

wog/450

THESE

présentée à

L' UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE (PARIS VI)

pour l'obtention du

DOCTORAT D'ETAT ES SCIENCES

Spécialité : MATHEMATIQUES

Mention : INFORMATIQUE

par M. *Gérard NOGUEZ*

Sujet de la thèse : ETUDE D'UN MODELE TEMPOREL DES SYSTEMES SEQUENTIELS

Soutenue le Décembre 1975 devant la Commission

composée de: Président M. 1e Professeur J. ARSAC

Examineurs: MM. 1es Professeurs

J. HEBENSTREIT

S. HYDER

L. NOLIN

J. C. SIMON

THESE

présentée à

L' UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE (PARIS VI)

pour l'obtention du

DOCTORAT D'ETAT ES SCIENCES

Spécialité : MATHEMATIQUES

Mention : INFORMATIQUE

par M. *Gérard NOGUEZ*

Sujet de la thèse : ETUDE D'UN MODELE TEMPOREL DES SYSTEMES SEQUENTIELS

ST4/39-13.

Soutenue le Décembre 1975 devant la Commission

composée de: Président M. 1^{er} Professeur J. ARSAC

Examineurs: MM. 1^{ers} Professeurs

J. HEBENSTREIT

S. HYDER

L. NOLIN

J. C. SIMON

A MARYSE

Qu'il me soit permis de remercier Monsieur le Professeur ARSAC qui m'a fait l'honneur de présider ce Jury et m'a prodigué ses encouragements, Monsieur HEBENSTREIT pour les discussions que nous avons eues et qui m'ont guidé dans la rédaction de cette thèse, Monsieur le Professeur HYDER qui tout au long de ses séjours à Paris a suivi et discuté le développement de ces travaux, Monsieur le Professeur NOLIN pour l'esprit de rigueur qu'il m'a enseigné tant pour la terminologie que pour la formalisation des problèmes logiques, Monsieur le Professeur SIMON pour l'intérêt qu'il a porté à ces travaux, Messieurs SUCHARD et ETIEMBLE dont les travaux sont à l'origine de cette étude.

Que tous ceux enfin qui ont permis l'achèvement de ce travail soient ici remerciés, particulièrement le secrétariat et l'imprimerie de l'Institut de Programmation.

INTRODUCTION

La conception d'un ordinateur est une tâche délicate si l'on considère qu'elle se trouve à l'intersection de deux domaines difficilement conciliables: le domaine de l'abstrait et celui du concret. Le principal danger qui guette "l'architecte de la machine" est de confondre dans son raisonnement les deux domaines.

La notion de temps nous paraît être le lieu privilégié de cette confusion: si nous pouvons nous servir par la pensée de tout phénomène comme point de repère - par exemple un signal qui véhiculerait des résultats - la notion de temps prend par contre dans la réalité l'aspect banal d'un signal qui n'a ni plus ni moins de propriétés que les autres signaux.

Afin de mettre en évidence ce type de difficulté, nous avons jugé bon d'expliquer nos motivations dans un premier chapitre. Nous proposons ensuite dans un second chapitre un modèle temporel des systèmes séquentiels. Les autres chapitres sont consacrés à l'application de ce modèle aux principaux problèmes temporels que l'on rencontre lors de la conception d'un ordinateur. Certaines applications sont renvoyées en annexe afin de ne pas trop alourdir l'exposé.

ETUDE D'UN MODELE TEMPOREL
DES SYSTEMES SEQUENTIELS

- I - Motivations
- II - Le modèle proposé
- III - Application aux systèmes à mémoire
- IV - Application aux systèmes à temps propre

Annexe - Application aux systèmes combinatoires

CHAPITRE I

Dans ce chapitre, nous essayons d'expliquer et de justifier le choix des fondements de notre modèle temporel. Nous rappelons d'abord la définition usuelle la plus générale des systèmes séquentiels. Nous analysons ensuite les problèmes temporels inhérents à cette définition. Nous étudions alors les solutions apportées par les différentes théories des machines séquentielles. Cela nous amène à la proposition d'un nouveau modèle. Enfin nous expliquons comment nous avons essayé d'évaluer le domaine d'application de ce modèle

MOTIVATIONS

- I - Présentation des systèmes séquentiels informatiques
- II - Problèmes temporels posés par les systèmes séquentiels
- III - Les modèles existants des systèmes séquentiels
- IV - Le modèle proposé
- V - Domaine d'application du modèle

MOTIVATIONS

Deux grandes théories permettent actuellement de formaliser la notion d'information. La première - la "théorie de l'information" - est relative à la transmission de l'information, elle a des fondements statistiques [SHA], [BRI]. La seconde - la "théorie des langages [CHO] et des machines séquentielles" [HUF], [MEA], [BOO] - est relative au traitement de l'information et a des fondements algébriques [NOL].

Dans ces deux théories, la notion de temps n'apparaît pas sous la même forme. Dans la première, l'information a pour support des phénomènes caractérisés par des fonctions continues de la variable réelle "temps" [SIM]. Par contre, dans la seconde théorie, la notion de temps se traduit par celle de séquence et la notion de durée pourrait se traduire par celle de longueur d'un mot.

Différentes extensions de la théorie des machines séquentielles ont été développées afin d'éliminer cette différence de représentation - continue ou dénombrable - du temps [EVE], [SIF]. Le modèle proposé dans cette thèse est aussi développé dans ce but, mais l'approche du problème diffère fondamentalement de celle qui est empruntée dans ces différentes extensions. Dans ce chapitre, nous essayons d'expliquer et de justifier le choix des fondements de notre modèle.

I - PRESENTATION DES SYSTEMES SEQUENTIELS INFORMATIQUES

Nous nous limitons à l'étude des systèmes dont la fonction est le "traitement de l'information".

1.1. Traitement séquentiel de l'information

De la façon la plus générale, un système de traitement de l'information est un système auquel on fournit des *données* afin d'obtenir un *résultat*. Vu comme un système au sens des Sciences Physiques [LAD], un tel système est un système *ouvert* pour lequel les échanges (d'informations) avec l'extérieur se font dans les deux sens: en *entrée* (données) et en *sortie* (résultats).

Le traitement de l'information peut se faire:

- 1) *en une seule étape*: nous dirons que le système est *combinatoire*;
- 2) *en plusieurs étapes*: nous dirons que le système est *séquentiel*.

Théoriquement, tout traitement de l'information peut être effectué par un système combinatoire. Cependant, les systèmes séquentiels se justifient pour deux raisons différentes:

- 1) il est physiquement plus simple de décomposer un traitement complexe de l'information en une *suite* de traitements élémentaires et de réaliser la *chaîne* correspondante de systèmes séquentiels que de réaliser un système global fort complexe;
- 2) il existe des problèmes pour lesquels il est extrêmement difficile de fournir toutes les données "simultanément".

Pour les systèmes combinatoires, le traitement de l'information se compose d'un seul type d'étape:

$$\text{données} \rightarrow \text{résultat} .$$

Par contre, un traitement séquentiel peut se décomposer en plusieurs sortes d'étapes:

- | | | | |
|---|---|-------------------------------|-----|
| <i>données</i> | → | <i>résultat intermédiaire</i> | (1) |
| <i>données + résultat intermédiaire</i> | → | <i>résultat intermédiaire</i> | (2) |
| <i>résultat intermédiaire</i> | → | <i>résultat final</i> | (3) |
| <i>données + résultat intermédiaire</i> | → | <i>résultat final</i> | (4) |

1.2. Automate abstrait d'états

Un système séquentiel peut être considéré comme un *automate abstrait d'états* si l'on suppose:

- 1) que l'ensemble des étapes qui aboutissent à un résultat intermédiaire est l'ensemble des états S ,
- 2) que l'ensemble des valeurs prises par les données est l'alphabet d'entrée I ,
- 3) que l'ensemble sur lequel les résultats finaux prennent leur valeur est l'alphabet de sortie O .

Le fonctionnement de l'automate est alors caractérisé par les relations qui lient 1) la suite (séquence) des états de l'automate, 2) la suite des caractères émis en sortie et 3) la suite des caractères d'entrée.

Soient i_n , s_n et o_n les éléments génériques de ces suites. Avec ces conventions, un système séquentiel est caractérisé par un ensemble de relations des types suivants [HEB] :

$$\text{Changement d'état: } i_n \in I, s_n, s_{n+1} \in S : s_{n+1} = f(i_n, s_n) \quad (5)$$

Ce type de relation correspond aux relations (1) et (2);

Sortie d'état :

$$a) \text{ Machine de Moore : } s_n \in S, o_n \in O : o_n = g(s_n) \quad (6)$$

Cette relation correspond à la relation du type (3) ,

$$b) \text{ Machine de Mealy: } i_n \in I, s_n \in S, o_n \in O : o_n = h(i_n, s_n) \quad (7)$$

Cette relation correspond à celle du type (4).

Notons qu'un système combinatoire pourrait être caractérisé comme un automate de ce type ayant plusieurs entrées (et par là plusieurs alphabets d'entrée $I_1, \dots, I_j, \dots, I_p$) et un seul état:

$$i_n^1 \in I_1, i_n^j \in I_j, i_n^p \in I_p, o_n \in O : o_n = k(i_n^1, \dots, i_n^j, \dots, i_n^p) \quad (8)$$

Du point de vue de l'ordre séquentiel, ces relations correspondent aux relations (6) et (7).

* Une suite est dénombrable par définition [BOU]

1.3. Domaine d'application usuel de la théorie des machines séquentielles

Nous essaierons de définir ce domaine d'application de la façon suivante:

- soit un système S de traitement de l'information, caractérisé comme un automate d'états,
- soit un ensemble d'automates élémentaires $E = \{ E_i \}$ dont les alphabets d'entrée et de sortie sont (en général) binaires et qui peuvent correspondre à des systèmes élémentaires - ou bien combinatoires - ou bien séquentiels,
- alors le but de la théorie des machines séquentielles est de définir une structure composée d'éléments E_i équivalente au système S .

Il faut pour cela établir une correspondance bi-univoque :

- 1) entre l'alphabet d'entrée (resp. de sortie) de S et un ensemble-produit de chaînes de caractères des alphabets d'entrée (resp. de sortie) des éléments E_i ;
- 2) entre l'ensemble des états de S et le produit des ensemble d'états des éléments E_i .

Le but de la théorie des machines séquentielles est naturellement d'arriver, à l'aide d'une telle décomposition, à une structure plus simple; c'est à dire [HEB] :

- soit à une structure d'éléments "logiques" d'un catalogue (eg: éléments combinatoires et cellules de mémoire) [Dans ce cas, à chaque élément logique correspond un élément physique et à chaque entrée ou sortie correspond un signal];
- soit à une cascade de systèmes séquentiels plus simples;
- soit à un "produit" de systèmes séquentiels (ce qui permet de remplacer un produit d'états par une somme: l'intérêt d'une telle décomposition est évident).

Après ce rappel de la notion de machine séquentielle, telle qu'elle est présentée dans de nombreux ouvrages, nous pouvons faire la remarque suivante: la notion usuelle de machine séquentielle exclut toute notion de temps continu, car le temps n'apparaît que sous la forme de séquences dénombrables de caractères ou d'états.

La solution du problème que nous soulevons semble tellement évidente qu'elle en est implicite. Ainsi, lorsque nous avons parlé de la décomposition d'un système séquentiel, nous n'avons pas abordé le problème de la correspondance du nombre de caractères des séquences d'entrée ou de sortie entre les

éléments E_i de la structure de synthèse. Implicitement cette correspondance est "unitaire" : à chaque caractère d'une séquence correspond un et un seul caractère des autres séquences.

Nulle part apparaît la notion de mesure du temps.

Autrement dit, le repérage temporel des entrées et des sorties est unique et prend en général la forme d'un signal d'horloge h . Cela implique que, physiquement, la mesure du temps est la même pour tous les signaux associés aux entrées et aux sorties des éléments d'une structure séquentielle.

Cette hypothèse unificatrice simplifie l'énoncé du problème, mais il n'est pas évident qu'elle n'entraîne pas des "paradoxes" semblables à celui "d'Achille et de la tortue" soulevé par Zénon d'Elée [Nous pensons qu'à l'aide de ses quatre paradoxes, Zénon d'Elée voulait montrer qu'on ne peut considérer l'ensemble des nombres "réels" comme une simple extension de l'ensemble dénombrable des nombres rationnels]. Nous allons maintenant essayer de répondre à cette question.

II - PROBLEMES TEMPORELS POSES PAR LES SYSTEMES SEQUENTIELS

2.1. Etablissement et maintien d'un état

Si un système séquentiel est considéré comme un système au sens des Sciences Physiques, la relation de changement d'état (5) : $s_{n+1} = f(i_n, s_n)$ peut être considérée comme la relation de cause à effet entre le caractère d'entrée i_n et le changement d'état $\langle s_n \rightarrow s_{n+1} \rangle$ du système. L'ordre croissant des indices ($n, n+1$) traduit le principe des effets retardés, suivant lequel l'effet suit la cause.

Il ne faut pas alors oublier que pour un système "physique" ouvert, l'état de celui-ci dépend à tout instant (c'est à dire " quelle que soit la valeur de la variable réelle t ") de celui des entrées. Il en résulte que le symbole i_n de la relation (5) peut être interprété de deux façons distinctes :

- ou bien i_n caractérise l'état de l'entrée I , par rapport à un des deux états s_n ou s_{n+1} du système,
- ou bien i_n caractérise la variation d'état de l'entrée I qui est la

cause du changement d'état du système.

Dans le premier cas, le symbole i_n caractérise la valeur de l'entrée qui assure le *maintien* d'un état du système. Cela implique que la relation (5) n'est une relation de *cause à effet* que dans la mesure où les états de l'entrée I qui assurent le maintien de deux états *successifs* du système sont *distincts*.

Dans le second cas, le symbole i_n caractérise la *cause d'établissement* du nouvel état s_{n+1} du système. Cela implique que l'état de l'entrée I qui assure le maintien d'un état (s_n ou s_{n+1}) du système est *implicite* : cet état de l'entrée correspond à l'élément neutre / symbole séparateur que l'on rencontre dans les alphabets de la théorie des automates.

Cette double interprétation du symbole d'entrée i_n des relations de changement d'état (5), due à l'hypothèse d'un repérage unique, entraîne la conclusion suivante :

la définition précédente des machines séquentielles ne peut aboutir à une théorie "unitaire".

Nous entendons par là qu'il est impossible de combiner, à travers un seul et unique système de relations, d'une part un système séquentiel décrit comme une combinaison de systèmes combinatoires (systèmes "asynchrones") et d'autre part un système séquentiel décrit comme une combinaison d'éléments séquentiels (systèmes "synchrones").

Cela est dû au fait que les relations de cause à effet du type (8) ne peuvent s'appliquer aux systèmes asynchrones : nous nous heurtons alors à des contradictions, comme nous le démontrons dans la note 1 du chapitre III.

Cette impossibilité a provoqué le développement de deux théories distinctes : celle des *machines synchrones* [DIE] et celle des *machines asynchrones* [HEB].

Pour obtenir une théorie "unitaire", il faut nécessairement que la distinction entre l'établissement et le maintien d'un état apparaisse dans le système de relations. Par exemple, la relation de type (5) peut être remplacée par les suivantes :

$$\text{établissement: } s_{n+1} = f(i_{2n+1}, s_n)$$

$$\text{maintien: } s_n = g(i_{2n}, s_n)$$

Ces relations correspondent à celles de la théorie des automates, si l'on suppose que les symboles i_{2n} dénotent le symbole séparateur neutre e tel que $g(e, s_n) = s_n$.

2.2. Repérage des états

L'hypothèse d'unicité du repérage implique, d'un point de vue "physique", que le fait de caractériser l'état de tous les signaux du système à une même date *doit* avoir un sens. Nous allons d'abord montrer que, pour un système séquentiel physique, les effets et les causes ont une durée bornée non nulle. Nous rechercherons ensuite les conditions dans lesquelles le fait d'associer une date à un *intervalle* de temps a un sens.

a) Durée d'un état

La longueur de la séquence des états d'une machine séquentielle est quelconque. Cela implique, pour le système physique associé, que la valeur à une date T , d'une variable d'état $S(T)$ ne peut être fonction que des valeurs (des variables d'entrée I_j et d'état S_k) comprises dans des intervalles de temps bornés :

$$[t_j, T_j] \text{ ou } [t_k, T_k] \text{ avec } t_j < T_j \leq T ; t_k < T_k \leq T$$

Borne supérieure : ces intervalles sont *majorés*, d'après l'axiome qui postule que l'effet suit la cause. Les intervalles peuvent être ouverts ou fermés à droite, cela dépend de l'interprétation stricte ou non du principe des effets retardés. Nous n'aborderons pas ce problème et renvoyons à Costa de Beauregard [COS].

Borne inférieure : les intervalles sont *minorés* car une durée infinie impliquerait que l'état caractérisé par la valeur $S(T)$ ne peut être atteint, à partir d'un autre état, qu'au bout d'un temps infini. A la rigueur, seul l'état initial peut avoir cette propriété.

[Cette minoration implique que le traitement "physique" de l'information est non linéaire, car seule la non linéarité permet "d'éliminer" le "passé" d'un signal]

Durée non nulle : la correspondance entre une variable logique d'état - entière - et un signal - fonction continue du temps - ne peut être établie que si l'on suppose que la durée des effets et des causes n'est pas "nulle", c'est à dire si les effets et les causes ne sont pas "ponctuels" dans le temps.

La durée d'un état est donc bornée et non nulle.

b) *Caractéristiques repérables d'un signal - support de l'information*

Le repérage unique, d'un état dont la durée est bornée et non nulle, consiste à associer une seule et même date à tous les intervalles de temps du type $[t_j, T_j]$ ou $[t_k, T_k]$. Cette date peut correspondre :

- ou bien à une des deux bornes des intervalles de temps,
- ou bien à un "point" compris entre ces bornes.

Nous allons voir que seul le premier type de correspondance peut avoir une interprétation physique et cela au prix d'hypothèses supplémentaires.

Sur toute la durée d'un état, les valeurs des variables sont équivalentes par définition. Il en résulte qu'un "point" intermédiaire ne peut être repéré que par rapport aux bornes de l'intervalle de temps caractéristique de l'état [Dans la pratique, cela revient à se repérer par rapport aux transitions d'un signal]. Un tel repérage relatif n'a de sens que si toute transformation d'un signal est une *isométrie temporelle*, c'est à dire une application qui conserve la distance temporelle entre les bornes de repérage.

Or il s'avère que pour la plupart des éléments physiques dits "de commutation" (eg: logique TTL), les temps de retard "à la montée" et "à la descente" ne sont pas identiques. Cette propriété est indépendante de la fonction logique réalisée par l'élément physique. La propagation des signaux à travers les éléments logiques ne peut donc être considérée comme une isométrie temporelle.

Il en résulte que seules les transitions d'un signal peuvent servir de "point" de repère.

Pour que cette possibilité soit vérifiée, il faut s'assurer de plus que le temps de retard associable à une transition ne dépende pas du signal

(p.ex: de son temps de montée/descente)de façon à ce que toutes les transitions d'un même sens soit repérées de la même manière. Cette propriété d'invariance n'est pas vérifiable à l'aide des modèles traditionnels des éléments physiques. A notre connaissance, seuls les modèles de J. Suchard et D. Etiemble [SUC], [ETI] permettent de déterminer les conditions dans lesquelles cette invariance est vérifiée (cf. le préambule de l'annexe).

Dans ces conditions, la seule façon de caractériser un changement d'état à l'aide d'une date unique est :

- 1) de supposer que, avant de changer d'état, le système a atteint un état "stable", invariant dans le temps (cf. la définition de la stabilité [CAZ]);
- 2) de supposer que le début de la cause du changement d'état peut être repéré temporellement par une date unique;
- 3) de repérer temporellement le changement d'état par cette date.

Comme l'effet suit la cause et comme l'état initial est "stable", on peut en toute rigueur définir l'état du système *physique* à la date du *début* du changement d'état.

Cette hypothèse de stabilité est faite dans la théorie des machines synchrones : le repérage est effectué par rapport au *signal d'horloge* qui *commande* le changement d'état des éléments séquentiels (registres, compteurs, etc..) [Notons que cette fonction de commande implique que la référence temporelle qu'est le signal d'horloge ait une existence matérielle].

Par contre, dans la théorie des machines asynchrones, l'état d'un système est étudié en dehors des périodes de stabilité, bien que le repérage des signaux soit unique. L'interprétation "physique" des variables associées à l'état des signaux nous semble alors pour le moins délicate. C'est ce qui explique que dans de nombreux ouvrages les hypothèses suivantes sont ajoutées [CHU] :

- 1) les temps de retard sont indépendants du sens de la transition du signal;
- 2) tous les temps de retard ont une valeur multiple d'une même unité de temps.

Ces hypothèses ne nous semblent pas être des hypothèses "simplificatrices" qui seraient introduites afin d'alléger l'énoncé de la théorie : elles sont fondamentales. Autrement dit, nous ne pensons pas que la théorie des machines asynchrones puisse aboutir à une description fidèle d'un système *physique*

pour lequel les hypothèses précédentes ne sont pas vérifiées [*Ne serait-ce dû qu'à l'incertitude sur les caractéristiques physiques des éléments logiques, on ne peut dans la plupart des cas vérifier de telles hypothèses*].

2.3. "Déterminisme" des systèmes séquentiels

Pour terminer notre étude sur les problèmes temporels posés par les systèmes séquentiels, nous étudions l'influence de l'hypothèse du repérage unique sur le problème de l'évaluation du bon fonctionnement ("*déterminisme*") d'un système séquentiel physique.

Nous caractériserons la finalité de la conception des ordinateurs de la façon suivante:

Synthèse : concevoir un système physique qui réalise le traitement de l'information demandé;

Analyse : définir les conditions physiques, en particulier temporelles, qui doivent être vérifiées pour que le système physique réalise effectivement le traitement demandé.

L'unicité du repérage ne permet qu'une formulation du but de l'analyse, celle de la vérification de l'*unicité du résultat*, relativement à un jeu de données d'entrée [*ie: il ne doit pas y avoir d' "aléas"*].

Comme il y a une infinité de valeurs possibles, pour les temps de propagation et de commutation et pour la durée des signaux, il y a aussi une infinité de cas à envisager. Il en résulte que cette façon d'énoncer les conditions de bon fonctionnement ne peut en général conduire à une réponse concrète [*Cette remarque ne s'applique pas à la théorie des machines synchrones, nous reviendrons sur ce sujet*].

La seule façon d'obtenir une réponse concrète, pour un système séquentiel quelconque, est de formuler la question "à l'envers", c'est à dire sous la forme suivante:

Pour un résultat logique et un jeu de données d'entrée imposés et un système physique donné,

- 1) existe-t-il des cas de bon fonctionnement?
- 2) si oui, par rapport à quel repère temporel peut-on observer, dans chaque cas, le résultat et est-ce que ce repère convient?
- 3) quelles sont alors les contraintes temporelles que doivent respecter les signaux de données, relativement à ce repère?

Seule cette formulation permet d'apporter une réponse exhaustive sur le "déterminisme" d'un système séquentiel physique.

2.4. Influence de l'hypothèse de repérage unique

L'étude précédente a mis en évidence certaines conséquences du choix de l'hypothèse d'un repérage unique :

- 1) ce choix ne permet pas de décrire la totalité des systèmes séquentiels à l'aide d'un seul et unique système de relations, compatible avec la théorie des automates abstraits;
- 2) la correspondance entre un état du système séquentiel de départ et un état du système physique associé ne peut être établi que pour un sous-ensemble restreint des systèmes séquentiels (ceux de la théorie des machines synchrones);
- 3) à l'exception des systèmes séquentiels "synchrones", ce choix ne permet pas de déterminer les conditions limites de bon fonctionnement du système physique associé au système séquentiel de départ.

Nous essayons maintenant de caractériser les modèles existants de machines séquentielles, face à ce problème de repérage temporel.

III - LES MODELES EXISTANTS DES SYSTEMES SEQUENTIELS

D'après le résultat de nos recherches bibliographiques, nous avons classé les modèles existants en trois catégories:

- 1) *Théorie des machines asynchrones,*
- 2) *Théorie des machines synchrones,*
- 3) *Logiques booléennes temporelles.*

A ces trois catégories, il faudrait ajouter les modèles utilisés en simulation qui ne peuvent être rattachés à une des catégories précédentes. Nous les avons exclu pour les raisons suivantes.

3.1. Modèles de simulation

Certains modèles correspondent à une simulation "électronique" des éléments séquentiels. Cette caractérisation purement physique des systèmes informatiques exclut toute notion d'automate d'états, c'est à dire de traitement logique de l'information. Si ce modèle de simulation permet d'étudier le fonctionnement électromagnétique du système, nous ne pensons pas qu'il permette d'en étudier le fonctionnement logique.

D'autres modèles remplacent les signaux binaires discontinus " en créneaux $< 0, 1 >$ " par des signaux qui possèdent des " rampes " de transition. L'état du signal est alors partout défini et prend toutes les valeurs comprises entre celles qui caractérisent les deux états "logiques" du signal. Cette finesse de la simulation nous semble plus qu'illusoire, car nous avons vu que la notion de date, c'est à dire de point auquel on attache une valeur du signal, n'a guère de sens [*Sauf pour les dates qui caractérisent une transition du signal*].

3.2. Théorie des machines asynchrones

Nous avons déjà exposé les limitations temporelles de cette théorie. Cette théorie permet d'effectuer la synthèse d'un système séquentiel en termes d'éléments combinatoires, c'est à dire en termes d'éléments logiques de base. Elle permet d'étudier le comportement temporel du système, lorsque les valeurs des temps de retard, ainsi que les caractéristiques temporelles des signaux, sont donnés. Elle ne permet pas cependant de déterminer l'ensemble des contraintes temporelles qui assurent le bon fonctionnement du système.

3.3. Théorie des machines synchrones

Cette théorie nous semble la plus complète: elle répond à la finalité de la conception des ordinateurs, telle que nous l'avons définie.

Pour qu'un système physique conçu selon les principes de cette théorie fonctionne, il suffit en effet que les conditions de stabilité des états soient vérifiées avant chaque changement d'état. Ces conditions de stabilité se résument aux deux contraintes suivantes:

- 1) l'intervalle de temps qui sépare deux changements d'état doit être supérieur à la somme du plus grand temps de commutation des éléments séquentiels de base et du plus grand temps de propagation d'un signal entre deux éléments séquentiels de base;
- 2) les éléments séquentiels de base doivent être *non transparents* [ie: le changement d'état doit se faire en deux étapes : a) lecture des entrées, b) "écriture" des sorties] .

Ces contraintes peuvent être respectées à l'intérieur du système, puisque tous les éléments séquentiels de base sont commandés par un même signal d'horloge. Par contre, pour les signaux d'entrée du système, le respect de ces contraintes implique que le "monde extérieur" au système soit synchrone avec celui-ci ! Le domaine d'application de la théorie des machines synchrone est donc limité, puisque les systèmes combinatoires- ainsi que les systèmes qui comportent plusieurs références de temps - en sont exclus. Cependant, l'utilité de cette théorie ne peut être niée, mais il faut bien reconnaître qu'elle se rapproche beaucoup plus de la théorie des automates que de la conception physique des ordinateurs !

3.4. Les logiques booléennes temporelles

Cette théorie est très intéressante car elle représente une tentative d'élimination de l'hypothèse du repérage unique [SIF] .

Chaque signal est repéré de façon intrinsèque et est représenté sous la forme d'une somme booléenne d' "échelons" dont les fronts repèrent les transitions du signal. Cette représentation pourrait être comparée à la décomposition d'un signal en séries de Fourier [MAX] . Cette approche est nécessaire pour étudier un système combinatoire comme un système physique [*Seules les transitions d'un signal peuvent servir de point de repère*], mais elle ne permet pas d'étudier le système comme un automate d'états.

Le système de repérage proposé ne permet pas en effet d'observer les transformations successives de l'état *logique* du système. Cette impossibilité résulte de l'*unicité de l'origine temporelle* pour tous les signaux, alors que la date des transitions qui délimitent un état du système n'est pas la même

pour chaque signal. Il est alors impossible d' "isoler" temporellement un état, car les lois booléennes de composition des signaux impliquent que tous les signaux doivent être *définis* pour être combinés : leur origine temporelle (d'observation) ne peut être qu'identique.

Pour "observer" un état isolément, il faut *dissocier l'état et le repérage d'un signal*. Seules des lois de composition distinctes pour l'état et pour le "temps" permettent d'associer une date spécifique d'observation à chaque signal, tout en conservant les lois de composition booléennes pour l'état des signaux.

IV - LE MODELE PROPOSE

Le modèle que nous proposons a été conçu dans le but de concilier deux types de représentation d'un système séquentiel :

- la représentation d'un système comme un automate abstrait d'états,
- la représentation d'un système comme un système physique pour lequel le temps est continu.

Pour cela, le modèle est fondé sur la *DUALITE DES NOTIONS D'ETAT ET DE TEMPS*. Nous considérons en effet que , bien qu'elles soient complémentaires - et par là indissociables - , ces deux notions sont *distinctes* :

- la notion d'état d'un signal n'a de sens que par rapport à une référence de temps et
- réciproquement une référence de temps ne peut être définie que par l'état d'un signal,
- cependant l'état et la référence de temps *ne sont pas obligatoirement associés au même signal* : ces deux notions sont relatives à un système de repérage qui peut être quelconque.

Cette dualité est la cause du développement d'un formalisme spécifique à chaque notion.

4.1. Logique d'état

La logique booléenne traditionnelle a été remplacée par une logique " extrême " pour les raisons suivantes:

- 1) Dans certains traitements de l'information, les alphabets associés aux signaux ne sont pas identiques; en particulier, les alphabets associés

aux signaux de commande sont en général binaires alors qu'il n'en est pas toujours de même pour les signaux de données [Rappelons que les lois de l'algèbre de Boole sont des lois de composition internes : il ne peut alors y avoir qu'un seul alphabet].

- 2) La distinction entre l'établissement et le maintien d'un état doit être mise en évidence : c'est le rôle des *extremums* des fonctions extrêmes.

- a) Si une des entrées a la valeur *maximale*, alors la valeur de sortie de la fonction est imposée, quelle que soit la valeur des autres entrées. Cette propriété caractérise une fonction d'*initialisation*, c'est à dire d'établissement.

- b) Par contre, une valeur *minimale* d'entrée n'influe pas sur la valeur de sortie de la fonction, valeur qui ne dépend alors que des autres entrées. La valeur minimale peut être considérée comme un caractère *séparateur* (élément neutre) qui "maintient" la valeur de la fonction, puisqu'elle ne la modifie pas.

A chacune des deux lois d'union et d'intersection de l'algèbre de Boole correspond un élément "maximal" et un élément "minimal" [Union: élément maximal 1, minimal 0 ; Intersection : élément maximal 0, minimal 1]. Ces deux lois sont remplacées par une seule fonction extrême, lorsqu'il s'agit de caractériser l'établissement ou le maintien d'un état.

4.2. Logique temporelle

Comme nous l'avons vu, il faut que l'origine temporelle d'un signal ne soit pas un "invariant" de la logique temporelle. C'est pourquoi cette logique est fondée sur une relation d'*inclusion* temporelle *partielle*. La relation d'inclusion ne porte que sur une partie du signal, partie qui est définie comme l'ensemble des composantes qui correspondent à une *partie* de l'alphabet associé. Une composante est alors *incluse* temporellement dans une autre si elle débute *après* et finit *avant*.

Les lois d'*union* et d'*intersection* sont construites sur cette relation d'inclusion. Leur particularité est de "modifier" la date d'origine qui ne peut que *progresser* dans le temps. Cette *irréversibilité* temporelle est nécessaire pour l'étude des phénomènes d'initialisation, cependant elle

implique que l'algèbre résultante ne peut être une algèbre de Boole.

L'algèbre est complétée par une loi de "complémentation" temporelle: la *mémorisation*. Cette loi caractérise la fonction de base des systèmes séquentiels qui est celle de *décalage temporel* (ie: passage d'un indice n à l'indice $n+1$). Comme nous le montrons dans la note 2 du chapitre II, cette fonction de mémorisation mérite bien le nom de complémentation temporelle, malgré son apparence.

4.3. Les signaux comme éléments de base

Les deux algèbres proposées s'appliquent à des ensembles de signaux qui sont caractérisés de deux façons distinctes:

- 1) à l'aide d'*alphabets* que nous distinguons soigneusement de l'ensemble des valeurs prises par la grandeur caractéristique du signal, car - rappelons le - la notion d'état est relative à un système de repérage : elle dépend de ce que l'on observe.

- 2) à l'aide de *repères* partiels ou complets.

Nous avons porté un soin tout particulier à la définition des alphabets et des repères, afin de bien mettre en apparence la *relativité* de ces notions. Nous montrons en particulier que la mesure de l'information *dépend de ces définitions* [On peut le vérifier pour les enregistrements magnétiques: la référence de temps ("synchro") peut être intégrée au signal ou bien peut être enregistrée séparément; le dénombrement des configurations distinctes du signal diffère dans chaque cas. Cette notion de mesure relative à la dualité "état - temps" se retrouve dans les relations d'Heisenberg LEV].

4.4. Schéma d'analyse

La définition d'une algèbre, même double, n'est pas suffisante pour établir une théorie: il faut de plus définir des règles de construction [BOU].

[Pour l'analyse d'une structure, il s'agirait plutôt de règles de décomposition]
 Pour celà nous avons fait appel à la théorie des langages: nous caractérisons les possibilités de fonctionnement d'un système séquentiel comme les *phrases* du langage qui est "accepté" par le système. Cette approche a été choisie car elle permet de répondre à la question du "déterminisme" (ie: bon fonctionnement)

du système physique correspondant au système séquentiel.

La méthode proposée est semblable à celle que l'on peut utiliser pour évaluer la "puissance" d'un automate. Cette puissance est évaluée en vérifiant que l'automate accepte un langage d'un certain type. Il faut pour cela:

- 1) vérifier la compatibilité des vocabulaires,
- 2) vérifier que l'automate accepte les différentes structure de phrases du langage.

Dans notre modèle, les "éléments du vocabulaire" sont les états élémentaires du système. A l'opposé de la théorie des automates, où les états sont distingués des entrées, nous caractérisons un état par un couple d'*isochrones* $\langle \text{causes}, \text{effet} \rangle$ [Une *isochrone* est un ensemble de composantes de signaux muni d'un système de repérage], car la continuité du temps physique ne permet pas de dissocier temporellement les causes des effets (à tout instant il y a une cause pour un effet observé).

L' "acceptation" d'un état élémentaire consiste alors à vérifier :

- 1) que les causes indiquées impliquent bien l'effet donné,
- 2) que cette relation de cause à effet peut effectivement être observée par rapport au système de repérage donné (au prix de certaines contraintes temporelles qui sont alors déterminées).

Les "phrases" du langage sont obtenues par *concaténation* d'états élémentaires du "vocabulaire" [Nous avons pour cela "adapté" la loi de *concaténation des algèbres monoïdes à des ensembles réels*]. L' acceptation des phrases se traduit par les vérifications suivantes :

- 1) les signaux de sortie doivent pouvoir être *complètement* reconstitués à partir de la concaténation des isochrones-causes,
- 2) la concaténation des isochrones-effets doit être temporellement compatible avec une *succession* des isochrones-causes associées [la *succession des isochrones-causes* - et non pas la *concaténation* - correspond à la recherche des causes minimales].

Ces vérifications permettent d'affirmer que le bon fonctionnement du système est *observable* relativement à un certain système de repérage; encore faut-il que ce système de repérage ait un intérêt logique [Par exemple, un

repérage relatif aux sorties - c'est à dire au résultat d'un traitement de l'information - est possible, mais il n'a aucun intérêt puisque ce résultat est par hypothèse inconnu].

La puissance de cette méthode - issue de la théorie des automates - permet d'étendre l'analyse de la structure à un système pour lequel l'incertitude sur la valeur des paramètres temporels n'est pas nulle.

Nous sommes parti de la remarque que - à l'intérieur d'une machine - la définition du temps est univoque (sauf à l'intérieur de l'horloge) et que tout système de repérage a alors une structure *arborescente* dont l'horloge est la racine. La méthode précédente est appliquée à partir des "feuilles" pour remonter jusqu'à la racine en cumulant progressivement les incertitudes. Cette technique de remontée correspond à celles de l'analyse syntaxique, lors de la compilation d'un langage de programmation: *la méthode proposée est automatisable.*

V - DOMAINE D'APPLICATION DU MODELE

Au lieu de délimiter précisément le domaine d'application de notre modèle , nous essayons plutôt de montrer, à travers des applications tirées de la pratique - et par là fort bien connues -, l'intérêt

- 1) que l'on retire de l'abandon de l'hypothèse du repérage unique,
- 2) d'une classification "temporelle" des systèmes séquentiels.

Nous pensons en effet que les problèmes spécifiques à la conception des systèmes séquentiels informatiques sont surtout temporels; les autres problèmes relèvent d'autres domaines: - conception des éléments logiques,

- conception des automates abstraits d'états.

L'intérêt d'une classification temporelle est alors d'isoler chaque problème spécifique aux systèmes séquentiels , afin de le résoudre *très simplement.*

Nous proposons dans ce but la classification temporelle suivante:

a) Les systèmes combinatoires

Ces systèmes ne possèdent pas de système de repérage intrinsèque et n'importe quel signal d'entrée peut servir de référence temporelle [*cela*

n'implique pas que le système de repérage soit identique pour chaque entrée]. Pour ces systèmes, l'état et le repérage des sorties peuvent être déduits des entrées.

b) *Les systèmes à mémoire*

Comme les précédents, ces systèmes ne possèdent pas de système de repérage intrinsèque, mais un seul signal d'entrée peut être utilisé comme référence de temps: *la commande d'écriture*. Seul le repérage des sorties peut être déduit de l'observation de cette entrée, car l'état des sorties dépend des états précédents du système. Ces systèmes sont caractérisés physiquement par un *système d'échantillonnage* des entrées, commandé par le signal de commande d'écriture.

c) *Les systèmes à temps propre*

Ces systèmes possèdent leur propre système de repérage. Cela implique que ni l'état ni le repérage des sorties ne peut être déduit de l'observation des entrées. Ces systèmes possèdent deux types de dispositifs:

- une horloge,
- des mécanismes de *couplage* et de *découplage* temporel, afin de communiquer avec d'autres systèmes à temps propre.

Nous classons les éléments *monostables* dans cette catégorie : nous les considérons comme les constituants de base d'une horloge.

Cette classification nous permet d'isoler les problèmes temporels suivants:

systèmes combinatoires: définition d'un système de repérage;

systèmes à mémoire: mémorisation, échantillonnage et transparence;

systèmes à temps propre: définition d'un système de repérage à références multiples et couplage / découplage temporel.

Afin de profiter d'exemples concrets, nous avons réparti l'exposé de la méthode d'évaluation (du "déterminisme" d'un système séquentiel) parmi les différentes analyses de problèmes temporels. Ainsi :

- 1) le report des contraintes temporelles de la sortie vers les entrées d'un élément logique est exposé à propos des systèmes combinatoires;
- 2) l' "acceptation" d'un état élémentaire et d'une suite de tels

états est présentée lors de l'étude des systèmes à mémoire. La méthode décrite ne tient pas compte des incertitudes et est rapportée au signal de commande d'écriture. La détection d' "aléas" est illustrée à l'aide de plusieurs exemples;

- 3) enfin, l'algorithme complet d'acceptation , qui tient compte des incertitudes et qui se rapporte à un système de références multiples, est décrit à propos des systèmes à temps propre.

Le plan de la thèse résulte de cette présentation des problèmes: après un chapitre où nous présentons de façon formelle notre modèle, nous étudions successivement son application aux systèmes à mémoire, puis aux systèmes à temps propre; l'application aux systèmes combinatoires est renvoyée en annexe.

BIBLIOGRAPHIE

B I B L I O G R A P H I E

- [ANC] F. Anceau
 " *Contribution à l'étude des systèmes hiérarchisés de ressources dans l'architecture des machines informatiques* "
 Thèse d'Etat - Université de Grenoble - Décembre 1974
- [ARM] D.B. Armstrong
 " *A deductive method for simulating faults in logic circuits* "
 IEEE Trans. Comput. , vol. C 21 , pp 464 - 471 - Mai 1972
- [ARS] J. Arzac
 " *Les langages sans étiquettes* "
 IP , n° 73.13 - Université Paris VI - 1973
 " *La Science Informatique* "
 Dunod - Paris - 1970
- [BAR] M.R. Barbacci
 " *A comparison of Register Transfer Languages for describing computers and digital systems* "
 IEEE Trans. Comput. , vol. C 24 , pp 137 - 149 - Février 1975
- [BAR] A. Barna
 " *High speed Pulse circuits* "
 Wiley Interscience - John Wiley & Sons, Inc - 1970
- [BOO] T.L. Booth
 " *Sequential Machines and Automata Theory* "
 John Wiley & Sons, Inc - 1967
- [BOU] N. Bourbaki
 " *Théorie des ensembles* "
 A.S.I. 1141 - Hermann - Paris - 1966

- [DEN] J.B. Dennis & S.S. Patil
" The description and realization of digital systems "
 Colloque sur la conception et la maintenance des automatismes logiques
 Toulouse - Septembre 1972
- [DIE] D.L. Dietmeyer
" Logic design of digital systems "
 Allyn and Bacon, Inc - Boston - 1971
- [DRO] D. Dromard
*" Représentation d'une procédure de transmission par des
 automates d'états finis "*
 Thèse de Docteur-Ingénieur - Université Paris VI - Juin 1974
- [ELM] M.I. Elmasry & P.M. Thompson
*" Two level emitter - function logic structures for logic-in -
 memory computers "*
 IEEE Trans. Comput. , vol. C 24 , pp 250 - 257 - Mars 1975
- [ETI] D. Etiemble
*" Contribution à l'étude et à la modélisation des circuits logiques
 - Application à la logique de type TTL bas niveau "*
 Thèse de Docteur-Ingénieur - Université Paris VI - Juin 1974
- [EVE] S. Even & A.R. Meyer
" Sequential Boolean equations "
 IEEE Trans. Comput. , vol. C 18 , pp 230 - 240 - Mars 1969
- [FRI] T.D. Friedman & S.C. Yang
" Methods used in an automatic logic design generator (ALERT) "
 IEEE Trans. Comput. , vol. C 18 , pp 593 - 613 - Juillet 1969
- [GER] G.B. Gerace & M. Vanneschi
" On the processing speed of microprogrammed systems "
 Euromicro - preprints - Meeting June 1974 - Paris - Juin 1974

- [HAR] F.H. Hardie & R.J. Suhocki
" Design and use of fault simulation for Saturn computer design "
 IEEE Trans. Comput. , vol. EC 16 , pp 412 - 429 - Aout 1967
- [HEB] J. Hebenstreit
" Générateur de microprogrammes "
 Thèse d'Etat - Université Paris VI - Mai 1969
" Informatique théorique : circuits de logique séquentielle "
 Cours C3 - IP , Université Paris VI - 1973
- [HUF] D.A. Huffman
" The synthesis of sequential switching circuits "
 Sequential machines - Addison Wesley Publishing Co - 1964
- [HYD] S. Hyder
" A system for generating URDU/FARSI/ARABIC script "
 IFIP 71 Congress Ljubljana - North Holland Publishing Co - 1972
- [IBM] G.M. Amdahl et al.
" Improvements in or relating to electronic data processing machines "
 IBM patent specification 1, 108, 800 - London - 1965
- [LAD] J. Ladrière
" Système (épistémologie) "
 Encyclopédie Universalis - vol. 15 , pp 685 - 687 - 1968
- [LEV] J.M. Levy - Leblond
" Mécanique quantique "
 Encyclopédie Universalis - vol. 13 , pp 860 - 868 - 1968
- [MAV] J. Mavor
" Conception et technologie des circuits intégrés à transistors MOS "
 Editions Eyrolles - Paris - 1975

- [MAX] J. Max
 " *Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques* "
 Editions Masson & Cie - Paris - 1972
- [MEA] G.H. Mealy
 " *A method for synthesizing sequential circuits* "
 Bell System Tech. Jour. , vol. 34 , pp 1045 - 1079 - Septembre 1955
- [MIL] J. Millman & H. Taub
 " *Pulse, digital and switching waveforms* "
 International Stud. Ed. - Mc Graw Hill Book Co - 1965
- [NOG] G.L.M. Noguez
 " *Présentation d'une technique : la microprogrammation* "
 Cours AEA - IP, Université Paris VI - 1974
 " *A quasi parallel hardware language emulated by a host high level language* "
 IEEE Conf. - COMPCON 75 fall - Washington - Septembre 1975
 " *Design of a microprogramming language* "
 MICRO 6 - ACM SIGMICRO - pp 145 - 155 - Septembre 1973
 " *A standardized microprogram sequencing control with a push down storage* "
 MICRO 5 - ACM SIGMICRO - pp 66 - 71 - Septembre 1972
- [NOL] L. Nolin
 " *Formalisation des notions de machine et de programme* "
 Gauthier Villars - Paris - 1969
 " *Notions de formalisation* "
 Cours C3 - IP, Université Paris VI - 1968
- [PAT] S.S. Patil
 " *Coordination of asynchronous events* "
 MAC TR - 72 - MIT - Boston - 1970

- [PIL] R. Piloty
 " *Design verification at the register transfer language level* "
 Workshop on computer Hardware description languages - New Jersey - 1973
- [RAV] Ravi Sethi & J.D. Ullman
 " *The generation of optimal code for arithmetic expressions* "
 Journal of ACM - vol. 17 , n° 4 - 1970
- [SER] M. Servit
 " *Hazard correction in synchronous sequential circuits* "
 IEEE Trans. Comput. - vol. C 24 , pp 305 - 309 - Mars 1975
- [SES] S. Seshu
 " *On an improved diagnosis program* "
 IEEE Trans. Comput. - vol. EC 14 , pp 76 - 79 - Février 1965
- [SHA] C.E. Shannon
 " *A mathematical theory of Communications* "
 Bell System Tech. Jour. - Juillet et Octobre 1948
- [SIF] J. Sifakis
 " *Modèles temporels des systèmes logiques* "
 Thèse de Docteur-Ingénieur - Université de Grenoble - Mars 1974
- [SIM] J.C. Simon
 " *Traitement du signal : la représentation continue* "
 Cours C2 - IP, Université Paris VI - 1968
- [SNA] J.P. Gray & C.R. Blair
 " *IBM's Systems Network Architecture* "
 Datamation - pp 51 - 56 - Avril 1975
- [SPI] M.J. Spier
 " *Process communication prerequisite or the IPC-set up revisited* "
 Sagamore computer conference on parallel processing - 1973

- [SUC] J. Suchard
" Etude physique des éléments logiques "
Cours C3 - IP, Université Paris VI - 1969/1975
- [SZY] S.A. Szygenda, ed. & E.W. Thompson
" Digital systems simulation "
Computer Journal - pp 23 - 49 - Mars 1975
- [UNG] S.H. Unger
" Asynchronous sequential circuits "
J. Wiley and Sons - New York - 1969

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : MOTIVATIONS	3
Présentation des systèmes séquentiels informatiques	5
<i>Traitement séquentiel de l'information</i>	5
<i>Automate abstrait d'états</i>	6
<i>Domaine d'application usuel de la théorie des machines séquentielles</i>	7
Problèmes temporels posés par les systèmes séquentiels	8
<i>Etablissement et maintien d'un état</i>	8
<i>Repérage des états</i>	10
<i>"Déterminisme" des systèmes séquentiels</i>	13
<i>Influence de l'hypothèse de repérage unique</i>	14
Les modèles existants des systèmes séquentiels	14
<i>Modèles de simulation</i>	15
<i>Théorie des machines asynchrones</i>	15
<i>Théorie des machines synchrones</i>	15
<i>Les logiques booléennes temporelles</i>	16
Le modèle proposé	17
<i>Logique d'état</i>	17
<i>Logique temporelle</i>	18
<i>Les signaux comme éléments de base</i>	19
<i>Schéma d'analyse</i>	19
Domaine d'application du modèle	21

CHAPITRE II : LE MODELE PROPOSE	25
La concaténation	27
<i>Définitions préliminaires</i>	28
<i>Loi de concaténation</i>	31
<i>Signaux continus</i>	33
<i>Origine d'un signal</i>	34
Les repères	37
<i>Définition</i>	37
<i>Echelles de mesure</i>	39
Algèbre des repères	43
<i>Relation d'ordre</i>	43
<i>Lois de composition</i>	45
<i>Treillis distributif</i>	46
<i>La mémorisation</i>	47
Les fonctions extrémales	49
<i>Définition</i>	49
<i>Porte logique</i>	50
<i>Initialisation logique</i>	51
<i>Jeu de fonctions extrémales</i>	52
Les isochrones	55
<i>Définition</i>	55
<i>Relation de transfert</i>	57
<i>Etats</i>	58
<i>Synchronisme</i>	59
<i>Système séquentiel</i>	60
note 1 : Alphanet Morse	62
note 2 : Algèbre de Boole et logique des événements	63

CHAPITRE III : APPLICATION DU MODELE AUX SYSTEMES A MEMOIRE :	
ETUDE DES CELLULES DE MEMOIRE STATIQUES	65
LA BASCULE RS	69
La fonction idéale de mémorisation	69
Equation de mémorisation	71
Isochrone de mémorisation	73
<i>Initialisation</i>	73
<i>Mémorisation</i>	73
<i>Durée</i>	74
<i>Repère intermédiaire I</i>	75
<i>Coordonnées</i>	75
Automate séquentiel	77
<i>Symétrie</i>	77
<i>Grphe des états</i>	78
Cas limite de fonctionnement	80
Repérage	82
Régime oscillatoire	84
ETUDE DES BASCULES	86
Principe de l'étude	86
<i>Contraintes temporelles</i>	86
<i>Mémorisation</i>	87
<i>Succession des états</i>	88
<i>Exemple d'analyse d'un circuit séquentiel</i>	89
ECHANTILLONNAGE	93

	Signal de commande	93
	Caractéristiques d'un système d'échantillonnage	94
	<i>Séparateurs</i>	94
	<i>Référence de temps</i>	94
	<i>Classification</i>	95
	Echantillonnage permanent	95
	<i>Complémentation en amont</i>	97
	<i>Complémentation en aval</i>	98
	<i>Contraintes temporelles</i>	100
	Echantillonnage temporaire	101
	<i>Echantillonnage sur "front avant"</i>	101
	<i>Echantillonnage sur "front arrière"</i>	103
	Echantillonnage mémoriel	105
	TRANSPARENCE	110
	Les cellules à "double pont"	111
	Les bascules " maître-esclave"	113
note 1	: La boucle de retour	115
note 2	: Le tore magnétique	120
note 3	: Résumé des caractéristiques des bascules statiques	124

CHAPITRE IV : APPLICATION DU MODELE AUX SYSTEMES A TEMPS PROPRE :	
ETUDE DES HORLOGES	129
Cycle de commandes	131
<i>Notion de transfert élémentaire</i>	131
<i>Synthèse d'un cycle de commandes</i>	133
<i>Exemple</i>	138
Diagramme des temps	145
<i>Repérage et mesure des caractéristiques temporelles</i>	145
<i>Domaine temporel arborescent d'une commande</i>	147
<i>Isochrone de contraintes</i>	150
<i>Concaténation des domaines temporels</i>	158
<i>Superposition de séquences de commande</i>	160
Domaines temporels	161
<i>Domaines synchrones et asynchrones</i>	161
<i>Couplage</i>	162
<i>Découplage temporel</i>	165
Structure d'une horloge	169
<i>Horloges monophasées</i>	169
<i>Horloges multiphasées</i>	169
<i>Exemple</i>	170
note 1 :	
Les circuits oscillateurs	175
CONCLUSION	179
Analyse des systèmes séquentiels	181
Synthèse des systèmes séquentiels	184
Limites du modèle	185

ANNEXE : APPLICATION DU MODELE AUX SYSTEMES COMBINATOIRES	187
Préambule	188
<i>Modèle synthétique des éléments logiques</i>	188
<i>Les paramètres temporels</i>	189
Le retard simple	193
<i>Caractéristiques physiques</i>	193
Repérage	194
<i>Composantes parasites</i>	195
<i>But recherché</i>	196
<i>Relations temporelles</i>	197
<i>Cumul des temps de retard</i>	201
<i>Distance invariante</i>	201
Les fonctions combinatoires	202
<i>La convergence</i>	203
<i>La divergence</i>	206
BIBLIOGRAPHIE	207