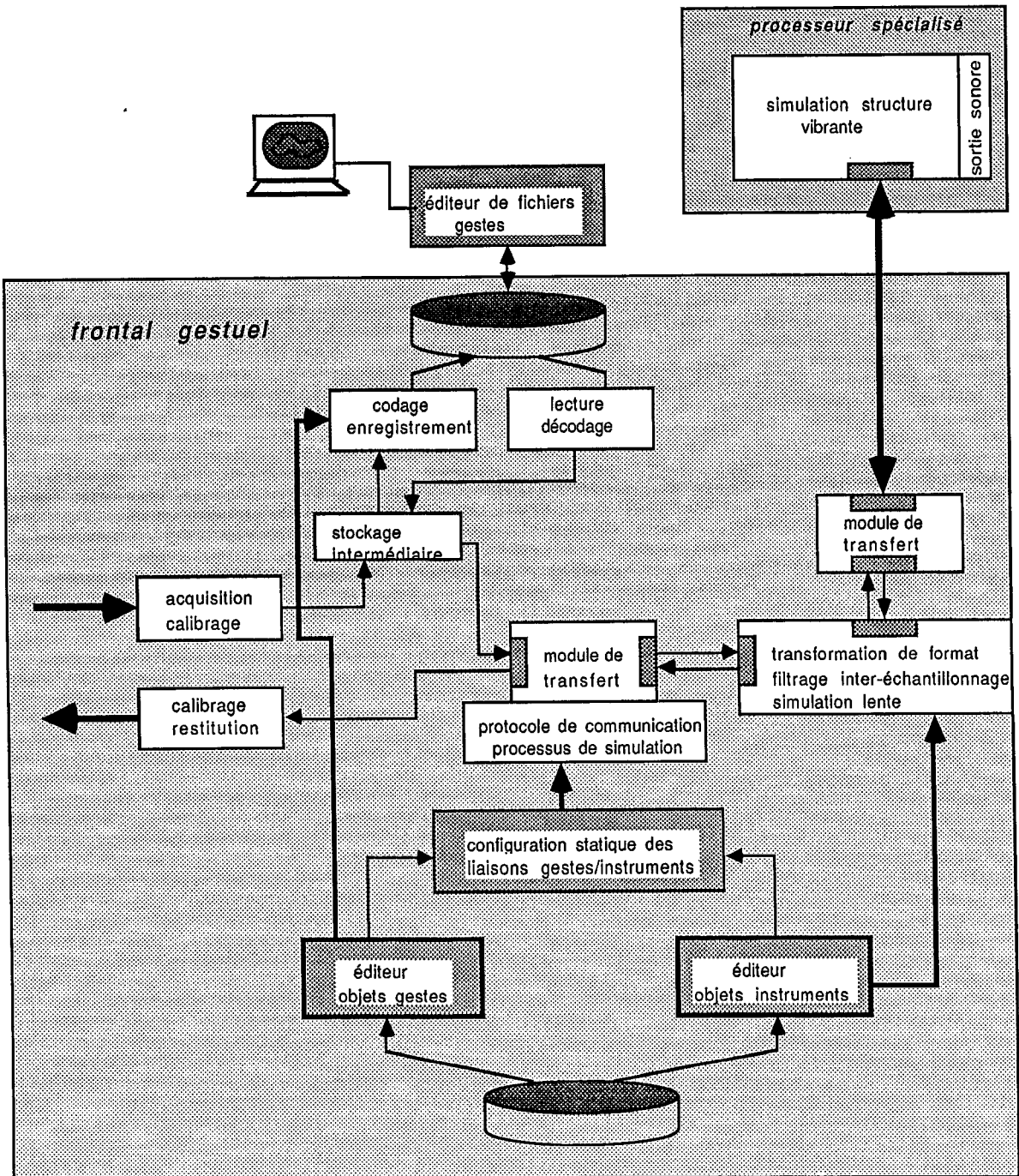


Figure 2.9 : Les fonctions du frontal gestuel

Le logiciel du frontal gestuel a été implanté sur les deux processeurs de l'unité de traitement gestuel. Le processeur d'E/S (cpu1), dédié au contrôle des entrées/sorties, doit assurer la coexistence de plusieurs tâches qui n'ont pas la même détermination temporelle, et qui se partagent des ressources locales, c'est-à-dire des ressources accessibles seulement par le processeur en question.

Le second processeur (cpu2) réalise des traitements de simulation lente.

Par ailleurs, c'est sur le cpu1 que s'exécutent les tâches élémentaires de dialogue avec l'utilisateur.

### **III.1.1. Répartition des tâches s'exécutant en temps réel**

#### **III.1.1.1. Système multi-tâches**

Pour faciliter la gestion multi-tâches, on dispose au niveau du processeur d'E/S d'un environnement logiciel adapté, ou système d'exploitation, permettant à des activités de se dérouler en parallèle, de se synchroniser et de communiquer les unes avec les autres. La solution au problème se compose d'un langage de programmation qui constitue l'outil de production du logiciel d'application, et d'un moniteur "temps réel" qui se charge de l'enchaînement des différentes tâches, de leur interaction mutuelle et de leur interaction avec le matériel. (cf. système temps réel multi-tâches PDOS).

Cependant, l'architecture d'un tel logiciel est influencée par des contraintes techniques liées aux temps de réponse à des requêtes système, et aux stratégies d'allocation des ressources.

En ce qui nous concerne, les temps impartis aux primitives système sont trop importants par rapport à nos objectifs temps réel. En effet, la gestion des différentes tâches est relativement lourde. Par exemple, le temps de commutation d'une tâche à une autre est de l'ordre de 40 ms, alors que le temps de conversion d'une voie analogique est de 4ms. Or si l'on adopte une fréquence d'échantillonnage élevée, par exemple 5000 Hz, il nous reste 200 ms pour effectuer tous les traitements. Par conséquent, l'utilisation du système d'exploitation multi-tâches s'avère être inadaptée aux besoins réels de notre application.

Néanmoins, nous avons simulé dans un premier temps le fonctionnement global de l'algorithme multitâches au moyen des primitives système, avec des contraintes moins strictes que celles imposées par la situation réelle (fréquence d'échantillonnage de 10 Hz). L'utilisation des primitives de synchronisation facilite en effet considérablement la tâche de programmation. D'autre part, la possibilité de découper le logiciel en modules indépendants permet de modifier ou d'ajouter des tâches sans que cela remette en question le reste du système. Ayant ainsi agencé de façon optimale un ensemble de tâches distinctes, nous avons ensuite réalisé nous-mêmes les modules de synchronisation, de coordination et de communication entre tâches.

### III.1.1.2. Définition et synchronisation des tâches

On peut découper le logiciel en un certain nombre de tâches qui coopèrent entre elles, comme le montre la figure 2.10.

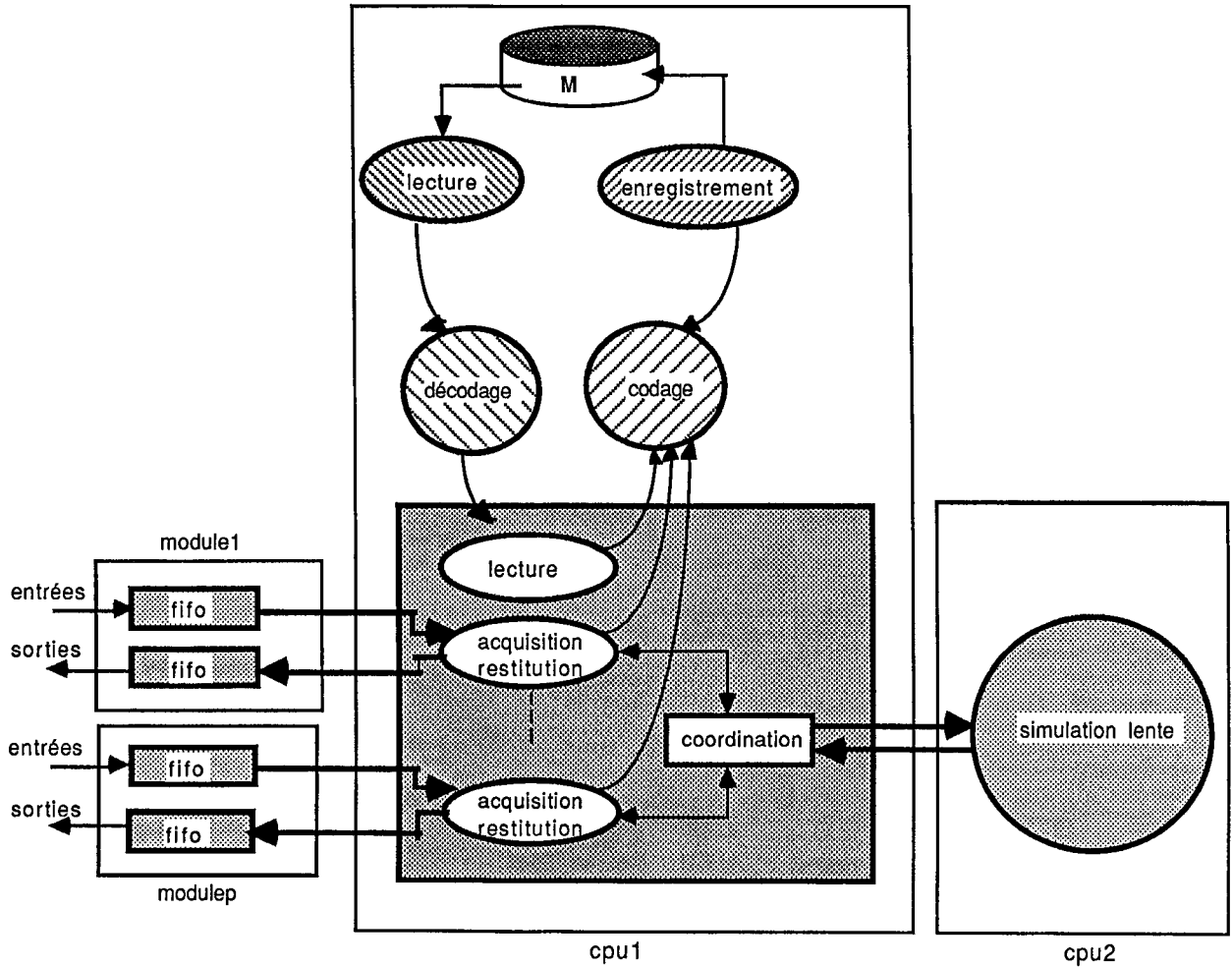


Figure 2.10 : Tâches logicielles

Pour garantir le fonctionnement de plusieurs processus synchrones ou asynchrones se partageant des données, sans risque de recouvrement de celles-ci, nous avons utilisé divers moyens matériels ou logiciels. Notamment, le logiciel comporte plusieurs niveaux d'organisation structurelle des données, qui tiennent compte d'un certain nombre de critères :

\* Le premier objectif visé est l'efficacité, étroitement lié aux performances temps réel du système. Cela concerne essentiellement les processus intervenant directement dans la "boucle de simulation".

\* Le second objectif tend à faciliter des opérations de plus haut niveau, telles que la structuration des voies gestuelles en canaux et unités gestuelles, nécessaires pour les fonctions en temps différé de représentation et de traitement d'objets structurés.

\* Enfin, il s'agit d'établir un pont entre le langage utilisateur et le langage du programmeur, plus proche des fonctionnalités du système.

#### a. Synchronisation des processus de gestion des E/S avec l'extérieur

Pour un module gestuel d'entrée, l'acquisition est réalisée au moyen d'un automate programmable qui scrute systématiquement toutes les voies d'entrée et les stocke dans un fifo. Un signal indiquant que le fifo est à moitié plein génère une interruption qui déclenche l'exécution d'une procédure synchrone, réalisant les fonctions suivantes :

\* l'acquisition et la restitution des échantillons du geste,

\* le calibrage des valeurs acquises et retournées en fonction des unités et des échelles spécifiées par l'utilisateur,

\* le transfert de et vers le simulateur, impliquant des opérations de transformation de format ; ces transferts s'effectuent par paquets.

\* Le stockage intermédiaire dans une zone mémoire partageable avec les processus de codage et de décodage.

Il est prévu l'extension de ce système à la gestion de plusieurs modules d'entrées et de sorties gestuelles. La tâche de gestion des E/S est alors décomposée en un ensemble de sous-tâches, chacune d'elles prenant en charge les opérations d'acquisition et de restitution propres au module qui leur est affecté.

De plus, il est possible de substituer à des entrées gestuelles mesurées à partir du geste, des entrées provenant de séquences pré-enregistrées. On s'arrange alors à ce que les données provenant du processus de décodage soient vues de la même manière que celles issues des fifos d'entrée.

Pour faciliter la communication avec les processus de simulation, on introduit une tâche supplémentaire assurant la coordination des transferts de et vers le simulateur.

#### b. Synchronisation du processus de simulation lente

Cette fonction est implantée sur le deuxième processeur de l'unité de traitement, et peut donc s'exécuter parallèlement aux autres processus. Elle se synchronise avec la tâche résidente dans le processeur d'E/S, et avec le module de transfert assurant la communication entre le frontal gestuel et le processeur de simulation.

Les données échangées avec d'une part le processeur d'E/S et d'autre part le processeur de simulation "rapide", nécessitent un stockage intermédiaire ; celui-ci est réalisé au moyen de la mémoire partageable.

c. Synchronisation du processus de gestion des E/S avec les processus de codage et de décodage.

Les processus de codage et de décodage sont caractérisés par leur nature asynchrone (du moins à court terme), due à la fluctuation aléatoire des signaux gestuels qui contiennent une quantité d'information essentiellement variable. Cette fluctuation conditionne la taille des enregistrements du geste. A cela s'ajoute la procédure de détection de stationnarité du signal, qui nécessite la prise en compte de plusieurs échantillons gestuels successifs.

Le problème de conflit d'accès aux ressources mémoires partagées entre le processus synchrone (boucle temps réel) et les deux autres asynchrones (codage et décodage) n'intervient pas si l'on utilise un mécanisme d'interruption, l'exclusion mutuelle étant assurée grâce à deux primitives de masquage et de démasquage des interruptions.

Pour empêcher les risques de recouvrement des données, dû au partage d'une même zone mémoire par trois processus asynchrones, nous avons mis en place un système de N fifos soft, associés respectivement aux N voies gestuelles d'entrée. La gestion de la synchronisation entre les trois processus est réalisée au moyen d'un système de sémaphores, et de pointeurs affectés aux différentes tâches.

d. Synchronisation du processus de codage (décodage) avec le processus d'enregistrement (lecture)

Pour optimiser le transfert sur disque, et donc minimiser le temps d'occupation cpu, on effectue cette opération sur un bloc de données dont la taille dépend du système de gestion de fichiers. Ce transfert est réalisé en mode DMA, ce qui signifie que l'exécution du transfert sur disque peut être parallélisée avec celle d'un des autres processus.

Afin de garantir la compatibilité d'accès à la mémoire partagée entre les processus de codage et d'enregistrement sur disque, un mécanisme de "double-buffer" est utilisé.

La synchronisation entre les processus de décodage et de lecture sur disque obéit au même principe.

### **III.1.2. Codage spatio-temporel des données du geste**

Il est intéressant de faire apparaître une structure hiérarchisée à trois niveaux qui rende compte, au niveau du codage, de la morphologie de l'instrument, et plus particulièrement des transducteurs. Pour cela, nous utilisons un arbre n-aire, dont les niveaux correspondent aux objets voies, canaux, et unités gestuelles (Fig. 2.17).

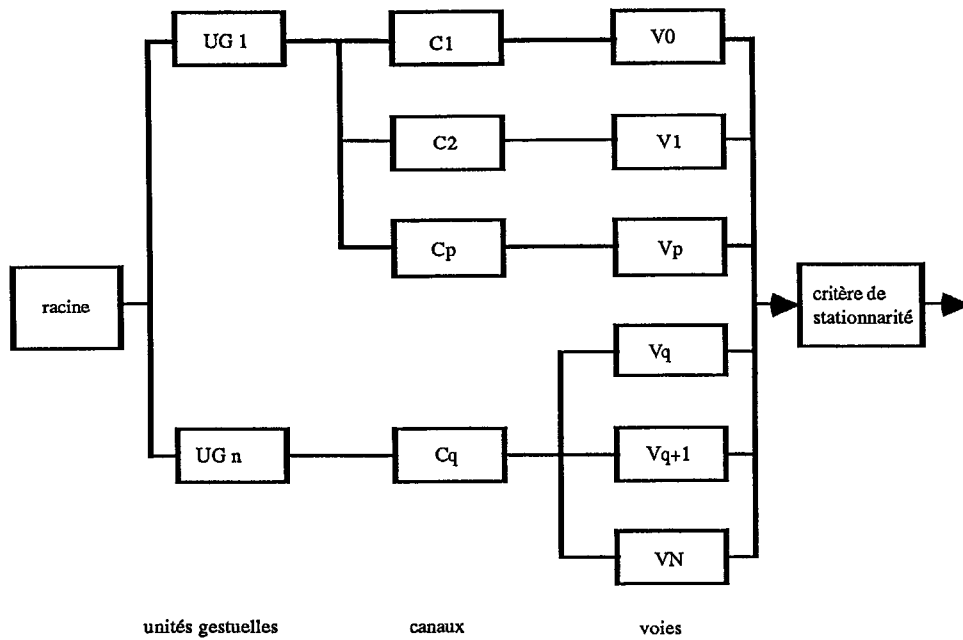


Figure 2.11 : Organisation hiérarchique des données du geste

La représentation de cette structure arborescente s'articule autour de la notion d'objets structurés constituant les noeuds de l'arbre. Chaque noeud se matérialise par un certain nombre de champs informationnels, spécifiant :

- l'identification du noeud (voie, canal, unité gestuelle, et numéro d'identificateur),
- les liens de parenté du noeud (pointeurs sur les objets structurés père et frère),
- s'il s'agit d'un objet voie, la fonction de détection de variation à effectuer (codage adaptatif),
- la nature fonctionnelle du canal par rapport à l'objet simulé (excitation, modification),
- la durée séparant le dernier enregistrement du même noeud.

Nous avons adopté une structure de données uniforme pour chacun des objets voie, canal ou unité gestuelle. Ainsi, parcourir l'arbre signifie appliquer successivement une même action élémentaire à chacun des noeuds de l'arbre.

L'arbre est parcouru :

- \* de manière ascendante par le processus d'acquisition et restitution (scrutation systématique des feuilles de l'arbre),
- \* de manière descendante par les procédures de codage et décodage.

L'intérêt de ce type de représentation est qu'il restitue directement l'information gestuelle codée à travers l'exploration de l'arbre. Le parcours adapté au problème de codage tel qu'il a été défini est le parcours préfixé.

Chaque noeud X de l'arbre est visité une fois et une seule par l'action visiter(X) ; on peut donner une version récursive du processus de parcours de la manière suivante :

```
préfixé(X)  
  visiter(X)  
  si il existe fils(X), alors préfixé(fils(X)) finsi  
  si il existe frère(X) alors préfixé(frère(X)) finsi  
fin
```

Pour améliorer les performances au niveau du temps d'exécution de cette tâche, nous avons été amenés à passer de la forme récursive à une forme itérative. A chaque pas d'échantillonnage, l'arbre est parcouru entièrement. Au cours du trajet descendant, nous gardons la trace des derniers noeuds visités. Si le critère de variation est détecté sur une "feuille" quelconque de l'arbre (voie), il suffit alors de lire l'histoire des noeuds mémorisés pour constituer un enregistrement gestuel au pas d'échantillonnage considéré.

## **III.2. Description interactive de l'instrument et des configurations de jeu**

### **III.2.1. Interactivité du frontal gestuel**

Ce niveau d'interactivité n'exploite pas des outils informatiques très sophistiqués, et ne prétend pas définir le dialogue qui s'établit entre l'utilisateur et l'instrument, pour décrire une scène instrumentale. La description de l'environnement de jeu est en quelque sorte intermédiaire entre une description d'objets de haut niveau, susceptibles d'être manipulés par l'utilisateur, et une représentation directement utilisable par les concepts de la modélisation (figure 2.12).

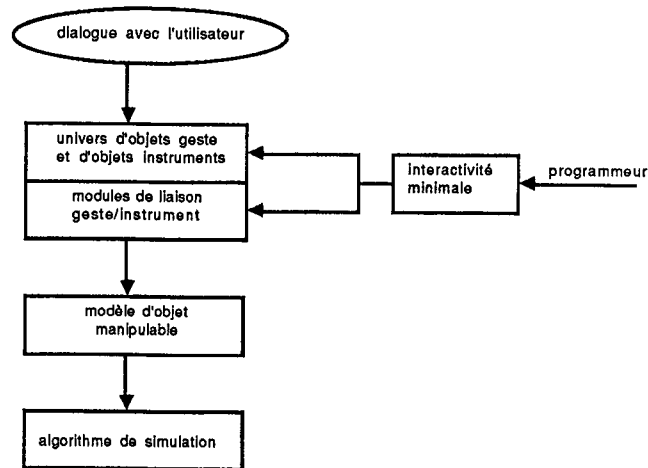


Figure 2.12 : Interactivité

Plusieurs situations peuvent se présenter, lors de la spécification d'une scène instrumentale (Fig.2.19) :

- (1) manipulation de l'objet par l'opérateur à l'aide de transducteurs gestuels,
- (2) substitution de séquences de gestes mémorisés à l'opérateur,
- (3) superposition des gestes exécutés par un instrumentiste, et de gestes enregistrés,
- (4) enfin, modification dynamique de gestes mémorisés par un geste réel.

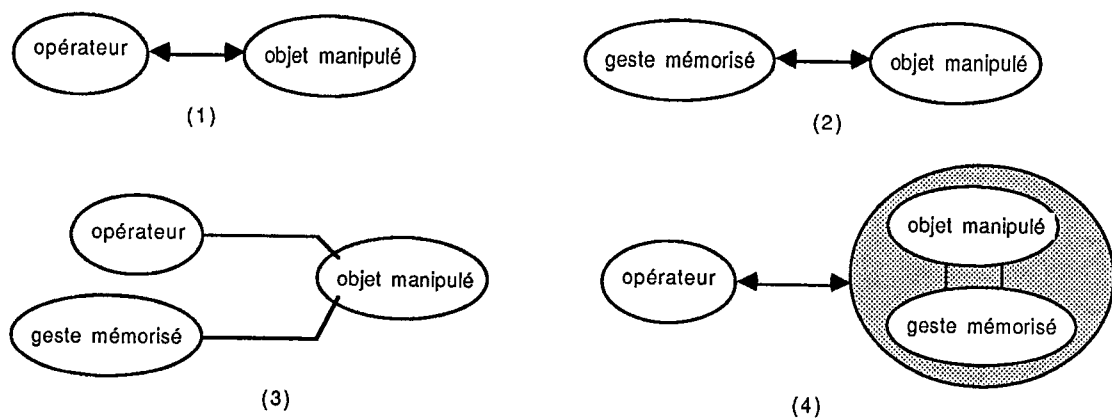


Figure 2.13 : Différentes situations instrumentales



Dans tous les cas de fonctionnement, on peut mettre en évidence un univers topologique d'objets instruments construits préalablement à l'expérience, qui sont couplés dynamiquement à un système mécanique constitué :

- soit par l'opérateur lui-même,
- soit par des "objets geste" mémorisés, c'est-à-dire des séquences enregistrées à partir de gestes réels.

Lorsque l'instrumentiste caractérise son univers instrumental, il définit :

- \* la constitution structurelle et paramétrique de l'objet manipulé,
- \* la configuration du couplage modèle de simulation/ geste.

La description statique de la scène instrumentale comporte trois niveaux :

1. Le premier établit un lien entre les voies physiques d'entrée et les entités informatiques qui leur correspondent, à savoir les objets structurés "canaux " ;
2. Le second configure statiquement les éléments de couplage entre les canaux gestuels et les points d'accès à l'objet simulé ;
3. Le troisième enfin autorise la structuration des canaux gestuels en unités gestuelles, suivant les intentions de jeu de l'instrumentiste.

### **III.2.2. Modes de fonctionnement des entrées**

L'utilisateur peut décrire une expérience instrumentale en spécifiant la nature des entrées gestuelles et leur mode de fonctionnement.

L'entité de plus bas niveau dont il dispose pour caractériser les gestes est l'objet canal.

Deux modes de fonctionnement des entrées sont possibles :

- le jeu direct, qui suppose la manipulation de l'objet par le geste d'un opérateur,
- le jeu lecture, qui permet de restituer des séquences gestuelles pré-enregistrées.

L'utilisateur peut préciser également s'il désire ou non mémoriser les gestes intervenant lors de l'expérience : mémorisation globale de tous ses gestes, ou mémorisation partielle de certains canaux ou unités gestuelles (figure 2.14 ).

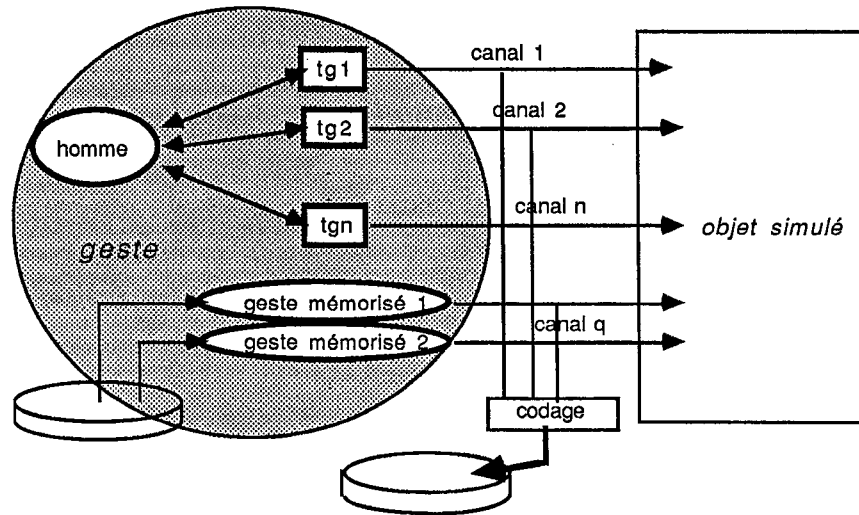


Figure 2.14 : Configurations des entrées geste

Dans une expérience instrumentale, il est possible de combiner ces différentes fonctions ; un canal quelconque peut être associé à un geste lu ou capté, il peut être ou non mémorisé. La configuration instrumentale ainsi définie est archivée dans une bibliothèque d'objets structurés, ou ensemble de "Transducteurs".

### III.2.3. Configuration statique du couplage geste/instrument

Il faudrait disposer à ce niveau d'un langage de spécification d'objets, permettant de construire des objets, de les modéliser, de les archiver. Cela ne rentre pas dans le cadre de cette étude. Cependant, nous avons adopté un langage de description statique des objets instrumentaux. Nous avons défini des ensembles de "points d'entrée" aux processus de simulation, qui regroupent des éléments de liaison permettant d'établir le couplage avec l'objet instrumental simulé. Il devient alors possible de construire un instrument, à partir de la spécification des "Transducteurs et des "points d'entrée" aux processus de simulation, et des liens permettant de les associer. Nous avons ainsi constitué une bibliothèque "d'Instruments".

### III.2.4. Structuration des entrées gestuelles

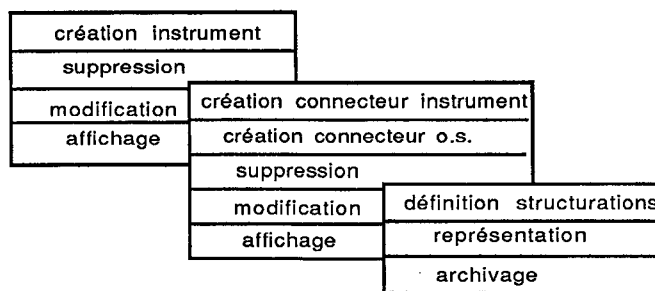
Il reste à partitionner l'ensemble des voies d'entrée en canaux et unités gestuelles, suivant une logique liée d'une part à la morphologie des transducteurs (canaux), et d'autre part à la nature dynamique du jeu de l'opérateur (unités gestuelles).

A ce niveau, nous définissons des sous-ensembles de canaux, correspondant à la sélection par l'opérateur d'un ou plusieurs modes de jeu pour un instrument donné.

### III.2.5. Dialogue avec l'utilisateur

Le dialogue avec l'utilisateur est réduit au minimum. Il est réalisé à partir de l'utilisation d'un ensemble de menus permettant de sélectionner une succession d'opérations.

Les différents niveaux traduisent la structure hiérarchisée mise en oeuvre dans la construction d'une scène instrumentale :



### III.2.6. Conclusion

Le logiciel du Frontal Gestuel a été implanté au niveau des deux processeurs de l'unité de traitement gestuel. Toutes les fonctions intervenant directement dans la "boucle de simulation en temps réel", incluant la gestion des entrée/sorties (acquisitions, restitutions, transferts, formatages), mais aussi les fonctions de codage et de décodage sont actuellement réunies sur le processeur d'E/S (cpu1).

Pour l'instant, ce système fonctionne de manière autonome, car la connexion avec le processeur vectoriel (Floating Point System) n'est pas encore achevée. Par conséquent, pour pouvoir tester les modalités de fonctionnement général du Frontal Gestuel, nous avons été amenés à mettre en place un système minimal de simulation d'objets instrumentaux.

Nous avons donc implanté au niveau du second processeur de l'unité de traitement des algorithmes permettant de simuler des objets mécaniques pouvant aller de simples raideurs, viscosités, à des simulations de butées, cordes pincées. Des principes de simulation ad-hoc développés par Sirot [Sirot 85], visant à l'exploitation de petites machines (en l'occurrence LSI 11-23) ont été utilisés à cet effet.

L'ensemble se comporte de manière satisfaisante et a été testé dans toutes les configurations de jeu définies précédemment.

## IV. Editeur de geste

### IV.1. Introduction

Dès lors que les actions gestuelles ont pu être mémorisées objectivement, il est envisageable d'aborder l'étude des représentations et des traitements du geste. Cela soulève la question de "l'écriture" musicale à partir des origines causales du son. Parmi les différentes formes de représentations possibles, nous retiendrons pour l'instant les représentations graphiques : d'une part parce que les moyens technologiques existants le permettent assez facilement (écrans de visualisation, tables traçantes, etc.) ; d'autre part, ce type de représentation est susceptible d'évoquer de manière pertinente le geste effectué. Il est intéressant en effet de remarquer que lors de l'exécution d'un mouvement, les messages gestuels sont unis par l'expérience à des messages visuels, de telle sorte que l'instrumentiste peut voir les formes que sa main parcourt, le geste accompli ou l'attitude prise par son corps.

La représentation la plus immédiate des informations gestuelles peut consister en la visualisation des signaux en coordonnées amplitude/temps. Ces signaux pourront ensuite être manipulés et transformés par des techniques d'édition graphique.

Les traitements primitifs sur le signal gestuel s'inspirent de ceux qui peuvent être opérés sur des sons enregistrés. L'enregistrement du son a permis en effet des manipulations électro-acoustiques diverses, qui ont conduit à décomposer des sons, à les transformer, et à les recombinaison avec d'autres, par des techniques de découpage des bandes magnétiques, de filtrage, d'opérations de montage et de mixage. Cela a donné naissance à des transformations selon les trois axes du trièdre : temps, fréquence, intensité. D'une analogie directe avec le signal sonore, il se dégage par conséquent des directions possibles pour la transformation des signaux gestuels.

L'étude préliminaire de l'éditeur de geste concerne essentiellement des objets-gestes codés suivant une logique d'organisation spatiale et temporelle qui fait intervenir les entités voies, canaux et unités gestuelles.

### IV.2. Fonctions de base de l'éditeur

Les traitements d'édition diffèrent suivant qu'il s'appliquent à des entités spatiales discrètes telles que les canaux ou les unités gestuelles, ou à des signaux temporels constituant les voies d'un canal particulier.

On peut concevoir un éditeur structuré en trois niveaux hiérarchisés qui correspondent à la structure arborescente du codage explicitée précédemment.

Des traitements temporels macroscopiques sur les informations gestuelles sont envisageables. Il s'agit d'opérations élémentaires telles que :

- \* afficher/effacer,
- \* couper/coller,
- \* transformer.

Les transformations dépendent étroitement de la nature des objets concernés. Elles peuvent se produire :

\* sur l'échelle temporelle

On s'intéressera notamment à des manipulations de signaux ou de paramètres du geste ayant une évolution temporelle continue, en spécifiant leur appartenance aux canal et unité gestuelle correspondants. Citons par exemple des modifications de timing ou des modifications agogiques qui sont habituellement spécifiées dans la notation musicale traditionnelle :

- les modifications de timing : c'est le "tempo" ou "mouvement" qui détermine la vitesse moyenne d'exécution d'une oeuvre musicale ; la nomenclature italienne indique les cinq principaux mouvements : *Largo, Adagio, Andante, Allegro, Presto*.

- les fluctuations passagères du tempo comme les retards, les accélérations et les "rubatos" qui affectent une séquence de notes.

L'*accelerando* permet d'augmenter progressivement la vitesse d'exécution, entraînant une modification temporaire du tempo. Le *ritardando* permet de revenir au tempo initial.

Le *rubato* qualifie un style d'exécution musicale dans lequel le tempo de la partie mélodique est fluctuant, tout en restant constant en moyenne.

On peut réaliser également des décalages temporels entre différentes parties d'une partition.

- On peut envisager d'autres types de transformations qui font intervenir des dilatations ou des compressions d'événements gestuels. Dans la mesure notamment où l'on accède aux différentes phases du mouvement telles que : l'attaque, la tenue et le relâchement, il devient possible d'influer directement sur ces composantes du geste. Dans la terminologie MIDI par exemple, on peut jouer sur les durées temporelles s'écoulant entre deux "note ON" et "note OFF" successifs.

En particulier des modifications de l'articulation du discours gestuel peuvent être appliquées en agissant au niveau de l'enchaînement temporel d'événements gestuels ; certaines de ces transformations peuvent être caractérisées par les termes italiens : *spiccato* (piquer), *staccato* (détacher), *portamento* (porter), *legato* (lier), etc.

\* sur l'échelle spatiale

Le geste se manifestant au niveau de liaisons mécaniques multiples acquiert en conséquence une dimension spatiale, induite par le mouvement lui-même.

On doit donc tenir compte de la multiplicité des effets du geste (simultanéité de certaines actions) et de la corrélation entre certains de ces effets (dépendance des voies d'un même canal).

Il est possible par exemple d'effectuer des transformations telles que :

- . la translation dans l'espace des voies,
- . la transposition spatiale,
- . etc.

\* sur l'échelle des intensités

On peut définir une échelle des intensités (force d'attaque, pression) qui conditionne le volume sonore. Ainsi, dans la notation classique, on définit une échelle dynamique relative *ppp*, *pp*, *p*, *mp*, *mf*, *f*, *ff*, *fff* qui représente les nuances de l'exécution et que l'on associe généralement à des aspects qualitatifs du son. On définit des variations dynamiques et progressives d'intensités telles que le *crescendo* ou le *decrescendo*, ainsi que des variations brusques telles que le *rinforzando* ou le *piano subito*. Les opérations retenues dans cadre de l'éditeur peuvent se résumer pour l'instant à celles :

- . d'amplifier
- . d'atténuer
- . de filtrer

Deux types de représentations des signaux gestuels seront tout d'abord prises en compte pour l'éditeur graphique. Ce sont les représentations temporelles, dans lesquelles la variable temps apparaît de manière explicite, et les représentations atemporelles, dans lesquelles le temps est une variable implicite.

#### IV.2.1. Exemples de représentations temporelles

On s'intéresse essentiellement à des visualisations élémentaires à deux dimensions : espace/temps ou amplitude/temps.

##### a. Représentations espace/temps

Il est possible de construire une échelle spatiale sur laquelle seront distribués les différents canaux d'une unité gestuelle, suivant un ordre prédéfini par l'utilisateur.

La représentation espace/temps est à rapprocher de la notation musicale traditionnelle, qui fait apparaître une échelle des hauteurs, et une échelle des durées. Cependant sur une partition musicale, la hauteur correspond en particulier à deux indications intimement mêlées : elle évoque d'une part la hauteur fréquentielle des sons, et d'autre part la position spatiale des dispositifs physiques sollicités par le geste (touches sur un clavier, cordes d'une harpe, ...). Définir une échelle spatiale liée à la disposition des organes physiques permet de s'affranchir d'une organisation suggestive propre au geste ou au son et de ne s'intéresser qu'aux moyens d'exécution relativement à un instrument donné.

L'évolution au cours du temps de la configuration des liaisons instrumentiste/instrument peut alors être visualisée assez simplement par la projection du geste dans l'espace de représentation canaux=f(temps). Pour des gestes s'exerçant sur un clavier de piano par exemple, cela correspond au mouvement des touches qui permet de regrouper les moyens d'exécution et de définir un principe d'organisation inhérent à l'instrument. On peut ainsi faire émerger des schémas de performances motrices, qui associent une représentation "verticale" (sélection simultanée d'un ensemble de touches) , et une représentation "horizontale" du mouvement (évolution dans le temps).

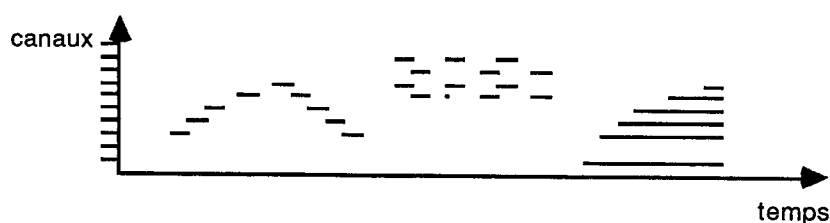


Figure 2.15 : Représentation espace-temps

On peut espérer de cette manière mettre en évidence des formes d'une logique immanente au jeu instrumental. Ces formes caractérisent la dynamique propre à des enchaînements et à des articulations de séquences motrices. Dans cette optique, l'émergence de "schemes" rythmiques, ou d'invariants temporels traduit une certaine forme d'intention motrice de haut niveau.

### b. Représentations amplitude/temps

L'écriture "musicale" traditionnelle comporte des informations verbales, qualitatives, qui associent étroitement des indications causales et perceptuelles ; ce sont par exemple des indications d'intensité (acoustiques ou gestuelles...), des indications sur le mode opératoire, des indications sur les effets du geste au niveau de l'instrument. Mais elle ne permet pas de coder de manière très précise et quantitative certaines caractéristiques du geste. Disposant en mémoire d'informations traduisant l'évolution continue de grandeurs gestuelles mécaniques, telles que la force, la pression, la vitesse, etc., il devient dès lors possible de caractériser plus finement le geste.

Il est remarquable notamment de constater des différences subtiles au niveau de la forme impulsionnelle du signal de force capté, lors de gestes de frappe sur un obstacle rigide :

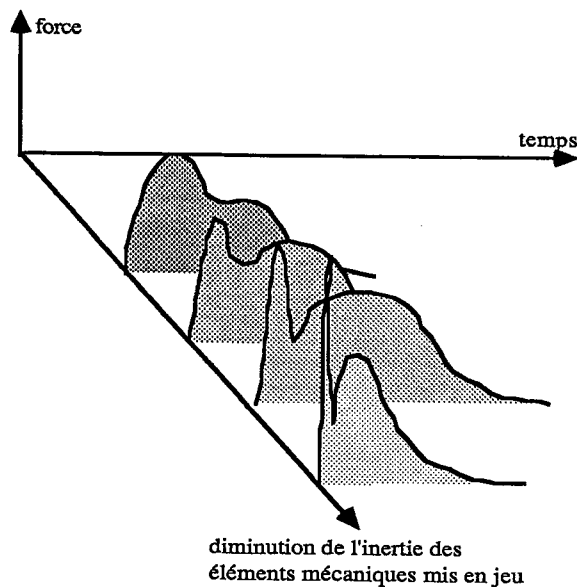


Figure 2.16 : Impulsions de force en fonction du temps

On voit apparaître deux impulsions successives plus ou moins raides : la première est d'autant plus fine et d'amplitude élevée que les éléments mécaniques mis à contribution dans le mouvement sont de faible inertie. Lorsque l'inertie augmente, le premier pic s'épaissit et son amplitude diminue jusqu'à ce qu'il y ait fusion des deux bosses, voire même disparition complète de la première.



c. Représentations espace-amplitude-temps

On peut regrouper les deux types de représentations précédentes en se plaçant dans le trièdre espace, amplitude, temps (figure 2.17) :

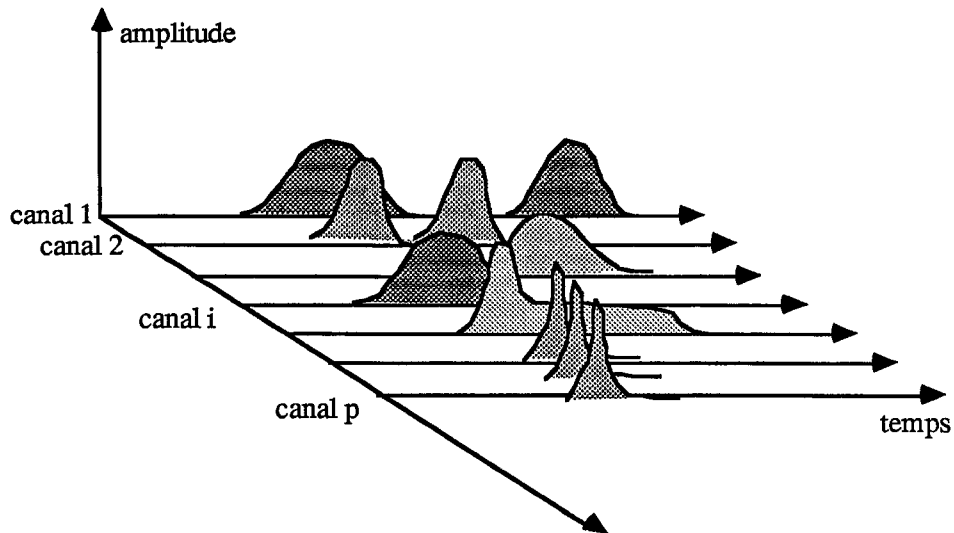


Figure 2.17 : Représentation espace-amplitude-temps

**IV.2.2. Exemple de représentation atemporelle**

D'autres représentations peuvent intégrer le temps de manière implicite. A partir notamment de l'évolution temporelle de  $n$  paramètres caractérisant le geste - soit  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$  -, il est possible de construire des trajectoires de points  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  dans l'espace des paramètres de dimension  $n$  ; une projection dans un plan à deux dimensions  $(x_i, x_j)$  est alors susceptible de mettre en évidence des formes évocatrices de l'action gestuelle (figure 2.18) :

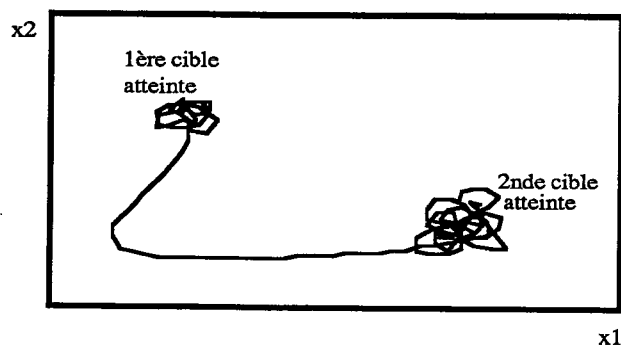


Figure 2.18 : Trajectoire dans l'espace des paramètres du geste

### IV.3. Réalisation de l'éditeur

L'éditeur de gestes existe aujourd'hui sous une forme simplifiée (cf. travaux et rapport interne de A. Razafindrakoto - 1986).

Il dépasse le cadre d'un simple éditeur d'échantillons, et permet de réaliser des traitements élémentaires de représentation des fichiers gestes codés suivant la syntaxe présentée à la figure 2.5. (chap. 2 § I.2.3.).

## V. Conclusions relatives au codage spatio-temporel des signaux gestuels

### V.1. Intérêts du codage par échantillonnage adaptatif

Le codage que nous avons adopté se justifie dans la mesure où nous nous sommes placé dans un contexte très général ; ce codage s'applique à une classe très large de signaux, indépendamment de leur dynamique et de leur fonction par rapport à l'instrument simulé.

Une manière simple de le décrire consiste à utiliser la représentation suivante (figure 2.19) dans l'espace à trois dimensions : espace, temps, amplitude :

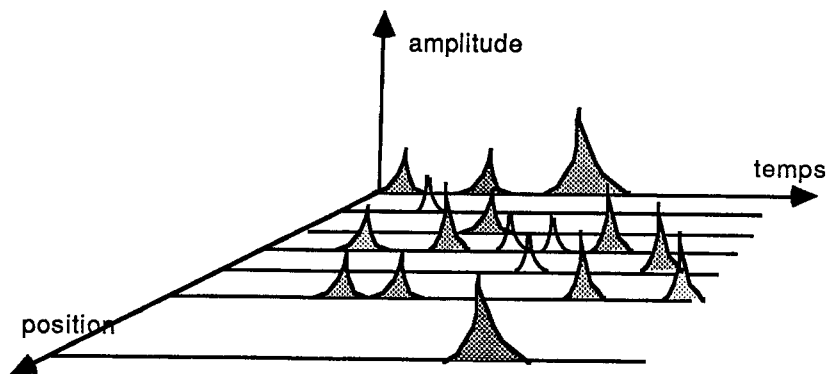


Figure 2.19 : Représentation spatio-temporelle des signaux gestuels

Ce codage adaptatif met plus particulièrement l'accent sur la prise en compte d'un grand nombre de canaux sollicités de manière non continue par le geste de l'opérateur. En effet, le stockage des échantillons de signal n'a lieu que lorsque se produit un événement sur la voie concernée. Pour le

geste du pianiste par exemple, cet événement peut être la frappe d'une touche sur le clavier. Ainsi, ce type de traitement tire parti des parties "creuses" du signal, ce qui conduit à une réduction considérable de l'information.

Une autre raison qui a motivé notre choix est la possibilité d'une mise en oeuvre relativement simple, autorisant l'exécution en temps réel des processus de codage et de décodage parallèlement à la simulation d'objets instrumentaux.

Le principe du codage par échantillonnage adaptatif est à rapprocher du codage MIDI, qui permet de détecter des événements gestuels et de les coder sous forme de messages asynchrones. Mais il va plus loin que MIDI :

- d'une part parce qu'il contient des messages explicites traduisant la durée séparant deux événements successifs,
- d'autre part parce qu'il permet de suivre des signaux à évolution continue, sans restriction sur le nombre et la complexité des dispositifs transducteurs employés.

La structuration en canaux et unités gestuelles est relativement intéressante, car elle intègre simultanément des aspects technologiques propres aux transducteurs gestuels, et des aspects relatifs à la dynamique du jeu de l'instrumentiste.

Précisons ce dernier point : l'utilisateur peut organiser lui-même son espace instrumental, en fonction des idées de jeu qu'il projette au niveau de l'instrument. Cette organisation n'est pas restrictive. Elle fait partie de la constitution de scènes instrumentales, et peut être modifiée au gré de l'instrumentiste. Il est même envisageable de modifier dynamiquement en cours de jeu cette structuration, par l'intermédiaire du geste. Cela autorise une expérimentation assez souple de la logique de regroupement des voies gestuelles d'entrée.

## **V.2. Difficultés soulevées par le codage adaptatif des signaux**

Plusieurs inconvénients techniques sont apparus.

Le premier concerne la détection d'événements par comparateur à seuils, qui peut conduire à une réduction de l'information gestuelle. En effet, l'introduction de seuils revient à diminuer le nombre de niveaux de quantification du signal. Or, l'application d'une quantification supplémentaire a le même effet du point de vue statistique (relativement à la densité de probabilité) que l'addition d'un bruit uniforme à ce signal [Picinbono 81]. De plus, les seuils, ajustés empiriquement, dépendent de la dynamique de variation des signaux gestuels, ce qui particularise le codage par rapport à la nature des entrées gestuelles utilisées. Il pourra donc s'avérer nécessaire d'annuler les seuils, en fonction des traitements ultérieurs à effectuer sur les objets gestes mémorisés.

Le second est relatif aux traitements d'édition des séquences de gestes codées. La réalisation minimale d'un éditeur de geste a permis de montrer que certaines transformations conduisent à des traitements relativement lourds. En particulier, une modification de l'échelle temporelle appliquée à un sous-ensemble d'objets (ensemble de voies par exemple) peut nécessiter la restitution de la forme primitive des signaux, afin de conserver le synchronisme des différents événements. En effet, les messages gestuels étant organisés sous une forme vectorisée (ensemble des valeurs de toutes les voies à un instant d'échantillonnage donné), on n'accède pas immédiatement à l'évolution au cours du temps d'une sous-partie de ce vecteur. Ainsi la notion de "forme" n'apparaît pas directement dans le message ainsi codé.

On peut s'interroger également sur les performances de ce codage par rapport aux objectifs initiaux de compression de l'information. Il existe en effet une antinomie entre la généralité et l'efficacité d'un codeur. Plus le champ d'application d'un codeur est étendu, moins il code de manière efficace et pertinente un signal particulier.

La généralisation et l'homogénéisation du codage pour un univers instrumental modulaire et de plus ou moins grande complexité se sont faites inévitablement au détriment de l'analyse de cas singuliers ; notamment lorsqu'un couplage permanent est établi entre l'opérateur et l'instrument, et lorsque la forme réelle de l'action -intimement liée à la nature de l'objet manipulé- est caractérisée par des signaux continus à évolution rapide, le codage par échantillonnage adaptatif n'est pas très performant.

Enfin, il convient de remarquer que le geste, contrairement au son, a une détermination bilatérale ; par conséquent, n'importe quelle transformation du signal gestuel ne peut être envisagée sans se préoccuper de l'incidence que ce traitement a sur le comportement du système mécanique global "geste + instrument". Cette bilatéralité du canal gestuel n'a pas été prise en compte lors de la phase de conception de l'éditeur de geste. La pertinence des transformations possibles reste alors à définir précisément.

#### Remarque

L'intégration dans la fonction de codage d'une connaissance statistique sur le signal, pourrait diminuer considérablement la redondance, tout en conservant les événements qui sont porteurs d'information. Mais en même temps, cela impliquerait des traitements plus complexes qui risquent d'entraîner d'une part un coût de calcul plus élevé, et d'autre part une perte éventuelle d'information. Or, la mémorisation du geste restant une étape obligée dans l'utilisation de l'outil de création, il est nécessaire, avant même de chercher à interpréter les phénomènes produits lors d'expériences instrumentales, d'en conserver une trace objective non traitée.

Il ne faut pas oublier cependant qu'un codage trop éloigné des préoccupations compositionnelles pénalise l'articulation entre l'enregistrement du geste en temps réel et les traitements applicables sur le geste en temps différé.

### **V.3. Quelques réflexions sur le problème de la représentation**

La représentation immédiate qui découle du codage par échantillonnage adaptatif et les traitements qu'elle suggère correspondent en fait à ceux que permet l'écriture musicale traditionnelle, traduisant l'empreinte du geste au niveau de l'instrument en coordonnées (espace, temps, intensité). Il est vrai que l'on est tenté (et cela correspond tout à fait à la tendance générale MIDI !) de concevoir des systèmes de commande d'instruments qui reprennent les concepts de l'écriture musicale sous la forme d'informations explicites de hauteur et de durée.

Dans ce genre d'approche, la plus immédiate, des modifications du timing, combinées à des variations subtiles d'intensité peuvent certes constituer un point d'entrée à un système de traitement du geste. Si l'on observe notamment les gestes de pianistes, on peut facilement constater l'existence de déphasages temporels, que ce soit au niveau d'un événement élémentaire (enfouissement-relâchement d'une touche) ou au niveau du phrasé gestuel (événements simultanés et successifs sur plusieurs touches). Ce sont ces déphasages qui participent d'une certaine façon à l'expression du langage gestuel et qui sont propres à chaque instrumentiste.

Cependant, il n'est pas immédiat d'extraire de la simple observation de la performance motrice des lois quantitatives inhérentes à l'organisation et à l'enchaînement d'événements gestuels.

Considérons par exemple des transformations élémentaires visant à modifier la vitesse d'exécution d'un geste. Ces modifications de "tempo" sont intéressantes, car elles constituent l'une des bases de l'apprentissage du jeu instrumental. Dans cette optique, on peut modifier l'échelle des durées à partir de transformations mathématiques simples (fonctions linéaires, homothéties,...).

Des expériences effectuées par des psychomotriciens sur les performances du jeu pianistique [Shaffer 80] ont mis ainsi en évidence des déphasages temporels par rapport au rythme prescrit par la partition musicale, ces déphasages se manifestant aussi bien au niveau des durées de notes, qu'au niveau des mesures ou des phrases mélodiques. Ces expériences ont permis de constater que l'augmentation de la vitesse d'exécution du geste n'impliquait pas une conservation des invariants temporels. Ainsi, la manipulation des durées relatives entre les événements gestuels ne permet pas forcément de restituer le réalisme des gestes "accéléré" ou "ralenti".

Si l'on s'intéresse maintenant à l'évolution continue d'un signal gestuel se produisant au niveau d'une voie de contrôle particulière, on voit apparaître le même genre de difficultés pour définir des représentations et traitements compositionnels. Le codage par échantillonnage adaptatif nous place en effet dans un espace de représentation du geste qui est très proche de l'espace des signaux bruts captés. Il consiste en quelque sorte à détecter de manière locale des stationnarités de bas niveau du signal. Cela revient à effectuer un marquage explicite du temps, qui ne tient pas compte de l'évolution temporelle macroscopique des phénomènes physiques considérés. On se contente ainsi de suivre les fluctuations à court-terme des signaux, en ignorant les caractéristiques éventuelles de permanence de ces signaux. Un tel système est supposé sans mémoire, puisque son passé, son évolution antérieure ne sont pas pris en compte.

Par conséquent, il n'est pas immédiat d'extraire directement de ce type de codage des formes gestuelles significatives pour le compositeur. Notamment, manipuler de tels signaux suppose l'établissement d'un lien entre le geste effectif et les traces qui en résultent.

Il découle de cela que l'espace des signaux gestuels captés ne donne pas une image du geste qui traduise de manière pertinente la substance de l'information émise. Et si certaines manifestations du geste peuvent s'exprimer par des mots, tels que "raidir la main", ou "assouplir le poignet", il n'est pas trivial d'établir une corrélation entre le geste effectué et les formes caractéristiques des informations captées et codées.

A ce niveau, il nous a semblé nécessaire de poser de manière plus fondamentale le problème de la représentation. En particulier, une façon de se rapprocher d'une évocation de la situation réelle, est de mettre en évidence des invariants structurels dans la performance motrice.

**On peut alors remarquer que l'étude des signaux, qu'ils soient déterministes ou aléatoires, est inextricablement liée à celle des systèmes qui les produisent, les reçoivent et les transforment.**

Ce type de réflexion nous a incités, dans un but de représentation et de traitement de l'information gestuelle, à "déplacer" l'espace des signaux vers l'espace du système qui les a engendrés, et à considérer les traces objectives captées comme des "émanations" des mécanismes producteurs humains. La démarche consiste alors à essayer de remonter aux causes responsables des phénomènes produits.

### Remarque

Les démarches classiques utilisées pour le contrôle gestuel en temps réel des processus de synthèse n'exploitent pas réellement toutes les possibilités du geste. Très souvent, le musicien est amené à manipuler des dispositifs physiques dont le comportement est toujours semblable, quelle que soit la structure de la synthèse sonore utilisée. La sensation tactile est toujours la même, que le son produit soit un son de guitare, de piano ou de flûte. De plus, le toucher caractérisant ce type de jeu est relativement "inconsistant" et pas très intéressant gestuellement.

Par rapport à cette approche, la démarche de l'ACROE apporte un plus en ce qui concerne la précision et la sensibilité du contrôle gestuel. Il est possible en effet de simuler le comportement physique d'objets instrumentaux de natures très différentes, et pour chacun de ces objets de restituer des réactions mécaniques de l'objet manipulé qui sont cohérentes avec l'action gestuelle effectuée. Ainsi, la programmabilité des objets instrumentaux, associée à l'utilisation de transducteurs gestuels à retour d'effort constitue un moyen d'expérimentation sensori-motrice d'objets de différentes sortes.

La prise en compte de la nature bilatérale du geste favorise ainsi un contrôle fin et précis du comportement dynamique de l'objet manipulé et permet une étude systémique du geste plus approfondie.

Dans les deux chapitres suivants, nous allons focaliser l'étude vers une analyse structurelle du geste, en cherchant à identifier les structures mécaniques caractérisant le comportement de l'opérateur.

## Chapitre 3

# Vers une modélisation structurelle du geste

## I. Modélisation du comportement gestuel de l'opérateur

### I.1. Limites à la caractérisation du geste à partir des signaux gestuels captés

Considérons une liaison mécanique bilatérale susceptible de mettre en relation l'opérateur O avec un objet manipulé I.

Jusqu'à présent, notre approche a consisté à caractériser le geste au moyen de l'évolution des grandeurs mécaniques ( force, déplacement, vitesse,...) mesurables au niveau de la liaison entre les deux systèmes mécaniques O et I.

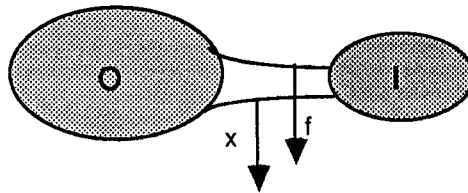


Figure 3.1 : Interaction Homme-Instrument

Les signaux captés reflètent le couplage dynamique entre les systèmes O et I ; ils dépendent donc à la fois de l'un et de l'autre, mais ils ne permettent pas directement de les dissocier.

Notamment, si l'on caractérise cette liaison par les variables mécaniques duales ( force, déplacement) , l'évolution de l'une des deux grandeurs ne traduit pas intrinsèquement le geste, mais plutôt une manifestation du geste par rapport à un instrument donné.

Il découle de cette dépendance du geste par rapport à l'objet manipulé des conséquences directes qui restreignent les possibilités de composition du geste.



En particulier, certaines transformations appliquées au geste et/ou à l'instrument peuvent altérer la cohérence de l'action physique par rapport à l'objet manipulé.

Nous allons tenter d'illustrer ceci au moyen d'un exemple qui traduit de manière simplifiée les conséquences possibles de transformations appliquées à l'instrument ou au geste.

Exemple : modification de l'instrument

Considérons un opérateur effectuant un geste de percussion sur une surface vibrante (peau de tambour). Nous supposons, au moment du contact de la main avec la "peau sensible", que l'action équivalente de l'opérateur au niveau de l'espace des capteurs est déterminée par un système passif et stationnaire à court-terme, lui-même caractérisé par une impédance mécanique ramenée  $Z_0$  (figure 3.2) :

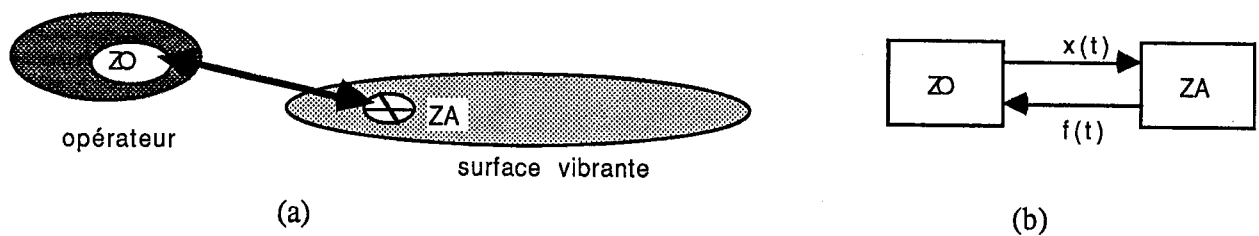


Figure 3.2 : Impact au point A

Pendant la durée très courte d'établissement de la liaison mécanique homme-instrument, on peut donc décrire le comportement dynamique du système global par la mise en relation de deux dipôles mécaniques,  $Z_A$  étant l'impédance mécanique de la surface vibrante, ramenée en son point d'excitation A.

Dans le cadre d'un système de traitement des signaux de commande gestuelle émis par l'opérateur, considérons par exemple la transformation compositionnelle qui consiste à appliquer le même geste en un point d'impact différent.

Le geste étant caractérisé par l'évolution du signal de commande du simulateur, soit  $x(t)$ , on est alors amené à appliquer ce même signal en un point B de la surface vibrante, possédant une impédance mécanique ramenée  $Z_B$ . On se retrouve donc dans la situation suivante (Figure 3.3).

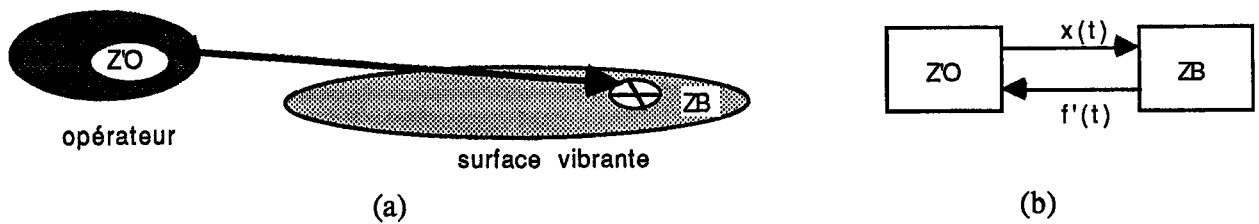


Figure 3.3 : Impact en B

Puisque  $Z_B$  est différent de  $Z_A$ , alors la conservation du signal  $x(t)$  impliquerait que le dipôle mécanique équivalent au système gestuel pendant la phase de contact soit caractérisé par une impédance mécanique  $Z'_o$  différente de  $Z_o$ .

Par conséquent, cela revient à dire que le geste utilisé dans la phase de restitution du signal enregistré ne correspond plus à un geste physique réel, identique à celui qu'aurait eu l'opérateur en frappant la surface vibrante au point B.

Dans certains cas, l'application de transformations sur le signal gestuel  $x(t)$  peut même conduire à des instabilités du comportement des deux dipôles couplés.

Il découle de cela la nécessité, pour caractériser le geste, de prendre en compte la réaction de l'objet sollicité par l'action de l'opérateur.

Si l'on décrit plus généralement le geste au moyen d'un modèle mécanique comportemental à court-terme, il n'est pas nécessaire de contrôler à chaque instant l'évolution des grandeurs mécaniques  $x$  et  $f$  ; ces signaux traduisent au contraire le résultat de l'interaction des deux systèmes mécaniques constitué par l'opérateur et l'instrument. De plus, cette approche est intéressante, car elle permet de décrire les phénomènes observés de manière plus structurée, moins abstraite qu'avec des signaux intimement liés aux dispositifs de mesure.

Au niveau le plus bas, cela peut signifier déterminer des phases de stationnarité du geste, sur des périodes d'analyse plus importantes que la période d'échantillonnage du signal lui-même.

**Pour aller plus loin, il s'agit d'extraire des formes significatives du geste, qui traduisent une représentation intrinsèque de l'action mécanique de l'opérateur, en faisant le plus possible abstraction de l'objet manipulé.**

## **I.2. Retour sur la notion de geste**

A cette phase de notre étude sur le geste, est apparue la nécessité de reconsidérer l'analyse et le traitement du geste (au niveau d'une liaison mécanique bilatérale) sous un angle nouveau : celui de la modélisation de l'action mécanique de l'opérateur.

Les signaux gestuels, qui constituent des traces effectives du geste au niveau de la liaison entre l'opérateur et l'instrument, sont alors utilisés afin d'appréhender certains mécanismes structurels inhérents au système humain.

La possibilité d'accéder à l'information bilatérale sur le geste - action sur l'instrument, et réaction sensible de l'objet simulé à cette action - autorise la détermination d'un modèle de représentation du geste équivalent au système humain dans l'espace d'observation, et ceci en termes d'identité de comportement.

### **I.2.1. Les variables d'observation**

Le système gestuel met en jeu un grand nombre de phénomènes, depuis le niveau microscopique jusqu'au niveau macroscopique. Une description fine du geste implique la connaissance des propriétés du système à l'échelle atomique. C'est sa description microscopique, qui fait intervenir des constantes de temps petites vis-à-vis de celles des phénomènes observables. En fait, cette analyse à l'échelle atomique n'est pas toujours possible, ou du moins n'est pas forcément nécessaire. On fait alors appel à des représentations macroscopiques, qui sont fonctions du problème à étudier. Afin d'appréhender le système, l'observateur dispose donc des appareils de mesure au niveau de la liaison mécanique, destinés à capter les grandeurs physiques traduisant l'évolution macroscopique du système, et qui constituent les variables d'observation.

### **I.2.2. Hypothèses de l'identification.**

Le modèle ne représente en fait qu'une projection de la réalité dans le sous-espace appréhendable par l'observateur, c'est-à-dire celui des capteurs qui reçoivent des données du monde réel.

Il faut tout de suite préciser que l'on ne pourra pas décrire intégralement les phénomènes gestuels impliqués lors d'actions instrumentales :

- d'une part à cause du nombre réduit des variables d'observation, ce qui nous conduira à des modélisations réductrices.
- d'autre part parce que l'on ne capte le geste que pendant des phases de contact avec l'objet manipulé, et le système humain peut avoir une évolution propre non observable.

*système ouvert, système fermé*

A partir de l'évolution des grandeurs mécaniques mesurables au niveau de la liaison entre les deux systèmes O et I, il s'agit de déterminer un modèle à court-terme du comportement de O, soit O' (figure 3.4.) :

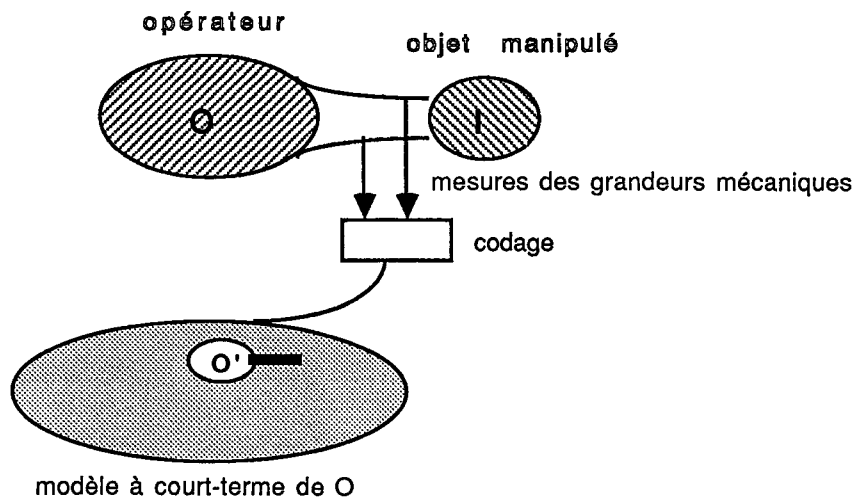


Figure 3.4 : Modèle à court-terme du comportement gestuel

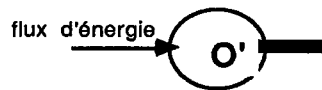
Deux types d'hypothèses peuvent être avancées, concernant la nature du système O'.

1. La première postule l'existence d'un sous-système O' de O, tel que, à court terme, le système (O'  $\cup$  I) ait un comportement autonome. C'est alors un système fermé. A chaque capteur recevant des données du monde réel, correspond une variable d'observation mesurable, associée à un certain nombre de variables d'état. L'ensemble des variables d'état constitue un vecteur d'état décrivant l'évolution interne du système dans le sens où sa connaissance à l'instant  $t_0$ , suffit à résumer le passé en vue de la connaissance de l'avenir, et vice-versa. En fait, les variables d'état sont des grandeurs macroscopiques (correspondant à des moyennes sur des grandeurs microscopiques) et toutes les propriétés microscopiques sont ignorées par l'observateur. On peut ainsi écrire une relation, appelée fonction d'état, faisant intervenir les variables d'état et un certain nombre de paramètres.

2. La seconde hypothèse consiste à considérer le sous-système O' de O comme un système ouvert, interagissant avec son environnement par un échange de flux d'énergie et de matière. Cet échange est une condition nécessaire mais non suffisante au maintien du fonctionnement de ce système. (entretien) L'action que le système O' a sur le reste du système humain, et la réciproque, dépendent d'une multitude de phénomènes dont on n'a qu'une vue partielle ; pour décrire quantitativement l'évolution de ce système ouvert, on est amené à construire un modèle mathématique des processus énergétiques au sein du système.

Il découle de cela deux formes d'hypothèses réductrices pour décrire l'évolution du système O' au cours du temps.

\* Soit on admet l'existence d'un couplage lent mais continu de O' aux autres parties de O, qui se manifeste par un échange d'énergie de O' avec l'extérieur :

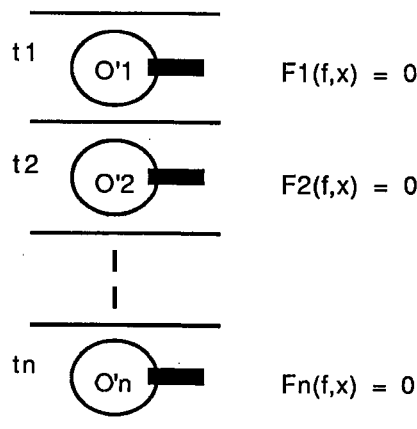


Cela peut s'exprimer, si les signaux mesurés sont la force  $f$  et le déplacement  $x$  par la relation suivante :

$$F(x,f,t) = 0$$

qui traduit la dépendance de  $F$  à l'égard du temps. On supposera de plus que les variations temporelles sont suffisamment lentes pour qu'elles puissent être considérées comme négligeables comparativement à la durée de l'analyse  $T$ .

\* Soit l'on considère que le système O' se comporte de manière autonome sur des intervalles de temps grands devant la durée de variation des signaux mesurés. La non stationnarité se traduit alors par des variations des fonctions  $F_i(x,f)$  sur chaque intervalle  $\Delta t_i$ .



Ce cas ne représente en fait que la discrétisation du cas précédent. Les séquences enregistrées sont découpées en intervalles successifs, le système étant supposé stationnaire sur chacun des intervalles.

Remarque :

Si l'on s'intéresse au cas particulier où l'on admet que le système étudié peut être représenté par un modèle linéaire à court-terme :

1) Dans le cas d'un système ouvert, il est possible de séparer les contributions respectives :

-d'une fonction active  $e(t)$  jouant le rôle de générateur de force,

-d'une fonction passive caractérisée par une impédance mécanique  $Z(t)$  dont les paramètres varient au cours du temps.

Ceci peut se représenter de la manière suivante, en utilisant l'analogie électrique :

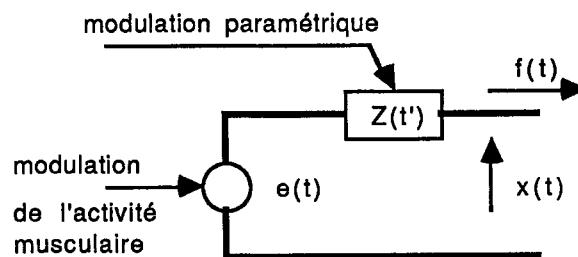


Figure 3.5 : Modèle linéaire à court terme du geste - système ouvert

ce qui s'écrit :

$$\alpha(t) f + \beta(t) x + \gamma(t) = 0 \quad \text{avec } \alpha, \beta, \gamma, : \text{opérateurs différentiels}$$

La non stationnarité se traduit par une variation au cours du temps à la fois de la partie active  $e(t)$  et de la partie passive  $Z(t)$ . L'hypothèse de linéarité du modèle sur une fenêtre d'analyse  $\Delta T$  sera admissible si les paramètres de l'impédance  $Z$  varient lentement par rapport à  $\Delta T$ .

2) Dans l'hypothèse d'un système fermé à court-terme, on peut le représenter par une succession de modèles linéaires à court-terme.

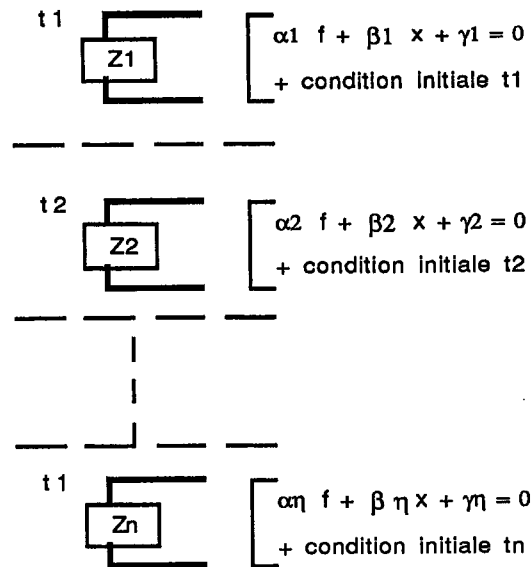


Figure 3.6 : Système fermé à court terme

### I.2.3. Réflexions sur la démarche modélisatrice.

Deux cas sont à envisager dans le processus de modélisation :

Lorsque l'on détient la connaissance des lois physiques qui gouvernent le système, on construit alors un modèle physique. On parlera de modélisation.

Dans le cas, plus fréquent, où la connaissance des mécanismes intrinsèques du système est incomplète, voire inexistante, on utilise alors des procédés d'identification, qui permettent d'inférer un modèle mathématique à partir de données expérimentales entachées de bruit. L'identification se présente donc comme une technique statistique.

Entre les cas extrêmes, celui où l'on détient une connaissance a priori des lois physiques régissant le système, et celui où l'on ignore tout des phénomènes mis en jeu, il existe un continuum de cas intermédiaires, qui prennent en compte les spécificités comportementales du système.

**L'identification tente de jeter un pont entre des concepts mathématiques et statistiques, et la réalité concrète perçue par l'expérimentateur.**

La nature du modèle, c'est-à-dire ce qu'il est, un modèle mathématique abstrait, ou un modèle physique, dépend étroitement des objectifs de ce modèle.

En ce qui nous concerne, les finalités sont multiples :

\*modèle d'analyse :

Plus qu'une représentation formalisée de la réalité, il doit être un instrument d'aide à la connaissance fondamentale.

*"Il traduit, soit un complexe de relations de causalité, soit un complexe de relations de signification."*

[Ribeill 79]

\*modèle de synthèse :

La simulation du modèle obtenu après analyse doit permettre l'exploration des dynamiques possibles du système gestuel, dans le but de contrôler pertinemment des mécanismes instrumentaux.

Ces deux pôles, qui imposent des contraintes à la fois contradictoires et complémentaires, nous conduisent à rechercher, dans le processus de modélisation, un compromis entre une justification a priori et une justification a posteriori.

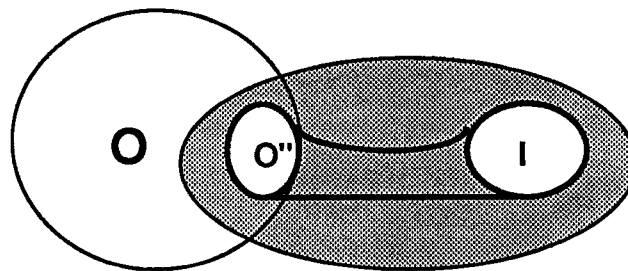
. La justification *a priori* nécessite une théorie de l'analogie entre le système naturel et le modèle.

Notamment la compréhension des phénomènes gestuels en cause, dans le but d'effectuer des traitements qui conservent la pertinence du geste, impose l'extraction de paramètres physiques signifiants.

Etant donné I ouvert interagissant avec O, l'hypothèse que nous admettons à ce niveau est qu'il existe un système  $O''(t)$  tel que :

quel que soit t,  $(O'' \cup I)$  soit fermé et équivalent au système  $(O \cup I)$  pendant T.

$O''$  représente un modèle partiel (temporellement) de O, qui est tel que les trajectoires observables sont identiques à partir de l'instant t pendant la durée T.



isolé à court-terme

Figure 3.7 : Modèle à court terme du comportement gestuel



Une façon d'interpréter le comportement gestuel humain est d'établir un lien entre :

- d'une part des modèles fonctionnels simples, adaptés aux données de l'expérience, et ne présupant aucune connaissance a priori sur le système,
- et d'autre part des modèles de connaissance intégrant des données physiologiques et des hypothèses sur les théories motrices.

. La justification *a posteriori*, quant à elle, consiste en une confrontation avec l'expérience. Celle-ci, quelle que soit la nature du modèle identifié, suppose la minimisation d'une distance entre la réponse du modèle et les données de l'expérience. Ce critère de proximité doit viser à construire un modèle mathématique, le plus simple possible, qui puisse décrire les données réelles de l'expérience.

Pour que le modèle soit intéressant, il faut qu'il concilie ces deux attitudes justificationnistes.

*"Toute modélisation est un pari. Il y a une mise et un gain : la mise c'est la justification a priori, le gain celle a posteriori,"*

[Thom 72]

Il semble dès à présent intéressant d'introduire la notion de *modèle mécanique* du geste, d'une part parce que le geste a une réalité mécanique évidente, d'autre part cela permet de conserver une certaine cohérence dans la description et le fonctionnement de l'ensemble du dipôle mécanique.

### **I.3. Perspectives par rapport à l'outil de création**

Les intérêts qui se dégagent d'une telle démarche par rapport à l'outil de création concernent en premier lieu les objectifs de représentation et de traitement compositionnel du geste en temps différé. En second lieu, des perspectives nouvelles apparaissent par rapport au problème de codage du geste en temps réel.

#### **I.3.1. Représentation**

La représentation doit permettre, à partir de l'analyse des mécanismes intrinsèques des phénomènes en cause, et des effets produits sur l'univers environnant, d'évoquer les manifestations sensibles du geste. L'instrumentiste associera, à cette projection de la réalité physique sur un autre espace sensoriel (visuel, tactile ou sonore), sa propre compréhension du geste, qui implique à la fois :

- la représentation de l'action motrice et des effets qui en résultent,
- la représentation de ses propres structures perceptives à travers les sensations multiples qui lui parviennent.

Or, le codage par identification permet une représentation du geste qui renseigne partiellement sur les mécanismes de production inhérents à la motricité, et d'en déduire au niveau de l'espace d'analyse des corrélats de l'intention gestuelle préalable à l'action elle-même.

Le geste peut être caractérisé au moyen de cet outil d'analyse par l'évolution dynamique de formes structurelles rappelant des schémas d'organisation de séquences motrices, et traduisant, mieux que n'importe quel type de codage du signal gestuel, les nuances expressives du geste. L'instrumentiste compositeur est alors à même d'extraire de cette représentation objective de son geste des formes signifiantes, susceptibles de rappeler, d'évoquer des représentations mentales de l'acte accompli.

En d'autres termes, le rôle de l'identification consiste à établir un pont entre l'espace de représentation issu du codage des évènements gestuels enregistrés, et l'image interne du geste construite par apprentissage du jeu instrumental.

### I.3.2. Traitements compositionnels

L'identification de l'action mécanique de l'opérateur sur l'objet à un modèle mécanique simple mais évolutif, permet une description des phénomènes gestuels en cause analogue à celle des mécanismes instrumentaux, ce qui autorise une certaine cohérence dans la représentation globale du dipôle homme/instrument.

On passe ainsi de la situation de jeu instrumental direct, où l'on capte les signaux geste résultant de l'action de l'instrumentiste sur l'instrument (figure 3.8.a) à la situation analogue de restitution du geste enregistré (figure 3.8.b) :

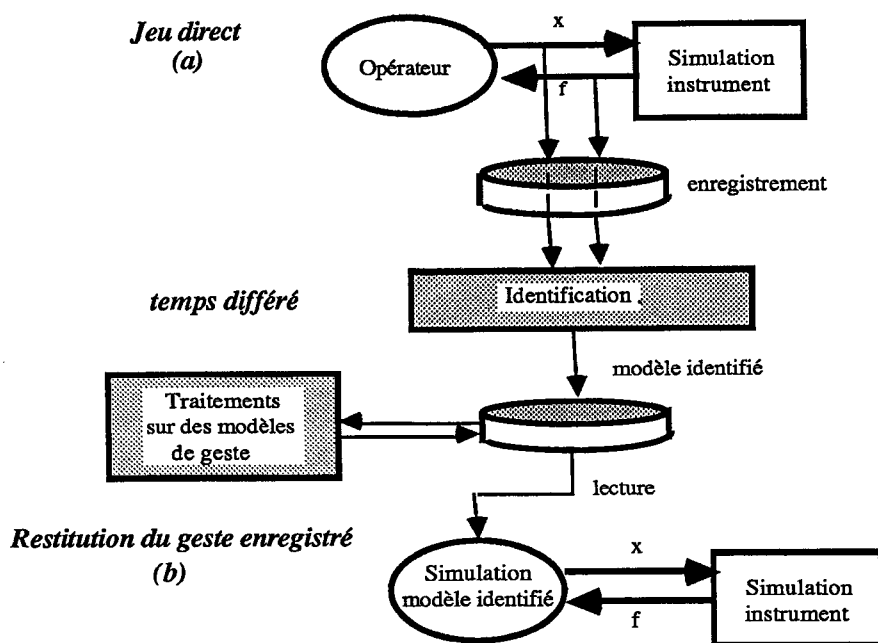


Figure 3.8 : Enregistrement en temps réel, identification et restitution du geste

Si l'on compare la démarche de modélisation avec celle qui consiste à prélever et coder les signaux émis par l'opérateur, on constate, dans ce dernier cas, la dépendance étroite du geste avec l'objet manipulé. Notamment, si l'on tente d'appliquer un même signal gestuel à deux objets distincts, on ne reproduit pas forcément la situation réelle qui consisterait à faire jouer l'instrumentiste de manière identique sur les deux objets.

Cette dépendance se manifeste jusque dans la nature physique des signaux captés, ce qui lie irrémédiablement le geste au transducteur qui lui est associé.

Il découle du principe de l'identification des avantages immédiats en ce qui concerne les processus compositionnels.

En particulier, la relative indépendance de l'objet geste identifié par rapport à l'objet manipulé autorise l'applicabilité de cet objet geste à une famille d'objets plus large que si l'on avait enregistré les séquences de signal.

De manière plus générale, les opérations de composition peuvent s'appliquer sur :

- \*des objets gestes,
- \*des objets instruments,
- \*des combinaisons de gestes et d'instruments.

### *Modifications structurelles du geste*

Les transformations à court terme se ramènent à des transformations structurelles ou paramétriques. A partir de l'identification, il devient possible d'envisager des transformations permettant une exploration fine des structures mécaniques responsables de la production des signaux gestuels. De la même manière que le compositeur s'intéresse de plus en plus aujourd'hui à la manipulation du matériau sonore au niveau de sa microstructure (caractéristiques du timbre, ...), il disposera d'un outil lui permettant de contrôler les éléments constitutifs de son geste.

### *Extension de l'univers instrumental au geste*

Il est envisageable d'étendre la notion d'objets instruments à celle d'objets gestes. Un instrument peut en effet se concevoir comme étant constitué d'éléments mécaniques passifs, et d'éléments actifs ; le geste d'un opérateur peut faire partie de cette deuxième catégorie (figure 3.9).

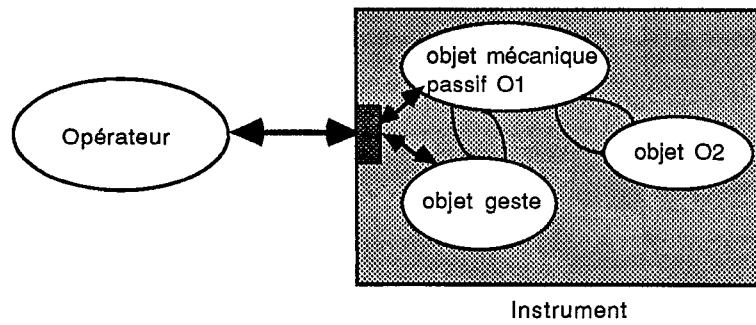


Figure 3.9 : Extension de la notion d'instrument

### I.3.3. Mémorisation du geste en temps réel

On peut envisager dès à présent utiliser l'identification comme technique de codage du geste en temps réel.

La mémorisation du geste, non plus sous forme de signal, mais sous forme de structures évoluant assez lentement dans le temps permet de réduire considérablement l'information gestuelle. On passe en effet du stockage des suites d'échantillons  $\{ x_k \}$  et  $\{ f_k \}$  en suite de n-uplets  $\{ a_i, b_i \}$ , les  $a_i$  et les  $b_i$  étant les coefficients d'une fonction de transfert traduisant le comportement de l'opérateur humain sur une fenêtre temporelle assez longue, la durée d'analyse étant directement liée à l'hypothèse de stationnarité des signaux.

Il est difficile de connaître a priori les constantes de temps du système étudié ; elles dépendent étroitement de la nature des phénomènes observés, relativement au comportement de l'instrument simulé. Ce que l'on peut dire dès à présent, c'est que l'on tend vers une description plus économique des phénomènes en cause, qui se traduit par un échantillonnage régulier des paramètres du système à fréquence plus faible.

L'intérêt des techniques d'identification est de pouvoir s'adapter automatiquement à la variabilité du modèle, et de détecter dynamiquement des phases de stationnarité des signaux, sans supposer connues au préalable les constantes de temps du système. De plus, la description des phénomènes gestuels multiples intervenant au niveau de la multiplicité des liaisons possibles entre l'opérateur et l'instrument, peut se ramener à l'évolution d'un nombre limité de paramètres, échantillonnés à une fréquence bien inférieure à celle des signaux mesurés.

Il découle de cela une représentation homogène du geste relativement aux différents canaux gestuels concernés du fait de la conservation du synchronisme des voies.

## **I.4. Ebauche d'une démarche expérimentale**

Le problème peut se formuler de la manière suivante : il s'agit de modéliser le système dynamique humain, lors d'interactions gestuelles de ce système avec un objet mécanique manipulable. Il faut tout de suite préciser que le geste ne pourra pas être étudié dans toute sa généralité ; en particulier, on s'intéresse au geste instrumental, qui n'aura de signification que par rapport à un instrument donné, ou à une classe d'instruments, ce qui limite le champ d'investigation expérimentale à un ensemble limité d'objets manipulables.

Dans ce contexte matériel, nous sommes confrontés à des difficultés d'ordre technologique, à cause du nombre restreint de dispositifs physiques destinés à jouer le rôle d'interface entre l'opérateur et l'objet simulé. En effet, dans toutes les expériences qui vont suivre, nous utiliserons un transducteur rétroactif à un seul degré de liberté, qui capte l'information émise par l'opérateur humain dans une seule direction d'action et restitue la réaction de l'objet mécanique sollicité.

De plus, ce type de dispositif ne permet de détecter les événements gestuels que dans la phase où il y a effectivement contact entre l'opérateur et l'instrument ; la composante "ballistique" du mouvement sera donc volontairement omise, bien qu'elle ait une incidence évidente au niveau de la saisie ou de la manipulation de l'instrument. On supposera toutefois que l'on conserve une certaine trace de l'information relative à la phase préparatoire du geste au niveau des signaux captés, et que l'on peut remonter au moins partiellement aux mécanismes impliqués dans le contrôle de la motricité du bras et de la main.

Il semble que pour mieux appréhender les phénomènes gestuels en cause, une phase préliminaire d'analyse du geste soit nécessaire. Par conséquent, au moins dans un premier temps, nous déplacerons notre propos par rapport à l'outil de création, et nous orienterons notre étude vers une meilleure connaissance des mécanismes intrinsèques du geste. Notre objectif sera entre autres de chercher à adapter la charge simulée aux différents effecteurs et récepteurs humains en cause lors de l'exécution d'un mouvement : il s'agit d'exploiter au mieux les possibilités de l'organisme humain relativement à des tâches motrices simples.

### **I.4.1. Démarche expérimentale**

#### I.4.1.1. Evaluation des méthodes à partir de l'application d'un signal de test en entrée

##### *\* Application d'un bruit blanc*

L'une des conditions requises pour analyser un système dont on mesure l'entrée et la sortie est de lui appliquer un signal de test en entrée. Or, pour pouvoir extraire le maximum d'information du

Le système étudié, on a intérêt à l'exciter dans toute sa bande de fréquence. La plupart des méthodes employées nécessitent une entrée excitatrice ayant les caractéristiques d'un bruit blanc, c'est-à-dire un signal dont le spectre est plat sur tout l'espace fréquentiel. En pratique, un tel signal n'existe pas. On utilise donc un bruit coloré, ayant une fréquence de coupure supérieure à la bande passante du système.

A partir de l'excitation de l'opérateur par ce signal de test, on tente de caractériser la fonction de transfert du système humain, pour des gestes simples de manipulation.

La situation idéale élémentaire pour identifier le geste serait de pouvoir appliquer directement un bruit blanc au niveau de l'entrée du dipôle constitué par l'opérateur :

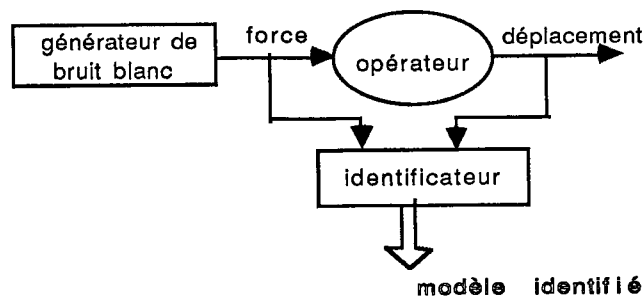


Figure 3.10 : Identification en boucle ouverte

**\* Simulation d'objets mécaniques simples**

En fait, on est amené à simuler des objets mécaniques pertinents gestuellement, autorisant une exploration fine du geste, dont l'action s'accompagne d'une réaction sensible de l'objet manipulé.

Par rapport à la situation précédente, cela revient à ajouter à l'entrée du système étudié la réaction de l'objet simulé (figure 3.11) :

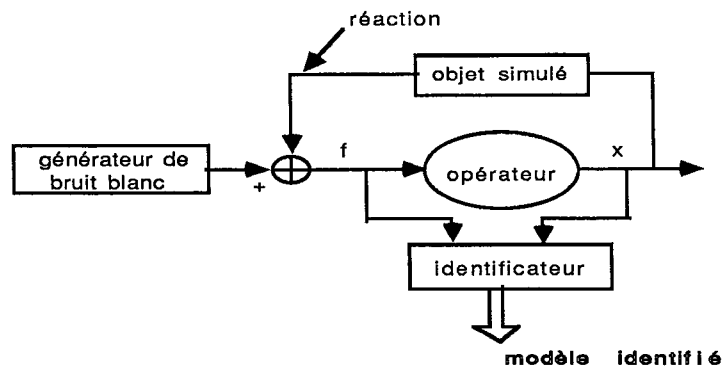
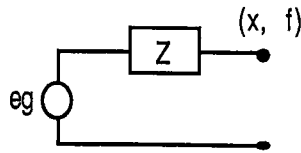


Figure 3.11 : Identification en boucle fermée

### *\* Gestes simples de manipulation*

Si l'on postule l'existence à court-terme d'un modèle linéaire du comportement de l'opérateur humain, il est possible de séparer les contributions respectives des parties actives et passives du geste. Considérons à nouveau la représentation suivante :



On distinguera les gestes passifs, pour lesquels le générateur de force  $eg$  est inhibé, des gestes "actifs", mettant en jeu une activité musculaire se traduisant par une modulation à la fois de  $eg$  et de l'impédance mécanique  $Z$ .

#### a. Gestes passifs et statiques

Afin d'évaluer les méthodes classiques d'identification et d'étalonner convenablement les conditions expérimentales, nous nous sommes intéressés à des gestes de préhension correspondant à une configuration statique des paramètres mécaniques de la main et du bras.

A cette phase de l'analyse, il est possible de contrôler qualitativement les caractéristiques mécaniques intentionnelles du geste en termes de raideur et d'inertie, et d'observer les effets qui accompagnent les différentes postures de la main au niveau des paramètres estimés. Par exemple on fera intervenir l'inertie d'un doigt, ou bien de la main, ou bien encore du bras tout entier. De même, il est possible de mettre à contribution tout ou partie de l'ensemble des articulations constituant le bras (phalanges, poignet, coude,...), en laissant libres certaines d'entre elles et en bloquant les autres.

#### b. Gestes actifs et dynamiques

L'objectif suivant a été d'appréhender des gestes dynamiques, se manifestant par des variations des paramètres et de la structure de l'impédance mécanique équivalente  $Z$ , et/ou des variations de l'activité du générateur  $eg$ .

#### I.4.1.2. Situation instrumentale générale

La notion d'objet manipulé est ensuite étendue à une classe d'objets plus large incluant des objets instrumentaux, pertinents pour le musicien, de plus ou moins grande complexité ; il est à remarquer qu'un grand nombre de situations instrumentales font intervenir des objets simulés

comportant des non linéarités, comme par exemple des cordes pincées ou frottées, des mécanismes d'échappement (piano), des butées ou seuils.

En outre, dans la situation de jeu instrumental, l'entrée appliquée ne doit pas perturber fortement le système. On est alors amené à réduire, voire à supprimer le signal de test, de telle façon que cette perturbation externe ne soit pas perceptible par l'opérateur.

On peut distinguer plusieurs catégories de gestes :

- les gestes de manipulation ou d'entretien, qui se traduisent par un déplacement ou une déformation de l'objet.
- les gestes percussionnels simples, qu'on est en mesure d'analyser seulement à partir de l'information captée durant le contact entre l'opérateur et l'instrument.
- les gestes "multiples", c'est-à-dire appliqués à un dispositif ayant une multiplicité de dispositifs semblables (clavier) ; chacun des gestes élémentaires s'exerçant sur les systèmes unitaires (touches) étant supposés connus, on cherche alors à analyser les mécanismes de plus haut niveau responsables de l'enchaînement et de la coordination des différents segments corporels (doigts) impliqués dans le geste.

#### **I.4.2. Environnement matériel**

Dans le cadre de notre travail, nous utiliserons des transducteurs gestuels à retour d'effort, pour lesquels une liaison mécanique homme/instrument peut être décomposée en deux lignes de transmission électriques orientées en sens inverse.

Des capteurs de différentes sortes (déplacement, force, vitesse, ...) opèrent la transformation de grandeurs mécaniques en signaux électriques.

Des dispositifs à contre-réaction (moteurs, amplificateurs, ...) effectuent la transformation inverse.



Pour une liaison mécanique particulière, on peut alors représenter la situation instrumentale en considérant l'opérateur humain comme un dipôle orienté comportant par exemple une entrée force et une sortie position.

Si l'on prend l'exemple de la touche, on peut en donner la représentation suivante :

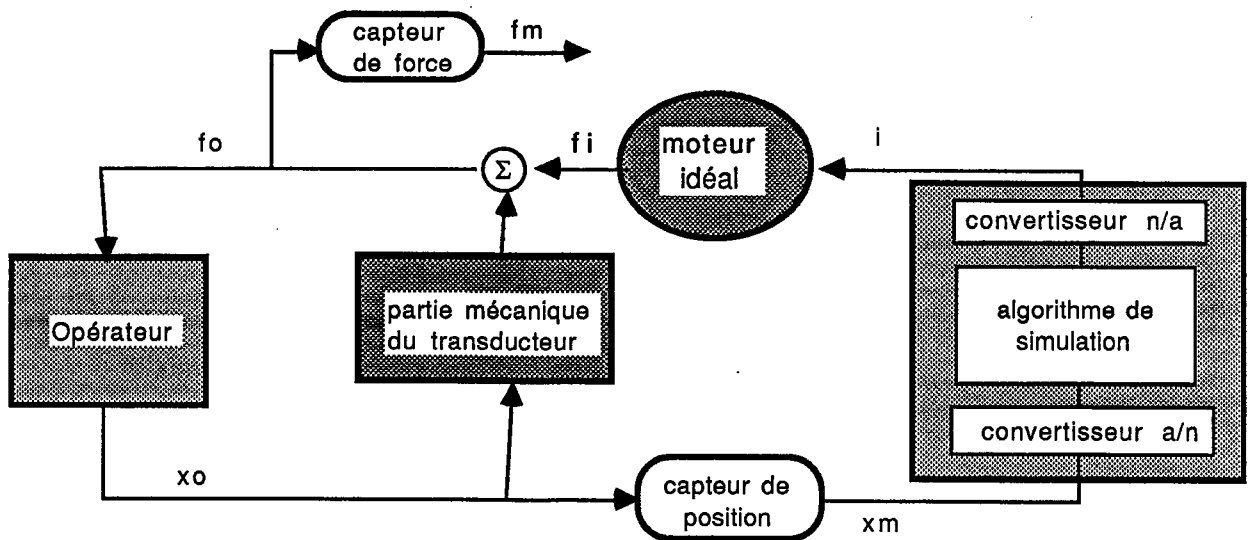


Figure 3.12 : Représentation de la touche

Pour mieux comprendre les phénomènes gestuels en cause lors de la manipulation d'objets mécaniques, on est alors amené à déterminer un modèle équivalent du système gestuel humain au lieu d'observation et de mesure des signaux d'entrée et de sortie de ce système.

Le problème qui se pose est le suivant :

*Peut-on, à partir des mesures des entrées/sorties du système, trouver les paramètres du modèle qui minimisent une certaine distance entre le comportement du système réel et celui du modèle ?*

Deux attitudes sont possibles face au problème posé, relativement à notre environnement matériel.

La première consiste à identifier le système global, (transducteur + opérateur) : M1, ce qui permet ensuite de remonter à la fonction de transfert de l'opérateur O', en supposant connues les caractéristiques des dispositifs physiques constituant le transducteur : caractéristiques mécaniques, moteur, capteurs. (figure 3.13) :

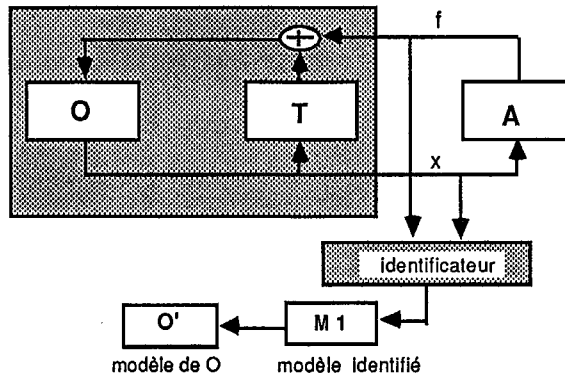


Figure 3.13 : Identification opérateur + transducteur

La seconde consiste à identifier le système directement à partir des mesures des signaux captés au niveau où s'exerce l'action de l'opérateur.

Dans ce cas, si l'on s'affranchit des caractéristiques des capteurs, on obtient directement la fonction de transfert de l'opérateur (figure 3.14) :

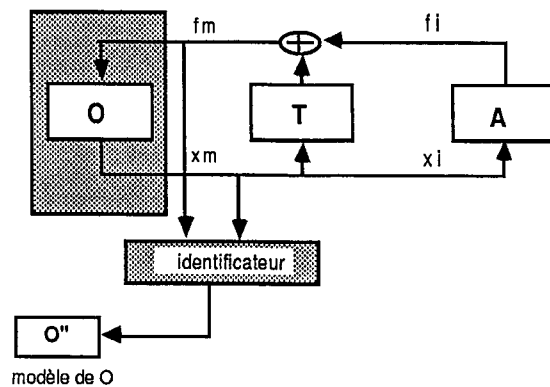


Figure 3.14 : Identification opérateur seul



chacune d'entre elles, afin de se placer dans les meilleures conditions d'identification. Il s'agit d'orienter dans un premier temps le problème vers la recherche d'un modèle de qualité approchant le

plus possible le comportement du système réel. Nous nous plaçons en effet dans le cadre d'une démarche par analyse/synthèse, dans le sens où la synthèse à partir de gestes identifiés doit permettre la restitution "exacte" des signaux issus de gestes réels.

Ayant expérimenté les méthodes d'identification dans des situations "idéalisées" en temps différé, nous pourrions éventuellement envisager dans un second temps utiliser les résultats de cette analyse pour contrôler de manière adaptative en temps réel les processus de simulation.

Il existe deux classes de méthodes qui répondent au problème posé :

\* Les méthodes non paramétriques permettent de déterminer une suite de points théoriquement infinie, comme par exemple la réponse impulsionnelle du système.

\* Les méthodes paramétriques, conduisent à la caractérisation du modèle par un ensemble fini de paramètres, qui sont par exemple les coefficients de la fonction de transfert du système.

L'identification comporte dans ce cas deux étapes :

\* une étape structurelle, ou qualitative, qui consiste à déterminer une classe de modèles approximant "convenablement" le comportement du système réel.

\* une étape quantitative où, ayant sélectionné un élément de la famille de modèles hypothétiquement candidats, on estime les paramètres du modèle, de manière à générer des données s'approchant le plus possible des données réelles.

Le choix de la structure du modèle peut tenir compte d'hypothèses simplificatrices ; par exemple si l'on souhaite réduire la dimension du système, connaissant les équations descriptives équivalentes en un point d'observation donné. En fait, ces équations sont souvent mal connues, mais contrairement au modèle statique qui nécessite une description du régime permanent dans toute sa gamme de fonctionnement, le modèle dynamique peut décrire le comportement du système autour d'un point de fonctionnement particulier. Par conséquent, il devient possible de proposer un modèle traduisant le comportement du système pour de petites variations autour de cet état d'équilibre, et sur une fenêtre temporelle limitée. On parlera alors de système linéarisable à court-terme.

Nous avons choisi d'utiliser des méthodes d'identification paramétriques, et plus particulièrement celles qui donnent lieu à une formulation régressive du problème, ce qui permet la détermination de fonctions de transfert linéaires, dans un contexte temporel discret. Dans cette optique, nous avons supposé que le système étudié est stable, et linéarisable à court terme.

## Objectifs du chapitre

### Approche classique

Après avoir donné un aperçu du principe de l'identification non paramétrique, nous développons plus précisément certaines méthodes paramétriques qui découlent du principe des Moindres Carrés Simples. Ces méthodes, abordées dans le cadre de l'analyse de systèmes linéaires, stationnaires, et invariants dans le temps, ont donné lieu à une abondante littérature. Elles sont décrites ici de manière un peu exhaustive, afin de rendre compte de la diversité des solutions pouvant être apportées à un problème spécifique ; de plus, nous expliquons comment on peut concevoir des variantes de solutions classiques à partir d'une compréhension du mauvais comportement de l'estimateur à la méthode employée.

Les méthodes explicitées se divisent en deux catégories :

- Les méthodes des Moindres Carrés Simples, Moindres Carrés Etendus, ainsi que la méthode du modèle de Landau se traduisent par une seule forme de réalisation possible.
- Le principe de la Variable Instrumentale, introduit par Wong et Polak [Wong 67] est beaucoup plus général ; une certaine liberté est laissée à l'utilisateur de choisir ses propres "variables instrumentales" adaptées à son problème spécifique [Söderström 83].

L'approche utilisée pour décrire séparément les diverses méthodes est de type "hors-ligne", c'est-à-dire que le modèle est calculé explicitement à partir d'une collection de données issues d'observations des entrées et des sorties du système.

Un algorithme itératif est ensuite dérivé des solutions hors-ligne, qui permet de regrouper toutes les méthodes exposées dans une version algorithmique unifiée.

### Adaptation des méthodes à notre problème

Le problème est ensuite orienté vers les exigences propres à notre application :

- D'une part, nous analysons en détail les conditions à respecter pour l'étude de systèmes en boucle fermée.
- D'autre part nous abordons la question de non-stationnarité du système ; l'algorithme récursif est alors modifié pour permettre le suivi des variations temporelles des paramètres estimés.

Cette partie du travail est décrite de manière exhaustive ; le détail des démonstrations n'est pas nécessaire à la compréhension de la suite de l'exposé.

## II.1. Principe d'une méthode non paramétrique

### Identification de la réponse impulsionnelle par intercorrélation :

Le principe de l'identification par intercorrélation, auquel nous ferons référence par la suite, est exposé brièvement.

Soit un système linéaire  $\mathcal{S}$ , caractérisé par sa réponse impulsionnelle  $h(t)$  :

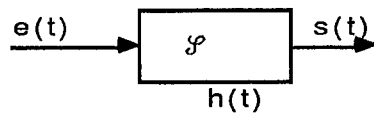


Figure 3.16 : Représentation du système  $\mathcal{S}$

Les signaux d'entrée  $e(t)$  et de sortie  $s(t)$  sont reliés par l'équation de convolution suivante :

$$s(t) = \int_{-\infty}^t e(\theta) h(t-\theta) d\theta \quad (3.1)$$

qui s'écrit encore :  $s(t) = e(t) * h(t)$  (3.2)

Si l'on considère la fonction d'autocorrélation de  $e(t)$ , d'une part, soit  $C_{ee}(\tau)$  ; la fonction d'intercorrélation entre  $e(t)$  et  $s(t)$ , d'autre part, soit  $C_{es}(\tau)$  ; il existe également une relation de convolution entre ces deux fonctions :

$$C_{es}(\tau) = C_{ee}(\tau) * h(\tau) \quad (3.3)$$

Si  $C_{ee}(\tau)$  est une impulsion de Dirac, i.e. si  $C_{ee}(\tau) = \delta(\tau)$ , alors on a :

$$C_{es}(\tau) = h(\tau) \quad (3.4)$$

Par conséquent, en appliquant un signal de test à l'entrée du système, qui est tel que sa fonction d'autocorrélation est proche d'une impulsion de Dirac, et en mesurant l'intercorrélation entre l'entrée et la sortie du procédé, on obtient directement la réponse impulsionnelle du système.

Ceci reste vrai lorsque l'on superpose au signal de test  $b(t)$  l'entrée du système en fonctionnement, soit  $x(t)$ .

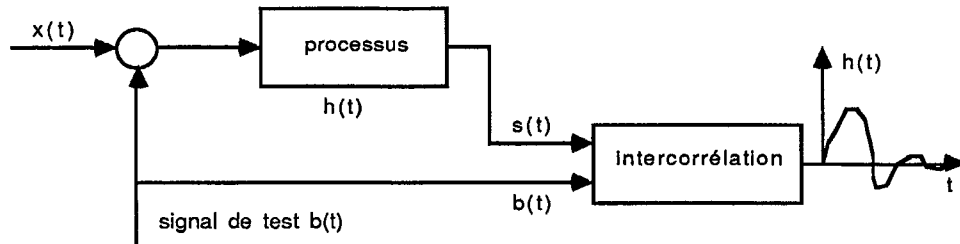


Figure 3.17 : Principe d'identification par intercorrélation

En effet,

$$C_{bs}(\tau) = C_{b(sx+sb)}(\tau) = C_{bsb}(\tau) = C_{bb}(\tau) * h(\tau) \quad (3.5)$$

car  $b$  est choisi de telle manière que  $b$  et  $x$  ne soient pas corrélés.

Si en particulier  $b(t)$  est un bruit blanc,

$$C_{bb}(\tau) = \delta(\tau) \quad (3.6)$$

$$C_{bs}(\tau) = h(\tau) \quad (3.7)$$

On obtient donc directement la réponse impulsionnelle du procédé en calculant l'intercorrélation entre le signal de test et la sortie du système. Des techniques de programmation non linéaire permettent ensuite de déterminer la fonction de transfert du système.

Il convient cependant d'être prudent par rapport à l'utilisation de telles méthodes. Nous verrons en effet qu'elles ne sont pas forcément adaptées à l'étude de systèmes bouclés.

## II.2. Méthodes paramétriques

Ces méthodes permettent directement d'identifier un modèle paramétrique discret, par minimisation d'une distance d'état qui peut être soit l'erreur de sortie, soit l'erreur d'équation.

### II.2.1. Choix de la structure du modèle déterministe

La représentation utilisée pour décrire le comportement du système est discrétisée, ce qui facilite la tâche de modélisation, puisque l'information dont on dispose est elle-même échantillonnée.

Nous considérerons par la suite la classe de modèles représentée par l'équation suivante :

$$A(q^{-1}) y(t) = B(q^{-1}) u(t) \quad (3.8)$$

où  $q^{-1}$  est l'opérateur retard défini par :  $q^{-1}y(t) = y(t-1)$

avec

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{na}q^{-na} \quad (3.9)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb}$$

Il existe différents types de représentations qui décrivent de manière identique un tel modèle.

Une possibilité est de réécrire l'équation (3.8) sous la forme d'une équation aux différences :

$$y(t) = b_0u(t) + b_1u(t-1) + \dots + b_{nb}u(t-nb) - a_1y(t-1) - a_2y(t-2) - \dots - a_{na}y(t-na) \quad (3.10)$$

De plus, il existe un lien immédiat entre les polynômes  $A(q^{-1})$  et  $B(q^{-1})$ , et les transformées en  $z$  respectives. Si l'on définit la transformée en  $z$  de la série temporelle  $\{x_t\}$  par :

$$X(z) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} x(t) z^{-t} \quad (3.11)$$

On obtient, dans le domaine fréquentiel :

$$A(z^{-1})Y(z) = B(z^{-1})U(z) \quad (3.12)$$

où  $U(z)$  et  $Y(z)$  sont respectivement les transformées en  $z$  des séquences temporelles  $\{u_t\}$  et  $\{y_t\}$ .

Une autre manière d'exprimer l'équation aux différences autorisant l'application des techniques de régression linéaire est donnée par :

$$y(t) = \theta^T \varphi(t) \quad (3.13)$$

$$\varphi^T(t) = [-y(t-1), \dots, -y(t-n_a), u(t), u(t-1), \dots, u(t-n_b)]$$

$$\theta^T = [a_1, a_2, \dots, a_{na}, b_0, b_1, \dots, b_{nb}]$$

$\varphi(t)$  étant un vecteur constitué des observation passées d'entrée et de sortie du procédé, et  $\theta$  un vecteur de paramètres, constitué des coefficients des polynômes respectifs  $A(q^{-1})$  et  $B(q^{-1})$ .



## II.2.2. Critères de ressemblance modèle-procédé.

Lorsque la structure du modèle est établie, il s'agit de déterminer les paramètres de ce modèle, de façon à ce que l'écart entre le système réel et le modèle soit minimal. Cette distance entre les comportements du modèle et du système réel est exprimée quantitativement au moyen d'un critère. Parmi les différents critères existants, on en retiendra deux qui sont les plus utilisés : l'erreur de sortie et l'erreur d'équation.

### II.2.2.1. Erreur de sortie.

Partant de la classe de modèles définie par l'équation (3.8), notre objectif est d'estimer un modèle particulier satisfaisant aux normes de minimisation du critère.

On notera  $\hat{A}(q^{-1})$  et  $\hat{B}(q^{-1})$  les estimateurs respectifs de  $A(q^{-1})$  et  $B(q^{-1})$ .

L'erreur de sortie est la différence entre la réponse du système et celle du modèle soumis à la même excitation :

$$\hat{v}(t) = y(t) - \hat{y}_m(t) = y(t) - \frac{\hat{B}(q^{-1})}{\hat{A}(q^{-1})} u(t) \quad (3.14)$$

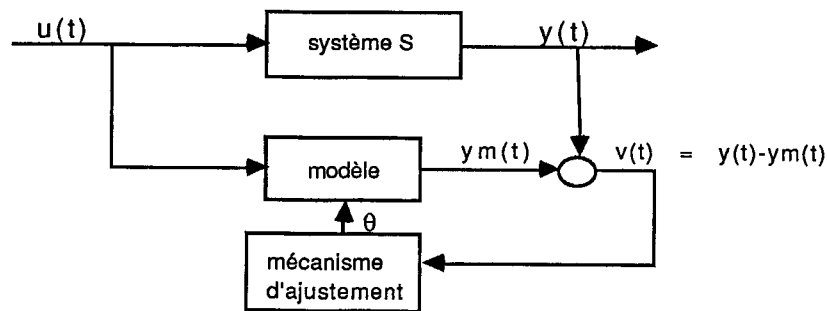


Figure 3.18 : Distance du "modèle"

Le critère numérique associé à cette distance est généralement quadratique : il s'exprime par la somme des carrés des erreurs sur l'horizon de mesures. Minimiser ce critère correspond à la recherche d'une identité de comportement entre le modèle et le système réel, dans un domaine de fonctionnement déterminé.

### II.2.2.2. Erreur d'équation

C'est l'écart entre la sortie réelle du système et la sortie prédite au même instant, à partir de l'information disponible aux instants précédents.

$$\hat{\varepsilon}(t) = \hat{A}(q^{-1}) y(t) - \hat{B}(q^{-1}) u(t) = y(t) - \hat{\theta}^T \varphi(t) \quad (3.15)$$

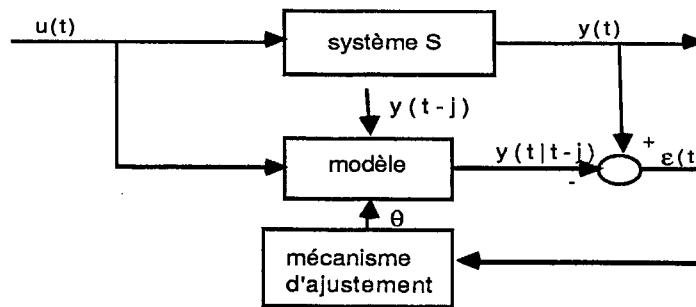


Figure 3.19 : Distance de prédiction

avec :

- $u(t), y(t)$  : mesures d'entrées/sorties disponibles à l'instant  $t$ ,
- $y(t-j)$  : mesures de la sortie aux instants précédent  $t$  ( $j$  variant de 1 à  $p$ ),
- $\hat{y}(t|t-j)$  : prédiction de la sortie à l'instant  $t$ .

$\hat{\varepsilon}(t)$  représente un estimateur de l'erreur d'équation qui a la signification physique d'erreur de prédiction

### II.2.2.3. Choix de l'erreur

Minimiser l'erreur d'équation/prédiction ou bien l'erreur de sortie n'a pas la même incidence sur le modèle.

La minimisation de l'erreur de prédiction consiste à déterminer un modèle qui permet de prédire à court-terme la sortie du système, méthode appropriée pour le contrôle adaptatif. En effet, cela revient à "réajuster" le prédicteur à chaque nouvelle mesure de sortie, et donc favorise le suivi des paramètres du système et la prédiction de la sortie en temps réel.

La minimisation de l'erreur de sortie obéit plutôt à l'objectif "similitude de comportement", et correspond à la détermination de la fonction de transfert du système.

Si la structure du modèle est proche de celle du système, on atteindra simultanément pour certaines méthodes les minima de l'erreur de sortie et de l'erreur d'équation.

Par contre, il est souvent possible de trouver un modèle linéaire à court-terme, assurant une bonne prédiction du processus réel à chaque pas temporel, mais dont la structure est très éloignée de celle du système étudié (par exemple, le système peut comporter des non linéarités).

Dans les algorithmes que nous allons expliciter, nous utiliserons exclusivement comme critère numérique la norme  $L^2$  de l'erreur d'équation :

$$J_N(\hat{\theta}) = \sum_{t=1}^N \hat{\varepsilon}^2(t) \quad (3.16)$$

A partir de la suite des données de l'instant  $t=1$  à  $N$ , l'estimation du vecteur de paramètres  $\theta$  est alors obtenue par minimisation du critère  $J_N(\hat{\theta})$  par rapport à  $\theta$ .

### II.2.3. Modélisation des composantes stochastiques.

Quelles que soient les méthodes employées, on représentera le système réel par une "boîte noire" déterministe, linéaire, à paramètres constants, reliant les sorties aux entrées, et perturbée par des bruits d'origines diverses : bruits propres du système, bruits de mesure, bruits de la charge du système (instrument simulé), erreurs de modélisation ; ces dernières prennent en compte le fait que la représentation précédente est inexacte, à cause de la présence possible de non-linéarités, de la sous-estimation éventuelle de l'ordre du système, etc.

L'objectif de l'identification est, connaissant la suite de mesures  $\{u(t)\}$  et  $\{y(t)\}$ , d'inférer un modèle mathématique qui ne dépende pas des sources de bruit. L'hypothèse de linéarité autorise une représentation qui ramène le bruit additivement sur la sortie.

La figure 3.20 donne une représentation générale du système à identifier, en présence de bruit.

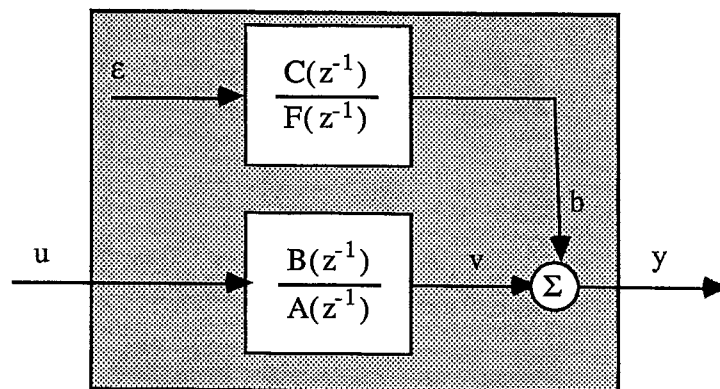


Figure 3.20 : Structure du modèle

Les seules grandeurs accessibles par l'utilisateur sont l'entrée  $u$  et la sortie  $y$  mesurées à des instants d'échantillonnage réguliers.  $(v)$  est la sortie réelle du bloc déterministe à laquelle s'ajoute le bruit de sortie  $b(t)$ . Les caractéristiques du signal aléatoire  $b(t)$  ne sont pas connues a priori.

Nous pouvons choisir pour ce bruit le modèle très général représenté par la fonction de transfert suivante :

$$G_{\varepsilon}(q^{-1}) = \frac{b(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{C(q^{-1})}{F(q^{-1})} = \frac{1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_p q^{-p}}{1 + f_1 q^{-1} + \dots + f_r q^{-r}} \quad (3.17)$$

où l'on suppose que les racines de  $F(z^{-1})$  sont de module inférieur à 1 (système stable) .

$\varepsilon(t)$  est un bruit blanc statistiquement indépendant, non mesurable, ayant les propriétés suivantes :

1.  $E\{ \varepsilon(t) \} = 0$
2.  $\text{cov}\{ \varepsilon(t), \tau \} = E\{ \varepsilon(t) \varepsilon(t+\tau) \} = \sigma^2 \delta(\tau)$

Ceci correspond à un signal aléatoire centré, de variance  $\sigma^2$ , et dont la fonction d'autocorrélation est représentée par le symbole de Kronecker  $\delta(t)$ .

On peut traduire la représentation précédente sous la forme d'erreur d'équation :

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + H_{\varepsilon}(q^{-1})\varepsilon(t) \quad (3.18)$$

avec

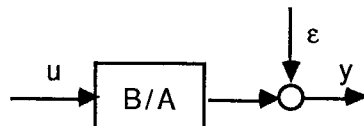
$$H_{\varepsilon}(q^{-1}) = \frac{A(q^{-1}) C(q^{-1})}{F(q^{-1})}$$

Les méthodes d'identification dépendent en général des hypothèses faites sur la structure du filtre de bruit. Trois cas peuvent être envisagés :

$$1) H_{\varepsilon}(q^{-1}) \equiv A(q^{-1}) \quad (\text{Bruit blanc en sortie})$$

Dans ce cas, on a :

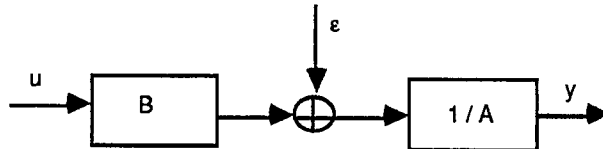
$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + A(q^{-1})\varepsilon(t)$$



2)  $H_\varepsilon(q^{-1}) \equiv I$  (Erreur d'équation blanche)

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + \varepsilon(t)$$

Ceci peut être représenté de la manière suivante :

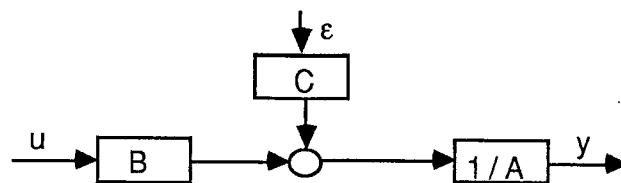


Ce cas particulier, où l'erreur d'équation est une séquence de bruit blanc correspond à celui où le filtre de bruit a pour fonction de transfert  $1/A$ , ce qui n'est pas très réaliste.

Il permet l'utilisation de la méthode des moindres carrés simples.

3)  $H_\varepsilon(q^{-1}) \equiv C(q^{-1})$

Ce cas est plus général que le précédent, puisqu'il permet d'inclure la modélisation du bruit dans la représentation du système. Le filtre de bruit a alors comme fonction de transfert  $C/A$ .



Dans la suite, nous nous intéresserons à la classe de modèles :

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})\varepsilon(t)$$

Ce modèle autorise en particulier la présence de séquences de bruit corrélées.

### II.2.4. Solution explicite par la méthode des Moindres Carrés Simples

Considérons la classe de modèles traduisant la formulation sous forme de régression linéaire :

$$A(q^{-1}) y(t) = B(q^{-1}) u(t) + e(t) \quad (3.19)$$

où  $e(t)$  représente l'erreur d'équation dont on ne spécifie pas les propriétés.

L'équation (3.19) peut encore s'écrire :

$$y(t) = \varphi^T(t) \theta + e(t) \quad (3.20)$$

avec :

$$\varphi^T(t) = [ -y(t-1), \dots, -y(t-n_a), u(t-k), \dots, u(t-k-n_b) ]$$

$$\theta^T = [ a_1, \dots, a_{n_a}, b_0, b_1, \dots, b_{n_b} ]$$

En itérant l'expression (3.20) pour N échantillons successifs, on obtient le système d'équations :

$$\begin{aligned} y(1) &= \varphi^T(1)\theta + e(1) \\ y(2) &= \varphi^T(2)\theta + e(2) \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ y(N) &= \varphi^T(N)\theta + e(N) \end{aligned} \quad (3.21)$$

Et si l'on pose :

$$Y_N^T = [y(1), \dots, y(N)]$$

$$E_N^T = [e(1), \dots, e(N)]$$

$$\phi_N^T = [\varphi(1), \dots, \varphi(N)]$$

On a alors

$$Y_N = \phi_N \theta + E_N \quad (3.22)$$

Le critère s'exprime de manière quadratique par rapport à  $E_N$  :

$$Y_N = E_N^T E_N = (Y_N - \phi_N \theta)^T (Y_N - \phi_N \theta) \quad (3.23)$$

En minimisant  $J_N$  par rapport à  $\theta$ , on peut trouver une solution explicite.

En effet,

$$J_N = Y_N^T Y_N - \theta^T \phi_N^T Y_N - Y_N^T \phi_N \theta + \theta^T \phi_N^T \phi_N \theta \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial J_N}{\partial \theta} = -2 \phi_N^T Y_N + 2 \phi_N^T \phi_N \theta$$

Comme  $J_N$  est un optimum,

$$\left( \frac{\partial J_N}{\partial \theta} \right)_{\theta = \hat{\theta}_{mcs}} = 0 \quad (3.25)$$

D'où l'on tire une solution analytique :

$$\hat{\theta}_N = (\phi_N^T \phi_N)^{-1} \phi_N^T Y_N \quad (3.26)$$

qui peut également s'exprimer par :

$$\hat{\theta}(N) = \left[ \sum_{t=1}^N \varphi(t) \varphi^T(t) \right]^{-1} \sum_{t=1}^N \varphi(t) y(t) \quad (3.27)$$

On calcule aisément la matrice dérivée seconde du critère, encore appelée Hessien :

$$\frac{\partial^2 J_N}{\partial \theta^2} = 2 \phi_N^T \phi_N \quad (3.28)$$

C'est une matrice qui, par construction est définie, positive ou nulle. Par, conséquent, la solution optimale est bien un minimum.

### II.2.5. Propriétés statistiques de l'estimateur

Supposons que le système vérifie la relation :

$$y(t) = \varphi^T(t) \theta^* + e(t)$$

avec  $\theta^*$  : vecteur de paramètres "réel"

En insérant cette expression dans (3.27), on obtient :

$$\theta_N = \left[ \sum_{t=1}^N \varphi(t) \varphi^T(t) \right]^{-1} \left[ \sum_{t=1}^N \varphi(t) \{ \varphi^T(t) \theta^* + e(t) \} \right] \quad (3.29)$$

Les propriétés générales requises pour obtenir une bonne estimation de paramètre sont :

\* d'une part que l'estimateur soit non biaisé (sans erreur systématique), ce qui signifie que

$$E\{ \theta_N \} = \theta^* \quad N \text{ fini} \quad (3.30)$$

\* d'autre part que l'estimateur soit consistant, c'est-à-dire que  $\theta$  converge vers sa valeur réelle  $\theta^*$  lorsque  $N$  tend vers l'infini ; ceci se traduit par :

$$\lim_{N \rightarrow \infty} E\{ \theta_N \} = \theta^* \quad (\text{estimateur asymptotiquement sans biais}) \quad (3.31)$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} E\{ [\theta_N - \theta^*][\theta_N - \theta^*]^T \} = 0 \quad (3.32)$$

Il découle de l'expression (3.29) des conditions suffisantes qui assurent la convergence asymptotique de  $\theta_N$  vers  $\theta^*$  :

$$(1) \quad \lim_{N \rightarrow \infty} \det \left( \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t) \varphi^T(t) \right) \neq 0 \quad (3.33)$$

$$(2) \quad \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t) e(t) = 0 \quad (3.34)$$

La deuxième condition est remplie si les vecteurs  $e(t)$  et  $\varphi(t)$  sont non corrélés, donc en particulier si  $e(t)$  est une séquence blanche centrée.

Cette contrainte restreint considérablement le champ d'applicabilité de la méthode des moindres carrés simples, pour des systèmes bruités. En effet, pour que l'estimation des paramètres soit non biaisée, il faut que le filtre de bruit ait pour structure  $1/A(q^{-1})$ , ce qui ne correspond pas généralement à la réalité.



La solution explicite proposée ayant cependant l'avantage d'être très simple à calculer, on cherchera par conséquent d'autres méthodes dérivées en cherchant à améliorer les propriétés statistiques de l'estimateur.

## II.2.6. Méthodes de la variable instrumentale

De manière générale, les séquences  $e(t)$  (erreur d'équation) et  $\varphi(t)$  (observation des entrées et sorties passées) sont corrélées. Pour palier à ce problème, on tente alors de modifier la méthode des moindres carrés, en substituant le vecteur  $\varphi(t)$  par un vecteur  $z(t)$  qui satisfait les conditions explicitées précédemment. La méthode de la variable instrumentale couramment employée permet d'obtenir une estimation du vecteur de paramètres  $\theta$  qui a pour expression :

$$\hat{\theta}_N = \left[ \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N z(t) \varphi^T(t) \right]^{-1} \left[ \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N z(t) y(t) \right] \quad (3.35)$$

Les conditions que doivent satisfaire l'estimateur deviennent :

$$(1) \quad \lim_{N \rightarrow \infty} \det \left( \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N z(t) \varphi^T(t) \right) \neq 0 \quad (3.36)$$

$$(2) \quad \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N z(t) e(t) = 0 \quad (3.37)$$

Il découle de la relation (1) que les vecteurs  $z(t)$  et  $\varphi(t)$  doivent être corrélés, et de la condition (2) que les vecteurs  $z(t)$  et  $e(t)$  doivent être décorrélés.

Toute matrice  $Z_N$  définie par  $Z_N^T = [z(1), \dots, z(N)]$ , et satisfaisant (1) et (2), est appelée matrice de la variable instrumentale, et les éléments du vecteur  $z(t)$  sont appelés **variables instrumentales**.

Les estimateurs de cette classe de méthodes seront notés  $\theta^{iv}$ .

### Remarque :

Avant de proposer des exemples de variables instrumentales, il est intéressant d'analyser l'effet d'une transformation sur ces variables.

Considérons la transformation du vecteur  $z(t)$  par la matrice non singulière  $T$  telle que

$$\xi(t) = Tz(t) .$$

Il est immédiat que cette opération n'affecte pas l'estimateur des paramètres  $\theta$  :

$$\left[ \sum Tz(t) \varphi^T(t) \right]^{-1} \left[ \sum Tz(t) y(t) \right] = \left[ \sum z(t) \varphi^T(t) \right]^{-1} \left[ \sum z(t) y(t) \right] = \theta$$

## II.2.7 . Choix de variables instrumentales

### II.2.7.1. Un cas théorique idéal

Supposons que le modèle décrivant le système peut se traduire par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} y(t) &= y_u(t) + w(t) \\ \text{avec} \quad y_u(t) &= B(q^{-1})/A(q^{-1})u(t) \end{aligned} \quad (3.36)$$

$y_u(t)$  étant la sortie non bruitée du processus.

Ces expressions peuvent s'écrire sous une forme régressive :

$$\begin{aligned} y(t) &= \varphi^T(t)\theta + e(t) \\ \text{et} \quad y_u(t) &= \psi^T(t) \theta \end{aligned} \quad (3.37)$$

avec :

$$\varphi^T = [-y(t-1), \dots, -y(t-n_a), u(t-1), \dots, u(t-n_b)]$$

et

$$\psi^T = [-y_u(t-1), \dots, -y_u(t-n_a), u(t-1), \dots, u(t-n_b)]$$

Si l'entrée  $u(t)$  et le signal d'erreur  $e(s)$  sont indépendants pour tous  $t$  et  $s$ , on en déduit que  $\psi(t)$  est indépendant de  $e(s)$  quels que soient  $t$  et  $s$ .

Par conséquent, si l'on choisit pour variables instrumentales les éléments de  $\psi(t)$ , il en découle que:

1) La matrice :

$$R(t) = E \{ \psi(t) \varphi^T(t) \} = E \{ \psi(t) \psi^T(t) \}$$

est définie positive, à condition que l'entrée soit suffisamment "excitante", et que le modèle ne soit pas "sur-paramétrisé".

2) La condition  $E \{ \psi(t)e(t) \} = 0$  est toujours vraie.

Choisir pour variables instrumentales les éléments de  $\psi(t)$  assurerait donc que les conditions de convergence de l'estimateur soient vérifiées.

Or, ce cas idéal, bien que d'un intérêt théorique, ne peut pas être utilisé directement, puisque l'on n'accède pas aux sorties  $\{y_u(t)\}$  non bruitées du système.

### II.2.7.2. Variable instrumentale à partir d'un modèle auxiliaire

Une variante couramment utilisée consiste à prendre pour vecteur  $z(t)$  :

$$z^T(t) = (-y_m(t-1), \dots, -y_m(t-n_a), u(t-1), \dots, u(t-n_b)) \quad (3.40)$$

$y_m(t)$  étant la sortie d'un modèle auxiliaire déterminé à priori (par exemple un modèle donné par  $\theta^{mcs}$ ) ;  $y_m$  est calculé à chaque instant par :

$$y_m(t) = -a_1 y_m(t-1) - \dots - a_{n_a} y_m(t-n_a) + b_0 u(t) + \dots + b_{n_b} u(t-n_b)$$

### II.2.7.3 Variable Instrumentale de Young

Il est possible de considérer le problème sous une forme itérative, c'est-à-dire que l'estimateur est réajusté à chaque pas temporel. Le vecteur "instrumental" de Young est défini par :

$$z^T(t) = (-y(t-1), \dots, -y(t-n_a), u(t), \dots, u(t-n_b)) \quad (3.41)$$

La sortie  $y(t)$  étant prédite de la manière suivante :

$$y(t) = b_0(t-\tau)u(t) + \dots + b_{n_b}(t-\tau)u(t-n_b) - a_1(t-\tau)y(t-1) - \dots - a_{n_a}(t-\tau)y(t-n_a)$$

Le retard  $\tau$  est choisi suffisamment grand pour que l'estimateur au temps  $(t-\tau)$  ne soit pas corrélé avec  $e(t)$ . Par exemple, si  $e(t) = C(q^{-1})\varepsilon(t)$ ,  $\{\varepsilon(t)\}$  étant une séquence blanche centrée, et  $C(q^{-1})$  un polynôme d'ordre  $(n_c)$ , alors on prendra  $\tau > n_c$ .

Une autre façon de décorréliser les variables instrumentales avec l'erreur  $e(t)$ , est de retarder les variations des paramètres du modèle estimé par application d'un filtre passe-bas comportant un retard pur.

#### II.2.7.4. Variantes applicables pour des systèmes en boucle fermée

Nous avons supposé jusqu'à présent que l'entrée  $u(t)$  était décorrélée de l'erreur d'équation  $e(t)$ . Or, l'entrée étant en partie déterminée par la sortie d'un modèle de simulation, l'hypothèse précédente n'est plus valable. Certaines méthodes de la variable instrumentale restent applicables dans le cas de systèmes bouclés. On peut citer :

\* La variable instrumentale à observations retardées :

$$z^T(t) = [ -y(t-k-1), \dots, -y(t-k-n_a), u(t-k-1), \dots, u(t-k-n_b) ] \quad (3.42)$$

(cf. Stoica et Soderstrom pour plus de détails 1983 : [Söderström 83])

\* La variante proposée par Bauer et Unbehauen (1978) [Söderström 83]

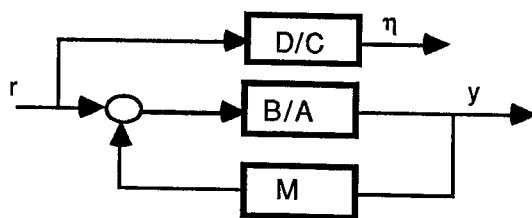
$$z^T(t) = [ -\eta(t-1), \dots, -\eta(t-n_a), r(t-1), \dots, r(t-n_b) ] \quad (3.43)$$

avec :

$$C(q^{-1}) \eta(t) = D(q^{-1}) r(t)$$

et 
$$u(t) = r(t) - M(q^{-1})y(t)$$

$r$  est un signal de test, et  $M$  est la fonction de transfert du filtre de boucle :



#### **II.2.8. Méthode des Moindres Carrés Pondérés**

Supposons que l'erreur d'équation  $e(t)$  soit caractérisée par sa matrice de variance/covariance définie par :

$$\mathcal{E}\{E_N E_N^T\} = R_{EE_N} \quad (3.44)$$

Dans le cas général, la séquence  $\{e(t)\}$  n'est pas blanche, et la matrice  $R_{EE_N}$  est différente de la matrice identité.

La décomposition de Cholesky permet d'écrire :

$$R_{EE_N} = \Sigma_N \Sigma_N^T \quad (3.45)$$

En multipliant chacun des membres de l'équation :  $Y_N = \Phi_N \theta + E_N$  par  $\Sigma_N^{-1}$ , on obtient :

$$\Sigma_N^{-1} Y_N = \Sigma_N^{-1} \Phi_N \theta + \Sigma_N^{-1} E_N \quad (3.46)$$

ou

$$Y'_N = \Phi'_N \theta + E'_N$$

Si l'on remarque que :

$$\mathcal{E}\{E'_N E'^T_N\} = \mathcal{E}\{\Sigma_N^{-1} E_N E_N^T \Sigma_N^{-1T}\} = \Sigma_N^{-1} \mathcal{E}\{E_N E_N^T\} \Sigma_N^{-1T} = \Sigma_N^{-1} \Sigma_N \Sigma_N^T \Sigma_N^{-1T} = I \quad (3.47)$$

alors l'application du principe des Moindres Carrés à (3.46) conduit à l'obtention d'un estimateur consistant :

$$\hat{\theta}^{mcp} = (\Phi_N^T \Phi'_N)^{-1} \Phi_N^T Y'_N = (\Phi_N^T R_{EE_N}^{-1} \Phi_N)^{-1} \Phi_N^T R_{EE_N}^{-1} Y_N \quad (3.48)$$

Cela revient en fait à une méthode de la variable instrumentale, avec pour matrice instrumentale :

$$Z_N^T = \Phi_N^T R_{EE_N}^{-1} \quad (3.49)$$

Cela correspond également à la forme optimale des Moindres Carrés Pondérés.

Dans le cas général, la matrice de covariance de l'erreur d'équation n'est pas connue, et l'on utilise une matrice de pondération  $W_N$ , définie positive.

Cela conduit à l'estimateur pondéré suivant :

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_N^{mcp} &= (\Phi_N^T W_N^{-1} \Phi_N)^{-1} (\Phi_N^T W_N^{-1} Y_N) \\ &= \left( \sum_{t=1}^N w_t \varphi(t) \varphi^T(t) \right)^{-1} \left( \sum_{t=1}^N w_t \varphi(t) y(t) \right) \end{aligned} \quad (3.50)$$

Le critère minimisé est alors :

$$J_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N w_t [y(t) - \varphi^T(t) \theta]^2 \quad (3.51)$$

### II.2.9. Méthode des Moindres Carrés Etendus

Cette méthode est intéressante lorsque l'on désire affiner le modèle en introduisant un filtre de bruit. Ceci permet ainsi d'obtenir une estimation non biaisée asymptotiquement pour une classe plus large de bruits ramenés à la sortie du système.

On considère alors le modèle décrit par l'équation :

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})\varepsilon(t) \quad (3.52)$$

avec  $C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc}$

La formalisation du problème revient à celle des Moindres Carrés Simples, si l'on pose :

$$\hat{\varphi}(t) = [-y(t-1), \dots, -y(t-n_a), u(t), \dots, u(t-n_b), \hat{\varepsilon}(t-1), \dots, \hat{\varepsilon}(t-n_c)]$$

$$\tilde{\theta}^T = [\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_{n_a}, \hat{b}_0, \dots, \hat{b}_{n_b}, \hat{c}_1, \dots, \hat{c}_{n_c}]$$

auquel cas on retrouve le modèle :

$$y(t) = \tilde{\theta}^T \tilde{\varphi}(t) + \varepsilon(t) \quad (3.53)$$

où l'on cherche à "blanchir"  $\varepsilon$ .

On distingue deux algorithmes :

- l'algorithme de Panuska, où  $\varepsilon$  est estimée a priori,
- l'algorithme de Larminat, où  $\varepsilon$  est estimée a posteriori.

### II.2.10. Méthode de Landau

Cette méthode utilise le concept de "modèle de référence", introduit par Landau.

L'idée de base est de comparer la sortie du système réel avec celle d'un modèle de référence ajustable, la correction des paramètres du modèle étant fonction de la minimisation de l'erreur de sortie.

## II.3. Formulation itérative unifiée des méthodes hors-lignes précédentes

L'expression " hors ligne " de l'estimateur par la méthode des moindres carrés n'est pas celle que nous utilisons dans l'algorithme. En effet, l'application directe du résultat explicite obtenu poserait des problèmes numériques. Nous avons en ce qui nous concerne, employé un traitement séquentiel "en ligne" qui a l'avantage de se prêter à des techniques adaptatives de suivi de paramètres.

Supposant connue l'estimation du vecteur de paramètres  $\theta_N$  à partir des  $N$  mesures d'entrées/sorties du système, on calcule l'estimateur au pas suivant, compte tenu de l'apport d'information supplémentaire, soit  $y(N+1)$  et  $u(N+1)$  :

$$\theta(N+1) = \mathcal{F} \{ \theta(N), u(N+1), y(N+1) \} \quad (3.54)$$

Les méthodes itératives présentent un certain nombre d'avantages :

- La formulation itérative permet de s'affranchir des problèmes numériques posés par la solution explicite.
- D'autre part, comme elles conduisent à des calculs très simples, et traitent l'information séquentiellement, elles peuvent être implantées sur des calculateurs de faible capacité de mémoire ou de calcul, tout en permettant le traitement d'un gros volume de données.
- La possibilité de corriger l'estimation à chaque période d'échantillonnage autorise les techniques adaptatives de suivi de paramètres, à condition de pondérer les mesures les plus récentes. En ce sens, ces méthodes sont reliées à la théorie des systèmes adaptatifs.
- Enfin, elles rendent compte de l'inadéquation du modèle au système réel. En effet, la forme de la variation des paramètres peut suggérer des modifications de la structure du modèle.

Les méthodes d'identification hors-ligne décrites précédemment conduisent à la formulation de l'estimateur sous la forme unifiée :

$$\hat{\theta}_N = \left( \sum_{t=1}^N w_t \psi(t) \zeta^T(t) \right)^{-1} \sum_{t=1}^N w_t \zeta(t) y(t) \quad (3.55)$$

$w_t$  étant un facteur de pondération.

Pour les différentes méthodes ( $\hat{\theta}^{mcs}$ ,  $\hat{\theta}^{iv}$ ,  $\hat{\theta}^{mcp}$ ,  $\hat{\theta}^{mce}$ ), on sélectionne  $\psi(t)$  et  $\zeta(t)$  de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \hat{\theta}^{mcs} \text{ (Moindres Carrés Simples)} : & \quad \psi(t) = \varphi(t) \\ & \quad \zeta(t) = \varphi(t) \\ \hat{\theta}^{iv} \text{ (Variable Instrumentale)} : & \quad \psi(t) = z(t) \\ & \quad \zeta(t) = \varphi(t) \\ \hat{\theta}^{mce} \text{ (Moindres Carrés Etendus)} : & \quad \psi(t) = \varphi_e(t) \\ & \quad \zeta(t) = \varphi_e(t) \end{aligned}$$

avec

$$\varphi(t) = [-y(t-1), \dots, -y(t-n_a), u(t), \dots, u(t-n_b)] \quad (3.56)$$

$$\varphi_e(t) = [-y(t-1), \dots, -y(t-n_a), u(t), \dots, u(t-n_b), \hat{\varepsilon}(t-1), \dots, \hat{\varepsilon}(t-n_c)]$$

$$z(t) = [-h(t-1), \dots, -h(t-n_a), u_f(t), \dots, u_f(t-n_b)]$$

$h$  : variables instrumentales

$u_f$  : entrée filtrée

Si l'on pose :

$$R(t) = \sum_{k=1}^t w_k \psi(k) \zeta^T(k) \quad (3.57)$$

Il découle, de l'expression  $\hat{\theta}_N$  que :

$$\sum_{k=1}^{t-1} w_k \psi(k) y(k) = R(t-1) \theta(t-1)$$

De plus, d'après la définition de  $R(t)$ , on a :

$$R(t) = R(t-1) + w_t \psi(t) \zeta^T(t)$$

et donc :

$$\begin{aligned} \theta(t) &= R^{-1}(t) \left( \sum_{k=1}^{t-1} w_k \psi(k) y(k) + w_t \psi(t) y(t) \right) \\ &= R^{-1}(t) [R(t-1) \theta(t-1) + w_t \psi(t) y(t)] \\ &= R^{-1}(t) \{R(t) \theta(t-1) + w_t \psi(t) [-\zeta^T(t) \theta(t-1) + y(t)]\} \end{aligned} \quad (3.58)$$

$$\theta(t) = \theta(t-1) + R^{-1}(t) \psi(t) w_t [y(t) - \zeta^T(t) \theta(t-1)]$$

$$R(t) = R(t-1) + w_t \psi(t) \zeta^T(t)$$

### Forme équivalente de l'algorithme

L'expression itérative précédente n'est pas très satisfaisante, puisqu'elle conduit à inverser une matrice à chaque pas temporel.



En utilisant le lemme d'inversion de matrice suivant :

$$[A + BCD]^{-1} = A^{-1} - A^{-1}B[DA^{-1}B + C^{-1}]^{-1}DA^{-1} \quad (3.59)$$

et en posant :

$$A = P(t-1), \quad B = \psi(t), \quad C = w_t, \quad D = \zeta^T(t)$$

On en déduit l'algorithme :

$$\theta(t) = \theta(t-1) + K(t) [y(t) - \psi^T(t) \theta(t-1)] \quad (3.60)$$

$$K(t) = \frac{P(t-1) \psi(t)}{\frac{1}{w_t} + \zeta^T(t) P(t-1) \psi(t)}$$

$$P(t) = P(t-1) - \frac{P(t-1) \psi(t) \zeta^T(t) P(t-1)}{\frac{1}{w_t} + \zeta^T(t) P(t-1) \psi(t)}$$

Ainsi, tous les algorithmes décrivant le fonctionnement des méthodes paramétriques précédentes ont la même structure.

Il devient alors possible d'intégrer plusieurs solutions dans un même logiciel, ce qui facilite considérablement l'implantation des algorithmes et l'exploration des différentes méthodes pour une application particulière.

Remarque :

Le principe de fonctionnement de l'identification itérative peut être assimilé à celui un asservissement à gain réglable :  $K(t)$  ; la valeur du gain influant comme un servo-mécanisme sur la stabilité (convergence) et sur la rapidité de la méthode.

Le vecteur de paramètres  $\theta$  est ainsi "asservi" à la minimisation d'une erreur d'équation ou de sortie. Pour moduler la rapidité de convergence, il est possible de jouer dynamiquement sur la valeur de ce gain. Par conséquent, si les paramètres du système varient dans le temps (système non-stationnaire), on aura intérêt à avoir un gain suffisamment fort, de manière à sensibiliser l'algorithme à des variations paramétriques aléatoires ; par contre, si le système est fortement bruité, il faut limiter le gain, sinon la sortie du modèle va tendre à poursuivre le bruit en interprétant les fluctuations aléatoires du signal comme résultant de variations de paramètres.

## II.4. Analyse théorique du problème d'identification en boucle fermée

### II.4.1. Position du problème

Considérons le système bouclé représenté à la figure 3.21 :

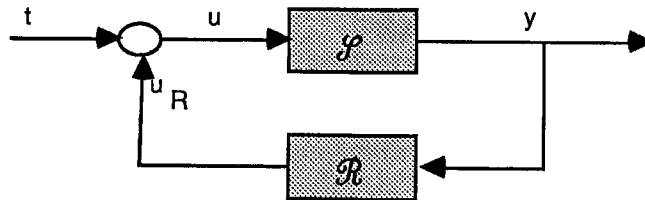


Figure 3.21 : Représentation du système bouclé

Un certain nombre de facteurs risquent d'influer sur les résultats de l'identification, à savoir :

- la nature du système réel à identifier (linéaire à court terme, ordre, retards purs,...)
- la structure du modèle de représentation :  $\mathcal{M}$
- la méthode d'identification utilisée
- la nature de la fonction de rétroaction, encore appelée "régulateur".

$\mathcal{S}$  est le système à identifier (le geste), dont les signaux d'entrée et de sortie sont respectivement  $u$  ( $f$ ) et  $y$  ( $x$  ou  $v$ ),  $\mathcal{R}$  représente le modèle de simulation (l'instrument simulé) ou fonction de rétroaction ; un signal de test externe, soit ( $t$ ), sera éventuellement appliqué à l'entrée du système.

Il y a deux manières d'appréhender le problème :

- soit en procédant à l'identification du système de manière indirecte, c'est-à-dire en modélisant globalement le système bouclé, ce qui revient à modéliser le signal stochastique ( $y$ ) au moyen d'un filtre excité par du bruit blanc. Il s'agit ensuite de déterminer la fonction de transfert de l'opérateur, connaissant les caractéristiques de la fonction de rétroaction.
- soit en analysant le système de manière directe, c'est-à-dire en opérant de la même façon que si le système était en boucle ouverte (analyse entre  $u$  et  $y$ ).

On distingue d'autre part deux cas, suivant l'application ou non d'un signal de perturbation externe.

Le problème consiste à déterminer des conditions nécessaires et suffisantes pour que le système  $\mathcal{S}$  soit identifiable.

Par définition, un système est dit identifiable s'il existe un vecteur de paramètres  $\theta$  et un modèle  $\mathcal{M}(\theta)$  dont le comportement converge vers celui du système réel, quand le nombre de mesures tend vers l'infini. Sous certaines conditions d'identifiabilité, le vecteur de paramètres  $\theta$  est unique.

On reprendra pour aborder cette étude les définitions introduites par Ljung et al. [Ljung 74], qui ne se retraignent pas au cas particulier du système décrit ici.

### Définitions

Les estimateurs souhaités appartiennent à l'ensemble :

$$D_T(\mathcal{S}, \mathcal{M}) = \left\{ \theta ; \frac{\hat{B}(z)}{\hat{A}(z)} \equiv \frac{B(z)}{A(z)} \text{ et } \frac{\hat{C}(z)}{\hat{A}(z)} \equiv \frac{C(z)}{A(z)} \text{ pour tout } z \right\}$$

constitué des vecteurs de paramètres  $\theta$  auxquels correspondent les modèles  $\mathcal{M}(\theta)$  qui ont la même fonction de transfert et les mêmes caractéristiques de bruit que le système réel.

$D_T(\mathcal{S}, \mathcal{M})$  dépend de  $\mathcal{S}$  et de  $\mathcal{M}$ , mais pas de  $\mathcal{J}$  ni de  $\mathcal{R}$ .

On notera  $\theta(N ; \mathcal{S}, \mathcal{M}, \mathcal{J}, \mathcal{R})$  l'estimateur à l'instant  $N$ , étant donnés  $\mathcal{S}$ ,  $\mathcal{M}$ ,  $\mathcal{J}$ , et  $\mathcal{R}$ .

\*Le système  $S$  est dit "système identifiable" (SI) sous  $\mathcal{M}, \mathcal{J}$  et  $\mathcal{R}$  :

$$' SI(\mathcal{M}, \mathcal{J}, \mathcal{R}) ', \text{ si } \theta(N ; \mathcal{S}, \mathcal{M}, \mathcal{J}, \mathcal{R}) \rightarrow D_T(\mathcal{S}, \mathcal{M}) \text{ quand } N \rightarrow \infty .$$

\*Le système est dit "paramètre identifiable" (PI) sous  $\mathcal{M}, \mathcal{J}$  et  $\mathcal{R}$  :

$$' PI(\mathcal{M}, \mathcal{J}, \mathcal{R}) ', \text{ si il est } SI(\mathcal{M}, \mathcal{J}, \mathcal{R}) \text{ et si } D_T(\mathcal{S}, \mathcal{M}) \text{ contient un seul élément.}$$

Nous allons essayer de déterminer des conditions nécessaires et suffisantes d'identifiabilité pour des systèmes bouclés, en supposant que le filtre de boucle est linéaire.

On analysera plus en détail le cas où l'on n'applique pas de signal de perturbation externe, pour des méthodes indirectes puis directes. On analysera ensuite l'influence d'un signal de test par rapport à cette question d'identifiabilité.

On considère que le système peut être représenté de la manière suivante (figure 3.22) :

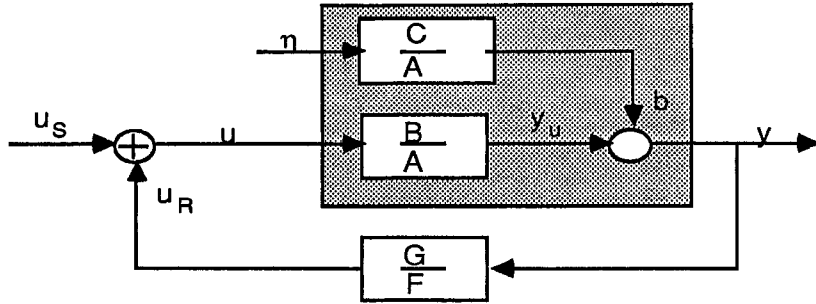


Figure 3.22 : Représentation "linéaire" du système bouclé

Le système  $\mathcal{S}$  est caractérisé par la relation entre son entrée  $u$  et sa sortie  $y$  :

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-k}B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})\eta(t) \quad (3.61)$$

et la rétroaction établit la relation suivante entre  $u$  et  $y$ , (lorsque  $u_s = 0$ ) :

$$F(q^{-1})u(t) = G(q^{-1})y(t) \quad (3.62)$$

avec

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_{na}z^{-na}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{nb}z^{-nb}$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + \dots + c_{nc}z^{-nc}$$

$$F(z^{-1}) = 1 + f_1z^{-1} + \dots + f_{nf}z^{-nf}$$

$$G(z^{-1}) = g_0 + g_1z^{-1} + \dots + g_{ng}z^{-ng}$$

On notera

$$G_\eta(z) = \frac{b(z)}{\eta(z)} = \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (3.63)$$

$$G_R(z) = \frac{u(z)}{y(z)} = \frac{G(z^{-1})}{F(z^{-1})} \quad (3.64)$$

$$H(z) = \frac{y_u(z)}{u(z)} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} z^{-k} \quad (3.65)$$

### II.4.2. Identification indirecte sans signal de test

Considérons le système ayant pour sortie  $y$  et pour entrée le signal d'excitation interne, non mesurable,  $\eta$ . On cherche à identifier ce système, à partir de la mesure du signal de sortie  $y$ , en supposant de plus connue la fonction de transfert du feed-back.

Soit la fonction de transfert que l'on cherche à identifier :

$$\frac{y(z)}{\eta(z)} = \frac{G_\eta(z)}{1 - G_R(z)H(z)}$$

$$\frac{y(z)}{\eta(z)} = \frac{C(z^{-1})F(z^{-1})}{A(z^{-1})F(z^{-1}) - B(z^{-1})z^{-k}G(z^{-1})} \quad (3.66)$$

$$\frac{y(z)}{\eta(z)} = \frac{1 + \beta_1 z^{-1} + \dots + \beta_r z^{-r}}{1 + \alpha_1 z^{-1} + \dots + \alpha_l z^{-l}} = \frac{\mathfrak{B}(z^{-1})}{\mathfrak{A}(z^{-1})}$$

soit  $l = \max[n_a + n_f, n_b + n_g + k]$

et  $r = n_c + n_f$

La méthode comporte deux étapes :

La première consiste à estimer les paramètres du modèle ARMA (Autoregressive Moving Average Process), qui constitue en fait un modèle du signal stochastique  $y$ .

$$\theta_{\alpha, \beta}^T = [\alpha_1, \dots, \alpha_l, \beta_1, \dots, \beta_r]$$

les  $\alpha_i$  et les  $\beta_i$  étant les pôles et les zéros du système défini par l'équation (3.66).

La seconde étape consiste à déterminer le vecteur de paramètres :

$$\theta^T = [a_1, \dots, a_{n_a}, b_1, \dots, b_{n_b}, c_1, \dots, c_{n_c}]$$

après avoir estimé les  $\alpha_i$  et les  $\beta_i$ , et supposant connus  $F$  et  $G$ .

Pour calculer de manière unique ces paramètres, il convient de satisfaire certaines conditions.

Si l'on revient à l'équation :

$$\mathfrak{A}(z^{-1}) = A(z^{-1})F(z^{-1}) - B(z^{-1})z^{-k}G(z^{-1}) \quad (3.67)$$

On constate que les  $(n_a+n_b)$  paramètres  $a_i$  et  $b_i$  doivent être calculés à partir des  $l$  paramètres  $\alpha_i$ , avec  $l = \max[n_a+n_f, n_b+n_g+k]$ .

Si l'on suppose de plus que les polynômes  $C$  et  $AF - z^{-k}BG$  ont exactement  $(n_p)$  facteurs communs, on peut introduire les polynômes  $D$  et  $H$  tels que :

$$\begin{aligned} C &= DP \\ AF - z^{-k}BG &= HP \end{aligned} \quad (3.68)$$

Pour obtenir une détermination unique des paramètres  $a_i$  et  $b_i$ , on doit donc avoir :

$$\begin{aligned} \max[n_a+n_f, n_b+n_g+k] - n_p &\geq n_a + n_b \\ \Rightarrow \max [n_f - n_b, k + n_g - n_a] &\geq n_p \end{aligned} \quad (3.69)$$

Dans le cas où  $n_p$  est nul, on en déduit une condition sur le filtre de boucle :

$$\begin{aligned} n_f &\geq n_b \\ \text{ou} \quad n_g &\geq n_a - k \end{aligned} \quad (3.70)$$

Söderström et al. [Söderström 75] ont analysé le problème en faisant intervenir l'ordre du système réel, et l'ordre estimé du modèle. Ils remarquent que l'estimateur peut être considéré comme solution de l'équation :

$$C(\hat{A}F - z^{-k}\hat{B}G) - \hat{C}(AF - z^{-k}BG) = 0 \quad (3.71)$$

Ils déduisent d'une étude approfondie le théorème suivant :

(i) Si la condition :

$$\max(n_f - n_b, n_g + k - n_a) - n_p \geq 0 \quad (3.72)$$

n'est pas vérifiée, alors il n'existe pas de modèle  $\mathcal{M}$  tel que le système soit SI. Inversement, si la condition (3.72) est vérifiée, alors il existe une classe de modèles  $\mathcal{M}$  telle que le système soit à la fois PI et SI. Une telle classe est donnée par :

$$\hat{n}_a = n_a, \hat{n}_b = n_b, \hat{n}_c = n_c, \hat{k} = k$$

(ii) Les conditions :

$$\begin{aligned} \min[\hat{n}_a - n_a, \hat{n}_b + \hat{k} - n_b - k, \hat{n}_c - n_c] &= 0 \\ \text{et} \quad \hat{n}_a + \hat{n}_b + \hat{n}_c - \max[n_f + \max(\hat{n}_a + n_c, n_a + \hat{n}_c), n_g + \max(\hat{k} + \hat{n}_b + n_c, k + n_b + \hat{n}_c)] + n_p &\leq 0 \end{aligned} \quad (3.73)$$

sont nécessaires et suffisantes pour que le système soit PI.

Des conditions explicites à la fois nécessaires et suffisantes pour que le système soit identifiable, ont donc été déterminées. On obtient des expressions complexes faisant intervenir l'ordre du système réel et l'ordre du modèle supposé décrire le comportement du système.

Il découle de cela la nécessité de connaître a priori l'ordre réel du système. En effet, il se peut que si l'on surestime l'ordre du modèle, le résultat de l'identification donne une description fautive des phénomènes réels, contrairement à ce qui se passe pour les systèmes en boucle ouverte. Par conséquent, le choix de la structure du modèle est critique, puisqu'il devient impossible de tester a posteriori l'ordre du système.

### Remarque

Cette propriété peut être illustrée de la manière suivante :

Soit la classe de modèles décrivant le comportement du système  $\mathcal{S}$  :

$$\begin{aligned} A(z^{-1})y(z) &= B(z^{-1})u(z) + C(z^{-1})\eta(z) \\ \text{avec} \quad F(z^{-1})u(z) &= G(z^{-1})y(z) \end{aligned} \tag{3.74}$$

Il est immédiat que la famille de modèles vérifiant la relation :

$$(A + LG)y(z) = (B + LF)u(z) + C\eta(z) \tag{3.75}$$

$L(z)$  étant un polynôme arbitraire,

aura les mêmes relations d'entrée sortie que le système  $\mathcal{S}$  à identifier.

En pratique, nous ramènerons ces conditions d'identifiabilité à deux contraintes qui s'avèrent être suffisantes dans notre contexte expérimental :

La première caractérise l'unicité de la classe de modèles décrivant le comportement du système, et impose de connaître exactement la structure du système réel. Cela suppose, soit la connaissance théorique des mécanismes intrinsèques qui gouvernent le système, soit la détermination par des méthodes heuristiques des caractéristiques dynamiques du geste (par exemple on peut effectuer des tests préliminaires en boucle ouverte, ou bien appliquer un signal de perturbation externe,...).

La seconde contrainte conditionne plutôt la nature du filtre de boucle linéaire, et peut se ramener simplement à des inégalités portant sur les ordres relatifs du système réel et du filtre de boucle :

$$\begin{aligned} n_f &\geq n_a - k \\ \text{ou} \quad n_g &\geq n_b \end{aligned}$$

### II.4.3. Identification directe sans signal de test

L'autre façon d'appréhender le problème d'identification est de procéder de la même manière que pour l'analyse des systèmes en boucle ouverte, i.e. que l'on cherche directement à estimer les paramètres de la fonction de transfert du système  $\mathcal{Y}$  à partir de la mesure de ses signaux d'entrée et de sortie.

On peut dès à présent remarquer que n'importe quelle méthode n'est pas applicable dans ce cas ; pour pouvoir effectuer par exemple une analyse par corrélation entre l'entrée et la sortie du système étudié, il est nécessaire que l'entrée  $u$  soit décorrélée du bruit  $b$  ramené à la sortie ; or, la rétroaction génère automatiquement une telle corrélation. Il découle de cela l'impossibilité d'utiliser certaines méthodes non paramétriques. Il est facile de montrer que le résultat de l'identification pour de telles méthodes correspond à l'obtention de l'inverse du filtre de boucle.

En effet,

$$\begin{aligned} \frac{u}{\eta} &= \frac{G_R G_\eta}{1 - G_R H} \\ \text{et} \quad \frac{y}{\eta} &= \frac{G_\eta}{1 - G_R H} \\ \Rightarrow \quad \frac{y}{u} &= \frac{1}{G_R} \end{aligned} \tag{3.76}$$

Remarquons que si l'on avait accès à  $y_u$ , signal de sortie du procédé, non affecté par les perturbations, on obtiendrait effectivement la fonction de transfert désirée :

$$\frac{y_u}{u} = \frac{\frac{y}{\eta} - \frac{b}{\eta}}{\frac{u}{\eta}} = H \tag{3.77}$$

Il apparaît donc, pour l'identification directe de systèmes en boucle fermée, la nécessité de connaître le filtre de bruit  $b(z)/\eta(z)$ .

Par conséquent il semble que les méthodes paramétriques, faisant intervenir les modèles du processus déterministe et du bruit soient mieux adaptées à l'analyse directe des systèmes bouclés.

On envisagera par la suite des modèles qui s'expriment par la relation suivante :

$$A(z^{-1})y(z) = B(z^{-1})z^{-k}u(z) + C(z^{-1})e(z) \tag{3.78}$$



La question de l'identifiabilité est abordée par extrapolation des résultats obtenus pour l'identification indirecte. On peut dériver en effet les conditions d'identifiabilité en examinant cette fois ci la fonction critère, qui s'exprime le plus souvent de manière quadratique par rapport à l'erreur résiduelle :

$$J_N = \sum_{k=1}^N \hat{e}^2(k) \quad (3.79)$$

L'unicité de détermination du modèle identifié peut alors se ramener à la détermination unique d'un minimum du critère par rapport aux paramètres estimés. Or, partant de la formulation du modèle ci-dessus, il est facile d'exprimer l'erreur en fonction des autres éléments intervenant dans le système en boucle fermée :

$$e(z) = \frac{1}{C(z^{-1})} \left[ A(z^{-1}) - B(z^{-1}) z^{-k} \frac{G(z^{-1})}{F(z^{-1})} \right] y(z) \quad (3.80)$$

De plus, si l'on remarque que :

$$\frac{AF - B z^{-k} G}{CF} = \frac{\mathfrak{A}}{\mathfrak{B}} \quad (3.81)$$

On en déduit que les conditions requises pour l'obtention d'un minimum unique sont équivalentes à celles qui conduisent à la détermination unique des paramètres intervenant dans les polynômes  $\mathfrak{A}$  et  $\mathfrak{B}$ , qui ne sont autres que ceux de la fonction de transfert  $y(z)/\eta(z)$  considérée précédemment. Par conséquent, dans la mesure où il y a convergence de la fonction d'erreur vers le bruit d'entrée du système stochastique, soit  $\eta$ , les conditions d'identifiabilité du système en boucle fermée analysé de manière directe sont identiques à celles obtenues pour l'analyse indirecte.

Une manière équivalente de formuler la condition (2) d'identifiabilité est d'invoquer des propriétés relatives à la dépendance linéaire des éléments du vecteur  $\varphi$  constitué d'observations passées du système.

En effet, la sortie à l'instant  $t$  peut s'écrire :

$$y(t) = \varphi^T(t) \theta + e(t) = [-y(t-1), \dots, -y(t-n_a), u(t-k), \dots, u(t-k-n_b)] \theta + e(t) \quad (3.82)$$

La présence de la rétroaction introduit une relation directe entre les éléments de  $\varphi(t)$  :

$$u(t-k-1) = -f_1 u(t-k-2) - \dots - f_{n_f} u(t-k-1-n_f) - g_0 y(t-k-1) - \dots - g_{n_g} y(t-k-1-n_g)$$

Par conséquent, si la condition (2) d'identifiabilité n'est pas vérifiée, à savoir si :

$$\begin{aligned} n_f &\leq n_b - 1 \\ \text{et} \quad n_g &\leq n_a - k - 1 \end{aligned}$$

alors les éléments de  $\varphi^T(t)$  sont linéairement dépendants entre eux.

La réciproque est immédiate. Si les éléments de  $\varphi^T(t)$  sont linéairement dépendants, alors il existe une famille de polynômes  $F(z^{-1})$  et  $G(z^{-1})$  tels que :

$$AF + Bz^{-k}G = A \tag{3.83}$$

et qui vérifient :

$$n_g \leq n_a - k - 1 \quad \text{et} \quad n_f \leq n_b - 1$$

Il découle de cela, si la rétroaction se traduit par une relation linéaire entre l'entrée  $u$  et la sortie  $y$  du système, l'équivalence des deux propositions suivantes :

$$\begin{aligned} n_g \geq n_a - k & \qquad \qquad \qquad \text{les éléments de } \varphi^T(t) \text{ sont linéairement} \\ \text{ou} & \qquad \qquad \qquad \equiv \qquad \qquad \qquad \text{indépendants.} \\ n_f \geq n_b & \end{aligned}$$

En pratique, si la condition (2) d'identifiabilité n'est pas remplie, il est possible d'y remédier en :

- \* augmentant les ordres  $n_f$  et  $n_g$ , dans le cas d'un régulateur linéaire.
- \* rajoutant un retard supplémentaire dans le filtre de boucle.
- \* introduisant une non linéarité dans le filtre de boucle, ce qui supprime la dépendance linéaire des éléments de  $\varphi$  et a pour effet de décorréler l'entrée du système avec l'erreur résiduelle  $e(t)$ .
- \* commutant le filtre de boucle entre deux contrôleurs ayant des paramètres distincts, la commutation se produisant avec une périodicité choisie de manière optimale.

#### I.4.4. Identification directe avec signal de test.

Dans tout ce qui précède, nous n'avons pas considéré les propriétés requises par le signal d'entrée du système étudié. Or, le principe même de l'identification implique une entrée qui puisse exciter tous les modes du système ; on parlera de signal excitateur d'ordre  $n$ .

Dans le cadre d'un processus bouclé, l'entrée du système ne peut pas être choisie librement par l'expérimentateur, comme en boucle ouverte. Cette entrée est en effet déterminée partiellement par la rétroaction.

L'application d'un signal de test externe permet :

- d'une part "d'enrichir" le signal d'entrée, améliorant ainsi les résultats de l'identification.
- d'autre part de s'affranchir des contraintes imposées par les conditions d'identifiabilité qui affectent l'ordre de la fonction de transfert du filtre de boucle.

Cette dernière propriété peut se mettre facilement en évidence, si l'on considère à nouveau le système représenté par la figure 3.22. Le signal d'entrée se décompose en deux termes qui doivent leur contribution à la perturbation externe  $u_S(t)$ , et à la sortie du feedback  $u_R(t)$ .

$$u(t) = u_R(t) + u_S(t) \quad (3.84)$$

avec :

$$u_R(z) = \frac{G(z^{-1})}{F(z^{-1})} y(z)$$

et

$$u_S(z) = G_S(z) s(z)$$

La sortie du système peut s'exprimer de la manière suivante :

$$y(z) = \frac{CF}{AF - Bz^{-k}G} \eta(z) + \frac{Bz^{-k}F}{AF - Bz^{-k}G} u_S(z)$$

$$[AF - Bz^{-k}G] y(z) = CF\eta(z) + Bz^{-k}Fu_S(z) \quad (3.85)$$

$$A(z^{-1})F(z^{-1})y(z) = C(z^{-1})F(z^{-1})\eta(z) + B(z^{-1})z^{-k}F(z^{-1})u(z)$$

Après élimination de  $F(z^{-1})$ , on obtient une expression analogue à celle des modèles précédents.

$$A(z^{-1})y(z) - B(z^{-1})z^{-k}u(z) = C(z^{-1})\eta(z) \quad (3.86)$$

Cette fois-ci, cependant,  $u$  ne dépend plus seulement du filtre de boucle, mais aussi de la perturbation  $u_S$ .

En effet, 
$$F(z^{-1})u(z) = -G(z^{-1})y(z) + F(z^{-1})u_S(z) \quad (3.87)$$

ce qui élimine la relation de dépendance linéaire entre les éléments du vecteur  $\varphi(t)$  dans le cas où la condition (2) d'identifiabilité n'est pas vérifiée :

$$u(t-1) = -f_1 u(t-2) - \dots - f_{nf} u(t-n_f-1) - g_0 y(t-1) - \dots - g_{ng} y(t-n_g-1) + u_S(t-1) + f_1 u_S(t-2) + \dots + f_{nf} u_S(t-n_f-1)$$

Par conséquent, la condition (2) d'identifiabilité n'est pas nécessaire dans le cas où l'on applique un signal de perturbation externe.

#### II.4.5. Conclusions

Pour l'analyse de systèmes en boucle fermée, les méthodes d'identification indirectes n'apportent aucune amélioration sensible des résultats par rapport aux méthodes directes, ni d'un point de vue de la précision, ni de l'identifiabilité. Nous choisirons donc de préférence des procédés d'identification directs, à partir de méthodes paramétriques.

Dans le cas où l'algorithme de simulation (objet instrumental) est réduit à un filtre de boucle linéaire, et où aucun signal de test n'est appliqué, les conditions d'identifiabilité du système peuvent se résumer de manière simplifiée à deux contraintes. Celles-ci portent :

- . d'une part sur la nécessité de connaître à priori l'ordre du système à identifier,
- . d'autre part sur l'ordre du filtre de boucle, qui doit être supérieur à l'ordre du système.

On voit tout de suite que ces conditions restreignent le champ d'applicabilité des méthodes paramétriques linéaires. En effet, l'impossibilité d'évaluer a posteriori les résultats de l'identification nous oblige à avoir une certaine connaissance sur la structure du modèle identifié. Ceci nous amènera préalablement à toute forme d'expérience instrumentale, à tester notre système en "ouvrant" la boucle de simulation.

On peut remarquer d'ores et déjà que les contraintes relatives à l'identifiabilité peuvent diminuer considérablement :

- soit par l'introduction d'un signal externe ayant des propriétés "excitantes" suffisantes,
- soit par la présence de non-linéarités dans la fonction de rétroaction ; ces non linéarités remplacent en fait le signal de test.

## II.5. Méthodes adaptatives de suivi de paramètres

Les méthodes développées auparavant ont conduit à l'estimation des paramètres de systèmes stationnaires, invariants dans le temps. Dans l'optique de l'analyse de gestes dynamiques, actifs, on peut être amené à considérer des modèles non stationnaires, traduisant un changement de point de fonctionnement du système, une nouvelle configuration du système, ou d'une manière générale, toute modification remettant en cause les valeurs actuelles des paramètres, et éventuellement celles de la structure du modèle. Notre objectif est donc d'étendre l'analyse par identification à des systèmes dynamiques, non stationnaires, à variation dans le temps.

Le problème posé dans toute sa généralité est extrêmement complexe ; une seule approche semble pouvoir y apporter une solution formelle : ce sont les techniques de filtrage non-linéaire introduites par Bayes. D'autres méthodes traitent les aspects liés à la non stationnarité de manière essentiellement heuristique.

Après avoir donné les principes de base des techniques Bayésiennes, qui sont plus sophistiquées mais requièrent une connaissance à priori sur les propriétés statistiques des signaux aléatoires, nous essaierons d'adapter nos méthodes paramétriques récursives aux techniques de suivi de paramètres.

### II.5.1. Techniques bayésiennes

L'approche Bayésienne consiste à considérer le vecteur de paramètres  $\theta$  décrivant le système comme un vecteur aléatoire caractérisé par sa distribution statistique.

Ainsi, à partir des observations  $u^t$  et  $y^t$  d'entrée et de sortie du système jusqu'au temps  $t$ , ces observations étant corrélées avec  $\theta$ , on espère déterminer la fonction "densité de probabilité a posteriori" de  $\theta$ , i.e. :

$$\mathcal{P}(\theta | y^t, u^t)$$

Une manière de définir l'estimateur  $\theta(t)$  est d'introduire l'espérance mathématique conditionnelle telle que :

$$\theta(t) = E\{\theta | y^t, u^t\} \tag{3.88}$$

En fait, le problème qui consiste à analyser l'évolution temporelle de la fonction (3.88) est extrêmement complexe ; seules des solutions approchées peuvent être proposées. En particulier, si

$\theta$  dépend linéairement des données, et si les termes de bruit ont une distribution gaussienne, alors il est possible de calculer une solution exacte ; celle-ci coïncide avec l'algorithme des Moindres Carrés : il suffit de prendre pour facteur de pondération  $w_t$  la variance de l'erreur d'équation.

Dans le cas général, le modèle utilisé pour décrire le fonctionnement d'un système non-stationnaire est représenté dans l'espace d'état par les équations :

$$\begin{aligned} X(t+1) &= f\{X(t), u, \theta\} \\ \theta(t+1) &= \theta(t) \\ y(t) &= g\{X(t)\} \end{aligned} \tag{3.89}$$

$X$  étant le vecteur d'état du système,  $\theta$  le vecteur de paramètres,  $u$  et  $y$  les entrées et sorties du système.

Il n'existe pas de solution explicite à l'heure actuelle. La méthode la plus couramment employée consiste à linéariser le système autour de l'estimation de l'état courant, puis à appliquer le filtre de Kalman étendu au système linéaire résultant [Ljung 83].

$$\begin{bmatrix} \delta x \\ \delta \theta \end{bmatrix} (t+1) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial \theta} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta \theta \end{bmatrix} (t) \tag{3.90}$$

$$\delta y(t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial x} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta \theta \end{bmatrix} (t)$$

## II.5.2. Techniques de suivi de paramètres à partir des algorithmes dérivés de la méthode des moindres carrés

### II.5.2.1. Facteur d'oubli

L'intégration d'aspects dynamiques du système dans les algorithmes d'identification hors-ligne issus de la méthode des moindres carrés est abordée de manière essentiellement heuristique. Cela suppose d'introduire un oubli exponentiel de l'influence des mesures relatives à un passé trop lointain au profit de celles relatives au présent et à un passé immédiat.

Si l'on se réfère à un critère de base du type moindres carrés, l'introduction du facteur d'oubli se traduit par :

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^t \omega(t,k) [y(t) - \varphi^T(t)\theta]^2 \quad (3.91)$$

Une méthode communément utilisée consiste à exprimer  $\omega(t,k)$  sous la forme réursive suivante :

$$\omega(t,k) = \lambda(t) \omega(t-1,k) \quad (3.92)$$

ou encore :

$$\omega(t,k) = \lambda(t) \omega(t-1,k) \quad (3.93)$$

avec

$$\omega(k,k) = \alpha_k$$

et

$$\lambda(k) \leq 1$$

Si l'on introduit :

$$R(t) = \sum_{k=1}^t \omega(t,k) \varphi(k) \varphi^T(k) \quad (3.94)$$

alors

$$R(t) = \lambda(t) R(t-1) + \alpha_t \varphi(t) \varphi^T(t)$$

Posant

$$P(t) = R^{-1}(t),$$

il est facile de montrer que l'algorithme récurif se traduit par :

$$\theta(t) = \theta(t-1) + L(t)[y(t) - \varphi^T(t)\theta(t-1)]$$

$$L(t) = \frac{P(t-1) \varphi(t)}{\frac{\lambda(t)}{\alpha_t} + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)} = P(t) \varphi(t) \quad (3.95)$$

$$P(t) = \frac{1}{\lambda(t)} \left[ P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{\frac{\lambda(t)}{\alpha_t} + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)} \right]$$

Si  $\lambda(t) = 1$ , on retrouve l'algorithme des moindres carrés récurif.

L'influence du facteur  $\lambda(t)$  peut s'expliquer facilement, si l'on remarque que prendre  $\lambda(t) \leq 1 - \delta$ , avec  $\delta > 0$ , empêche la matrice de covariance  $P(t)$  de tendre vers la matrice nulle, et augmente la sensibilité de l'algorithme, le rendant plus apte à suivre des variations de paramètres.

Cas particuliers :

1) facteur d'oubli constant :  $\lambda(k) = \lambda$  pour tout  $k$  (avec  $\lambda < 1$ )

$$\Rightarrow \omega(t,k) = \lambda^{t-k} \alpha_k$$

Ceci correspond à un accroissement exponentiel de l'incertitude sur les mesures, avec un facteur d'oubli  $\lambda$  constant. Il se produit en quelque sorte un phénomène de mémorisation à court terme, qui se traduit par un gain  $L(t)$  évanescent.

Ainsi, cette méthode de pondération exponentielle des données peut s'avérer efficace, si l'information mesurée est distribuée uniformément dans le temps et dans l'espace.

Or, ce cas est rarement rencontré. En particulier, lorsque le système est bouclé, l'entrée dépend en partie de la fonction du filtre de boucle ( $u(t) = F\{y(t)\}$ ), et par conséquent tous les modes du système ne sont pas uniformément excités .

On est alors amené à faire des hypothèses sur la nature des lois d'évolution du système.

Une erreur sur l'évaluation des lois de variation peut conduire à des résultats erronés :

\_ Si les paramètres varient plus lentement que prévu, la sensibilité de l'algorithme adaptatif sera trop élevée, et l'incertitude sur l'estimation sera importante, la sortie du modèle ayant tendance à suivre le bruit du système.

\_ Si au contraire, les paramètres varient plus rapidement que supposé, la durée de convergence de la méthode sera importante. Par conséquent, le suivi des paramètres ne sera pas satisfaisant.

Ceci montre que la valeur du facteur d'oubli doit être un compromis entre une adaptation rapide de l'estimateur, et une bonne précision sur l'estimateur.

2) L'utilisation d'un facteur  $\lambda$  dépendant du temps permet de mieux s'adapter aux variations dynamiques des paramètres, dans la mesure où le système n'est pas trop bruité.

Fortesque et al. ainsi que Wellstead et Sanoff [Hägglund 84,85] ont suggéré l'utilisation de facteurs d'oubli dépendant de la valeur du résidu de l'estimation (erreur estimée).

Ainsi, on peut exploiter le fait que toute modification de la dynamique du système provoque des variations importantes de l'erreur ; il est alors possible d'introduire dans l'algorithme une procédure de détection de transition d'erreur, déclenchant automatiquement une diminution du facteur d'oubli  $\lambda$ , ce qui a pour effet de discréditer les mesures anciennes plus rapidement.



### II.5.2.2. Analyse détaillée du problème de pondération

Hägglund [Hägglund 85] propose une alternative à cette approche, qui traduit plus finement la nature des variations du système, en distinguant d'une part les variations liées aux paramètres eux-mêmes, et d'autre part celles qui reflètent une modulation du rapport signal sur bruit.

Il est à remarquer en effet qu'une modification brutale des paramètres s'accompagne inévitablement d'un accroissement de l'innovation, et la séparation des contributions respectives du bruit et des fluctuations des paramètres n'est pas immédiate.

Considérons à nouveau la méthode des moindres carrés pondérés, dans laquelle on cherche à déterminer le vecteur  $\theta(t)$  qui minimise la fonction critère définie à l'équation (3.91).

L'estimateur peut alors se formuler de la manière suivante :

$$\theta(t) = [ \Phi^T(t) W^{-1}(t) \Phi(t) ]^{-1} \Phi^T(t) W^{-1}(t) Y(t) \quad (3.96)$$

avec :

$$\Phi^T(t) = [ \varphi(1), \dots, \varphi(t) ]$$

$$Y^T(t) = [ y(1), \dots, y(t) ]$$

$$W(t) = \text{diag}\{1/\omega(t,i)\}$$

Nous avons démontré (II.2.8.) que le choix optimal pour la fonction  $\omega(t,k)$  consistait à prendre l'inverse de la variance de l'erreur d'équation. Or, on ignore la plupart du temps la fonction de distribution des composantes aléatoires du système, et leur évolution au cours du temps.

#### **Caractérisation de l'erreur résiduelle**

Considérons le système décrit par le modèle suivant :

$$y(t) = \theta(t-1)^T \varphi(t) + e_n(t) \quad (3.97)$$

dans lequel  $\{ e_n(t) \}$  est une séquence de variables aléatoires indépendantes.

Cela peut se réécrire :

$$\begin{aligned} y(i) &= \theta(i-1)^T \varphi(i) + e_n(i) \\ &= \theta(t-1)^T \varphi(i) + [ \theta(i-1) - \theta(t-1) ]^T \varphi(i) + e_n(i) \\ &= \theta(t-1)^T \varphi(i) + e_m(t,i) + e_n(i) \end{aligned} \quad (3.98)$$

Le "résidu" est donc constitué de deux termes : le bruit de mesure  $e_n$ , et l'erreur de modélisation  $e_m$ . L'erreur  $e_m$  traduit en fait la nature des variations temporelles des paramètres ; elle s'annule si le système est stationnaire. Les origines de  $e_m$  sont diverses ; notamment elles peuvent refléter un changement du point de fonctionnement du système en présence de non-linéarités. Par conséquent, les poids affectés aux données mesurées à chaque instant devraient dépendre des termes d'erreur :  $e_m$  et  $e_n$ , dont les variances respectives sont  $\sigma_m$  et  $\sigma_n$  :

$$\omega(t,i) = 1/\sigma^2(t,i), \quad (3.99)$$

avec : 
$$\sigma(t,i)^2 = \sigma_m(t,i)^2 + \sigma_n(i)^2$$

### exemples

1) Considérons un système dont les paramètres sont constants.

Il découle de cela que :

$$e_m(t,i) = [\theta(i-1) - \theta(t-1)]^T \phi(i) = 0$$

d'où 
$$\sigma_m(t,i) = 0$$

Par conséquent,

$$\sigma(t,i)^2 = \sigma_n(i)^2$$

Dans ce cas, l'incertitude sur les paramètres est uniformément distribuée dans le temps, et l'on retrouve la procédure des moindres carrés simples.

Il est souhaitable toutefois de choisir les facteurs  $\omega(t,i)$  de telle manière que :

$$\omega(t,t) = w(t) = 1/\sigma_n^2(t)$$

2) Supposons que l'erreur de modélisation croisse exponentiellement, et que la variance du bruit est constante :

$$\sigma_m(t,i)^2 = [(1/\lambda)^{t-i} - 1] \sigma^2 \quad \sigma_n(i)^2 = \sigma^2$$

alors 
$$\sigma(t,i)^2 = (1/\lambda)^{t-i} \sigma^2$$

On retrouve l'expression d'un facteur d'oubli constant qui tend à discréditer les mesures passées par rapport aux mesures les plus récentes.

## Conséquences

Si l'on détient une connaissance à priori des propriétés statistiques des variables stochastiques liées d'une part aux erreurs de modélisation, dues aux variations paramétriques du modèle ( $e_m$ ), et d'autre part aux erreurs de mesure ( $e_n$ ), on obtient directement un estimateur des paramètres à partir de la solution explicite des Moindres Carrés.

Cependant, dans la majorité des cas, on ignore la nature des variances  $\sigma_m$  et  $\sigma_n$  de ces erreurs et leurs lois d'évolution au cours du temps. Par conséquent, il convient d'estimer ces variances, moyennant certaines hypothèses.

Nous serons amenés en particulier à distinguer les constantes de temps relatives au système lui-même, et celles liées à la modulation des paramètres. En effet, la notion de variance  $\sigma_m$  n'a pas de sens si cette grandeur statistique varie aussi vite que la variable aléatoire elle-même.

En ce qui concerne la nature des variations des paramètres, nous admettrons que :

**Si les paramètres estimés ou le niveau de bruit varient, ils varient lentement, et/ou rarement par rapport aux constantes de temps du système.**

Cela signifie que des transitions brutales peuvent se produire, mais leur fréquence d'apparition est faible par rapport à la fréquence d'échantillonnage du signal.

Si ces hypothèses ne sont pas vérifiées, le problème doit être résolu au moyen de méthodes non linéaires, en utilisant par exemple les techniques Bayésiennes mentionnées au paragraphe précédent.

Pratiquement, nous avons jugé nécessaire d'affiner nos méthodes d'identification récursives, pour les rendre plus aptes à s'adapter automatiquement à l'évolution des paramètres et/ou à celle des variables stochastiques, tout en séparant les contributions respectives des différents facteurs.

Deux approches de type heuristique peuvent être envisagées, qui traitent différemment des processus dont les paramètres sont susceptibles de varier brutalement, mais rarement, et des processus à variation lente dans le temps comparativement aux constantes de temps du système.

1) La première consiste à exploiter certaines méthodes appropriées pour le contrôle adaptatif, conduisant à une estimation séparée de la variance du bruit propre au système, et de celle due à l'évolution des paramètres.

Pour des variations rapides des paramètres, on utilise une procédure de "détection d'erreur", qui s'appuie sur des propriétés relatives aux probabilités de corrélation entre des incréments successifs

du vecteur de paramètre identifié. Ceci peut s'expliquer facilement, si l'on remarque que lorsque le système est stationnaire, la probabilité pour que le produit de deux incréments successifs soit positif, est égale à la probabilité pour qu'il soit négatif :

$$\mathcal{P} \{ \Delta\theta^T(t) \Delta\theta(t-1) > 0 \} = \mathcal{P} \{ \Delta\theta^T(t) \Delta\theta(t-1) < 0 \}$$

Par contre, si le système est non-stationnaire, l'algorithme d'identification va tendre à minimiser l'erreur en modifiant les paramètres, ce qui va donner une orientation aux incréments paramétriques pendant toute la durée de la variation.

$$\mathcal{P} \{ \Delta\theta^T(t) \Delta\theta(t-1) > 0 \} > \mathcal{P} \{ \Delta\theta^T(t) \Delta\theta(t-1) < 0 \}$$

En pratique, il est plus efficace d'analyser le produit scalaire entre le vecteur incrémentiel  $\Delta\theta$  et la somme des derniers incréments.

En adoptant ce type d'approche, la détection de transitions brutales sur les paramètres donne de bons résultats ; cette méthode a été testée sur un modèle simulé, dont les paramètres varient suivant un loi non-linéaire en forme de marches d'escalier. La figure 3.23 représente l'évolution temporelle des paramètres  $a_1$  et  $a_2$  du modèle simulé identifié à partir des signaux d'entrée et de sortie :

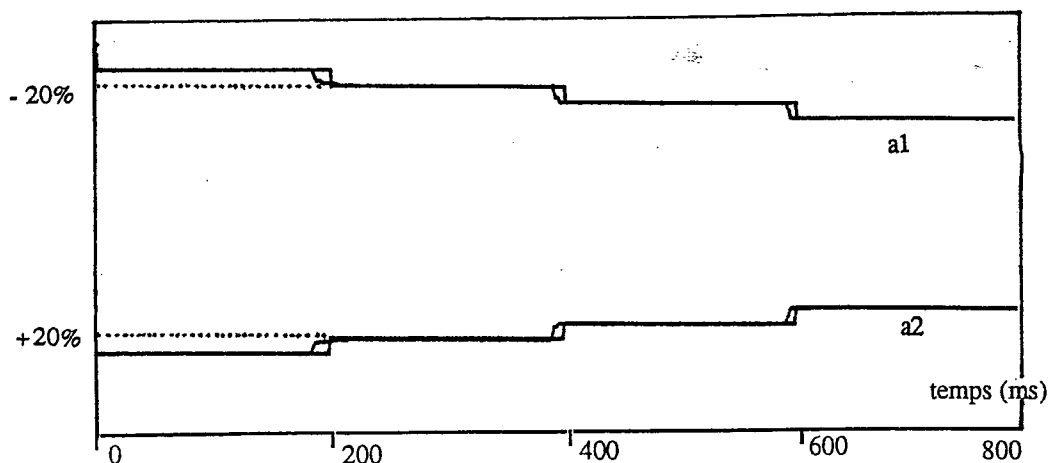


Figure 3.23 : Transitions paramétriques : coefficients  $a_1$  et  $a_2$  simulés et identifiés

2) Pour des variations lentes des paramètres, le problème est un peu plus délicat ; deux types d'inconvénients peuvent se présenter.

Le premier est lié à une excitation pauvre du système étudié ; dans ce cas, il s'agit de compenser cette insuffisance en forçant l'activité excitatrice de telle sorte que l'entrée contienne une quantité d'information quasi-constante.

Le second problème concerne une mauvaise adaptation de la méthode, qui se traduit par une confusion dans l'estimation de la variance du bruit et de la variance de l'erreur de modèle. La non distinction de ces quantités conduit à interpréter des modifications du bruit interne au système comme provenant de variations paramétriques ; ainsi, l'algorithme va "croire" que les mesures anciennes sont plus incertaines que les récentes, alors que c'est exactement l'inverse.

On peut s'affranchir de cette difficulté en s'intéressant cette fois-ci à la précision sur l'estimateur des paramètres, plutôt qu'en faisant des suppositions sur la nature des variations paramétriques et du niveau de bruit.

Une solution consiste à discréditer les valeurs passées de manière variable, en fonction de l'estimation de la quantité d'information disponible à chaque instant (matrice de Fisher : inverse de la matrice de covariance).

L'algorithme est dérivé des Moindres Carrés Pondérés, les poids étant choisis de telle manière que la variance des paramètres atteigne une valeur désirée. Par conséquent, c'est la durée d'analyse que l'on modifie essentiellement, suivant l'estimation de la quantité d'information. Si cette dernière est grande, les mesures passées sont oubliées au profit des plus récentes. Si par contre les signaux sont bruités, avec un contenu informationnel faible, alors on élargit l'horizon des mesures.

Cette méthode a été testée sur un modèle simulé, dont les paramètres varient suivant une fonction sinusoidale à fréquence lente relativement à la fréquence d'échantillonnage (figure 3.24).

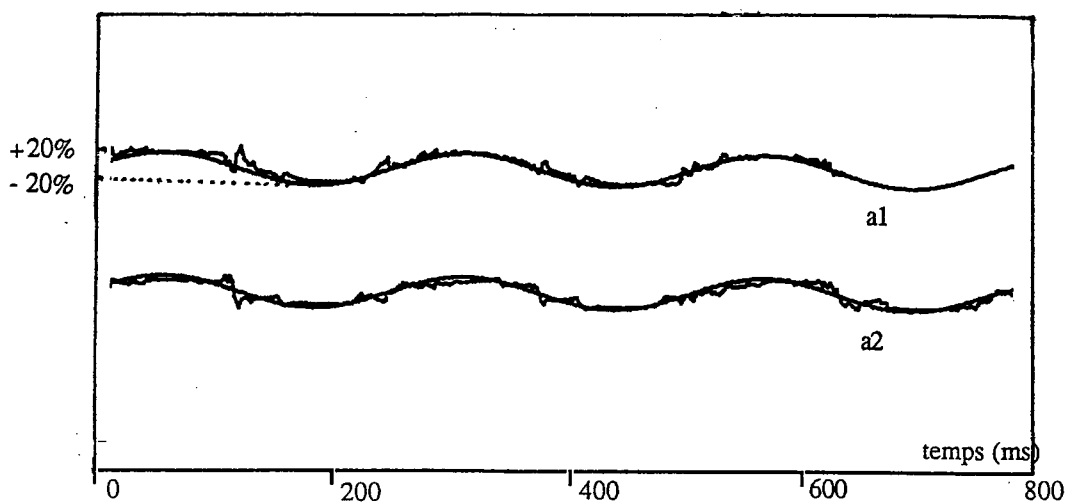


Figure 3.24 : Variations lentes des paramètres : coefficients  $a_1$  et  $a_2$  simulés

## III. Modèle mécanique du geste - Corrélation avec certaines hypothèses de la psychomotricité

### III.1. Objectifs

Les méthodes d'analyse du geste par identification conduisent à proposer un modèle mathématique équivalent à court-terme, c'est-à-dire qui rend compte le mieux possible des variables d'analyse sur un intervalle de temps dépendant uniquement de leurs propriétés de quasi-stationnarité.

Les hypothèses de stationnarité et d'ergodicité des signaux, ainsi que l'évaluation de l'ordre du système sont les seules hypothèses formulées pour l'élaboration du modèle. Celui-ci est le résultat d'une optimisation paramétrique visant à minimiser un critère quadratique qui exprime l'erreur entre les signaux réels et les signaux modélisés. Le modèle permet donc un re-synthèse fidèle des signaux analysés.

Mais, plus qu'un codage optimal, ce type d'approche permet d'atteindre une réalité plus structurelle du geste : le modèle se ramène en effet à des formes mécaniques évolutives par des transformations simples non réductrices. Ces formes mécaniques, qui sont caractérisées par des raideurs, des viscosités et des inerties, évoluent dans un espace de représentation pertinent qui permet de comprendre et d'interpréter les phénomènes en cause.

Pour aller plus loin, il est envisageable d'établir une corrélation entre ce type de modèles mécaniques, et des modèles hypothétiques comportementaux issus de paradigmes de la psychomotricité. La prise en compte de certains concepts de théories motrices permet en effet d'approcher des mécanismes inhérents au système moteur humain, et par conséquent donne lieu à une forme d'interprétation qui facilite les représentations et les traitements du geste.

Notre but toutefois n'est pas d'atteindre une connaissance fondamentale des processus gestuels chez l'homme : il ne s'agit pas, partant d'hypothèses a priori issues de théories motrices, de générer des expériences capables, en retour, de confirmer ou d'infirmer ces hypothèses.

Nous cherchons plutôt à établir une certaine cohérence entre notre modélisation et les connaissances acquises dans d'autres disciplines telles que la Physiologie et la Psychologie expérimentale.

## III.2. Regard sur les hypothèses de la psychomotricité

### III.2.1. Gestes simples

Il convient tout d'abord de donner un aperçu de quelques principes concernant le contrôle de la motricité pour des gestes simples, qui découlent de la confrontation d'approches neurophysiologiques, et de réflexions issues de modèles cybernétiques et plus récemment de l'apport de l'informatique.

Notamment sont apparus depuis quelques années les concepts de plan et de programme moteur, qui utilisent la terminologie de l'informatique pour expliquer des schémas d'organisation dont la logique présente quelques analogies avec le fonctionnement des systèmes artificiels.

#### III.2.1.1. Définition du programme moteur

*"Le programme moteur fait référence aux capacités qu'a tout système biologique de générer un ensemble de commandes organisées spatialement et temporellement",* préalablement à l'exécution du mouvement. [Beubaton 83]

L'utilisation de la métaphore s'explique par l'existence probable d'un ensemble de commandes organisées avant le déclenchement de la séquence motrice, et qui déterminent le déroulement séquentiel d'une série d'instructions.

Ainsi, le programme permet de sélectionner des muscles, de régler leur contraction et leur relaxation au moment approprié. Les mouvements balistiques, et plus particulièrement la phase de projection du membre vers un objectif spatial, mettent en évidence une certaine forme d'activité programmée ; en effet, l'exécution de ce type de geste peut se faire en l'absence d'un contrôle sensoriel continu de la performance motrice (pas ou peu d'indices cutanés ou proprioceptifs).

Les finalités d'un tel programme peuvent s'exprimer en termes de cibles :

\* "cibles-spatiales" lorsqu'il s'agit d'atteindre des points d'impact caractérisant la trajectoire spatiale du mouvement [MacNeilage 70],

\* "cibles-équilibre" lorsqu'il s'agit d'atteindre des états d'équilibre [Polit 79] -cet équilibre peut se traduire par exemple par l'annulation des forces d'étirement et de relâchement s'exerçant sur des paires de muscles agonistes /antagonistes.

Ces deux types d'approches, qui tendent à spécifier des cibles de nature différente, donnent lieu à l'élaboration de deux principaux modèles comportementaux : "l'impulse timing model", et le "mass-spring model".

### III.2.1.2. Structure du programme

#### *\* impulse-timing model*

Certains émettent l'hypothèse que le mouvement est contrôlé par un nombre limité de paramètres spatiaux, qui permettent de décrire la trajectoire du mouvement en termes d'amplitude, de direction et de vitesse [Smyth 84]

Selon le point de vue de Schmidt [Schmidt 75,79,80], les paramètres contrôlés par le programme sont les variables force et temps. Les paramètres cinématiques (vitesse, accélération, point d'arrivée) du mouvement sont alors spécifiés indirectement par l'intégrale "force-temps".

Ainsi, le temps apparaît dans ce cas comme une variable explicite du programme ; ce dernier se manifeste sous la forme de commandes en impulsions, permettant de déclencher et d'organiser temporellement des séquences d'activation musculaire.

#### *\* "mass-spring model" ou modèle masse-ressort*

Une autre approche tend à renforcer l'idée selon laquelle le programme spécifierait une succession d'états d'équilibre, et que la réalisation du mouvement entre deux états d'équilibre (cibles) résulterait de la dynamique propre du système. Dans le cas de gestes de pointage, l'atteinte d'une position d'équilibre finale, quelle que soit la position de départ, et indépendamment des perturbations rapides effectuées en cours de mouvement, a permis de justifier ce point de vue.

Notamment, le "mass-spring model" [Fel'dman 65], [Cooke 80], a récemment fourni un cadre d'interprétation cohérent de ce principe. Selon cette conception, le programme moteur gère un certain niveau d'activité dans les motoneurones commandant les paires de muscles agonistes/antagonistes. Pour décrire le fonctionnement musculaire d'un tel système, on a recours à une description mécanique, caractérisée par des paramètres de raideur, de viscosité et d'inertie. L'intérêt d'un tel modèle, qui prend en compte les propriétés visco-élastiques des muscles est la réduction possible du contrôle du mouvement par les centres nerveux ; en effet, la commande motrice revient alors à la prédiction d'un point d'équilibre des forces. Dans ce cas, il n'y a donc pas nécessité d'intervention continue des commandes issues du système nerveux central, puisque le déroulement du mouvement dépend essentiellement des propriétés mécaniques du muscle.

*"La forme du contrôle oppose plusieurs conceptions : celle de Cooke, qui change directement la raideur pour passer d'une cible à l'autre, et celle de Fel'dman qui peut agir simultanément sur le seuil d'activation (déterminé par le réflexe myotatique) et la raideur." [Abry 87]*



### III.2.2. Gestes complexes - phénomènes cycliques

Il semble intéressant d'essayer de caractériser des gestes plus complexes, mettant en oeuvre une certaine habileté motrice. Notamment, les gestes instrumentaux comportent généralement des composantes cognitives, et rentrent dans la catégorie des gestes appris. Ces gestes mettent en jeu des processus qui influent sur des aspects qualitatifs et quantitatifs de la performance, qui sont : la rapidité, la précision, la fluidité, l'expressivité.

En particulier, il est possible de mettre en évidence des phénomènes cycliques (gestes répétitifs). Nous allons tenter d'appréhender ce type de gestes, en suivant le raisonnement de Kelso.

#### III.2.2.1. Rôle du temps dans le programme moteur

Deux théories s'opposent en ce qui concerne l'introduction explicite (Schmidt et al.) ou implicite (Kelso) du temps dans le contrôle moteur [Schmidt 80], [Kelso 80].

##### *\* temps explicite*

Pour prendre en compte les contraintes temporelles qui interviennent dans des actions motrices coordonnées, certains adeptes de la programmation ont introduit la notion de séquenceur ou d'horloge externe, responsable du contrôle des variables de durée de l'activité musculaire : quel muscle est sollicité, et quand ?

Si le temps est une variable contrôlée volontairement par le système moteur, on est donc amené à construire des programmes moteurs sophistiqués qui intègrent la coordination et le déclenchement du mouvement d'une cible vers une autre, et qui traduisent des composantes intentionnelles à plus long terme du mouvement.

La principale critique qui va à l'encontre de cette approche porte sur le problème de la traduction des commandes et du codage moteur : comment passer en effet de programmes discrets, indépendants du contexte, à des caractéristiques de l'appareil musculaire qui sont continues, dynamiques et sensibles au contexte ?

##### *\* temps implicite*

Une alternative à cette approche consiste à expliquer les phénomènes par des principes fondamentaux de la physique, notamment ceux de la thermodynamique.

L'idée de base est de

*"rechercher les causalités et les processus impliqués dans le contrôle de la motricité dans l'organisation du système dynamique lui-même, plutôt que dans des lois qui lui seraient étrangères."*

[Beaubaton 83]

Certains vont encore plus loin, et remettent en cause la notion même de programme. Kelso prétend que l'activation musculaire n'est pas une donnée à priori, mais peut être considérée comme une propriété émergente de la dynamique du système [Kelso 80a, 80b].

Nous allons tenter de caractériser plus précisément cette idée à partir du modèle masse-ressort, qui prend en compte les propriétés mécaniques des muscles.

Ce modèle n'est pas suffisant, puisqu'il ne permet pas d'expliquer des mouvements plus complexes, notamment des mouvements oscillatoires.

En effet, l'équation du mouvement :

$$mx'' + cx' + kx = 0$$

traduit un phénomène amorti, dû à la présence du coefficient d'amortissement  $c$ .

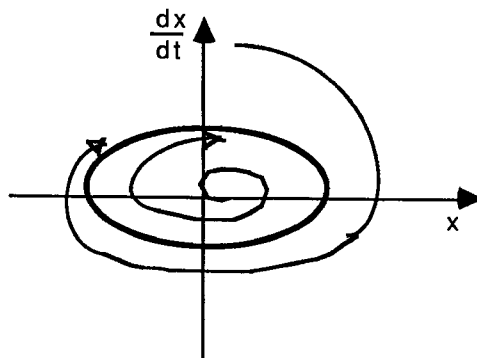
Les mouvements cycliques, quant à eux, pourraient être décrits par l'équation suivante :

$$mx'' + cx' + kx = e$$

dans laquelle ( $e$ ) est une fonction de forçage qui a pour rôle de compenser exactement la perte d'énergie potentielle au cours de chaque cycle.

Par analogie avec la thermodynamique, un tel système peut être représenté par un système ouvert, qui échange de l'énergie avec l'extérieur, sous la forme d'un flux d'énergie continu. Ce flux d'énergie met en oeuvre un certain travail, qui assure la stabilité dynamique du système. La compensation des pertes d'énergie locales peut se traduire par l'existence d'une non-linéarité (par exemple une fonction d'échappement).

On peut donc caractériser le comportement oscillatoire de certains types de gestes par celui d'un oscillateur non linéaire à **cycle limite stable**, encore appelé oscillateur à relaxation. Ces cycles limites ont pour interprétation physique une oscillation limite du système étudié, vers laquelle tendent asymptotiquement les trajectoires pour toutes les conditions initiales situées dans une certaine région du plan de phase des variables.



Ce type d'oscillateur est un système autonome, dans lequel le temps n'apparaît pas de manière explicite.

### III.2.2.2. Structures coordinatives

Il est possible de mettre en évidence l'existence de lois générales et de structures d'organisation communes à l'ensemble de la motricité corporelle. Ainsi, certaines séquences motrices complexes peuvent s'exécuter avec des modalités spatio-temporelles différentes, et ceci indépendamment des configurations musculaires impliquées.

C'est notamment le cas de l'écriture avec ses principes d'invariances homothétiques spatio-temporelles (conservation du style lorsque l'on écrit sur papier ou sur un tableau). C'est également le cas de la parole : des modifications de configurations articulatoires n'altèrent pas forcément des schémas structurels stables. (exemple du fumeur de pipe qui parvient à s'exprimer intelligiblement).

La notion d'*unités fonctionnelles*, encore appelées *synergies* ou *structures coordinatives* a ainsi été introduite (Kugler, Kelso, Turvey) pour traduire l'ensemble des muscles ou articulations qui coopèrent dans l'exécution d'un mouvement [Kugler 80], [Kelso 80b].

Ces unités fonctionnelles ne sont pas associées de manière immuable à un ensemble localisé d'éléments de l'appareil musculaire, mais suggèrent plutôt l'utilisation des muscles dans une situation comportementale.

*" Ceci pourrait aussi suggérer l'existence d'une représentation interne de la séquence, faisant abstraction des réalisations possibles".* [Beaubaton 83]

Selon Kelso, ces structures s'organisent spontanément lors de leur contribution à une action. Il propose alors d'assimiler le fonctionnement des structures coordinatives à celui d'un ensemble d'oscillateurs non linéaires à cycle limite, mutuellement couplés.

Ce sont des systèmes autonomes, auto-organisés, pour lesquels l'oscillation n'est pas imposée par l'environnement, mais est une propriété émergente de la dynamique du système.

De même, les invariants spatio-temporels découlent de la structure interne du système cyclique.

### III.3. Corrélations possibles avec un modèle mécanique du geste

#### III.3.1. Gestes simples

##### III.3.1.1. Analogie modèle identifié à court-terme/modèle masse-ressort

Peut-on mettre en évidence la corrélation qui existe entre le modèle à court-terme identifié et le modèle masse-ressort proposé par Fel'dman, et traduisant le comportement de gestes simples du bras ?

##### *\*Modèle mécanique à deux muscles*

Considérons deux ressorts ammortis reliés à une même masse et traduisant de manière simplifiée les activités de contraction et de relaxation de deux muscles agonistes/antagonistes.

L'équation du mouvement de ce système mécanique découle de l'expression traduisant l'équilibrage des forces s'exerçant à la jointure des deux ressorts.

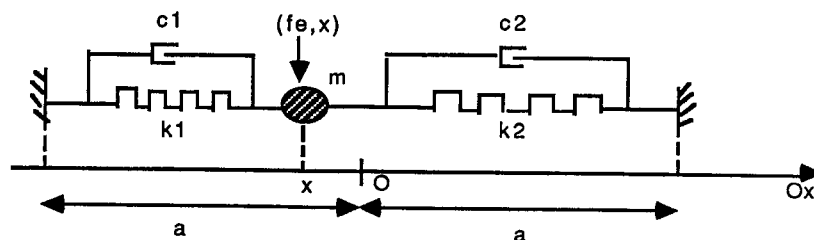


Figure 3.25 : Modèle mécanique à deux muscles

Si l'on ne considère le mouvement que dans une seule direction (horizontale), caractérisée par l'axe Ox, et que l'on place l'origine au milieu du segment de longueur (2a) reliant les extrémités des ressorts, on peut écrire :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -(k_1+k_2)x - (c_1+c_2) \frac{dx}{dt} + (k_2-k_1)a + f_e \quad (3.100)$$

- avec :
- x : déplacement
  - fe : force extérieure résultante exercée à l'abscisse x
  - k1, k2 : raideurs des ressorts
  - c1, c2 : viscosités des ressorts

En négligeant les inerties ramenées dues aux muscles et à la charge du système, on peut caractériser l'état d'équilibre du système par la position au repos  $x_0$ , qui constitue une cible à atteindre :

$$x_0 = - \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} a \quad (3.101)$$

Le mouvement peut alors se définir à partir de la commande d'une succession d'états d'équilibres, le passage d'un état d'équilibre à un autre étant fonction de la modulation du rapport  $k_1/k_2$ .

La discrétisation de l'équation précédente nous conduit à l'expression suivante :

$$x(t) = \frac{P(q^{-1})}{Q(q^{-1})} [f(t) + f_0(t)] \quad (3.102)$$

avec

$$P(q^{-1}) = \frac{1}{m} q^{-1}$$

et

$$Q(q^{-1}) = 1 - (2 - K - Z) q^{-1} + (1 - Z) q^{-2}$$

$$K = \frac{(k_1 + k_2) T_e^2}{m}$$

$$Z = \frac{(c_1 + c_2) T_e}{m}$$

$$f_0(t) = [k_2(t) - k_1(t)] a$$

### \* *Modèle identifié*

Le modèle que nous avons utilisé pour l'identification est un modèle linéaire à court-terme qui s'exprime sous forme de régression linéaire:

$$A(q^{-1}) x(t) = B(q^{-1}) f(t) + C(q^{-1}) \eta(t)$$

Ce qui donne :

$$x(t) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} \left[ f(t) + \frac{C(q^{-1})}{B(q^{-1})} \eta(t) \right] = Z_m(q^{-1}) [f(t) + f_0(t)] \quad (3.103)$$

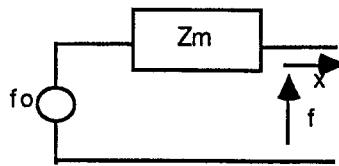
Ce modèle traduit la décomposition du système en :

- une partie active, caractérisée par une impédance mécanique de la forme :

$$Z_m = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} = \frac{b_0 q^{-1}}{1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2}}$$

- une partie active, caractérisée par un générateur de force :

$$f_0(t) = \frac{C(q^{-1})}{B(q^{-1})} \eta(t)$$



Il est possible alors d'établir un rapprochement entre les paramètres du modèle d'analyse obtenu par la méthode d'identification et les paramètres mécaniques du modèle à deux muscles. On obtient, par identification de  $Z_m$  et de  $f_0$  :

$$m = 1/b_0$$

$$K = 1 - a_1 + a_2$$

$$Z = 1 - a_2$$

et  $f_0$  est obtenu par filtrage de l'erreur de prédiction  $h$  à travers le filtre  $C/B$ .

d'où on en déduit :  $k_1, k_2, (c_1+c_2)$ , en normalisant la longueur ( $a$ ) à 1 :

$$k_1 = 1/2(mK - f_0) = 1/2[(1-a_1+a_2)/b_0 + f_0]$$

$$k_2 = 1/2(mK + f_0) = 1/2[(1-a_1+a_2)/b_0 - f_0]$$

### III.3.1.2. Evolution temporelle du modèle mécanique

L'évolution au cours du temps du modèle mécanique identifié se traduit par une modulation simultanée des paramètres de l'impédance mécanique, et du "générateur de force"  $f_0$ .

Il est intéressant en particulier d'analyser les lois de variation des paramètres de raideur  $k_1$  et  $k_2$ , ainsi que celles de la raideur globale ( $k_1+k_2$ ). En effet, les hypothèses du modèle masse-ressort tendraient à prouver que les paramètres contrôlés par le programme moteur sont effectivement les raideurs équivalentes des muscles agonistes et antagonistes.

Il convient alors de caractériser plus finement la nature de ces variations, en introduisant la notion de trajectoires d'indices mécaniques, traduisant les transitions de passage d'une cible à une autre.

### III.3.2. Gestes cycliques

On peut tenter de caractériser des gestes cycliques en prolongeant le modèle masse-ressort, de telle manière qu'il permette d'expliquer des mouvements entretenus.

Nous avons par conséquent retenu les hypothèses de Kelso, qui vont dans le sens de l'élaboration de modèles comportementaux, intégrant des principes de la mécanique propres au système gestuel humain, et permettant une économie de représentation appréciable. Il s'agit en effet de trouver des modèles de représentation les plus simples possibles qui soient capables de reproduire et d'expliquer pertinemment le fonctionnement des phénomènes observés.

#### *modélisation possible de gestes cycliques : exemple d'un système non-linéaire à cycle limite*

L'équation de Van Der Pol peut décrire des mouvements oscillatoires à cycle limite :

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \alpha(1 - \beta x^2) \frac{dx}{dt} + kx = f_e \quad (3.104)$$

Elle présente des non-linéarités, qui s'expriment sous la forme d'une modulation du coefficient d'amortissement en fonction de la position et de la vitesse. On peut représenter le fonctionnement d'un tel système en le décomposant en deux parties distinctes :

- une partie linéaire à coefficients constants,
- une partie non-linéaire qui s'exprime au moyen d'une fonction contrôlée par les signaux de vitesse et de position.

En effet, l'équation (3.104) peut encore s'écrire :

$$m x'' + \alpha x' + k x = \alpha \beta x^2 x' + f_e$$

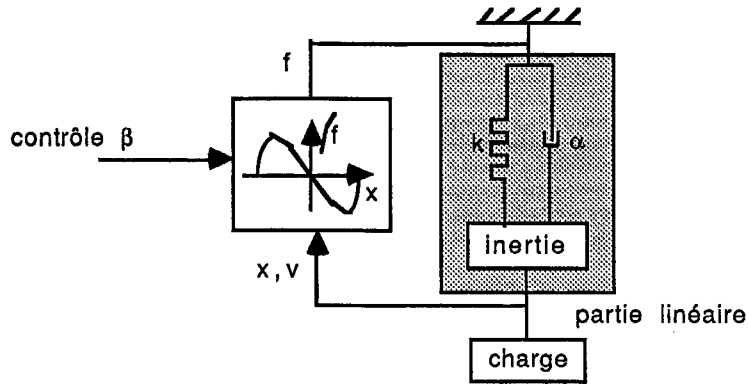


Figure 3.26 : Schéma mécanique du cycle de Van Der Pol

Une représentation plus générale que dans le cas de Van der Pol donne :

$$m x'' + c x' + k x = f_e + f_o = f_e + F(x, x')$$

avec :  $F(x, x')$  : fonction de la position et de la vitesse qui traduit la non-linéarité du modèle.

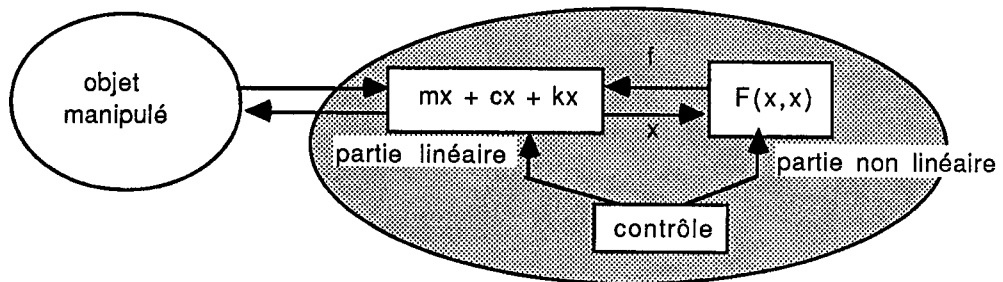


Figure 3.27 : Séparation partie linéaire et non linéaire

Si l'on effectue le lien avec le modèle masse-ressort, il apparaît que la fonction  $F$  n'est autre que la partie "active" ( $f_o$ ) du modèle :

$$F(x, x') = f_o(t)$$

avec  $k = k_1 + k_2$

$$c = c_1 + c_2$$



Dans l'optique où les paramètres effectivement contrôlés par le programme sont les constantes de raideur  $k_1$  et  $k_2$ , l'évolution au cours du temps du modèle non-linéaire se traduit par :

\* une modification des paramètres  $k_1$  et  $k_2$  de la forme :

$$k_1 = g(x, x')$$

$$k_2 = h(x, x')$$

\* une modification des paramètres intervenant dans la partie linéaire du modèle et des paramètres de la fonction non-linéaire  $F$  (dans le cas de Van der Pol, c'est le paramètre  $\beta$  qui module la fonction  $F$ ).

Dans la phase d'expérimentation proprement dite, nous nous attacherons essentiellement à décrire des gestes simples du bras sur un dispositif pouvant se mouvoir dans une seule direction d'action. L'interprétation des résultats pourra se faire à partir de l'analyse de trajectoires "mécaniques". Il sera possible d'identifier les paramètres estimés à ceux du modèle masse-ressort et d'en déduire une explication plausible des phénomènes observés. La mise en évidence de cycles limites reste une direction d'investigation pouvant conduire à d'éventuelles interprétations de gestes plus complexes, notamment de gestes comportant des périodicités.

## Chapitre 4

# Application des méthodes d'identification au geste

### I. Expériences d'identification

Aujourd'hui, l'appréhension du geste humain par des modèles physiques reste limitée à certains aspects fonctionnels, et correspond à des situations expérimentales bien déterminées.

Certains physiologues [Bekey 85], [Rees 85], cherchant à caractériser la fonction de transfert de l'appareil musculaire et articulaire, sont confrontés à des difficultés d'ordre théoriques d'une part, et expérimentales d'autre part. L'élaboration de modèles théoriques ne permet pas en général de décrire une grande variété d'expériences. Les lois mathématiques permettant de décrire les différentes fonctions qui interviennent sont extrêmement complexes, et la plupart du temps non linéaires. La mise en place d'expériences appropriées soulève également d'énormes difficultés.

Les problèmes issus de la communication Homme/Machine ont conduit à l'élaboration de systèmes de contrôle optimal pour l'opérateur humain, dans des domaines d'application diversifiés. C'est le cas notamment de l'aéronautique, où le contrôle manuel de systèmes dynamiques hautement perfectionnés requiert une connaissance assez fine des mécanismes gestuels. Cela contribue à améliorer les conditions relatives à la conduite d'engins spécialisés, et à permettre un apprentissage réaliste de tâches particulières. Cependant, l'optimisation du contrôle gestuel s'effectue dans d'étroites limites, les caractéristiques propres à la charge simulée demeurant pratiquement constantes.

Dans notre cas, le but est plutôt d'exploiter au mieux les possibilités de contrôle gestuel d'un instrument simulé. Dans cette optique, on se propose d'analyser le plus finement possible le geste, et donc de se placer dans des conditions d'expérience favorables à cette analyse.

A cet effet, la "programmabilité" des objets instrumentaux simulés (\*) offre des moyens intéressants pour adapter le geste à l'instrument manipulé. Il s'agit alors d'expliquer les phénomènes observés par des modèles physiques concrets, capables de décrire des classes d'expériences particulières.

L'identification suppose la connaissance des éléments intervenant dans la "boucle de simulation", en particulier des caractéristiques statiques et dynamiques du transducteur (inertie, viscosité, effets de non linéarité, ...), et de l'algorithme de simulation.

Partant de la situation la plus simple : ouverture de la boucle de simulation et application d'un signal de test, la configuration expérimentale évolue vers une plus grande complexité, pour tendre vers la situation de jeu instrumental générale. A chaque étape, on tente de caractériser dynamiquement le système, ce qui nécessite à chaque fois une détermination de sa structure et une estimation de ses paramètres, de telle sorte que le modèle obtenu soit le plus simple possible et le plus proche de la réalité observée.

### **I.1. Modèle du simulateur d'instrument**

Le simulateur d'instrument est caractérisé par :

- une chaîne de conversion analogique/digitale, une chaîne de conversion digitale/analogique, et un algorithme de simulation.

- un dispositif physique comportant :

- \*une partie mécanique ayant ses caractéristiques morphologiques et physiques propres : inertie, raideur, viscosité.

- \*une chaîne d'amplification motrice.

- \*des capteurs destinés à mesurer les grandeurs mécaniques force et position.

L'ensemble est représenté par la figure 4.1 qui traduit la circulation des forces ramenées à l'extrémité de la touche.

*(\*) Dans toutes les expériences mises en oeuvre, les simulations d'objets instrumentaux ont été réalisées par J.L Florens.*

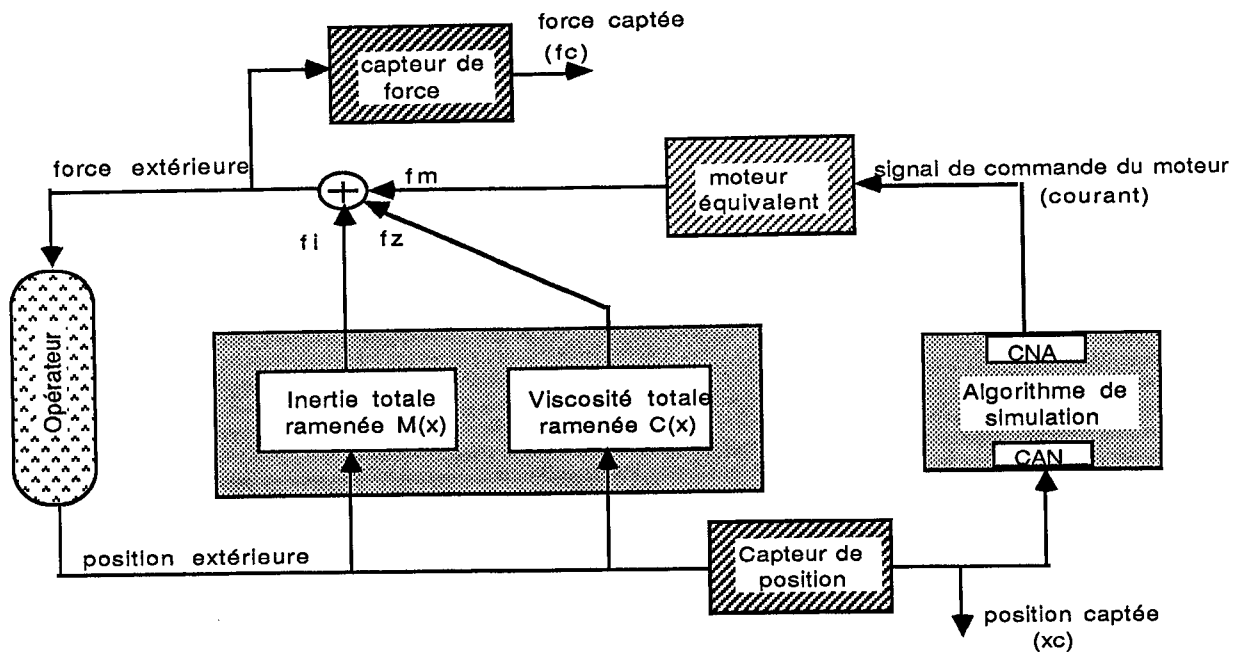


Figure 4.1. Représentation de la configuration instrumentale

### L1.1. Partie mécanique de la touche

Une étude statique de la touche rétroactive, effectuée par J.L. Florens (rapport interne - 1987) a permis de déterminer les caractéristiques de sa partie mécanique. Celle-ci comporte :

- \* une partie linéaire, constituée d'une inertie, d'une viscosité, et d'une élasticité négligeable.
- \* une partie non linéaire, sans constante de temps, déterminée par les aspects géométriques de la transmission entre l'axe du moteur et l'extrémité manipulée.

Nous supposons que les constantes de non linéarité, caractérisées par le coefficient  $\alpha$  sont localisées, ce qui permet d'écrire :

$$M(x) = M_0 + 1/\alpha^2(x) J_0 \quad (\text{inertie totale équivalente})$$

$$C(x) = C_0 + 1/\alpha^2(x) Z_0 \quad (\text{viscosité totale équivalente})$$

où :  $M_0$  est l'inertie totale de la touche,  $C_0$  est le coefficient de viscosité correspondant.  
 $J_0$  est le moment d'inertie total au niveau de l'axe du moteur (rotor, roue d'entraînement, rotor du capteur de position )  
 $Z_0$  est le coefficient de viscosité total correspondant à ces mêmes parties.  
 $x$  est la variable position indiquant le déplacement du bras de la touche.

La fonction de transfert de la partie mécanique de la touche est difficile à exprimer sous forme explicite, étant donné la présence de non-linéarités, conduisant à une dépendance du coefficient  $\alpha$

par rapport au déplacement  $x$ . En négligeant la dépendance de  $M$  et de  $C$  par rapport à  $x$ , on peut caractériser l'impédance mécanique totale ramenée de la touche par :

$$R(p) = M p^2 + C p$$

### I.1.2. Moteur équivalent

Le moteur est commandé en courant et délivre une force motrice qui peut s'exprimer de manière approchée sous la forme suivante :

$$f_{\text{moteur}} = 1/\alpha(x) k(p) i$$

- où :
- $k(p)$  caractérise le gain du moteur, qui est sensiblement constant.
  - $i$  est le courant injecté à l'entrée du moteur.
  - $\alpha$  est un coefficient de non-linéarité.

### I.1.3. Représentation générale sous forme de fonction de transfert

Si  $O(p)$  est une fonction de transfert caractérisant le comportement de l'opérateur ramené au point de manipulation ( $O(p) = x/f$ ), on peut proposer une représentation globale du simulateur couplé à l'opérateur :

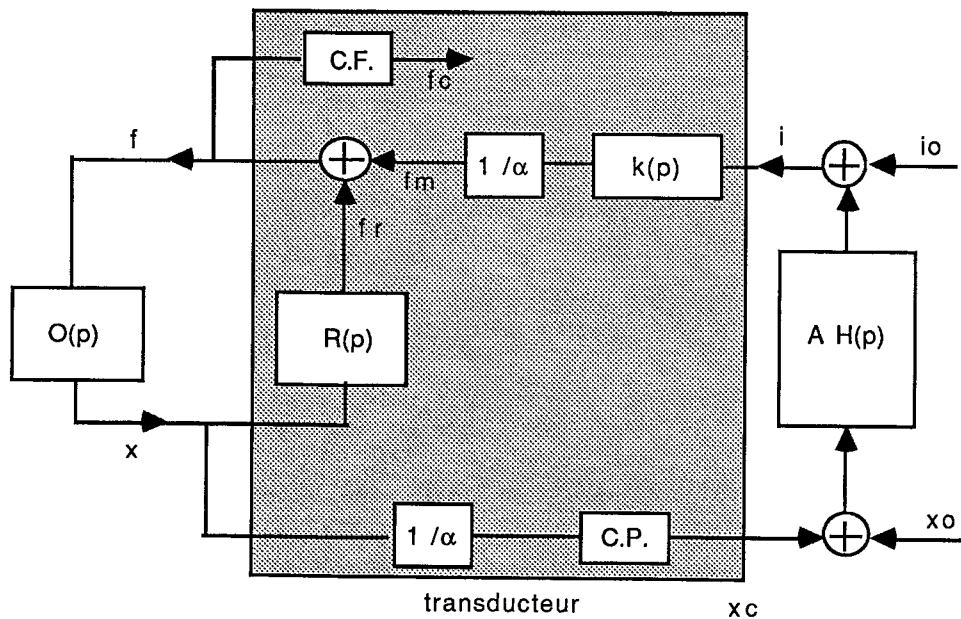


Figure 4.2. Représentation sous forme de fonctions de transfert

$x_0$  et  $i_0$  sont des signaux de test que l'on fera éventuellement intervenir pour l'identification.

Remarques :

1) Cette représentation ne se prête pas au couplage avec un système extérieur du type ( $f=0$ ) ; dans ce cas, on utilise une représentation duale, "l'opérateur" étant caractérisé par une entrée position et une sortie force.

2) Il faut noter que la représentation que nous proposons ici ne précède pas l'analyse par identification, mais résulte de tests statistiques et dynamiques, qui ont permis d'affirmer ou d'infirmer certaines hypothèses a priori.

**I.1.4. Représentations équivalentes pour l'identification**

Pour identifier le système gestuel  $O(p)$ , deux cas peuvent se présenter, en fonction de l'utilisation de la force du moteur ou bien de la force mesurée à l'extrémité de la touche au moyen d'un capteur de force.

I.1.4.1. Modélisation du système ayant pour entrée le signal de commande du moteur ( $i$ ), et pour sortie le signal de position ( $x$ )

La fonction de transfert identifiée a pour expression :

$$\frac{x}{i} = \frac{\frac{k(p)}{\alpha}}{\frac{1}{O(p)} - R(p)} = G(p)$$

avec  $i = i_0 + \frac{1}{\alpha} A H(p)$

Connaissant  $k(p)$ ,  $\alpha$  et  $R(p)$ , on en déduit alors :

$$\frac{1}{O(p)} = \frac{k(p)}{\alpha G(p)} + R(p)$$

I.1.4.2. Modélisation du système ayant pour entrée le signal de force mesuré.

Dans ce cas, on accède plus directement à la fonction de transfert de l'opérateur.

Ce dernier "voit" en effet un dipôle mécanique caractérisé par une relation entre  $f$  et  $x$  :

$$\frac{f}{x} = R(p) + \frac{1}{\alpha^2} k(p) A H(p)$$

avec

$$R(p) = \left( M_0 + \frac{1}{\alpha^2} J_0 \right) p^2 + \left( C_0 + \frac{1}{\alpha^2} Z_0 \right) p$$

L'introduction des signaux de test  $x_0$  et  $i_0$  donne :

$$f = \left[ R(p) + \frac{1}{\alpha^2} A H(p) k(p) \right] x + \frac{1}{\alpha} k(p) i_0 + \frac{1}{\alpha} k(p) A H(p) x_0$$

et

$$x = O(p) (f_m + f_r) = O(p) f$$

Ce que l'on représente par la figure 4.3. suivante :

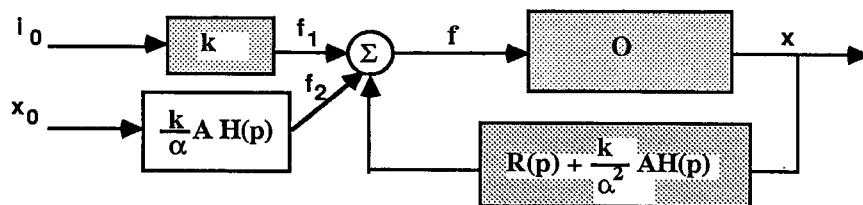


Figure 4.3 : Représentation équivalente : entrée force, sortie position

Ou, si l'on considère la représentation duale (figure 4.4), avec pour entrée la position et pour sortie la force:

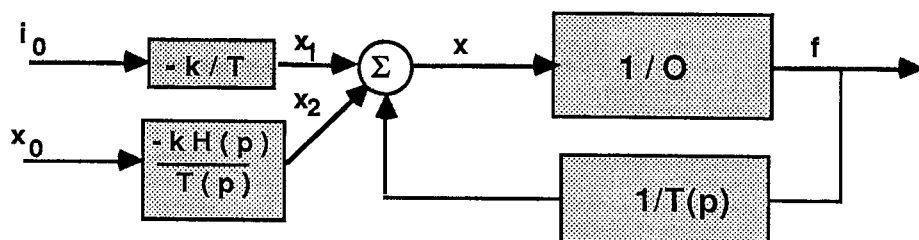


Figure 4.4 : entrée position, sortie force

avec :

$$T(p) = R(p) + A H(p) k(p) / \alpha^2$$

Cette dernière représentation est relativement moins intéressante si l'on utilise un signal de test : en effet, celui-ci est filtré à travers la fonction  $1/T(p)$ , ce qui éloigne ses caractéristiques de celles d'un bruit blanc.

## I.2. Méthodes d'identification employées

La pratique de l'identification pour une expérience instrumentale donnée suppose un "va et vient" entre trois phases :

- une phase de détermination de la structure du modèle sur la fenêtre d'analyse considérée,
- une phase d'analyse qui conduit à l'estimation des paramètres du modèle,
- une phase de validation qui repose sur des critères de fiabilité, de qualité et de proximité du modèle vis-à-vis du système réel.

L'évaluation permet éventuellement de remettre en cause les hypothèses a priori.

Les différentes étapes mises en oeuvre dans une expérience d'identification peuvent être schématisées par le diagramme représenté à la figure 4.5 :

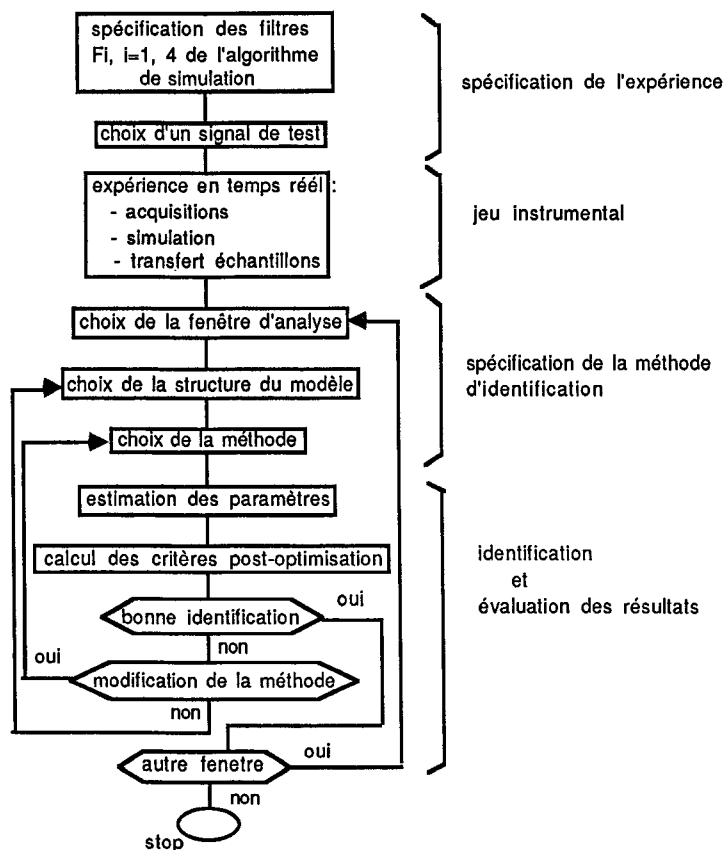


Figure 4.5 : Synoptique de la démarche expérimentale



### I.2.1. Détermination de l'ordre du système

Différentes méthodes ont été envisagées pour tester l'ordre du système :

Une possibilité est d'évaluer le critère optimisé pour des ordres de modèles croissants.

La méthode consiste à tracer la courbe  $J = f(n)$  ; on estime alors que la valeur de  $n$  pour laquelle se produit une "rupture" de la courbe correspond à l'ordre du système. Ceci peut s'expliquer relativement simplement ; tant que l'ordre du modèle est inférieur à celui du système, il comporte trop peu de "degrés de liberté" pour pouvoir prédire correctement la sortie du système. Par contre, dès que l'ordre du modèle dépasse celui du système, il est toujours possible de trouver une solution à l'estimation dont les équations sont une combinaison linéaire de celles décrivant le système réel.

Une autre méthode utilise l'élimination des pôles et des zéros de la fonction de transfert estimée dans le plan des  $z$  ; lorsque l'ordre du modèle excède l'ordre "vrai", on remarque en effet que les pôles et les zéros supplémentaires s'éliminent mutuellement.

Le critère proposé par Akaike, quant à lui, tient compte simultanément de l'ordre du système et de l'amélioration du critère. Il s'exprime par :

$$A_K = \frac{N}{2} \text{Log} \left( 2 \cdot \pi \cdot e \cdot \frac{J}{\sqrt{N}} \right) + 2 \cdot p$$

avec

- N : nombre d'échantillons d'entrées/sorties
- p : nombre de paramètres
- J : critère optimal
- e : base du logarithme Népérien

### I.2.2. Choix de la méthode

Nous avons implanté dans un même logiciel plusieurs formes différentes de l'algorithme d'identification récursif, dérivé du principe des Moindres Carrés simples ; on distingue :

- la méthode des Moindres Carrés Simples
- la méthode des Moindres Carrés Etendus
- la méthode du modèle
- les méthodes de la Variable Instrumentale :

- \*de Young
- \* à observations retardées
- \* à partir du filtrage d'un signal de test externe

Les deux dernières sont des variantes adaptées à l'analyse de systèmes fonctionnant en boucle fermée.

### I.2.3. Evaluation post-optimisation de la méthode

L'algorithme d'identification récursif permet de calculer à chaque pas temporel un vecteur de paramètres  $\theta$  ; lorsque le calcul converge, il se produit une stabilisation de ces paramètres qui traduit le succès de l'opération. Pour observer cette convergence, il est nécessaire d'une part que les signaux soient réellement stationnaires sur la fenêtre d'analyse, et d'autre part que la durée d'analyse soit supérieure à la durée de convergence de la méthode.

La seule valeur du vecteur de paramètres ne permet pas d'évaluer la qualité du modèle obtenu. Il faut encore calculer un certain nombre de facteurs post-optimisation qui témoignent de la réussite de l'analyse. Plusieurs critères d'évaluation ont été mis en oeuvre dans l'algorithme d'identification, que nous énumérons ci-après.

#### I.2.3.1. Critères relatifs

Ces critères permettent de mesurer la distance entre le système réel et le modèle identifié :

\*erreur relative de prédiction :

$$\frac{\sum_{i=1}^N (s_m(i) - s_p(i))^2}{\sum_{i=1}^N s_m^2(i)}$$

avec  $s_m(i)$  : sortie mesurée au pas temporel  $i$   
 $s_p(i)$  : sortie prédite au même instant

\*erreur relative de sortie :

$$\frac{\sum_{i=1}^N [s_m(i) - s_a(i)]^2}{\sum_{i=1}^N s_m^2(i)}$$

avec  $s_a$  : sortie calculée du modèle

### I.2.3.2. Gain statique

Si la fonction de transfert estimée s'écrit :

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} \cdot z^{-k}$$

alors le gain statique a pour expression :

$$G_S = \frac{\sum_{i=0}^m b_i}{1 + \sum_{i=1}^n a_i}$$

Ce gain ne permet pas directement d'évaluer les résultats obtenus ; il est cependant un moyen de se rendre compte de l'aberration ou non des résultats.

### I.2.3.3. Calcul des pôles et des zéros.

Les pôles sont les racines du polynôme :

$$z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_n = 0$$

et les zéros sont les racines de :

$$b_0 z^m + \dots + b_m = 0$$

L'observation des pôles de la fonction de transfert permet de révéler la cohérence des résultats. De plus, la compensation éventuelle des pôles par des zéros est un bon indicateur de l'ordre du système.

### I.2.3.4. Calculs de précision

Le calcul de la précision des paramètres sur la fenêtre d'analyse est un bon indicateur de la validité des résultats. Notamment, on peut observer une augmentation sensible de la variance des paramètres lorsque l'on surestime l'ordre du système.

Dans la méthode des Moindres Carrés, ces variances sont calculées à partir des éléments de la diagonale de la matrice P ; en effet, l'espérance mathématique de cette matrice étant proportionnelle à la matrice de variance/covariance de l'estimateur  $\theta$  , on a :

$$E\{P(k+1)\} = \frac{1}{\sigma_e^2} \text{cov}[\Delta\theta(k)]$$

avec :

$$\sigma_e^2 = E\{e^T e\}$$

$$\Delta\theta(k) = \theta(k) - \theta^*$$

et

$e$  : erreur d'équation

$\theta^*$  : vecteur de paramètres réel

### I.2.3.5. Outils graphiques

D'autre part, il est possible de s'aider d'outils graphiques permettant de visualiser :

- \* l'évolution des paramètres estimés sur la fenêtre temporelle considérée.
- \* les signaux gestuels captés, supposés être respectivement l'entrée et la sortie de notre modèle de représentation.
- \* l'évolution des pôles et des zéros correspondants dans le plan des z.
- \* le signal résiduel, qui peut être : l'erreur d'équation a priori ou a posteriori, l'erreur de sortie, ou encore l'erreur résiduelle filtrée.
- \* la fonction d'autocorrélation de l'erreur d'équation.

Si le modèle est correctement adapté aux mesures, la séquence des erreurs d'équation doit être "blanche" à l'optimum, ce qui revient à dire que la fonction d'auto-corrélation de cette erreur doit approcher une fonction de Dirac.

L'autocorrélation qui s'exprime par :

$$R(\tau) = \sum_{k=\tau+1}^N e(k-\tau).e(k)$$

est facilement calculable de manière récursive.

### I.2.3.6. Re-synthèse

Enfin, la dernière étape nécessaire pour vérifier la validité de la modélisation consiste à simuler le modèle identifié dans des conditions analogues à celles de l'analyse, et de comparer les entrées et les sorties respectives du système réel d'une part, et du modèle calculé d'autre part.

### I.3. Identification en boucle ouverte

#### I.3.1. Description de l'expérience

Nous avons réalisé une première série d'expériences destinées à déterminer approximativement les caractéristiques du transducteur et celles de la main (passive) de l'opérateur. Ces expériences sont décrites à la figure 4.6 :

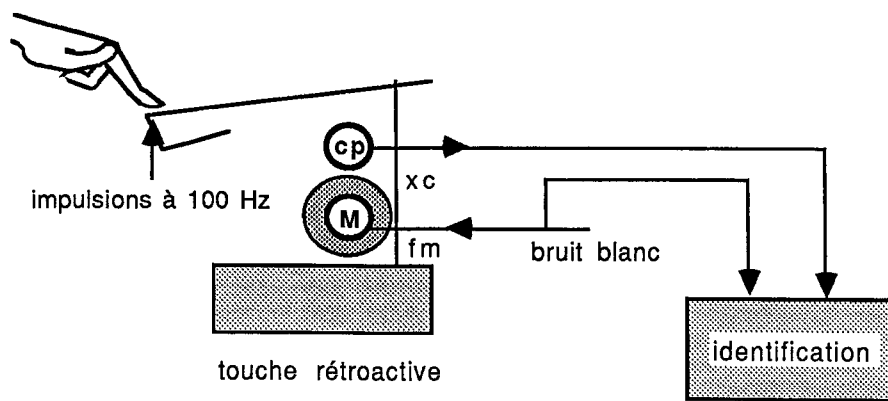


Figure 4.6 : Première série d'expériences

L'identificateur opère sur un système dont l'entrée est la force, constituée par un signal de test ayant les caractéristiques d'un bruit blanc, et la sortie est le signal de position délivré par le capteur de position. La force est injectée à l'entrée du moteur de la touche. Le système est dit en boucle ouverte, car il n'existe pas dans ce cas de modèle de simulation permettant d'établir une relation entre la force  $f_m$  et la position captée. La fonction de transfert du système identifié a pour expression, compte tenu du modèle du simulateur proposé précédemment :

$$\frac{x}{i} = \frac{\frac{k(p)}{\alpha}}{\frac{1}{O(p)} - R(p)}$$

#### I.3.2. Caractéristiques du signal excitateur

Les caractéristiques requises pour le signal de test idéal sont telles qu'il doit être centré, riche spectralement, et ne pas perturber le point de fonctionnement du système. Autrement dit, c'est un

signal qui tend à se rapprocher d'un bruit blanc ; dans le domaine fréquentiel, l'autospectre de ce signal  $b(t)$  vérifie :

avec  $T.F\{ C_{bb}(t) \} = S_{bb}(v) = k$  [T.F. symbolise la transformée de Fourier]  
 $k$  : constante  
 $C_{bb}(\tau)$  : fonction d'autocorrelation de  $b(t)$  définie par :

$$C_{bb}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T b(t)b(t-\tau) dt$$

La condition ci-dessus se traduit, dans le domaine temporel par :

$$C_{bb}(\tau) = k.\delta(\tau)$$

Or, tout système physique étant à support borné (pas de fréquences infinies), cela entraîne :

$$H(f) \equiv 0 \text{ pour } |f| > f_{\max}$$

Ceci est représenté sur la figure 4.7 suivante :

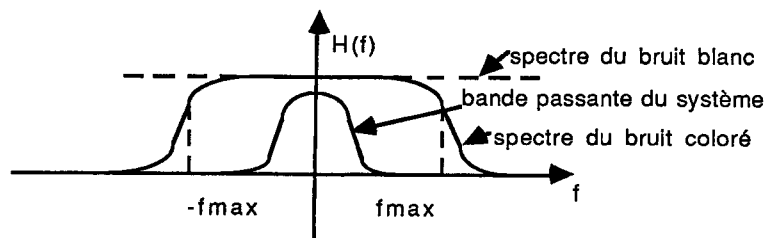


Figure 4.7 : Allure des spectres

Cela revient à dire que  $C_{bb}(\tau)$  doit être "étroite" devant la réponse impulsionnelle  $h(\tau)$  du système.

On peut remarquer que le signal tel que :

$$C_{bb}(\tau) \approx \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT)$$

convient, pourvu que  $T > 2\tau_{\max}$ ,  $\tau_{\max}$  étant la valeur de  $\tau$  telle que  $h(\tau) = 0$  pour  $|\tau| \geq \tau_{\max}$ .

Or, la fonction ci-dessus n'est plus la fonction de corrélation d'un signal aléatoire, mais d'un signal périodique de période  $T$  :

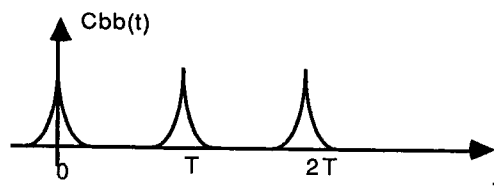


Figure 4.7 : Fonction de corrélation d'un signal périodique

Le signal test  $b(t)$  répondant à de telles conditions est appelé signal pseudo-aléatoire. En fait, un tel signal est beaucoup plus facile à générer qu'un signal aléatoire, surtout dans le domaine des basses fréquences. Dans le contexte discret, on construit des séquences binaires pseudo-aléatoires, constituées d'une succession périodique de créneaux de durée variable, cette durée étant un multiple entier d'une largeur minimale  $\theta$ .

Il est facile de réaliser de telles séquences à partir d'un registre à décalage de  $N$  étages, "contre-réactionné" modulo 2, c'est-à-dire que l'on ajoute à l'entrée du registre le résultat de l'addition modulo 2 des sorties d'un certain nombre d'étages du registre :

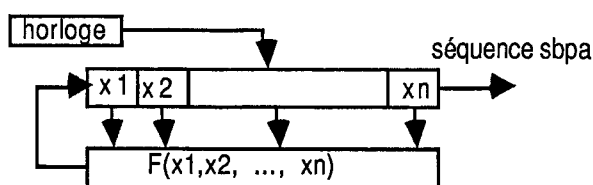


Figure 4.9 : Registre à décalage : réalisation d'une s.b.p.a.

Les séquences construites sont composées d'une suite de créneaux successivement positifs et négatifs telles que, si la durée de la séquence est  $T = N \theta$ , la fonction d'autocorrélation est une suite de triangles de largeur à la base  $2\theta$ , se répétant tous les  $N\theta$ .

Deux problèmes se posent alors, concernant d'une part le choix de la fréquence d'horloge, et d'autre part celui de la longueur de la séquence du signal pseudo-aléatoire.

### I.3.2.1. Fréquence d'horloge

Celle-ci est directement liée à la largeur  $\theta$  :  $F = 1/\theta$ .

La transformée de Fourier du triangle centré sur l'origine vaut  $(\sin \pi v \theta / \pi v \theta)^2$ .

Il faut que dans la zone où  $S(v)$  (Transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation) est différente de zéro,  $(\sin \pi v \theta / \pi v \theta)^2$  soit voisin de 1.

Si l'on tolère 3dB d'affaiblissement pour  $f=f_{\max}$  (borne supérieure du spectre), on a :

$$\left( \frac{\sin \pi v \theta}{\pi v \theta} \right)^2 = 0,70$$

soit  $F = 1/\theta = 3 \cdot f_{\max}$

En pratique, nous avons choisi comme fréquence d'horloge de la séquence binaire pseudo-aléatoire (s.b.p.a.) la fréquence d'échantillonnage des signaux mesurés. En effet, ce signal de test doit être capable d'exciter tous les modes caractérisant les récepteurs sollicités par les stimulations extérieures.

### I.3.2.2. Longueur de la séquence binaire pseudo-aléatoire

Soit  $\tau_M$  la durée de la réponse impulsionnelle du système. La longueur de la séquence est déterminée par :  $(2^N - 1) \theta$

On doit donc avoir :  $(2^N - 1) \theta > \tau_M$ , ce qui entraîne :

$$N > \frac{\text{Log}(\tau_M F + 1)}{\text{Log } 2}$$

En pratique, il faut choisir la période d'analyse  $T = N\theta$  en prenant la première valeur de  $N$  supérieure à  $\text{Log}(\tau_M F) / \text{Log} 2$ .

Des études physiologiques sur le geste ont permis de faire certaines hypothèses concernant la durée de la réponse impulsionnelle des signaux gestuels. Cette durée est estimée à environ 200 ms pour des gestes lents de manipulation.

En pratique, elle dépend de la nature des gestes effectués, et en particulier des types de récepteurs mis à contribution ; elle variera donc d'une expérience à une autre. Le tableau suivant donne les valeurs de  $N$  pour des fréquences d'échantillonnage et des durées de réponses impulsionnelles variables :

$\tau_M$ $f_e$	100 (ms)	200	500	1000
100 Hz	16	32	64	128
200	32	64	128	256
700	128	256	512	1024
1500	256	512	1024	2048

### **I.3.3. Etalonnage de la méthode, sans l'opérateur**

Avant d'aborder l'étude du geste, nous avons procédé à une sorte d'étalonnage de la méthode, qui vise à ajuster les paramètres intervenant au niveau des conditions d'expérience. Partant de conditions initiales déduites d'une certaine connaissance préalable de l'outil, une analyse par identification, opérée en injectant à l'entrée du système (ici le signal de commande du moteur) un signal d'excitation, est destinée à extraire les caractéristiques dynamiques de la touche.



Le couplage avec l'extérieur étant du type ( $f=0$ ), il convient de prendre une représentation ou la fonction de transfert de l'opérateur est caractérisée par une entrée position et une sortie force.

On identifie alors la fonction de transfert :

$$\frac{x}{i} = - \frac{k(p)/\alpha}{R(p)}$$

ce qui permet d'en déduire les caractéristiques du moteur et de la partie mécanique de la touche.

La démarche consiste à essayer d'isoler les influences des différents paramètres intervenant dans la configuration expérimentale, et à tester la sensibilité de la méthode à chacun de ces paramètres. On obtient alors un ensemble de courbes, ou abaqués, mettant en évidence des zones de fonctionnement intéressantes, i.e. des zones favorables à l'identification du système. Cette approche est relativement empirique et délicate, puisqu'elle suppose la connaissance à priori d'un conditionnement global idéal du système. Si l'on considère l'ensemble des conditions d'expérience  $C = \{ c_1, c_2, \dots, c_n \}$ , cela consiste à étudier la sensibilité de la méthode à  $c_j$ , les  $c_j$  (avec  $j$  différent de  $i$ ) étant supposées vérifiées.

Dans cet ensemble, on regroupe un certain nombre de facteurs tels que :

- la fréquence d'échantillonnage, et les fréquences de coupure des filtres correcteurs,
- les caractéristiques du signal excitateur,
- le conditionnement statique de la touche.

#### I.3.3.1. Sensibilité de la méthode à la fréquence d'échantillonnage des signaux captés

Celle-ci est conditionnée par la bande passante des caractéristiques du système gestuel sensori-moteur ; elle dépend en particulier des types de récepteurs impliqués dans les gestes analysés (perception tactilo-kinesthésique). De manière similaire, ces caractéristiques fréquentielles dépendent de la nature de l'objet mécanique simulé. Dans le cas idéal, on tente d'ajuster le dispositif de couplage entre le geste et l'objet manipulé, de telle sorte que le simulateur soit "adapté" aux émetteurs et récepteurs gestuels.

Jusqu'à présent, nous avons supposé que la bande passante des signaux gestuels n'exédait pas 50 Hz, pour des gestes du membre supérieur. En fait, cette hypothèse n'est pas toujours exacte. Une méthode empirique peut être proposée pour évaluer la fréquence d'échantillonnage qu'il convient de prendre ; cette méthode consiste à appliquer l'identification aux signaux d'entrée et de sortie de la touche, la fréquence d'échantillonnage de ces signaux étant progressivement augmentée.

Le système identifié est un système résonant à deux pôles complexes conjugués, et la fréquence de résonance se déduit facilement des paramètres estimés. La représentation des pôles dans le plan des  $z$  de la fonction de transfert du système identifié indique la sensibilité de la méthode à la variation de la fréquence d'échantillonnage des signaux (figure 4.10) :

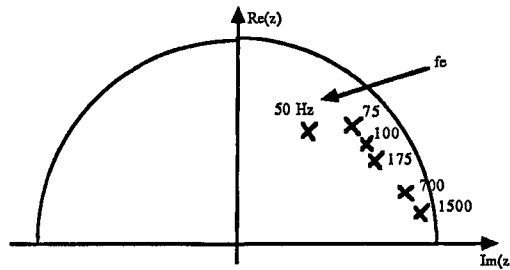


Figure 4.10 : Sensibilité des pôles à la fréquence d'échantillonnage

Il semble qu'il existe un seuil pour la fréquence d'échantillonnage tel que, en-dessous de ce seuil, on observe une rupture dans la loi d'évolution des pôles, et au-dessus de ce seuil, un resserrement des pôles dans la zone ( $z=1$ ) ; ce rapprochement vers l'axe réel traduit une fréquence d'échantillonnage trop élevée.

Cela peut s'expliquer simplement, si l'on remarque que la valeur des pôles obtenus dépend de la fréquence d'échantillonnage des signaux ; en effet, si l'on établit une correspondance entre le plan des  $p$  et le plan des  $z$ , on a :

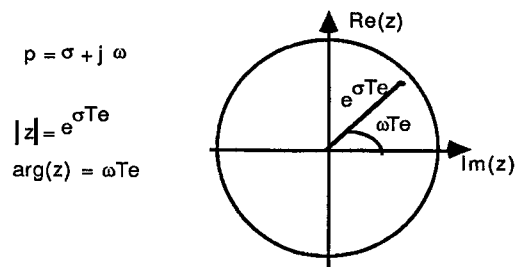


Figure 4.11 : module et argument des pôles dans le plan des  $z$

Nous avons évalué ce palier à la frontière de la zone instable à la valeur de 75Hz. La limite supérieure est plus difficile à estimer : elle dépend de la nature du geste ; par exemple, pour un geste lent de manipulation, il suffit d'échantillonner les signaux à 100Hz.

Des gestes rapides peuvent nécessiter des fréquences d'échantillonnage allant jusqu'à 700Hz.

### I.3.3.2. Sensibilité de la méthode à l'amplitude (a) du bruit d'excitation

Augmenter l'amplitude du bruit d'excitation revient à se déplacer sur une courbe à rayon constant ( $r=0.85$ ) dans le sens d'un rapprochement vers l'axe réel, ce qui traduit une diminution sensible de la fréquence de résonance du système. Cet accroissement d'amplitude s'accompagne de plus d'une augmentation de l'incertitude sur les résultats (figure 4.12).

Pour ( $a > 50$ ), une zone de saturation semble apparaître sur la courbe  $f_r = f(a)$ .

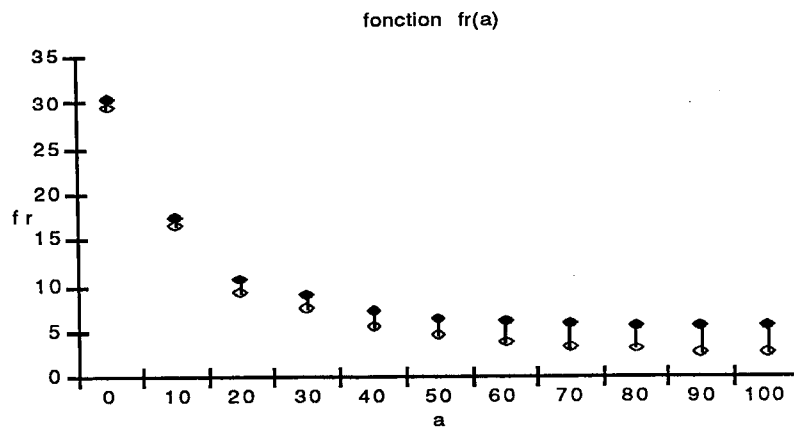


Figure 4.12 : Sensibilité à l'amplitude du bruit

#### Remarque :

Lorsque le système fonctionnera en boucle fermée, le gain de boucle dépendra à la fois de l'amplitude du bruit, mais aussi de celle du modèle d'objet simulé, et de celle des différents filtres intervenant dans l'expérience (filtres dérivateurs, filtres correcteurs destinés à assurer la stabilité des asservissements, etc.). Par conséquent, il est difficile de régler de manière isolée ce paramètre faisant partie des conditions expérimentales.

### I.3.3.3. Sensibilité de la méthode aux caractéristiques statiques de la touche

#### a. Influence de la position moyenne ( $x_m$ ) de la touche

Les caractéristiques dynamiques du modèle identifié dépendent du réglage initial de la position moyenne du transducteur. La courbe  $f_r = h(x_m)$  traduit ce comportement non-linéaire du dispositif (figure 4.13).

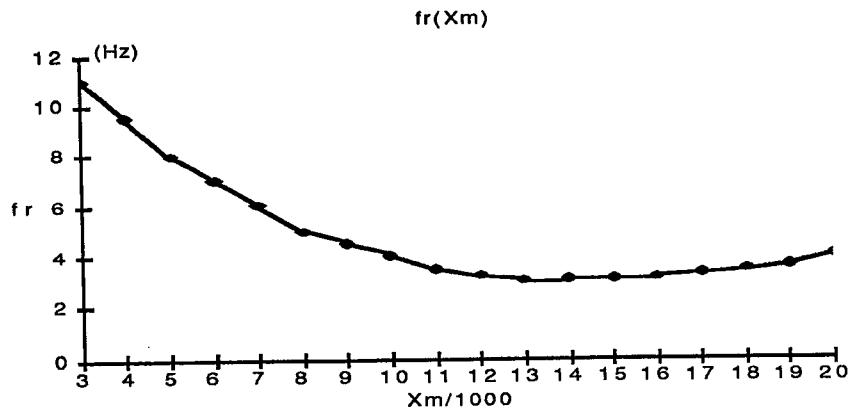


Figure 4.13 : Sensibilité à la position moyenne

b. Influence d'une inertie ramenée (m) à l'extrémité du bras de la touche

La fréquence de résonance du dispositif est fortement corrélée à l'inertie mécanique ramenée au point d'observation. (figure 4.14) :

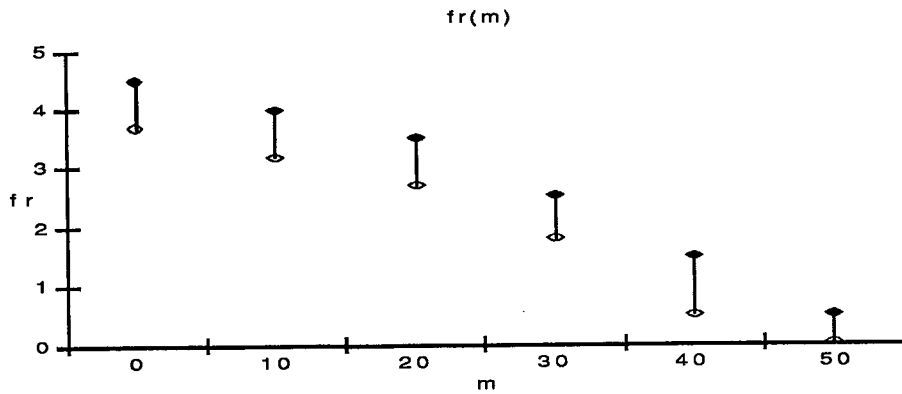


Figure 4.14 : Sensibilité à l'inertie

Nous aurons intérêt dans la suite des expériences à éliminer le plus possible cette inertie, en construisant des modèles qui tiennent compte de ces caractéristiques statiques.

#### I.3.3.4. Conséquences

Cette étude préliminaire a permis d'identifier le dispositif mécanique de la touche, couplé à l'opérateur. Pour des conditions globales d'expérience données, la méthode d'identification des Moindres Carrés Simples donne des résultats satisfaisants. Les paramètres estimés convergent très rapidement (10 à 20 ms environ). L'évaluation des résultats a été faite au moyen du calcul de critères relatifs post-optimisation. D'autre part, la re-simulation du modèle obtenu à partir des résultats de l'identification permet de restituer les signaux gestuels avec une très bonne précision.

De manière générale, à partir de l'analyse du système dont l'entrée est le courant du moteur et la sortie la position  $x_c$  captée (fig. 4.1), on obtient un modèle résonant à deux pôles, dont la fréquence varie entre 5 Hz et 10 Hz, en fonction des conditions de l'expérience. L'allure du spectre lissé de la sortie du système étudié traduit un système très amorti (figure 4.15.c), ce qui était tout à fait prévisible.

Cependant, l'utilisation de la touche à vide, c'est-à-dire sans modèle de simulation, entraîne des difficultés, dues essentiellement à la fluctuation importante de la position moyenne du bras de la touche. D'une part, ce déplacement de grande amplitude s'accompagne d'effets non-linéaires, qui traduisent une grande dispersion sur les résultats. Pour palier à ce problème, il est possible de déterminer des objets simulés permettant de compenser en partie les effets dus aux non-linéarités. D'autre part, en ce qui concerne la méthode d'identification, il est souhaitable d'utiliser comme signal d'entrée du modèle un signal à valeur moyenne nulle sur la fenêtre d'analyse. On préférera donc au signal de position le signal de vitesse correspondant.

Dans un premier temps, nous envisagerons l'utilisation de modèles mécaniques simples, permettant de simuler des frottements visqueux, des élasticités plus ou moins raides. En particulier, il est intéressant de réaliser des asservissements de position, assurant ainsi une position moyenne fixe du bras de la touche. Ce cas nous amène à analyser dynamiquement le système pour de petites variations autour d'un point d'équilibre  $x_0$ , pour lequel le coefficient de non-linéarité  $\alpha$  est sensiblement constant.

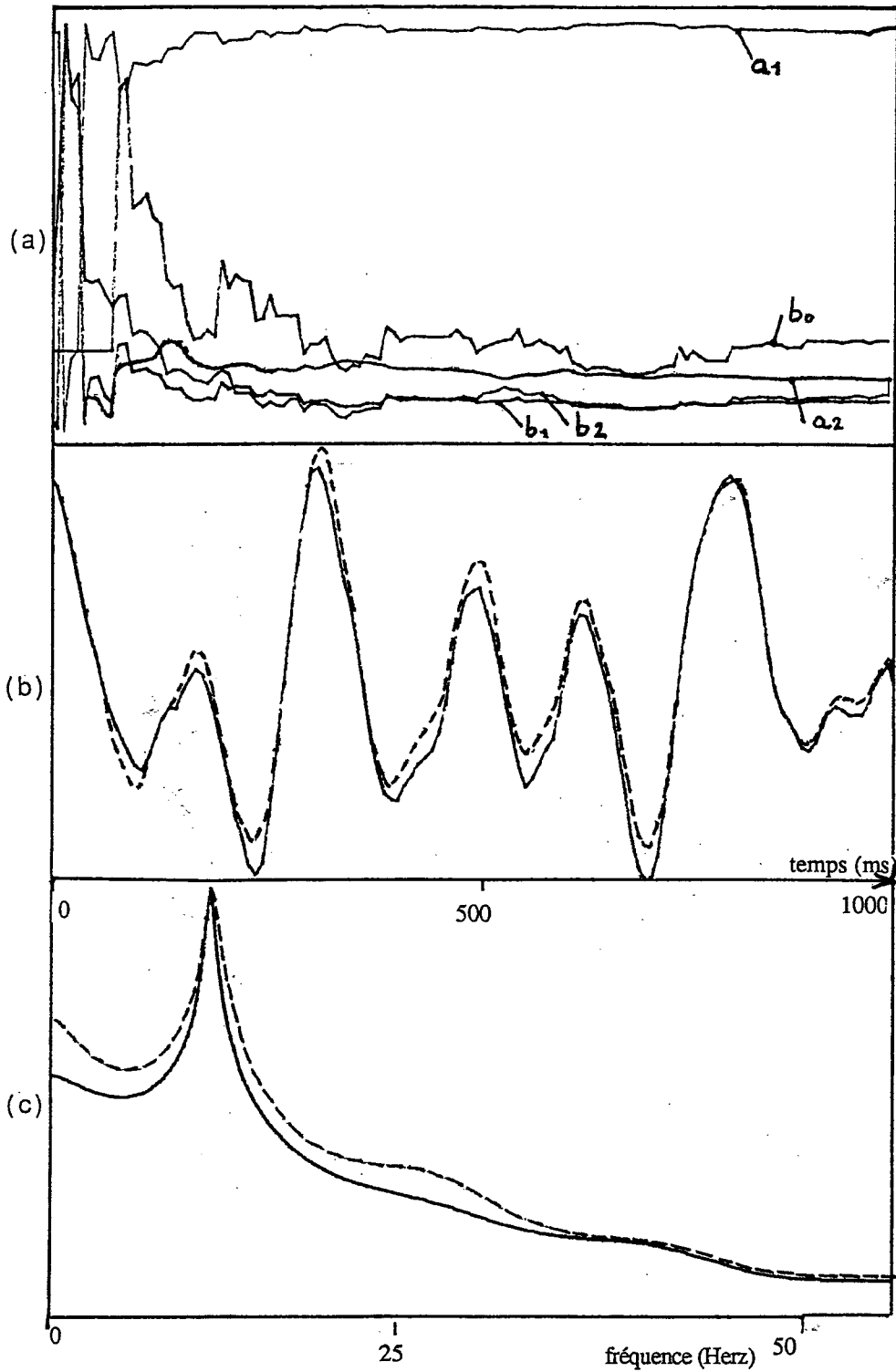


Figure 4.15. Estimation du système stationnaire : touche excitée par du bruit blanc

- (a) paramètres estimés :  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$
- (b) position simulée/ position réelle
- (c) spectre lissé par analyse LPC

#### I.4. Identification en boucle fermée

L'extraction des caractéristiques dynamiques du système gestuel humain lors d'interventions gestuelles sur un objet mécanique n'est pas immédiate, car l'opérateur s'intègre à un système en boucle fermée. L'entrée d'excitation du système à analyser dépend donc en partie de la nature du modèle simulé, et il faut s'assurer qu'elle est suffisamment riche pour permettre à l'identification de s'effectuer dans des conditions satisfaisantes.

On peut représenter la situation d'interaction gestuelle avec un objet manipulé sous la forme du dipôle orienté suivant :

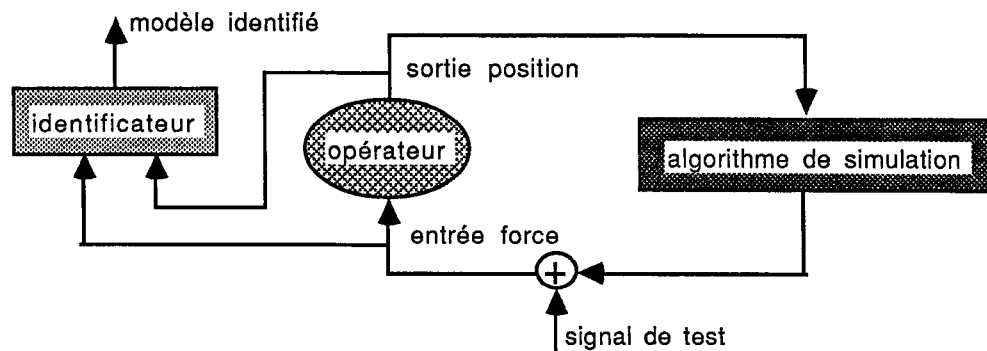


Figure 4.16 : Identification en boucle fermée

Afin de respecter les conditions d'identifiabilité, qui s'avèrent plus contraignantes pour un système bouclé que pour un système dont on contrôle complètement l'entrée, nous avons réalisé deux catégories d'expériences.

Dans une première catégorie d'expériences, nous nous sommes intéressés à l'analyse du geste de manipulation d'objets simples, en appliquant un signal de test à l'entrée du procédé.

Dans le second type d'expériences, nous avons supprimé le signal de test, et essayé de tirer parti des caractéristiques non-linéaires de l'objet simulé, ou de celles du geste qui lui est appliqué. Ces expériences permettent en général de se rapprocher de situations instrumentales réelles.

##### I.4.1. Analyse de gestes de manipulation en présence d'un signal de test

Dans le cas de la manipulation d'objets instrumentaux élémentaires, l'adjonction d'un signal de test à l'entrée du procédé permet d'obtenir un estimateur non biaisé.

Les objets simulés sont constitués de filtres linéaires permettant de simuler des comportements d'inertie, de raideur ou de viscosité. Ils permettent l'étude de deux catégories de gestes de manipulation :

- d'une part des gestes passifs et statiques,
- d'autre part des gestes actifs et dynamiques.

#### I.4.1.1. Mise en oeuvre expérimentale

Pour pouvoir évaluer les résultats de l'identification, il importe de pouvoir établir un lien entre les manifestations intentionnelles du geste, et leur action au niveau de l'objet physique manipulé. Par conséquent, il est nécessaire que les objets simulés conservent un certain réalisme dans leur comportement.

Les objets simulés auxquels nous nous sommes intéressés pour l'analyse de gestes passifs sont essentiellement des butées élastiques plus ou moins raides ; elles ont été réalisées au moyen d'algorithmes d'asservissement de position.

Le schéma simplifié des expériences est le suivant :

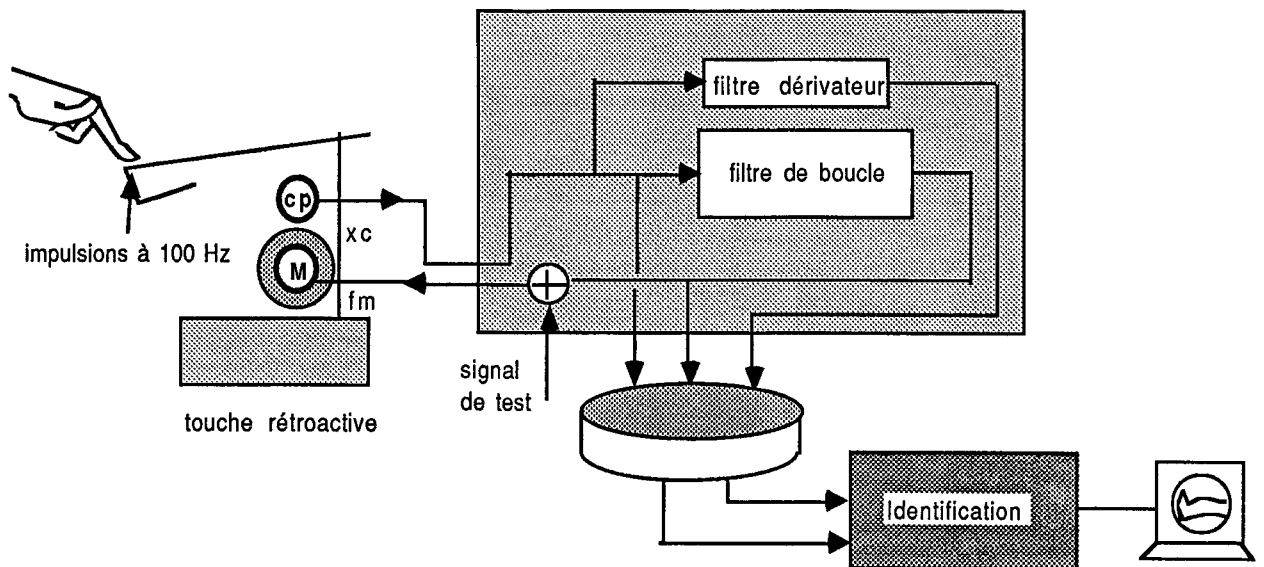


Figure 4.17 : Expériences avec des objets simulés linéaires

La figure 4.18. donne une description plus détaillée des différentes fonctions mises en oeuvre, et leur localisation matérielle :



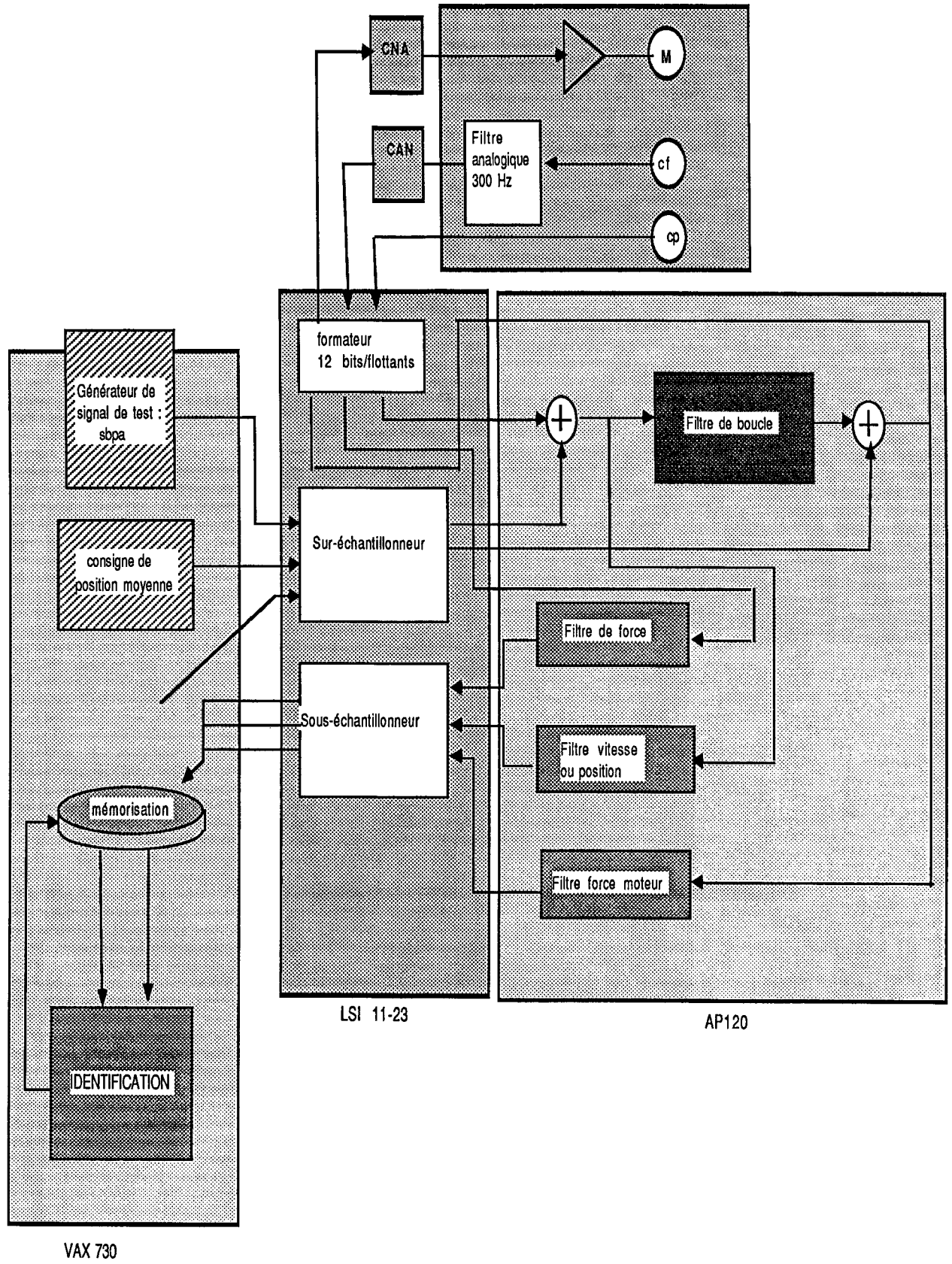


Figure 4.18 : Implantation logicielle

Les programmes de simulation ont été implantés au niveau du processeur vectoriel (Floating Point System AP120). Un logiciel interactif développée par J.L. Florens permet de construire et d'assembler des filtres linéaires au niveau du processeur hôte, et de les charger automatiquement dans le processeur rapide, via le processeur "tampon" (LSI 11-23).

A partir du signal de position capté, il est possible de calculer le signal de vitesse par application d'un filtre dérivateur. Cela nécessite, pour limiter les retards dus au temps de calcul, l'utilisation du signal de position échantillonné à une fréquence plus élevée.

Ainsi, l'échantillonnage des signaux s'effectue dans le cadre de ces expériences à la fréquence interne de la touche, soit 1500 Hz, et les traitements réalisés dans le processeur vectoriel, qui se résument essentiellement à des calculs de filtres, sont synchronisés sur cette fréquence.

Les données du geste sont transmises en temps réel à une cadence variable pouvant aller de 100 Hz à 1500 Hz vers le processeur hôte (Vax) en vue de leur mémorisation sur le disque dur. Plusieurs types de signaux peuvent être pris en compte :

- \*le signal de force filtré analogiquement puis capté ; celui-ci n'est pas utilisé directement pour la simulation.
- \*le signal de position capté ou le signal de vitesse dérivé.
- \* le signal de vitesse obtenu à partir de la dérivation du signal de position.

Il est possible d'enregistrer en temps réel soit la force captée, soit la force motrice servant de commande du moteur. Ces signaux sont filtrés numériquement avant d'être transférés (filtres passe-bas).

Un signal de test, généré à partir du Vax vers le processeur rapide est éventuellement appliqué en différents points de l'algorithme de simulation (à l'entrée ou à la sortie du filtre de boucle).

L'identificateur travaille en temps différé sur les données du geste enregistrées au cours d'une expérience instrumentale.

#### I.4.1.2. Gestes statiques et passifs

Nous considérons que les gestes passifs sont ceux qui ne réagissent pas à des stimulations externes, et ne mettent pas en mouvement les organes effecteurs en cause. De plus, ces gestes supposent une configuration statique des articulations et des muscles. Par rapport au modèle linéaire explicité précédemment, un geste passif peut signifier l'inhibition de la commande motrice représentée par un générateur de force.

L'identification revient donc à déterminer l'impédance mécanique équivalente du système gestuel, considérée comme une sorte de projection de l'impédance mécanique réelle de l'opérateur dans l'espace d'observation. L'objectif visé est d'extraire des paramètres mécaniques corrélés aux caractéristiques intentionnelles du geste.

Les expériences réalisées mettent en jeu la main et le bras de l'opérateur. Celui-ci a un doigt posé sur la touche (geste non préhensile). Deux systèmes stationnaires sont alors analysés. Le premier suppose une configuration souple de la main, du poignet et du coude. Le second implique un raidissement de la main.

Nous avons étudié chacun des deux systèmes séparément, puis analysé la transition au passage des deux gestes : geste "souple/raide" puis geste "raide/souple".

La méthode d'identification doit réaliser un compromis par rapport à la précision du modèle, et à la rapidité de suivi des paramètres. En effet, sur les zones de fonctionnement stables, une bonne précision implique de considérer le système comme étant stationnaire ; par contre, au niveau de la transition, il faut que la méthode puisse répondre rapidement à la variation des paramètres, ce qui implique de conserver un gain relativement important, au détriment de la précision de l'estimation.

Dans le premier cas [geste raide/souple], apparaissent deux états stationnaires, séparés par une transition nette : ceci peut être observé sur les figures 4.19. et 4.20 (pages 175 et 176) où sont représentés les paramètres estimés  $a_1$  et  $a_2$  (coefficients du dénominateur de la fonction de transfert).

Les critères obtenus à l'optimum sont toutefois meilleurs lorsque le couplage entre le dispositif et la main de l'opérateur est relativement souple. Un couplage trop rigide conduit en effet à une diminution sensible de l'excitation du système, qui se manifeste par une diminution de l'amplitude du signal de vitesse. D'autre part, le maintien d'une configuration raide des muscles entraîne un état du système pseudo-stable.

La représentation dans le plan des paramètres  $a_1$  et  $a_2$  conduit à une trajectoire qui met en évidence deux cibles correspondant aux états stables du système. (figure 4.19.f)

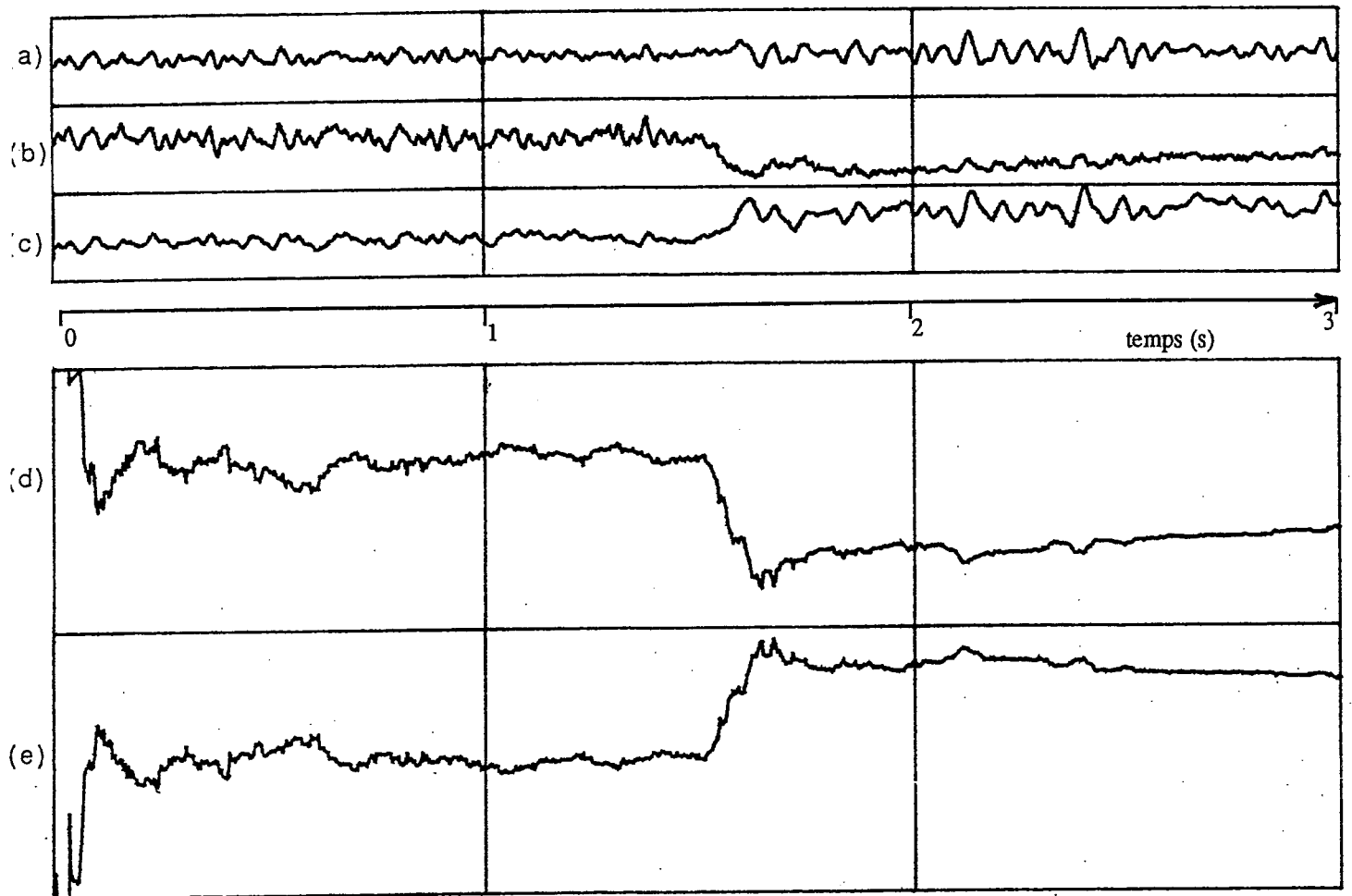
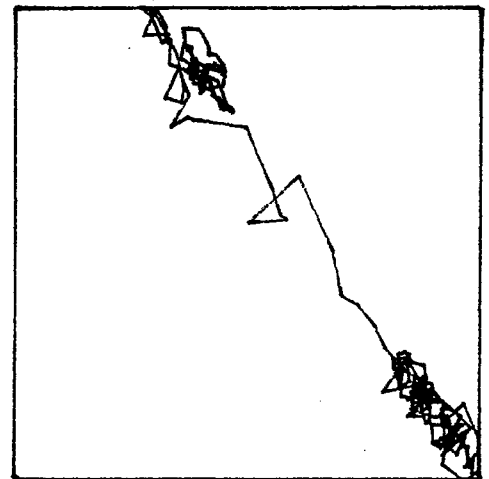


Figure 4.19. Geste statique G1- transition raide/souple

- (a) signal de vitesse
- (b) signal de force
- (c) signal de position
- (d) coefficient estimé a1
- (e) coefficient estimé a2



(f) représentation dans le plan des paramètres a1 et a2

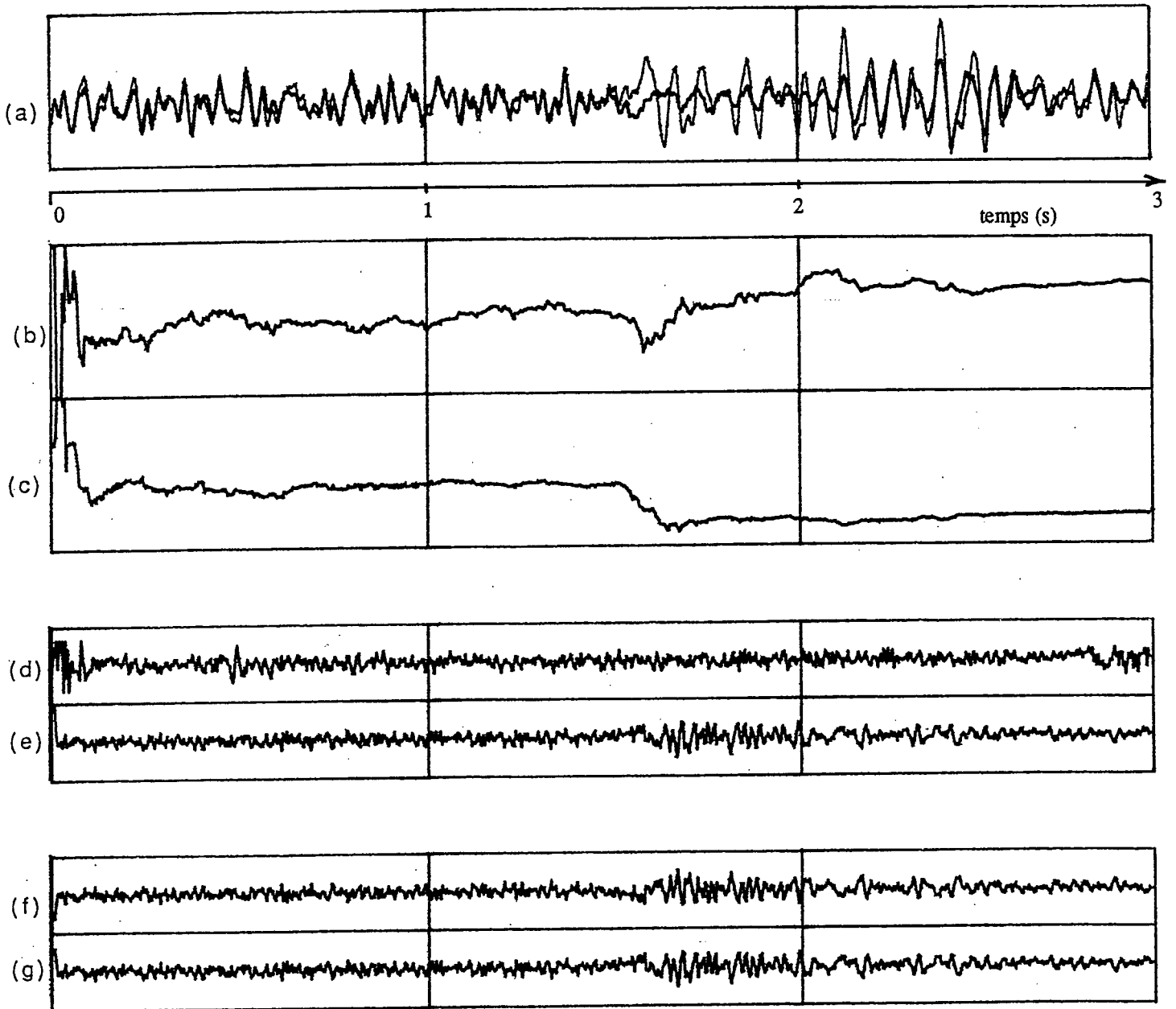


Figure 4.20. Geste statique G1- transition raide/souple

- (a) signal de vitesse réel/simulé
- (b) raideur mécanique équivalente K calculée
- (c) viscosité équivalente Z calculée
- (d) erreur d'équation estimée
- (e) signal d'activation  $f_0$  calculé
- (f) raideur "agoniste"  $k_1$
- (g) raideur "antagoniste"  $k_2$

Le second cas d'expérience [geste souple/raide] permet de retrouver précisément les deux états stationnaires précédents (figures 4.21 et 4.22 pages 177 et 178) ; la transition au passage de ces états s'effectue de manière moins brutale, et sur une durée plus longue.

On peut remarquer que le facteur d'activation musculaire, caractérisé par  $f_0$ , est pratiquement nul sur les parties stationnaires des signaux, ce qui était logiquement prévisible.

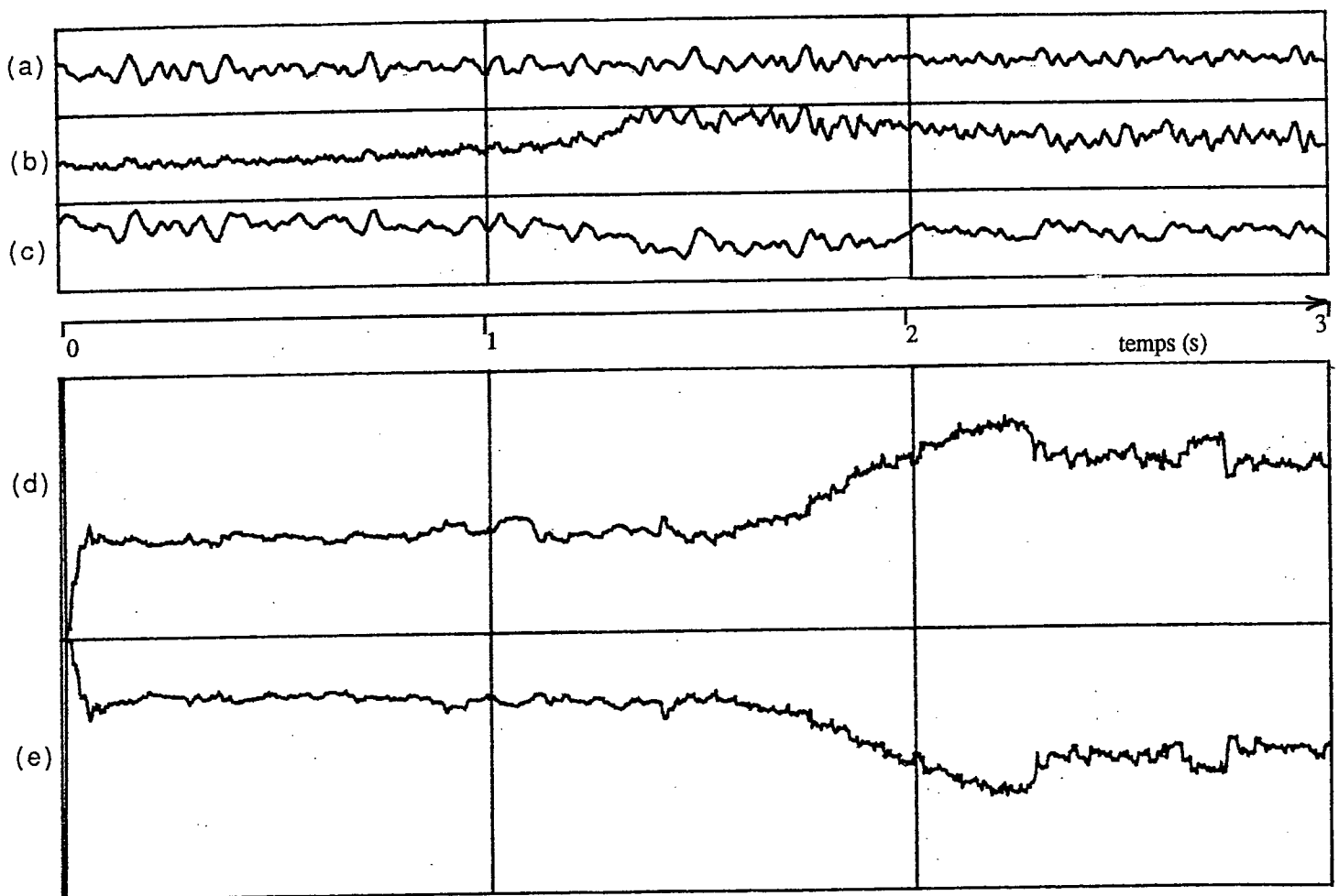


Figure 4.21. Geste statique G2- transition souple/raide

- (a) signal de vitesse
- (b) signal de force
- (c) signal de position
- (d) coefficient estimé  $a_1$
- (e) coefficient estimé  $a_2$

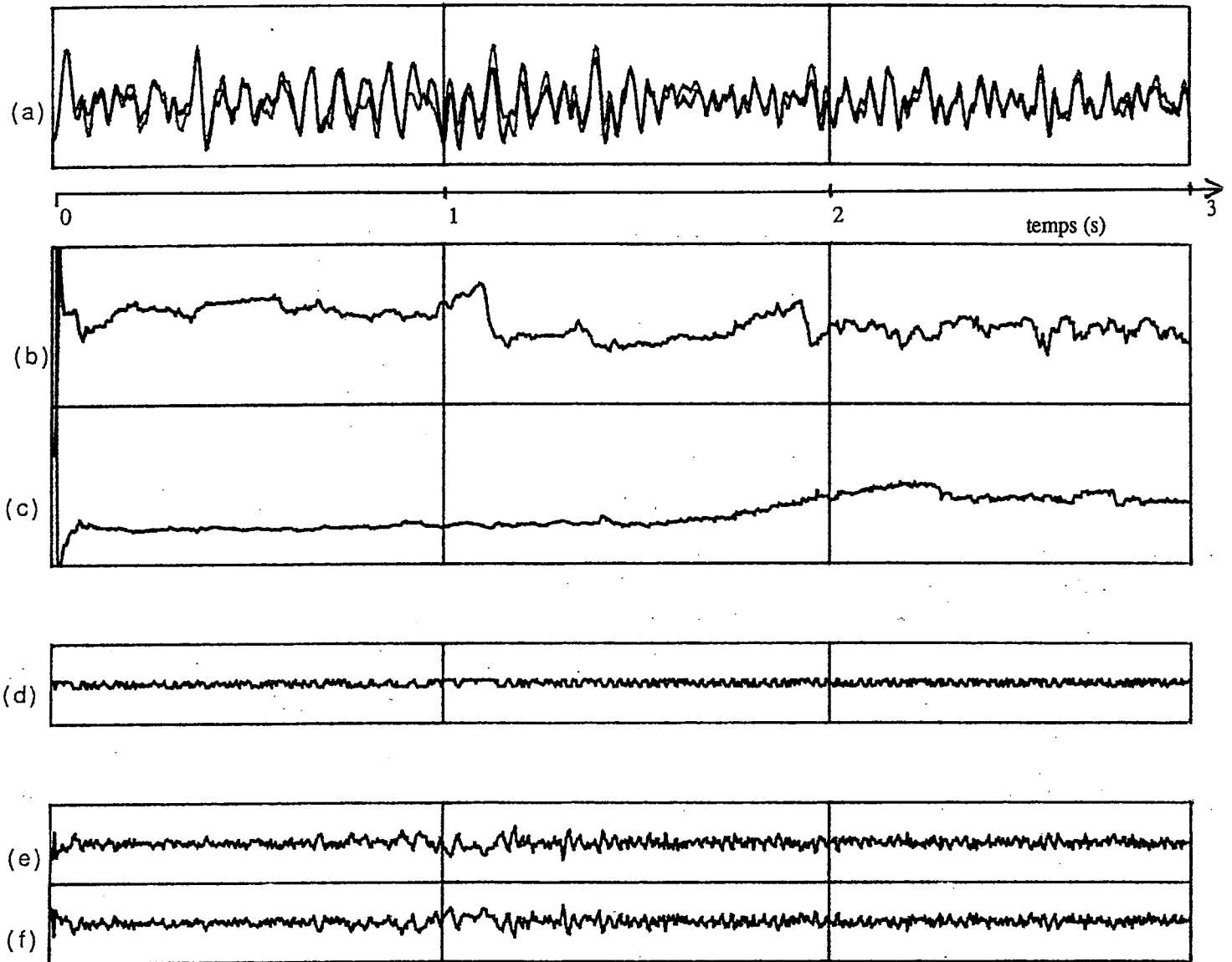


Figure 4.22. Geste statique G2- transition souple/raide

- (a) signal de vitesse réel/simulé
- (b) raideur mécanique équivalente K calculée
- (c) viscosité équivalente Z calculée
- (d) erreur d'équation estimée
- (e) signal d'activation  $f_0$  calculé
- (f) raideur "agoniste"  $k_1$
- (g) raideur "antagoniste"  $k_2$

### I.4.1.3. Gestes actifs et dynamiques

Les phénomènes qui entrent en jeu lors de mouvements actifs sont relativement complexes. La nature des variations du geste n'étant pas connue a priori, il a été nécessaire d'utiliser des méthodes d'identification appropriées pour l'analyse de systèmes non stationnaires, et pouvant s'adapter automatiquement à l'évolution des paramètres du système.

Le problème de l'adaptativité en général n'est pas trivial. Dans le cas qui nous intéresse, on peut tenter de mettre en évidence les difficultés liées à la fois aux hypothèses de modélisation, et aux méthodes d'identification elles-mêmes, et proposer des solutions à ce problème. En admettant que le système étudié puisse être représenté par une famille de modèles décomposables en une partie passive, caractérisée par une fonction de transfert  $B/A$ , et une partie active, caractérisée par un "générateur" de force  $f_0$ , tel que :

$$v = B/A [ f + f_0 ] ,$$

Il s'agit alors d'identifier séparément les contributions respectives de l'une et l'autre de ces parties. Pour chaque expérience proposée, on calcule un estimateur des paramètres de  $A$  et  $B$ , ainsi qu'un estimateur de  $f_0$ .

L'hypothèse supplémentaire que nous faisons à ce niveau consiste à admettre que les variations des paramètres sont soit lentes, relativement à l'évolution du système lui-même, soit rapides mais avec une fréquence d'occurrence faible.

Or, lorsque le système est non-stationnaire, les deux parties, active et passive, sont susceptibles de varier simultanément, et de s'influencer mutuellement. En particulier, on peut dire que l'erreur d'équation que l'on cherche à minimiser comporte deux termes, qui correspondent d'une part à l'erreur interne du système ( $e_n$ ), traduisant des variations de l'estimateur de  $f_0$ , et d'autre part à l'erreur engendrée par des variations paramétriques ( $e_m$ ).

Les algorithmes d'identification classiques, s'appliquant à des systèmes linéaires, se proposent de minimiser un critère, qui s'exprime en fonction du carré de l'erreur d'équation globale, constituée de la somme de  $e_m$  et  $e_n$ . Par conséquent, les variations de  $f_0$  risquent d'être corrélées à celles du résidu de la méthode, et par là même aux variations des paramètres de  $A$  et  $B$ .

Les méthodes développées au chapitre 3.III.4., qui permettent de détecter indépendamment des variations paramétriques et/ou des variations de la variance du bruit du système, semblent proposer une solution à notre problème. Elles ont été implantées séparément, et ont donné des résultats satisfaisants sur des systèmes simulés.



Cependant, l'intégration de ces méthodes dans un même algorithme n'est pas simple. Cela suppose notamment d'introduire dans la procédure de détection d'erreur une fonction qui dépend de la probabilité d'occurrence de transitions brutales, et nécessite des ajustements assez fastidieux. Il convient d'appliquer ce type de méthode lorsqu'une connaissance suffisante du système est acquise.

Par conséquent, nous nous sommes tourné vers une autre solution pour parvenir à dissocier le bruit interne au système du bruit dû aux fluctuations des paramètres ; elle consiste à introduire un filtre de bruit dont on estime les paramètres parallèlement à ceux de la fonction de transfert du modèle. Ce dernier s'exprime par l'équation suivante :

$$Ay = Bu + C\varepsilon$$

Par utilisation de la méthode des Moindres Carrés Etendus, il s'agit alors de chercher à "blanchir" l'erreur  $\varepsilon$ . Les variations de l'activité interne propre au système se caractérisent par des variations des coefficients du polynôme C, ces variations étant relativement indépendantes de celles de A et B. Afin de suivre l'évolution des paramètres du système, nous utilisons le principe fondé sur le calcul du facteur d'oubli ; ce dernier s'exprime par :

$$\lambda(t) = 1 - \frac{\bar{\varepsilon}^2(t)}{\tau \varepsilon^2(t)}$$

avec 
$$\bar{\varepsilon}^2(t) = \gamma \bar{\varepsilon}^2(t-1) + (1 - \gamma) \varepsilon^2(t)$$

$\varepsilon$  caractérisant l'erreur d'équation estimée au temps t.

Nous avons exploité ces méthodes pour analyser des gestes mettant en jeu une activation dynamique des forces musculaires. L'objet simulé est encore un asservissement de position. L'opérateur effectue un geste en modulant volontairement la tension de ses muscles et de ses articulateurs, avec une fréquence variable.

Une amélioration très nette des résultats a été observée lorsque le filtre de bruit est rendu plus complexe par l'adjonction de pôles et de zéros. Cela se traduit par une diminution des critères d'évaluation relatifs, et une meilleure précision sur l'estimateur.

Lorsque la fréquence de modulation du geste est relativement lente, les résultats obtenus sont tout à fait satisfaisants. On remarque une corrélation évidente entre des modulations du geste et celles des paramètres identifiés (figure 4.23 et 4.24 p.181 et 182), la simple observation des signaux du geste ne permettant pas de caractériser cette modification structurelle.

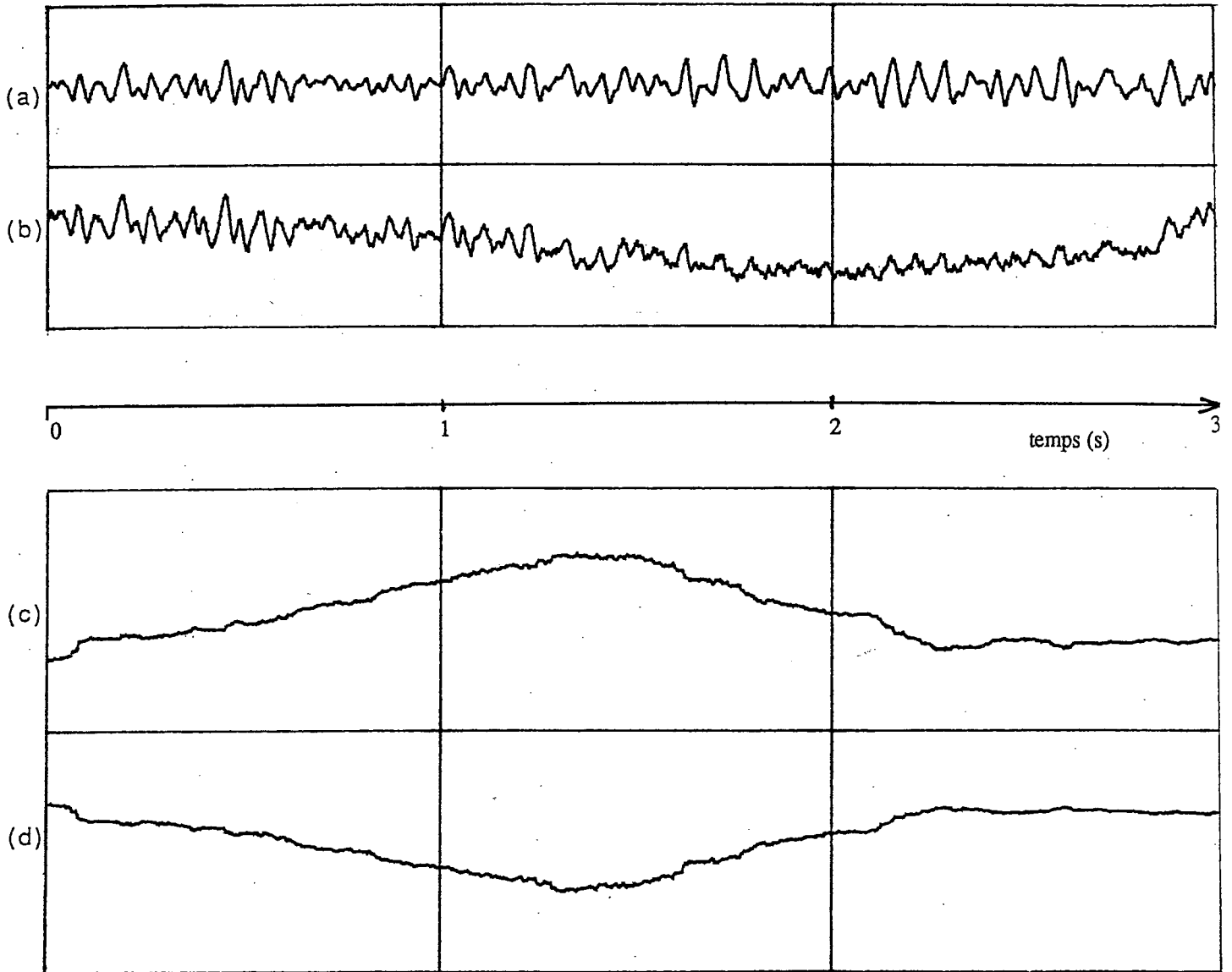


Figure 4.23. Geste actif G3 - Modulation lente

- (a) signal de vitesse
- (b) signal de force
- (c) coefficient estimé a1
- (d) coefficient estimé a2

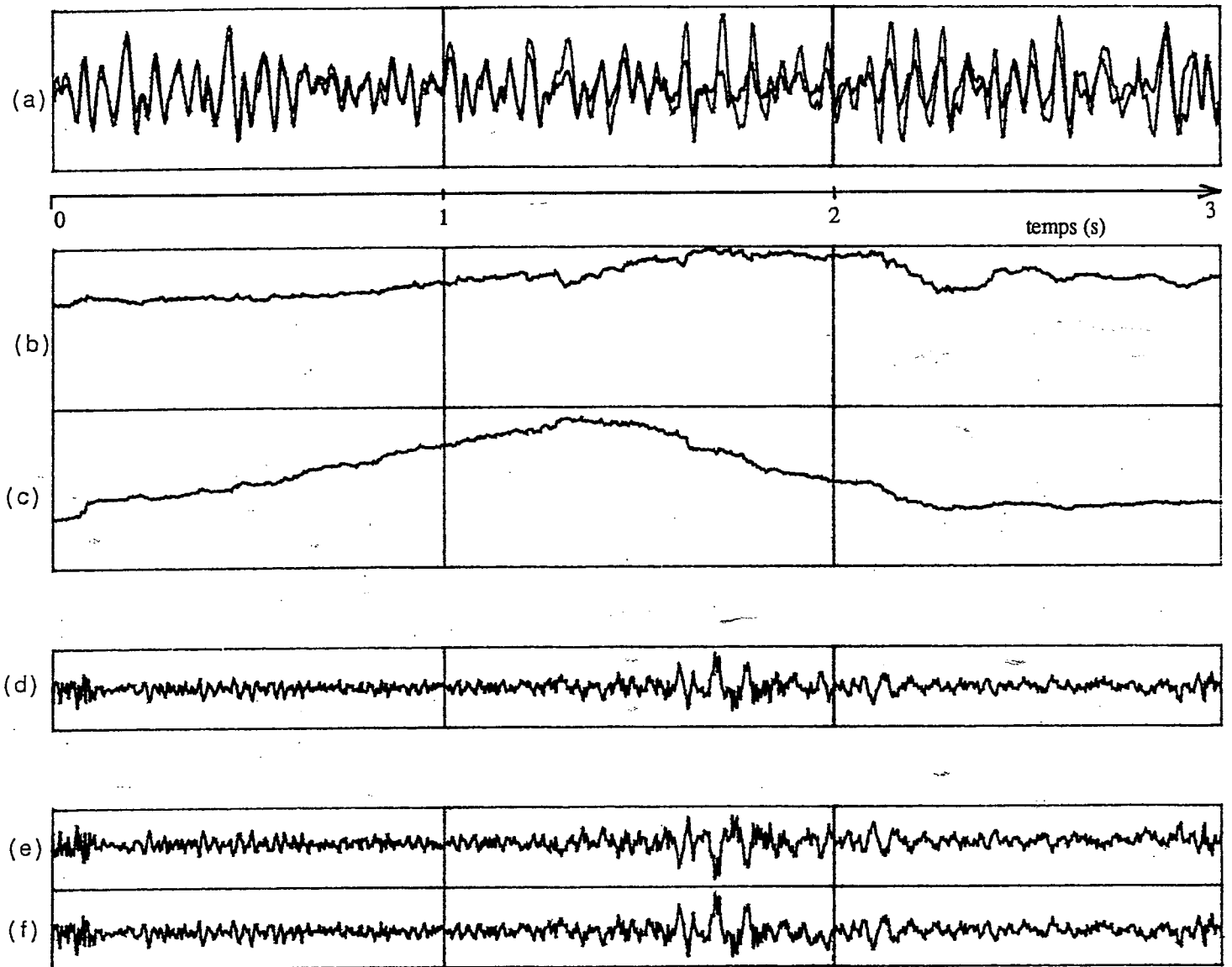


Figure 4.24. Geste actif G3 - Modulation lente

- (a) signal de vitesse réel/simulé
- (b) raideur mécanique équivalente K calculée
- (c) viscosité équivalente Z calculée
- (d) signal d'activation  $f_0$  calculé
- (e) raideur "agoniste"  $k_1$
- (f) raideur "antagoniste"  $k_2$

Il est intéressant d'observer les signaux mécaniques  $K$  et  $Z$  qui se déduisent directement des coefficients mathématiques  $a_1$  et  $a_2$  ; il suffit pour cela d'intégrer l'équation mécanique différentielle du second ordre correspondant au modèle oscillant comportant une inertie, une raideur  $K$  et une viscosité  $Z$ , et de les exprimer en fonction de  $a_1$  et  $a_2$ .

La raideur équivalente  $K=(k_1+k_2)$ , qui correspond à la raideur globale du système (ou raideur de co-contraction) varie peu. Par contre, la viscosité équivalente semble fortement influencée par la modulation du geste. Ceci tend à montrer que des variations structurelles du geste s'accompagnent d'effets plus ou moins complexes qui combinent des variations simultanées de plusieurs paramètres mécaniques.

Si l'on fait l'hypothèse que l'annulation de "l'activité " correspond à l'atteinte d'un état d'équilibre entre les forces agonistes et antagonistes, alors la cible-équilibre est parfaitement déterminée par la valeur du rapport  $k_1/k_2$ . Il existe en fait une infinité de couples qui vérifient l'équation d'équilibre. On peut toutefois déduire de notre analyse que  $k_1$  et  $k_2$  varient simultanément au rythme de  $f_0$  (en opposition de phase), avec une raideur de co-contraction quasi-constante.

Si l'on augmente la fréquence de modulation du geste, on voit apparaître un accroissement de l'imprécision sur les paramètres estimés (figure 4.25 et 4.26 p. 184 et 155) ; cela est dû à une augmentation de la sensibilité de la méthode, qui doit suivre des variations paramétriques très rapides. Les résultats obtenus restent cependant acceptables. Il faut noter l'apparition dans l'évolution du signal actif  $f_0$  d'une périodicité, qui correspond en fait à celle du geste cyclique effectué.

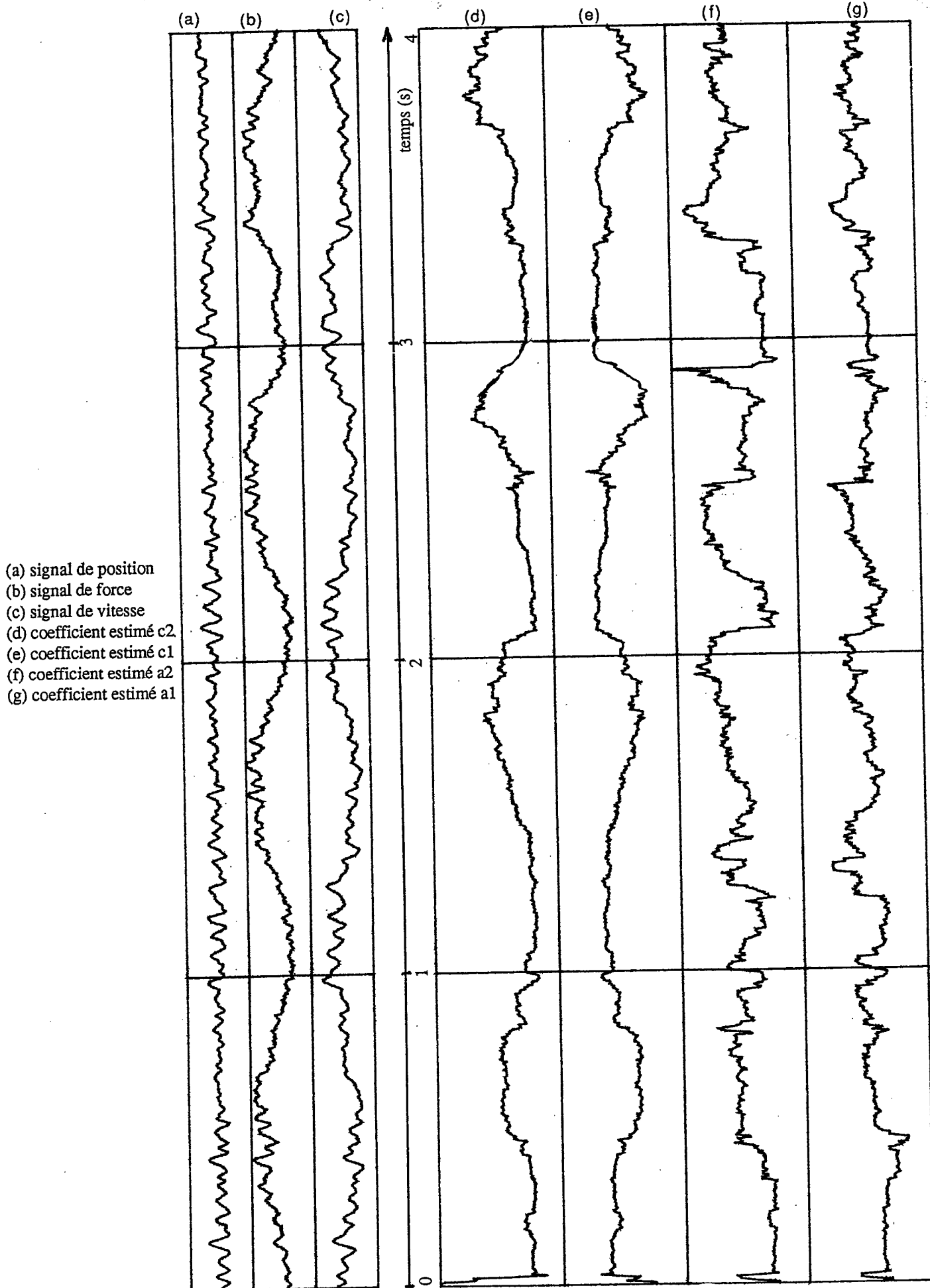


Figure 4.25. Geste actif G4 - Modulation rapide

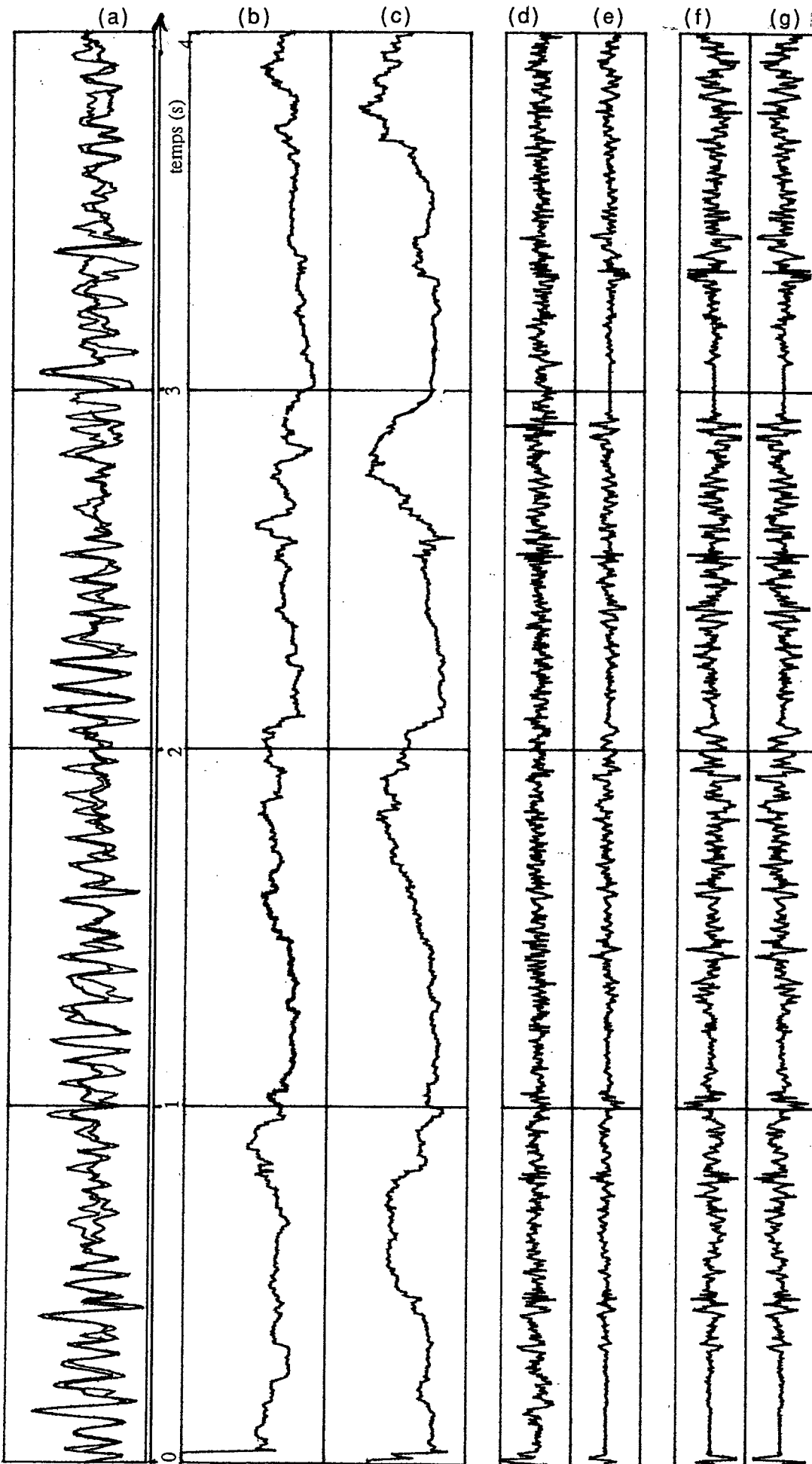


Figure 4.26. Geste actif G4 - Modulation rapide

### I.4.2. Analyse de gestes de manipulation sans signal de test

On utilise un modèle d'instrument simulé constitué d'une succession d'obstacles, dont la rigidité est programmable. Ce modèle, mis en oeuvre par J.L Florens, s'apparente à une "scie crantée".

L'expérimentateur agit sur les crans par l'intermédiaire d'un excitateur simulé, qui franchit les butées en fonction de la position captée. Cet excitateur est manipulé par la touche à retour d'effort, qui restitue à l'opérateur la réaction de l'objet à son action gestuelle (figure 4.27).

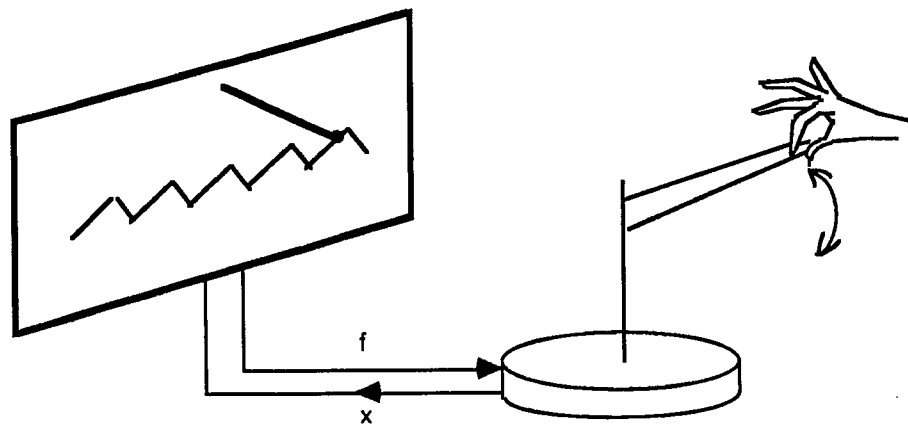


Figure 4.27 : Manipulation d'une "scie crantée"

Les butées se traduisent par des relations entre la force  $f$  et le potentiel  $V$  qui sont représentées à la figure 4.28 :

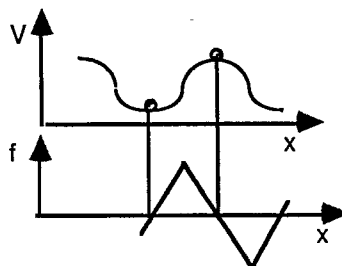


Figure 4.28 : Lois d'évolution du potentiel et de la force en fonction de la position

Les non-linéarités introduites par ce type d'objet sont susceptibles de remplacer l'effet d'un bruit blanc rajouté à l'entrée du système.

Les résultats de l'expérience semblent plutôt concluants. En effet, pour un geste oscillant relativement rapide, il a été possible de déterminer une fonction de transfert évolutive traduisant la structure mécanique de la main de l'opérateur (figure 4.29 p. 188).

Aucune variation paramétrique n'est observée à la traversée d'un cran ; cela peut s'expliquer par le fait que la configuration musculaire et articulaire du bras de l'opérateur est identique immédiatement avant et après la butée, la main recevant une impulsion au passage de la non-linéarité. Ainsi, si la vitesse qu'il imprime à son geste est suffisamment élevée, l'opérateur n'a pas le temps de contrôler ce qui se passe lors du franchissement des obstacles.

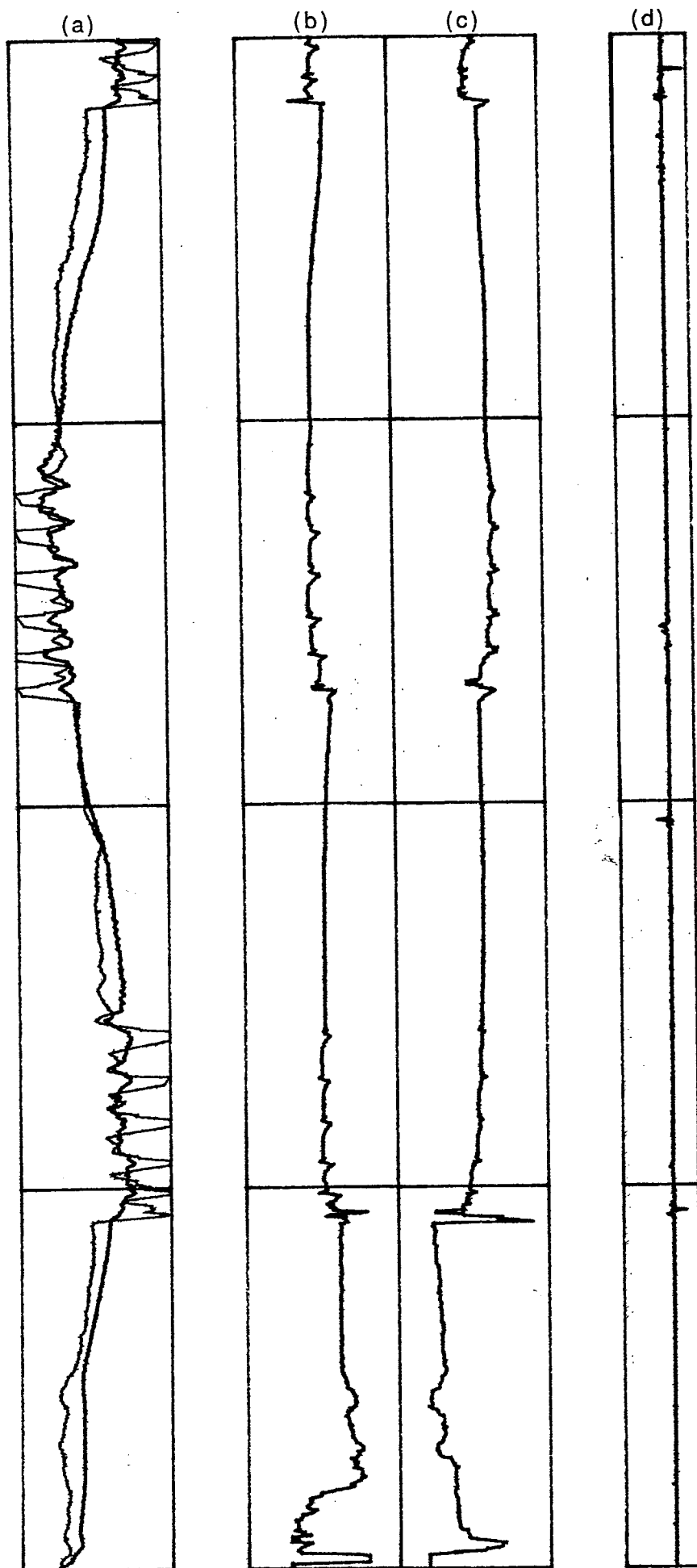
Des variations structurelles apparaissent sur des durées temporelles plus longues. Elles peuvent correspondre à une modulation du geste qui accompagne le mouvement oscillatoire.

Il est remarquable cependant de constater que la structure du geste reste quasiment constante sur toute la durée de l'analyse.

#### **I.4.3. Corrélation entre la structure du geste et ses effets sonores...**

Une expérience de simulation est en cours qui consiste à coupler chaque butée du modèle précédent à un mécanisme allant percuter une structure vibrante. Il s'agit en l'occurrence d'un mécanisme d'échappement approchant celui du piano. On espère alors que des modifications structurelles du geste entraîneront des modifications pertinentes du son produit ...





(a) signal de vitesse réel/simulé  
(b) raideur équivalente calculée  
(c) viscosité équivalente calculée  
(d) activation  $f_0$

Figure 4.29. Geste actif G5 - Objet non-linéaire

## II. Résultats de l'identification

L'application des techniques d'identification au geste dans le contexte de la simulation mécanique d'objets instrumentaux soulève une difficulté essentielle due au fait que l'opérateur s'intègre à un système en boucle fermée ; il est donc impossible d'appréhender le geste indépendamment de l'objet auquel il s'applique. Cette situation d'interaction des deux systèmes mécaniques constitués par l'opérateur et l'instrument fait surgir un paradoxe dans le processus d'identification : il s'agit pour une expérience donnée de déterminer un modèle mécanique indépendant de l'objet instrumental manipulé, et approchant le comportement gestuel humain ; en même temps, l'estimation des paramètres du geste est satisfaisante, si l'objet simulé répond de manière sensible et cohérente aux sollicitations du geste, ce qui rend l'identification dépendante de cet objet.

Le choix d'objets instrumentaux appropriés soulève en fait deux problèmes qui sont étroitement imbriqués :

- \* Le premier concerne l'identifiabilité du système, qui caractérise la nécessité "d'exciter" suffisamment le système gestuel dans tous ses modes de vibration, de façon à pouvoir en extraire une information riche et pertinente ; lorsque l'excitation est trop pauvre, ou inexistante, il s'avère en effet impossible de séparer la contribution du modèle identifié de celle du modèle d'objet simulé.
- \* Le second caractérise la sensibilité de l'instrument à des modifications structurelles fines du geste effecteur.

Il est évident qu'un mauvais modèle instrumental conduit à une excitation insuffisante du système gestuel, ce qui se traduit par la non identifiabilité de ce système, et par un contrôle gestuel peu précis de l'instrument.

L'appréhension de la nature structurelle du geste, et de sa relation aux effets produits au niveau du comportement de l'objet physique manipulé n'est pas triviale. Nous sommes confrontés à ce niveau au problème du luthier, qui construit des instruments de façon à permettre un champ d'investigation de l'espace sonore suffisamment riche, et contrôlable précisément à partir du geste. Le luthier acquiert au fil du temps une connaissance de plus en plus fine du matériau susceptible de produire des sons, et de la pertinence des gestes permettant d'imprimer une certaine dynamique au son.

Ainsi, s'instaure un cheminement en constant aller-retour entre le façonnage de l'instrument et l'expérimentation, permettant d'évaluer à la fois les qualités ergonomiques et musicales de l'instrument, et aboutissant à la convergence vers un système mécanique cohérent, riche au niveau des possibilités de jeu et des effets qu'il permet.

Il se dégage des procédés d'identification un intérêt essentiel qui va dans le sens d'une amélioration de la communication homme-machine, et qui peut aider à la conception de nouveaux dispositifs transducteurs et à l'élaboration d'objets instrumentaux simulés répondant plus sensiblement aux actions gestuelles.

A l'origine de ce travail sur l'identification, nous nous sommes appuyés sur une connaissance empirique des fonctions mécaniques du geste, et plus particulièrement des fonctions d'adaptation entre l'opérateur et l'instrument.

Afin de mieux cerner les différentes composantes qui participent à une certaine forme d'expressivité du geste, la délimitation du champ expérimental, ainsi que la mise en place de conditions favorables à l'analyse du geste se sont avérées nécessaires. En particulier, une analyse fine de la corrélation entre les gestes et les effets qui en résultent suppose l'élaboration de modèles de simulation réalistes et précis.

On peut dès à présent tenter de se resituer par rapport aux objectifs exprimés lors de l'esquisse d'une démarche expérimentale (chap. 2, § I.4).

Notre point de départ a consisté à analyser des gestes de manipulation s'exerçant sur des objets mécaniques très simples : frottements, raideurs, viscosités, ...

La simplicité des objets simulés, conduisant à une mise en oeuvre relativement facile, a cependant soulevé le problème de l'identifiabilité du système. Une solution a alors consisté à introduire un signal de test au niveau de la sortie de l'algorithme simulé, afin de décorréler le modèle identifié du modèle instrumental simulé.

L'élaboration de modèles d'instruments plus complexes a ensuite permis de diminuer les contraintes d'identifiabilité, et de s'affranchir du signal de test, tout en se rapprochant vers des situations instrumentales réelles :

- Soit en simulant des modèles d'objets linéaires, l'ordre des filtres les constituant étant largement supérieurs à l'ordre du système à identifier.

- Soit en simulant des objets ayant un comportement non-linéaire, les non-linéarités remplaçant en quelque sorte le signal de test. Les butées, les seuils, les échappements, sont des exemples de non-linéarités qui sont fréquemment rencontrés dans les fonctions instrumentales.

Certaines de ces non-linéarités permettent le transfert d'énergie de phénomènes basse-fréquence (commande gestuelle) vers des phénomènes "haute-fréquence" (son).

Nous en sommes restés pour l'instant à l'étape d'analyse du geste dans des situations instrumentales particulières.

Nous avons constaté cependant que la généralisation de la situation instrumentale ne devait pas soulever de difficulté majeure en ce qui concerne l'applicabilité des méthodes d'identification.

Parmi les différentes catégories de gestes que nous avons distingué, nous n'avons abordé que les gestes de manipulation, qui impliquent un contact permanent entre l'opérateur et l'objet manipulé.

L'appréhension de gestes percussionnels semble poser des difficultés d'ordre technique. En effet, lors d'un geste de frappe sur un obstacle rigide, on n'accède aux signaux du geste que lorsque le contact avec l'objet est établi. Pour remonter à la structure mécanique de la main de l'opérateur, il faudrait disposer de la valeur de ces signaux juste avant le contact. Une façon de remédier à ce problème consisterait à placer au niveau du transducteur gestuel un capteur de proximité.

Dans toutes les expériences mises en oeuvre jusqu'à présent, le système gestuel humain, en tant qu'élément d'un système asservi, est identifiable ; autrement dit, compte tenu des contraintes engendrées par le contexte de la simulation mécanique, il a toujours été possible de décrire le geste au moyen d'un modèle mécanique simple, lentement déformable, constitué d'une paire de pôles et de zéros. L'évaluation des modèles identifiés a été effectuée au moyen de critères post-optimisation calculés "en-ligne" dans l'algorithme, et par des procédés d'analyse-synthèse.

Les valeurs de critères calculées indiquent dans tous les cas de figure rencontrés, une "bonne" convergence de la méthode statistique, qui traduit à la fois la rapidité de convergence et la qualité de précision obtenue.

La restitution des signaux gestuels captés à partir des modèles identifiés est tout à fait satisfaisante ; l'erreur relative entre les signaux réels et les signaux resynthétisés reste très faible, ce qui permet de dire que la réduction d'information caractérisant ce procédé n'est pas déterminante.

De plus, la re-synthèse du geste après enregistrement est très facile à mettre en oeuvre ; cela consiste à simuler un objet (geste), i.e. un modèle mécanique simple évoluant assez lentement dans le temps, du même type qu'un objet instrumental.

Remarque : identification et temps réel

Il est à noter au passage que l'identification conduit à une économie de stockage de l'information gestuelle appréciable, puisque l'on peut échantillonner les paramètres identifiés à une fréquence bien inférieure à celle des signaux captés. Cette remarque peut nous inciter à envisager l'identification comme technique de codage du geste instrumental en temps réel. En effet, l'utilisation de méthodes rapides (Givens,...) permet une réduction considérable du coût de calcul propre aux procédés utilisés.

L'environnement multiprocesseur du "frontal gestuel" offre la possibilité d'ajouter un processeur rapide avec co-processeur flottant, capable de supporter l'exécution en temps réel de tels processus, parallèlement aux autres processus impliqués dans la "boucle de simulation" en temps réel.

Plusieurs intérêts se dégagent de cette perspective "temps réel" :

Le premier est directement lié à l'économie de stockage de l'information gestuelle captée.

Le second concerne la facilité de passage du mode instrumental au mode compositionnel. Il peut être intéressant en effet de passer continûment de modifications d'objets gestes et/ou d'objets instruments, avec un langage unifié pour décrire ces transformations, et sans altérer la cohérence de l'ensemble.

Un troisième intérêt, concerne l'utilisation de l'identification pour la simulation. On peut envisager en effet faire intervenir de manière artificielle les paramètres du geste extraits de l'identification pour contrôler les processus de synthèse sonore. Ce principe d'adaptativité devrait permettre de compenser certaines limites liées à la simulation, et de mieux exploiter la "sensibilité" gestuelle pour le contrôle de l'objet manipulé.

## Conclusion et perspectives

Par rapport aux objectifs de mémorisation, de représentation et de traitement évoqués tout au long de cet exposé, il semble nécessaire de rappeler le point où nous sommes arrivés aujourd'hui, et de préciser comment les différents traitements du geste s'articulent dans le contexte de l'outil informatique pour la création musicale.

L'étude du geste instrumental a fait l'objet de deux approches complémentaires.

Tout d'abord un travail de réalisation a consisté à mettre en place un système s'intégrant au noyau temps réel de l'outil de création. Ce système prend en charge le contrôle d'organes extérieurs couplés à l'opérateur humain, et assure la communication avec des processus simulant le comportement mécanique de l'instrument. Parallèlement, il réalise les fonctions de codage et de mémorisation en temps réel des données gestuelles captées, et ceci pour un univers instrumental modulaire et de complexité variable.

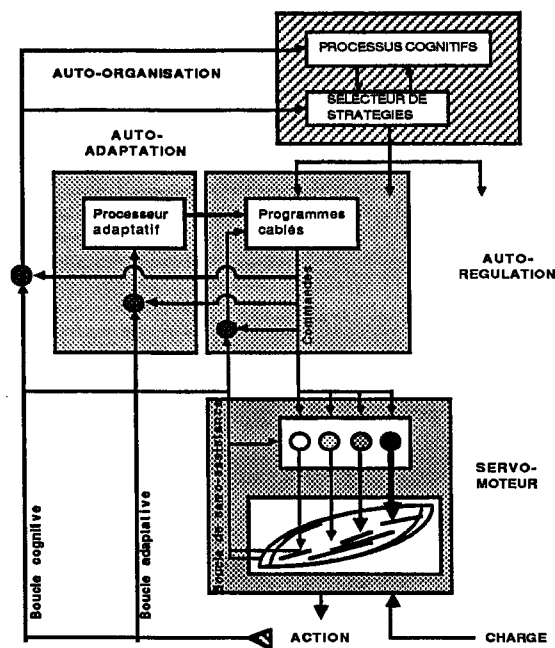
Cette phase du travail est plus particulièrement concernée par des préoccupations de temps réel, ce qui limite les possibilités de prétraitement de l'information gestuelle captée. Elle reste cependant essentielle pour pouvoir garder une trace objective des objets produits lors d'expériences instrumentales, afin de permettre des manipulations en temps différé de ces objets.

La recherche d'un espace de représentation du geste significatif pour le compositeur nous a ensuite amené à analyser plus finement la nature structurelle du geste. Ce travail a donné lieu à des investigations théoriques et expérimentales. L'analyse a porté essentiellement sur une classe de gestes, pour lesquels la simultanéité de l'action produite et de la perception de ses effets revêt une importance particulière. Cette étude a permis de montrer qu'il est possible d'identifier le comportement de l'opérateur à un système mécanique simple évoluant lentement dans le temps. Cela donne une possibilité d'interpréter les phénomènes gestuels, en s'intéressant non plus seulement aux effets produits, mais aux structures mécaniques qui leur ont donné naissance.

L'évaluation des résultats de l'identification est loin d'être achevée. Par la nouveauté et la complexité des problèmes posés, l'application de cet outil d'analyse statistique au geste constitue un axe de recherche en soi.

Une évaluation rigoureuse nécessiterait la mise en place de systèmes de mesure très perfectionnés, capables de rendre compte des caractéristiques dynamiques du geste humain. On peut cependant proposer deux directions d'évaluation des modèles de représentation du geste.

Tout d'abord en essayant de situer les modèles d'analyse obtenus par rapport à certaines hypothèses issues de théories de la motricité. Sans entrer dans le débat des psychomotriciens qui s'interrogent sur l'existence et la nature de plans et de programmes moteurs, on peut tenter d'établir un parallèle avec le modèle d'organisation systémique proposé par Paillard, [Paillard 80] qui décrit les différents niveaux de contrôle de la performance motrice :



- "1- le servo-moteur musculaire avec ses boucles de régulation réflexe,*
- 2- le programme câblé avec ses circuits d'auto-régulation par servo-assistance,*
- 3- le processus adaptatif assurant la recalibration du programme câblé,*
- 4- la sélection de stratégies sous la dépendance des processus cognitifs. "*

[Beaubaton 83]

Le modèle mécanique à court-terme identifié peut correspondre au niveau le plus bas de la hiérarchie, c'est-à-dire le niveau "servo-moteur" dans lequel existe une coopération entre l'action, la perception, et les exigences imposées par l'environnement. ( charge instrumentale)

Cette compréhension des faits permet de préciser le statut du temps sous-jacent à la notion d'évolution lente des paramètres mécaniques. En effet, la nature évolutive du modèle est étroitement liée aux constantes de temps propres aux éléments mécaniques (muscles, articulations,...) mis à contribution dans l'action gestuelle. Ainsi, l'identification met en évidence des formes structurelles où le temps apparaît de manière implicite. Cela va dans le sens d'hypothèses motrices qui supposent que le contrôle du geste par l'opérateur ne nécessite pas forcément une traduction des commandes motrices aux différents effecteurs sous la forme d'ordres temporels explicites, et que le déroulement du mouvement peut tirer partie des propriétés visco-élastiques des muscles [Kelso 80].

Dans un système de contrôle hiérarchisé, le séquençage des structures mécaniques identifiées peut alors provenir d'ordres émis par des niveaux supérieurs, à une cadence plus lente correspondant à la durée d'adaptation de boucles de régulation du mouvement.

Cependant, puisque nos objectifs ne visent pas directement à extraire une connaissance fondamentale des processus humains, on peut envisager évaluer différemment les modèles d'identification obtenus. La construction d'un outil général de création, permettant à l'utilisateur de manipuler les produits issus d'expériences instrumentales particulières (gestes, sons, images,...), doit servir de support à l'expérimentation et à la composition ; l'apprentissage de cet outil sera donc susceptible d'apporter des éléments de réponse au problème de validation des modèles de gestes identifiés.

### **Activité compositionnelle**

Par rapport à l'activité compositionnelle à partir des gestes, l'objectif essentiel de l'outil de création est de permettre l'exploration de l'espace sonore corrélativement à l'espace gestuel, par des transformations appliquées sur des objets gestes enregistrés.

Dans cette optique, l'identification offre des perspectives originales. Cette approche conduit en effet à une nouvelle voie d'investigation du geste, intéressante tant d'un point de vue de la réduction de l'information gestuelle que d'un point de vue de la représentation et des traitements qu'elle suggère.

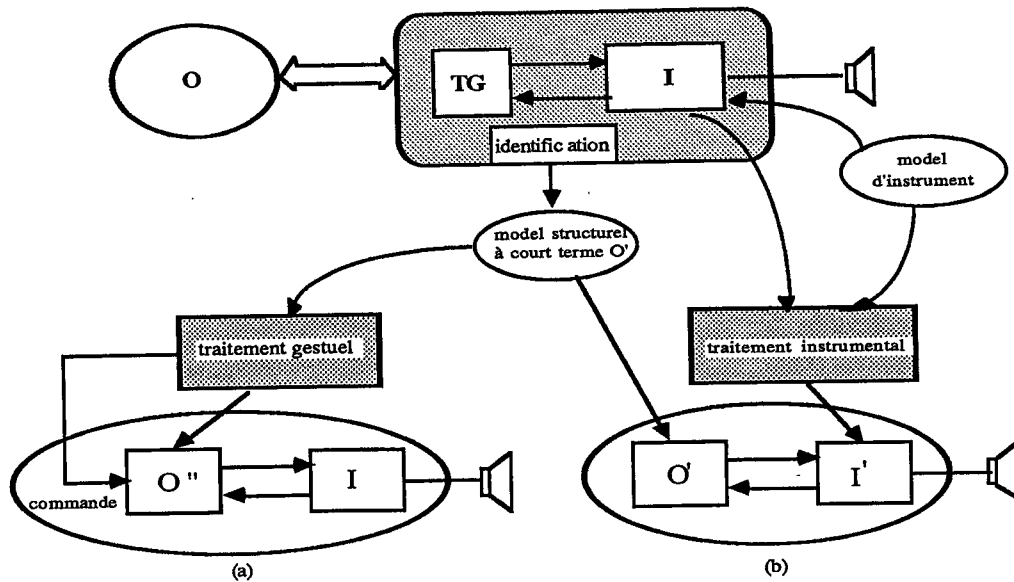
Jusqu'à présent, en cherchant à restituer l'expérience instrumentale, et en utilisant l'ordinateur comme moyen de "représentation de l'univers instrumental", nous avons introduit des contraintes qui sont celles du monde "naturel".



On peut concevoir aujourd'hui pousser plus loin la référence à la causalité comme logique de production de structures sonores musicales, en considérant les gestes, non plus seulement comme des traces d'une activité sensori-motrice, mais comme des éléments constitutifs du système producteur. De même que nous avons préféré à la transformation directe des sons la manipulation des causes génératrices de ces sons, nous disposons d'un outil puissant permettant d'envisager des manipulations du geste au niveau même des causes qui les génèrent.

L'analogie de représentation des gestes et des instruments conduit à l'élaboration d'un outil de composition qui exploite à la fois les aspects structurels des gestes et des instruments. On peut envisager deux types de traitements :

- \* des traitements sur les gestes (a),
- \* et des traitements sur les instruments (b).



Ces traitements impliquent une distanciation par rapport à la situation de jeu instrumental direct. Le compositeur, disposant de moyens informatiques pour accéder aux différents éléments de production des sons peut :

1. manipuler des gestes de la même manière qu'il manipule des instruments, soit en agissant sur les constituants eux-mêmes (structures), soit en modifiant les paramètres de ces structures. Ainsi, des modifications sur la micro-structure des mécanismes producteurs (gestes ou instruments), pourront influencer sur la nature micro-structurale du son produit, et permettre de travailler au niveau même du timbre.

2. agir directement sur la commande en construisant, en agencant et combinant des séquences de contrôle des structures gestuelles.

Dans le prolongement de la construction d'objets instrumentaux, l'outil de composition doit permettre également de construire des gestes de toutes pièces. A cet effet, il est intéressant d'utiliser la similitude de représentation des objets gestes et des objets instruments. Dans le contexte de la simulation mécanique, la synthèse des gestes peut alors être englobée dans le système de synthèse des objets instrumentaux.

Cependant, si l'on maîtrise précisément les lois physiques qui régissent le comportement des instruments mécaniques, il n'en est pas de même pour les gestes, dont on ignore les principales caractéristiques. Il semble par conséquent important de commencer par manipuler des gestes réels, issus d'expériences instrumentales, avant même de penser à fabriquer des séquences de gestes "artificiels".

Ainsi, l'analyse du geste par identification apparaît comme une étape préliminaire, nécessaire pour l'appréhension du geste. Cette phase du travail est sans doute la plus fastidieuse, mais elle donne la possibilité de délimiter l'espace gestuel, et de conserver une certaine cohérence du comportement global du dipôle homme/instrument. Partant de la connaissance et du partitionnement de l'espace des paramètres physiques du geste, il devient possible d'élaborer un outil de synthèse des gestes instrumentaux à partir de la génération et de l'assemblage de structures mécaniques élémentaires, et en définissant des règles de transformation. Dans un premier temps, ces structures et ces règles pourront s'inspirer des lois physiques "naturelles". Dans un second temps, il sera envisageable d'en déduire d'autres structures et d'autres règles par extrapolation des précédentes.

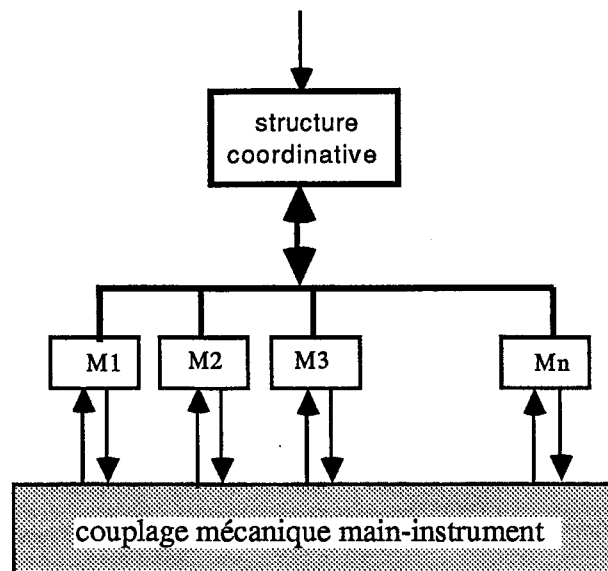
### **Modélisation de l'activité gestuelle**

Pour l'instant, nous n'avons pas dépassé certains aspects structurels du geste, ayant une détermination temporelle microscopique. Par l'analyse de l'évolution structurelle des paramètres mécaniques du modèle identifié, nous espérons en fait traduire certaines nuances expressives propres au "toucher" de l'instrumentiste.

Or, l'expressivité, de même que la fluidité, la vitesse d'exécution, la précision, qui caractérisent les gestes "appris", peuvent dépendre de phénomènes plus globaux, mettant en jeu des boucles d'adaptation lente des paramètres, influant ainsi sur des aspects qualitatifs et quantitatifs de la performance motrice.

On peut alors s'interroger sur la nature des mécanismes qui autorisent l'enchaînement et la coordination des différents mouvements se produisant sur des articulateurs distincts. Dans le cas de gestes s'exerçant sur un clavier (de piano, par exemple), les mouvements des doigts d'une même main sont corrélés entre-eux ; il est probable alors que la configuration structurelle de chacun des articulateurs est fortement influencée par la dynamique globale de la main, et par l'entraînement du bras. Il en est de même pour les deux mains qui sont généralement contrôlées de manière simultanée et globale. Ainsi, chaque évènement, analysé de manière isolée, est susceptible de dépendre d'autres évènements intervenant dans un voisinage temporel immédiat.

Disposant d'un ensemble de signaux mécaniques issus de l'analyse par identification, on peut imaginer réitérer la démarche "structurelle" (ou démarche systémique), et tenter de remonter aux structures mécaniques "coordinatives" pouvant expliquer cette dépendance à plus long terme des différents articulateurs entre-eux.



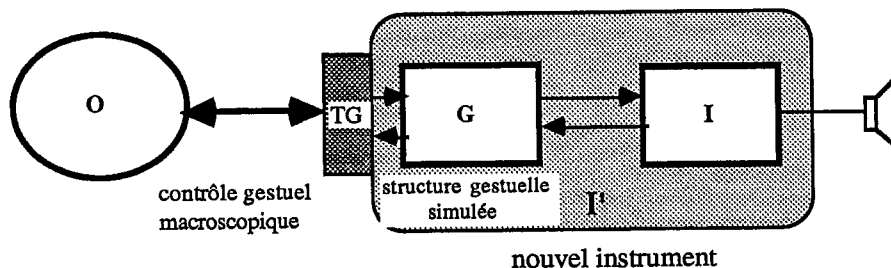
Pour appréhender ce type de situation, une analyse par identification multidimensionnelle est envisageable, qui peut conduire à la détermination d'informations sur la nature de ces dépendances structurelles.

Dans cette optique, l'élaboration d'un clavier rétroactif, actuellement en cours de réalisation, pourra donner le jour à des expériences d'identification tout à fait intéressantes.

L'analyse par synthèse de gestes instrumentaux vient élargir le champ d'investigation du compositeur. L'élaboration de gestes de structures plus complexes, construits à partir de modules mécaniques élémentaires permet alors le contrôle d'objets geste de plus haut niveau, avec des constantes de temps plus importantes.

Ainsi, le compositeur est susceptible de se placer au niveau du séquençage logique d'éléments structurels agencés hiérarchiquement, l'évolution temporelle rapide des signaux produits apparaissant comme des conséquences directes de cet enchaînement logique.

A partir de là, l'intégration de modèles de gestes à des modèles d'instruments simulés présente un intérêt immédiat pour le compositeur-instrumentiste qui peut ainsi restituer le caractère essentiel de l'action gestuelle avec un mode de contrôle plus économique.



Dans cet ordre d'idée, le contrôle instrumental est à rapprocher de celui du chef d'orchestre qui coordine et synchronise un instrument complexe constitué d'un ensemble "d'instrumentistes", chacun contrôlant un dispositif qui lui est propre. Cela nous conduit à imaginer des instruments inédits dans lesquels gestes et objets manipulés sont intimement mêlés.



# Bibliographie

## B.1. Identification, traitement du signal, modélisation

- [Bekey 85] G.A. Bekey : "*Identification of neuromuscular systems*", IFAC on Identification and System Parameter Estimation, York, 1985
- [Burnham 74] G.O. Burnham, J.Seo, G.A. Bekey, "*Identification of human driver models in car following*", IEEE Transactions on Automatic Control, dec.1974
- [Finigan 74] B.M. Finigan, I.H. Rowe, "*Strongly Consistent Parameter Estimation by the Introduction of Strong Instrumental Variables*", IEEE Transactions on Automatic Control, dec. 1974
- [Foulard 77] C. Foulard, S. Gentil, J.P. Sandaz, "*Commande et régulation par calculateur numérique*", Ed. Eyrolles, 1977
- [Gustavsson 77] I. Gustavsson, L. Ljung, T. Söderström, "*Identification of Processes in Closed-Loop - Identifiability and Accuracy Aspects*", Automatica, vol.13, 1977
- [Hägglund 84] T. Hägglund, "*Adaptative control of systems subject to large parameter changes*", IFAC : 9th.Triennial World Congress, Budapest, 1984
- [Hägglund 85] T. Hägglund, "*Recursive estimation of slowly time-varying parameters*", IFAC on Identification and System Parameter Estimation, York, 1985
- [Janiszowski 85] K.B. Janiszowski, "*On-line identification algorithm with evaluation of model quality*", IFAC on Identification and System Parameter Estimation, York, 1985
- [Kleinman 74] D.L.Kleinman, T.R. Perkins, "*Modeling Human Performance in a Time-Varying Anti-Aircraft Tracking Loop*", IEEE. Transactions on Automatic Control, aug.1974
- [Kurz 78] H. Kurz, "*Recursive process identification in closed loop with switching regulators*", North-Holland Publishing Company, 1978
- [Laporte 84] P. Laporte, "*Conception assistée par ordinateur en automatique*", Thèse de docteur de l'INPG, 1984
- [Laporte 85] P. Laporte, A. Barraud, S. Gentil, "*An interactive computer aided identification package*", IFAC on Identification and System Parameter Estimation, York, 1985

- [Ljung 74] L. Ljung, I. Gustavsson, T. Söderström, "*Identification of Linear Multivariable Systems Operating under Linear Feedback Control*", IEEE. Transactions on Automatic Control, dec.1974
- [Ljung 83] L. Ljung, T. Söderström, "*Theory and practice of Recursive Identification*", MIT Press, 1983
- [Lüders 74] G. Lüders, K.S. Narendra, "*Stable Adaptive Schemes for State Estimation and Identification of Linear Systems*", IEEE Transactions on Automatic Control, dec.1974
- [Luh 83] J.Y.S. Luh, "*An anatomy of industrial robots and their controls*", IEEE Transactions on Automatic Control, vol AC, n°2, 1983
- [Ng 77] T.S. Ng, G.C. Goodwin, B.D.O. Anderson, "*Identifiability of MIMO Linear Dynamic Systems Operating in Closed Loop*", Automatica, vol.13, 1977
- [Picinbono 81] A. Blanc-Lapierre, B. Picinbono, "*Fonctions aléatoires*", Masson, 1981
- [Rees 85] N.W. Rees, P.T. Bason, B.S. Samarasini, "*Muscle modeling and force estimation*", IFAC on Identification and System Parameter Estimation, York, 1985
- [Smith 83] J.O. Smith, "*Techniques for digital filter design and system identification with application to the violin*", Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, 1983, CCRMA, Stanford University
- [Subba Rao 74] T. Subba Rao, H. Tong, "*Linear Time-Dependent Systems*", IEEE. Transactions on Automatic Control, dec.1974
- [Söderström 75] T. Söderström, I. Gustavsson, L. Ljung, "*Identifiability conditions for linear systems operating in closed loop*", INT. J. CONTROL, vol.21, 1975
- [Söderström 83] T. Söderström, P.G. Stoica, "*Instrumental Variable Methods for System Identification*", Springer-Verlag, 1983
- [Thom 72] R. Thom, "*Stabilité structurelle et morphogénèse*", Benjamin, New York et Ediscience, Paris, 1972
- [Thom 75] R. Thom, "*Réflexions sur de nouvelles approches dans l'étude des systèmes*", Publ. par E.N.S.T.A., 1975
- [Walter 82] E. Walter, "*Identifiability of State Space Models*", Springer-Verlag, 1982
- [Wellstead 75] P.E. Wellstead, J.M. Edmunds, "*Least-squares identification of closed-loop systems*", INT. J. CONTROL, vol.21, 1975
- [Wong 67] K.L. Wong, E. Polak, "*Identification of linear discrete time systems using the instrumental variable method*", vol AC-12, n°6, dec. 1967

## B.2. Psychologie, physiologie

- [Abry 87] P. Perrier, C. Abry, E. Keller, "*Vers une modélisation des mouvements du dos de la langue*", 16 ièmes Journées d'Etude sur la Parole, Hammamet, 1987
- [Beaubaton 83] D. Beaubaton, "*Contrôle proactif et rétroactif de la motricité. Rôle des ganglions de la base et du cervelet dans la programmation et l'exécution du mouvement*", Thèse de Doctorat Es-Sciences, Université d'Aix-Marseille II, 1983
- [Beaubaton 84] D. Beaubaton, "*La contribution des structures nerveuses centrales à la spécification des paramètres spatiaux du mouvement*", *Comportements*, n°1, 1984
- [Beaubaton 85a] D. Beaubaton, "*Plans et programmes moteurs : quelques principes communs dans le contrôle des systèmes artificiels et biologiques*", *Automatique, Intelligence Artificielle et Psychologie*, 1985
- [Beaubaton 85b] D. Beaubaton, "*Le contrôle de la main : Planification du geste et assistance sensori-motrice*", Colloque UNICEF, Paris, 1985
- [Berthoz 78] A. Berthoz, "*Rôle de la proprioception dans le contrôle de la posture et du geste*", dans "*Du Contrôle moteur à l'organisation du geste*", Ed. H. Hecaen & Masson, 1978
- [Cooke 79] J.D. Cooke, "*Dependence of human arm movements on limb mechanical properties*", *Brain Research*, 1979
- [Cooke 80] J.D. Cooke, "*The organisation of simple, skilled movements*", dans *Tutorials in Motor Behavior*, Ed. G.E. Stelmach & J. Requin, p.199-212, 1980
- [Fel'dman 65] D.G. Asatryan, A.G. Fel'dman, "*Functional tuning of the nervous system with control of movement or maintenance of a steady posture*", *Biophysics* 10, 1965
- [Hatwell 81] Y. Hatwell, "*La fonction perceptive de la main : perception tactile de l'espace et intégration de la vision au toucher*", Thèse de Doctorat Es-Lettres et Sciences Humaines, 1981
- [Jeannerod 81] M. Jeannerod, "*Le contrôle de l'oeil sur le geste*", *La Recherche*, n°120, Mars 1981
- [Jeannerod 83] M. Jeannerod, "*Le cerveau-machine - Physiologie de la volonté*", *Collection Le Temps des Sciences*, Ed. Fayard, 1983
- [Kelso 77] J.A. Scott Kelso, "*Motor control mechanisms underlying human movement reproduction*", *J. of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, vol.3, n° 4, 1977
- [Kelso 79] J.A. Scott Kelso, "*On the coordination of two-handed movements*", *Journal of experimental Psychology, Human Perception and Performance*, 1979



- [Kelso 80a] J.A. Scott Kelso, "*Exploring a vibratory systems analysis of human movement production*", Journal of Neurophysiology, vol.43, n° 5, 1980
- [Kelso 80b] J.A. Scott Kelso, "*Contrasting perspectives on order and regulation in movement*", ? , 1980
- [Kugler 80] P.N. Kugler, J.A.S. Kelso, M.T. Turvey, "*On the concept of coordinative structure as dissipative structure*", Tutorials in motor behavior, Ed. G.E. Stelmach & J. Requin, Amsterdam : North Holland, 1980
- [Lyons 85] D.M. Lyons, "*A simple set of grasps for a dextrous hand*", IEEE International Conference on Robotics and Automation, St Louis, Mars 1985
- [Napier 56] J.R. Napier, "*The prehensile movements of the human hand*", Journal of Bone and Joint surgery, vol. 38B, n°4, Novembre 1956
- [MacNeilage 70] P.F. MacNeilage, "*Motor Control of Serial Ordering of Speech*", Psychological Review 77, p. 182-196, 1970
- [Paillard 80] J. Paillard, "*Nouveaux objectifs pour l'étude neurobiologique de la performance motrice intégrée : les niveaux de contrôle*", "Psychology of motor behavior and sport", Ed. C.H. Nadeau, W.R. Halliwell & G.C. Roberts, Human Kinetics Publishers, 1980
- [Polit 79] A. Polit, E. Bizzi, "*Characteristics of motor programs underlying arm movement in monkeys*", Journal of Neurophysiology, 1979
- [Schmidt 75] R.A. Schmidt, "*A schema theory of discrete motor skill learning*", Psychological review, 1975
- [Schmidt 79] R.A. Schmidt, H. Zelaznik, B. Hawkins, J.S. Frank, J.T. Quinn, "*Motor output variability : a theory for the accuracy of rapid motor acts*", Psychological Review 86, p. 415-451, 1979
- [Schmidt 80] R.A. Schmidt, "*On the theoretical status of time in motor program representations*", Tutorials in motor behavior, Ed. G.E. Stelmach & J. Requin, North-Holland Company, 1980
- [Shaffer 80] L.H. Shaffer, "*Analysing piano performance : A study of concert pianists*", Tutorials in motor behavior, Ed. G.E. Stelmach & J. Requin, North-Holland Company, 1980
- [Smyth 84] M.M. Smyth, A.M. Wing, "*The psychology of Human Movement*", Academic Press, INC, 1984
- [Tuller 84] B.Tuller, J.A.S. Kelso, "*The timing of articulatory gestures : evidence for relational invariants*", J. Acoust. Soc. AM., 1984

### B.3. Informatique musicale

- [Allouis 79] J.F. Allouis, "*Use of high speed microprocessors for digital synthesis*", Computer Music Journal, vol. 3, n°1, 1979
- [Arfib 79] D. Arfib, "*Digital synthesis of complex audio spectra by means of multiplication of nonlinear distorted sine waves*", J.A.E.S., vol.17, n°10, 1979
- [Berberyan 79] T. Berberyan, "*Application des processus récurrents à la synthèse sonore*", D.E.A. d'électronique, I.N.P.G., Grenoble 1979
- [Berberyan 82] T. Berberyan, "*Etude et réalisation d'un ordinateur spécialisé pour la synthèse sonore en temps réel par simulation mécanique de mécanismes instrumentaux*", Thèse de Docteur-Ingénieur, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1982
- [Cadoz 78] C. Cadoz, J.L. Florens, "*Fondement d'une démarche de recherche informatique/musique*", Rev. Acous., n° 2, 1978
- [Cadoz 79] C. Cadoz, "*Synthèse de sons par simulation de mécanismes vibratoires - Application aux sons musicaux*", Thèse 3ème cycle, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1979
- [Cadoz 81] C. Cadoz, A. Luciani, J.L. Florens, "*Synthèse musicale par simulation des mécanismes instrumentaux. Transducteurs gestuels rétroactifs pour l'étude du jeu instrumental*", Rev. Acoust., n° 59, 1981
- [Cadoz 84] C. Cadoz, A. Luciani, J.L. Florens, "*Responsive input devices and sound synthesis by simulation of instrumental mechanisms The CORDIS system*", Computer Music Journal, vol.8, n° 3, 1984
- [Cadoz 87] C. Cadoz, "*Timbre et causalité*", dans "*Le timbre, métaphores pour la composition*" (sous presse)
- [Chateau 75] J. Chateau, "*Le réel et l'imaginaire dans le jeu de l'enfant*", Ed. Vrin, 1975
- [Chowning 73] J. Chowning, "*The synthesis of complex audio spectra by means of frequency modulation*", J.A.E.S., vol.21, n°7, 1973
- [Di Giugno 81] P. Di Giugno, J. Kott, "*Présentation du système 4X, processeur numérique de signal en temps réel*", Rapport IRCAM, vol. 32, Paris, 1981
- [Florens 78] J.L. Florens, "*Coupleur gestuel rétroactif pour la commande et le contrôle de sons de synthèse*", Thèse de 3ème cycle, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1978
- [Florens 86] J.L. Florens, A. Razafindrakoto, A. Luciani, C. Cadoz, "*Optimized real time simulation of objects for musical synthesis and animated image synthesis*", International Computer Music Conference, The Hague, 1986

- [Francès 72] R. Francès, "*La perception de la musique*", Ed. Vrin, Paris, 1984
- [Hiller 58] L.A. Hiller, L.M. Isaacson, "*Musical composition with a high speed digital computer*", J.A.E.S., vol.6, n°3, 1958
- [Lacornerie 82] P. Lacornerie, "*Dialogue homme-machine pour la synthèse sonore par simulation de mécanismes vibratoires*", D.E.A. d'électronique, I.N.P.G., Grenoble, 1982
- [Lacornerie 85] P. Lacornerie, "*Synthèse des sons par simulation des mécanismes instrumentaux : logiciel pour le processeur Cordis-Temps-Réel*", Thèse de Docteur Ingénieur, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1985
- [Lebrun 79] M. Lebrun, "*Digital waveshaping synthesis*", J.A.E.S., vol.27, n°4, 1979
- [Luciani 85] A. Luciani, "*Un outil informatique de création d'images animées : modèles d'objets, langage, contrôl gestuel en temps réel - Le système ANIMA*", Thèse de Docteur Ingénieur, Institut National Polytechnique de Grenoble, Nov. 1985
- [Marie 73] J.E. Marie, "*Sur quelques problèmes de notation*", *Musique en jeu*, n°13, 1973
- [Mathews 63] M.V. Mathews, "*The digital computer as a musical instrument*", *Science*, vol. 142, Nov. 1963
- [Mathews 69] M.V. Mathews, J.E. Miller, F.R. Moore, J.R. Pierce, J.C. Risset, "*The technology of computer music*", M.I.T. Press, 1969
- [Mathews 70] M.V. Mathews, F.R. Moore, "*GROOVE, a program to compose, store and edit functions of time*", *Communication of the A.C.M.*, vol.13, n°12, 1970
- [Moorer 78] J.A. Moorer, "*The use of the linear prediction of speech in computer music application*", *Rapport IRCAM*, n°6, Paris, 1978
- [Moorer 82] J.A. Moorer, "*The Lucas Film Audio Signal Processor*", *Computer Music Journal*, vol.6, n°3, 1982
- [Razafindrakoto 85] A. Razafindrakoto, "*Le système ANIMA*", Thèse de 3ième cycle, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, Dec. 1986
- [Risset 71] J.C. Risset, "*L'ordinateur instrument de musique*", *Rev. Acoust.*, n° 16, 1971
- [Risset 71] J.C. Risset, "*Paradoxe de hauteur : le concept de hauteur sonore n'est pas le même pour tout le monde*", 7ième congrès I.C.A., Budapest, 1971
- [Risset 77] J.C. Risset, "*Hauteur et timbre des sons*", *Rev. Acoust.*, vol.42, 1977
- [Risset 82] J.C. Risset, D.W. Wessel, "*Exploration of timbre by analysis and synthesis*", *The Psychology of Music*, ed. Diana Deutsch, Academic Press, 1982

- [Risset 86] J.C. Risset, "*Timbre et synthèse des sons*", Analyse musicale, 2ième trimestre, 1986
- [Risset 87] J.C. Risset, "*L'Informatique Musicale*", Journal du CPRIM, n°1, janvier 1987
- [Rodet 84] X. Rodet, Y. Potard, J.B. Barrière, "*The CHANT project : from the synthesis of the singing voice to synthesis in general*", Computer Music Journal, vol.8, n°4, 1984
- [Rodet 84] X. Rodet, P. Cointe, "*FORMES : Composition and scheduling of processes*", Computer Music Journal, vol. n° 8, 1984
- [Schaeffer 66] P. Schaeffer, "*Traité des objets musicaux*", Ed. Seuil, Paris, 1966



## **Annexe**

# **Structure matérielle du frontal gestuel**

La conception et la réalisation matérielle du frontal gestuel a été une étape nécessaire pour permettre la mise en oeuvre du logiciel de capture, de codage et de prétraitement des signaux gestuels.

### **A.1. Description de l'environnement matériel général**

Nous désignons sous le terme de "frontal gestuel" un ensemble matériel et logiciel destiné au contrôle et au traitement des entrées/ sorties gestuelles, considéré comme "frontal" d'un environnement informatique plus général. Ce système s'intègre à une configuration matérielle dotée :

- \* d'une unité de simulation temps réel, constituée d'un (ou plusieurs) processeur vectoriel (actuellement l'AP120)
- \* d'un calculateur hôte jouant le rôle de superviseur.
- \* de processeurs périphériques de sortie spécialisés dans le traitement et le stockage d'images et de sons de synthèse :
  - LSI11-23 pour le son : on l'appelle "LSI-son"
  - Processeur d'image Evans Sutherland.

Cette configuration générale est présentée à la figure 1.

### **A.2. Mise en oeuvre de la configuration matérielle du frontal gestuel**

Le premier de nos objectifs a été de mettre en place un système matériel capable de supporter l'ensemble des fonctions de base explicitées au chap. 2-II. Il s'agit essentiellement de gérer en temps réel la communication des organes physiques assurant une liaison bilatérale avec l'extérieur, l'information en provenance et à destination de ces dispositifs servant à contrôler dynamiquement le comportement d'un objet simulé.

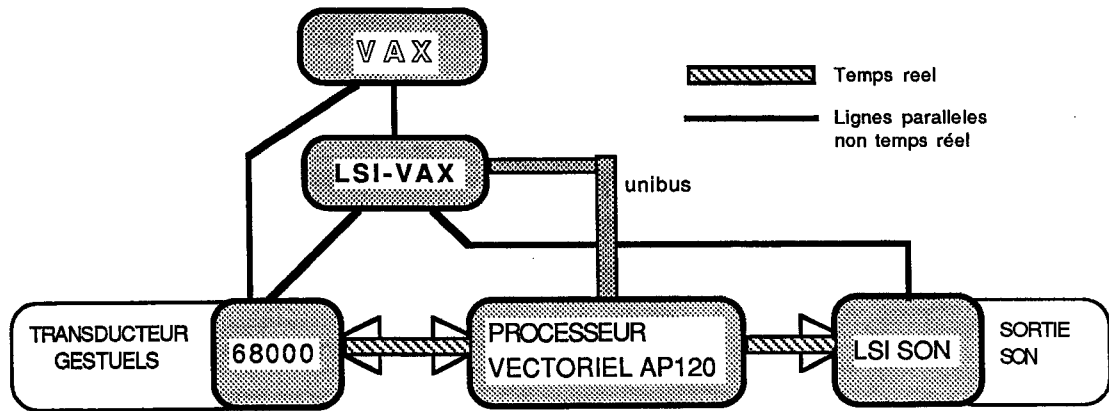


Figure 1 : Configuration générale

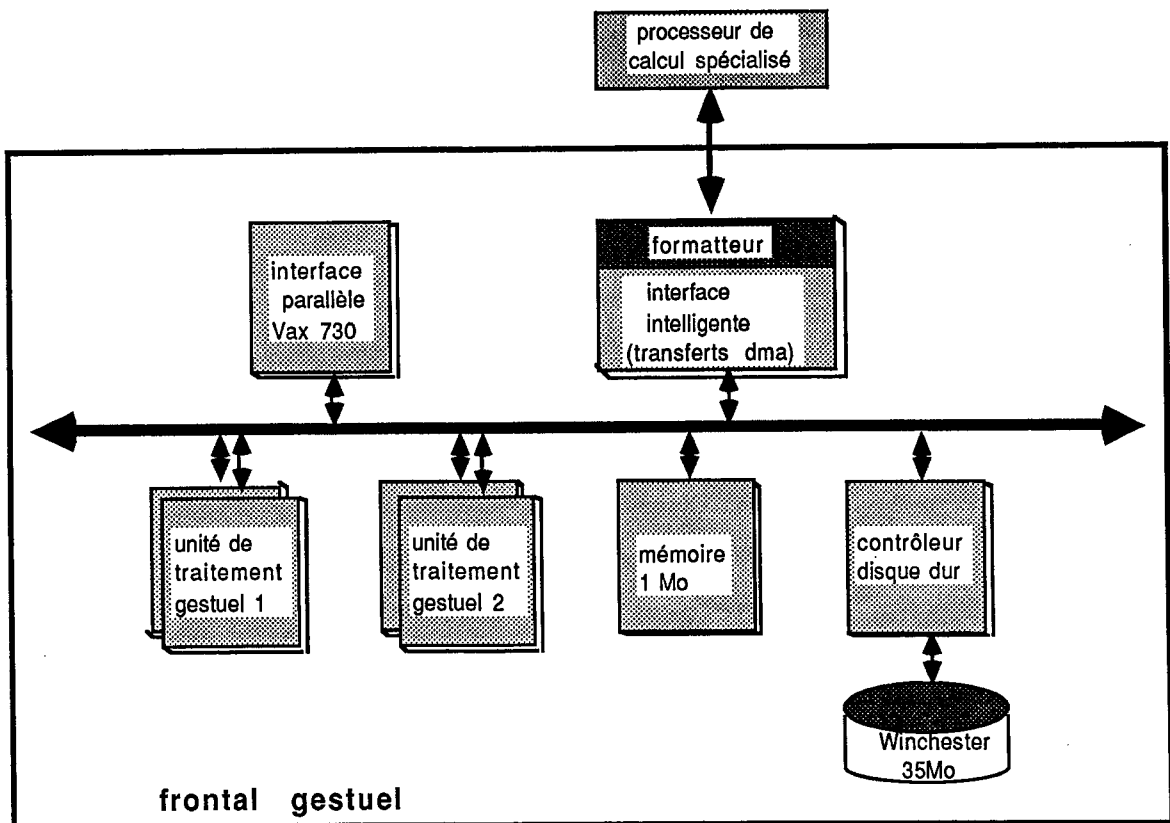


Figure 2 : Structure matérielle du frontal gestuel

Le temps réel est donc une préoccupation majeure. De plus, la connexion possible du système informatique à des dispositifs physiques multiples, diversifiés, doit être prise en compte. Une solution à ce problème consiste à utiliser une machine ultra-rapide, modulaire, permettant de traiter en parallèle une grande quantité d'information.

L'environnement choisi a une structure multiprocesseur. Dans un souci de standardisation, de rapidité et d'extensibilité du système, nous avons opté pour un standard VME (Versa Module Eurocard), permettant à plusieurs processeurs Motorola 68000 de partager des ressources communes. En effet, la nature asynchrone du bus permet de faire cohabiter des processeurs, des mémoires, et des périphériques présentant des caractéristiques de vitesses différentes.

La structure globale est donnée à la figure 2.

Une unité de traitement gestuel comprend deux cartes à base de microprocesseurs 68000 connectées au bus VME, une mémoire globale, ainsi que des modules d'acquisition et de sortie des données gestuelles.

Une mémoire supplémentaire de 1 Mégaoctets a été ajoutée sur le bus VME pour permettre le stockage temporaire des signaux gestuels codés ; cette mémoire est accessible par les différentes unités de traitement gestuel ainsi que par les autres processeurs de la configuration.

On dispose de plus d'un disque Winchester de 35 Mo, pour le stockage de masse des échantillons gestuels traités. Un contrôleur Sasi gère automatiquement les accès à ce disque dur.

Une carte processeur, chargée de gérer les transferts DMA entre les unités de traitement gestuel et l'interface parallèle du processeur vectoriel est en cours de construction.

### **A.3. Unité de traitement gestuel**

#### **A.3.1. Constitution d'une unité gestuelle (figure 3)**

Chacun des deux processeurs de l'unité de traitement gestuel possède sur son bus local interne à la carte, une mémoire privée, et un ensemble de périphériques d'entrées/sorties qui lui sont propres.

\_ Le CPU1, ou "processeur d'E/S "est plus spécialement dédié à la gestion des entrées et des sorties gestuelles. C'est lui qui joue le rôle de processeur hôte du frontal ; il est connecté à des dispositifs de dialogue avec l'utilisateur (console, imprimante), et possède des outils logiciels de développement (système d'exploitation multi-tâches temps réel PDOS).



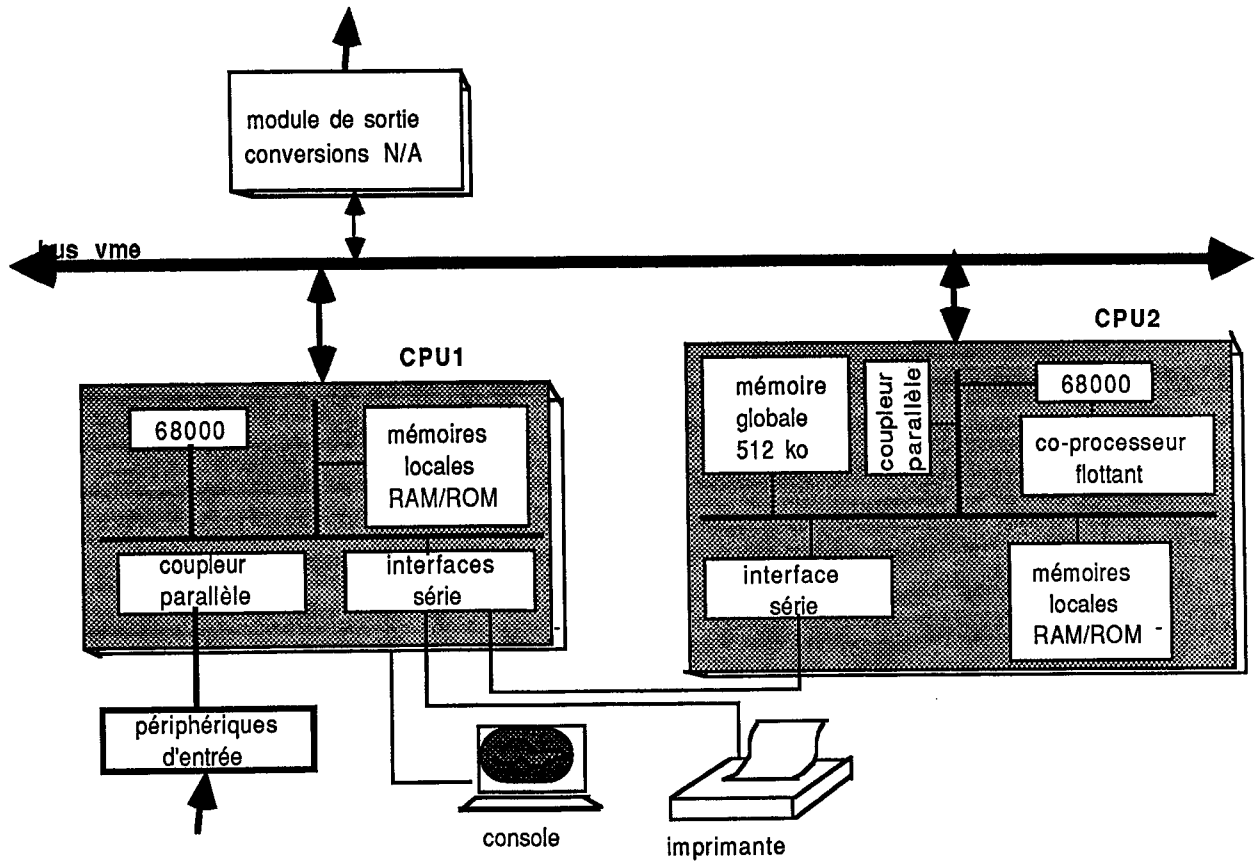


Figure 3 : Unité de traitement gestuel

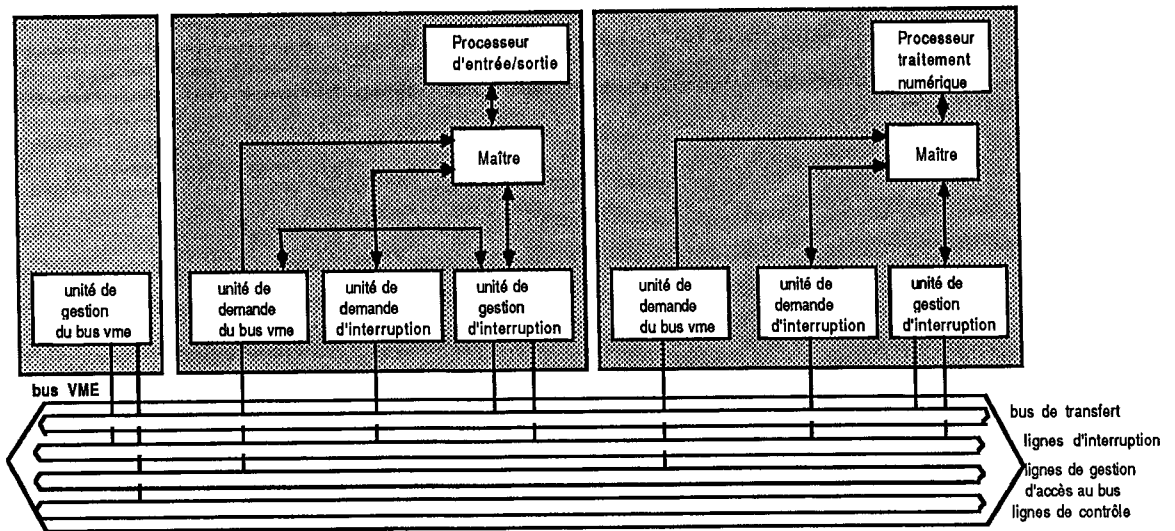


Figure 4 : Communication entre les deux processeurs de l'unité gestuelle

D'autre part, il est susceptible d'émuler le processeur de calcul : la communication avec le cpu2 s'effectue soit par l'intermédiaire d'une ligne série asynchrone lorsqu'il s'agit d'envoyer des messages de commande, soit au moyen de la mémoire partagée lorsqu'il s'agit de transferts importants ou à grande vitesse.

\_ Le CPU2 , ou "processeur de simulation lente", est doté d'une unité de calcul flottant, et se consacre plus spécifiquement à des tâches de simulation locale ou à des traitements particuliers plus sophistiqués.

### **A.3.2. Principe de la communication entre les deux processeurs**

Le schéma de principe de la communication interne d'une unité de traitement gestuel est représenté à la figure 4.

#### **A.3.2.1. Accès au bus VME**

La communication entre les processeurs au niveau de l'accès au bus VME utilise le concept de maître-esclave. Le maître a le contrôle du bus, tandis que l'esclave après décodage de l'adresse le concernant répond à la commande envoyée par le maître.

Le bus VME dispose de quatre niveaux de priorité d'accès au bus, assignés statiquement (hiérarchie fixe) , ou dynamiquement (priorité tournante) à des lignes spécialisées BR<sub>3</sub>-BR<sub>0</sub> (Bus Request). Un premier niveau de priorité est dû à l'affectation d'une carte maître à une ligne particulière BR<sub>i</sub>. Une unité de gestion d'accès au bus de transfert (arbitre) établit une hiérarchie des demandes d'accès, et accorde le bus à la demande la plus prioritaire.

Si plusieurs processeurs se partagent une même ligne BR<sub>i</sub>, un mécanisme de "daisy-chain" alloue le bus par simple priorité sérielle, établissant ainsi un deuxième niveau de priorité suivant la position de la carte dans le châssis.

En ce qui concerne le choix de notre configuration, les deux cartes comprennent des unités de demande d'accès au bus, leur niveau de priorité étant établi de manière fixe, ce qui leur confère alternativement le rôle de maître ou d'esclave, rôle exclusif, puisque deux processeurs ne peuvent devenir simultanément maîtres du bus.

### A.3.2.2. Gestion des interruptions

#### a. Interruptions sur le bus VME

Il existe sept lignes d'interruption sur le bus VME.

Deux types de gestion des interruptions peuvent être envisagés :

- \* Un système de gestion centralisée qui confie à un seul processeur le traitement des demandes d'interruption.
- \* Un système de gestion distribuée qui répartit sur plusieurs processeurs les demandes d'interruption et confie à chacun d'eux le traitement de celles qui lui correspondent.

Dans notre application, chaque processeur est susceptible d'interrompre un maître voisin, ou d'être interrompu ; le CPU1 pourra être interrompu par des dispositifs d'entrées/sorties sur le bus VME, le CPU2 par le périphérique intelligent responsable des transferts DMA entre la mémoire globale et l'AP120.

On optera pour une gestion centralisée des interruptions ; les lignes d'interruption seront cependant séparées en deux groupes, pris en charge par des modules distincts affectés respectivement aux processeurs 1 et 2. Ainsi, chacune des cartes dispose d'une unité de demande d'interruptions et d'une unité de gestion d'interruptions.

#### b. Interruptions locales à chaque processeur

Chaque processeur 68000 dispose sur son bus interne de sept lignes d'interruption gérées de manière locale.

### **A.3.3. Modules périphériques d'entrées sorties**

Chaque processeur gestuel gère un ensemble de modules d'entrées et de sorties.

#### A.3.3.1. Transducteurs et types d'interfaces associées

Pour capter le geste instrumental, nous sommes amenés à connecter des transducteurs gestuels au processeur d'entrées/sorties. La fonction du transducteur est d'établir la correspondance entre l'espace sensori-moteur du geste et l'espace numérique. Il joue donc simultanément le rôle de capteur et d'émetteur.

Sur le plan technique, un transducteur est caractérisé par :

- sa morphologie
- ses capteurs
- ses dispositifs de retour d'effort (moteur,...)
- son système de conditionnement mécanique et électronique ( alimentation, calibrage,...)

La nature des informations transmises et reçues par un transducteur peut être très diverse, selon les capteurs utilisés. Notre premier objectif est d'assurer le plus haut niveau de modularité, aussi bien "hardware" que "software". En effet, le frontal gestuel doit permettre la connexion de dispositifs physiques déjà existants, mais aussi de dispositifs nouveaux conçus spécialement pour une expérience instrumentale particulière.

Nous pouvons envisager la connexion au processeur gestuel de différents systèmes d'entrée classiques : sticks, capteurs de force divers, capteurs de déplacement électromagnétiques, ...

Un capteur mixte de position (X,Y) et de forces ( $F_X, F_Y, F_Z$ ) a été réalisé à l'ACROE à partir de la souris d'une tablette à digitaliser.

Il faudra étendre cet environnement gestuel par l'adjonction d'autres dispositifs. On peut mentionner :

- un clavier rétroactif à 16 touches actuellement en cours de réalisation
- des transducteurs à plusieurs degrés de liberté (sticks, surface rétroactive, ...)
- des dispositifs non rétroactifs permettant la modification de paramètres et de configurations instrumentales : potentiomètres divers, codeurs incrémentaux, boules roulantes, touches sensibles, etc.

#### A.3.3.2. les modules d'entrée et de sortie

##### a. Les modules d'entrée

Les informations échangées ont des caractéristiques différentes, qui vont conditionner la nature des interfaces gestuelles associées, selon qu'il s'agit de signaux analogiques, ou de signaux numériques qui peuvent circuler soit à travers des lignes parallèles, soit à travers des lignes séries.

Cela nécessite l'élaboration de modules d'entrée spécialisés, interfacés au processeur d'E/S ; on distingue essentiellement deux types d'interfaces :

\_ Les interfaces parallèles, comportant des modules de conversion analogiques/numériques, ou numériques/numériques, et un coupleur de périphérique permettant de réaliser la liaison parallèle entre le microprocesseur 68000 et son module d'acquisition.

\_ Les interfaces séries, utilisant un coupleur de périphérique permettant de réaliser la liaison série entre le 68000 et la ligne série.

Nous nous intéresserons plus particulièrement à l'élaboration d'interfaces parallèles, qui permettent d'établir des liaisons numériques à grande vitesse entre l'environnement physique des transducteurs et le processeur d'E/S. Par souci de modularité et d'homogénéisation des traitements, nous serons amenés à réaliser des interfaces plus spécialisées, permettant de convertir des données séquentielles provenant de liaisons séries en données numériques parallélisées. Les lignes série véhiculant des informations codées de manière spécifique (codage Midi par exemple), et utilisant un protocole de communication très variable (mode synchrone ou asynchrone, vitesse variable, standard RS232, Midi, ...), il conviendra alors d'adapter la logique hardware au cas par cas.

#### b. Les modules de sortie

Ceux-ci sont essentiellement constitués de dispositifs de conversion numériques analogiques. Les voies analogiques de sortie sont destinées à contrôler des dispositifs à retour d'effort (signaux de commande des moteurs, ...).

#### A.3.3.3. Localisation des modules d'acquisition et de sortie

Nous avons opté pour une répartition dissymétrique des modules d'entrée ou de sortie. Les modules d'entrée sont interfacés sur le bus interne du processeur d'E/S (cpu1). Nous avons par conséquent introduit la notion de bus local accessible seulement par le processeur correspondant. Les modules de sortie numériques-analogiques sont connectés directement sur le bus VME.

Les raisons qui ont influencé notre choix sont de plusieurs ordres :

En premier lieu, il est nécessaire de limiter la charge du bus VME pour les opérations d'entrées/sorties. En particulier, la connexion au bus VME de périphériques non intelligents conduirait à une dégradation sensible des performances de ce bus.

Ainsi, une évaluation rapide du temps de transfert sur le bus alloué aux différentes tâches nous a incité à diminuer le plus possible le taux d'occupation du bus. Or, ce sont généralement les opérations d'acquisition et de contrôle des entrées gestuelles qui sont les plus coûteuses ; le processeur chargé de gérer le déclenchement et le déroulement des opérations de conversion, se trouve assez souvent dans des attentes actives, ce qui monopolise le bus pendant une durée non négligeable. Il découle de cela l'idée de concevoir un bus externe, ne mettant pas à contribution le bus VME, et utilisant uniquement les ressources internes à la carte processeur dédiée aux E/S.

En second lieu, la carte processeur dispose d'une seule interface parallèle, et le débit élevé des informations d'entrées/sorties exclut le multiplexage entre les entrées et les sorties, compte tenu des limitations temporelles de l'interface parallèle, et des exigences de la synchronisation.

Enfin, il existe des cartes de conversion numérique-analogique interfacées sur le bus VME, permettant le transfert des données à grande vitesse, à partir d'un mode de communication DMA (direct memory access).

Ces systèmes ont la particularité d'être modulaires. On peut connecter sur le bus extérieur autant de modules d'acquisition que le permet la limite de traitement d'un microprocesseur. Celle-ci a été évaluée à seize voies d'entrée et huit voies de sortie, ou bien trente deux voies d'entrée. Au-delà de cette limite, il faut rajouter sur le bus VME d'autres unités de traitement gestuel identiques. Le schéma de principe de cette organisation est représenté à la figure 5 :

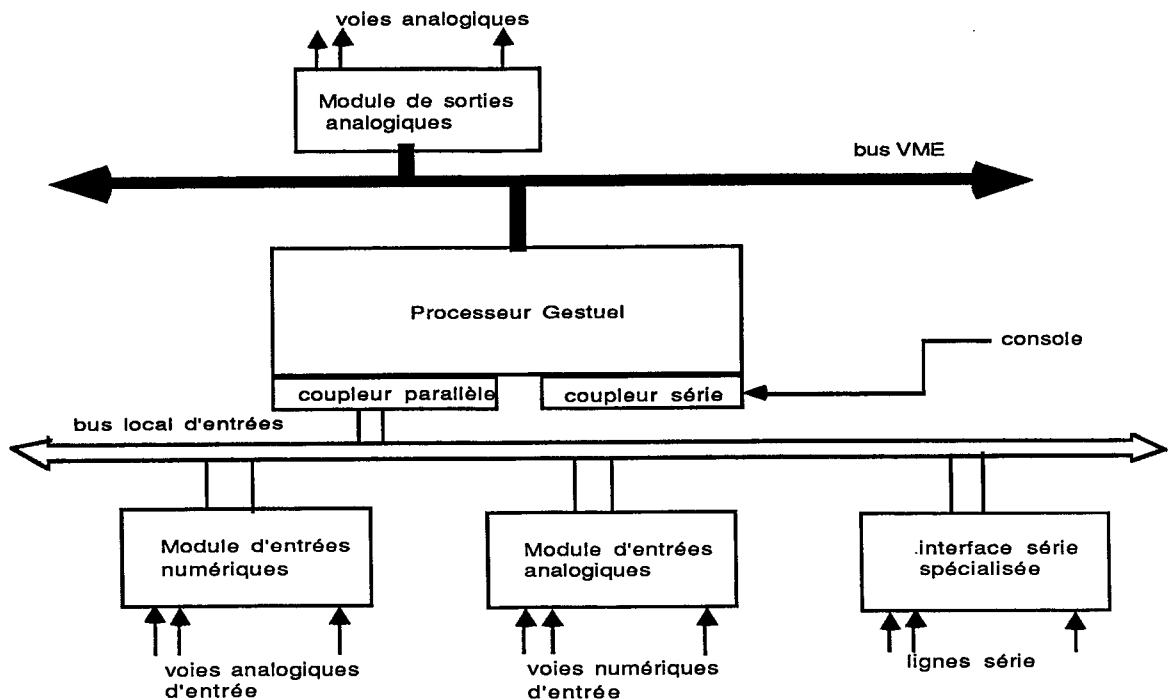


Figure 5 : Modules d'entrées sorties gestuelles

## **A.4. Etude et réalisation d'interfaces d'acquisition temps réel spécialisées**

### **A.4.1. introduction**

Cette étude consiste à rechercher un bon compromis entre la spécialisation fonctionnelle "hardware" des modules d'acquisition, et une solution tout informatique consistant à développer des logiciels adaptés au problème de l'acquisition et du codage.

Une première approche (software) laisse au programmeur un contrôle maximum sur la machine et les périphériques par l'introduction dans le langage de concepts de bas niveau permettant de gérer différents types de communication avec l'extérieur. La diversité des dispositifs connectés implique en effet la cohabitation de plusieurs modes de fonctionnement : mode synchrone, asynchrone, fonctionnement ou non par interruption, gestion de mécanismes de priorités. Or, le manque de généralité de ces fonctions introduit une forte dépendance du programme vis-à-vis des périphériques utilisés et de la machine pour lequel il est écrit, le rendant difficilement transportable.

Une seconde approche (hardware) implique la prise en charge des tâches de bas niveau par des dispositifs matériels spécialisés. On réalise alors un automate plus ou moins complexe, en fonction du niveau de spécialisation. Si l'on va trop loin dans la spécialisation, on aboutit à des solutions peu flexibles, non adaptées aux besoins de la variété des dispositifs, et de la diversité des traitements. Par exemple, il est difficile d'intégrer les mécanismes de codage adaptatif explicités précédemment dans un système "câblé" et par conséquent rigide ; en effet, nous sommes amenés à coder des signaux de dynamique et de rapport signal sur bruit très variables, ce qui compromet l'interchangeabilité des dispositifs d'entrée.

Entre ces deux attitudes, il est possible d'imaginer des solutions intermédiaires. Pour obtenir une certaine généralisation et cohérence des programmes de traitement du geste, il importe que le programmeur ait devant lui une machine relativement transparente, dans laquelle la saisie des données est faite implicitement, sans qu'il ait à intervenir. Cela suppose généralement l'existence de coupleurs intelligents, destinés à effectuer une scrutation systématique des données d'entrée, et à les transmettre automatiquement vers la mémoire locale du processeur par des mécanismes DMA (Direct Memory Access)

### **A.4.2. Fonctions des modules d'acquisition d'entrée**

Nous nous intéresserons plus spécifiquement à des modules d'acquisition de voies analogiques d'entrée. En fait, le principe restera identique en ce qui concerne les voies numériques d'entrée.

Notre objectif a été de réduire le plus possible la fonction d'acquisition des données gestuelles par le processeur d'E/S. Si l'on considère en effet la procédure de conversion et de stockage de 16 voies analogiques multiplexées, deux modes d'acquisition sont possibles :

D'une part, le mode par interruption. Celui-ci, déclenchant une procédure d'interruption à chaque donnée convertie, introduit un temps de réponse non négligeable, et essentiellement variable, ce qui pénalise les performances du système.

D'autre part, le mode synchrone par "attente" des événements ; ce cas ne conduit pas à une optimisation du temps de traitement, puisque le processeur est en attente active une partie du temps.

Les fonctions du module d'acquisition doivent alors permettre :

- 1) La scrutation et la conversion automatique des voies analogiques ou numériques d'entrée, à une cadence spécifiée par l'utilisateur ; cela nécessite l'existence d'un multiplexeur analogique ou numérique, commandé par une horloge programmable interne au dispositif, ou provenant d'un dispositif de synchronisation extérieur.
- 2) Le rangement automatique des données converties et de leur adresse respective dans un dispositif Fifo, l'ordre de stockage étant celui de la scrutation, et pouvant être déterminé au préalable par l'utilisateur. En particulier, il doit être possible de scruter les voies d'entrée à des cadences différentes (fréquences d'échantillonnage variables).

La figure 6 traduit le principe de fonctionnement d'un module d'entrée analogique ou numérique. Ainsi, le rôle du processeur d'E/S est réduit à celui du transfert d'un paquet de données stockées dans un dispositif de file d'attente, la taille du paquet et le mode de déclenchement du transfert pouvant être sélectionnés par l'utilisateur.



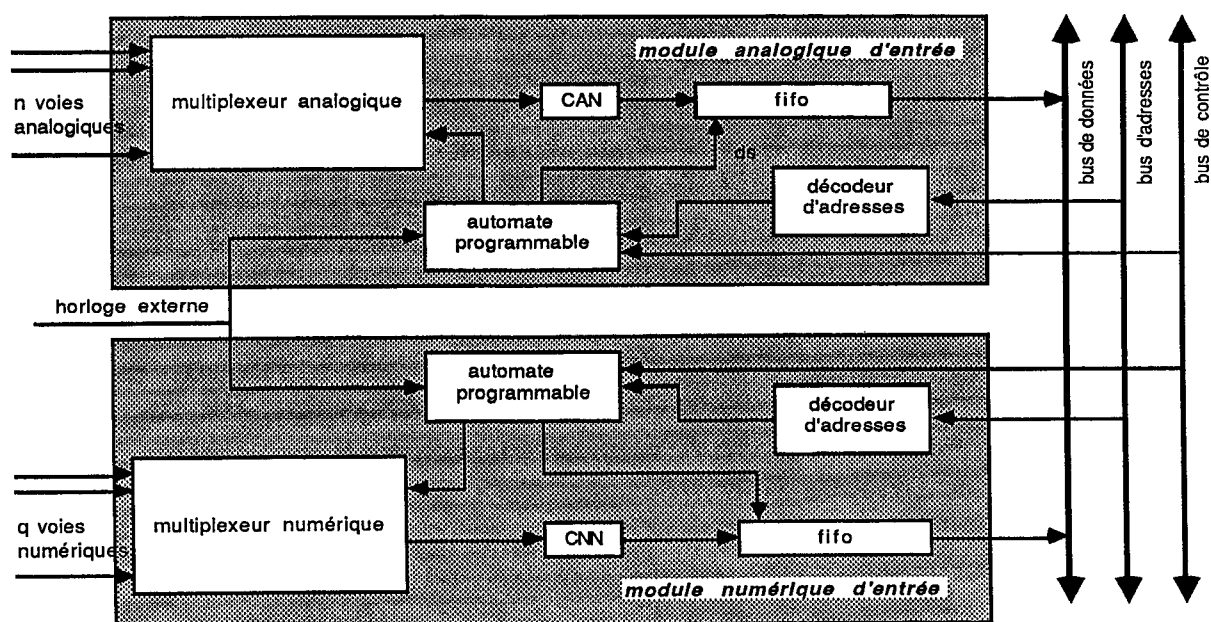


Figure 6 : Modules d'entrée numériques et analogiques

### II.4.3. Réalisation d'un module d'acquisition d'entrées analogiques

Ce module comporte une horloge externe programmable, la fréquence d'échantillonnage pouvant être sélectionnée entre 25 Hz et 50 kHz et un automate programmable, constitué d'un séquenceur et d'une logique de commande. Il existe deux modes de fonctionnement de l'automate : le mode aléatoire ou séquentiel.

Le mode séquentiel permet de scruter automatiquement les voies analogiques dans un ordre d'adresses croissantes. Il est possible de réduire le nombre N de voies traitées :  $1 \leq N \leq 16$ , en sélectionnant des configurations spécifiques d'interrupteurs implantés sur la carte.

Le mode aléatoire autorise une scrutation des voies d'entrée dans un ordre spécifié par l'utilisateur ; l'intérêt de ce type de fonctionnement est qu'il permet de faire l'acquisition de signaux à des fréquences d'échantillonnage différentes. En effet, une séquence d'adresses est stockée sur mémoire programmable et effaçable (EPROM), et le séquenceur balaie automatiquement les adresses successives. Ce processus est bouclé, ce qui permet de répéter le cycle de scrutation.

L'automate a été conçu de telle manière que ces deux modes sont gérés identiquement, ce qui facilite la tâche du programmeur. Les données converties sont stockées systématiquement dans un fifo. La communication avec le processeur gestuel s'effectue au moyen de signaux émis par le fifo, qui déclenchent un processus de transfert, soit par un mécanisme d'interruption (signal fifo demi-plein, signal fin du cycle, ...), soit par détection de l'état du fifo (test d'un registre indiquant que le fifo est vide, ou à moitié plein,...).

Le coupleur parallèle servant d'interface entre le module d'acquisition et le microprocesseur 68000 est programmé successivement suivant deux modes distincts :

- 1- mode entrée : ce mode configure l'interface en entrée ; cela permet l'écriture de mots servant, d'une part à sélectionner la fréquence d'échantillonnage, d'autre part à configurer l'automate dans le mode de fonctionnement souhaité.
- 2- mode sortie : l'interface, configurée en sortie, assure le transfert en temps réel des données gestuelles.

Une description détaillée, incluant les schémas électroniques, et le logiciel de base de cette interface ("handler" du coupleur parallèle), est donnée dans un rapport technique.