

# Chapitre I

## GENERALITES ET MODELES DES SYSTEMES SEQUENTIELS

### 1. GENERALITES ET DEFINITIONS

#### 1.1 Différence entre système combinatoire et séquentiel

Dans un système combinatoire, la fonction de sortie dépend uniquement des variables d'entrée indépendamment du temps. Dans un système séquentiel, à l'instant  $t_i$ , la fonction de sortie dépend à la fois des variables d'entrée et du temps  $t_{i-1}$ .

Soit un circuit dont on connaît les  $n$  entrées  $E = (E_1, E_2, \dots, E_i, \dots, E_n)$  et les  $m$  sorties  $S = (S_1, S_2, \dots, S_j, \dots, S_m)$ . Rappelons qu'un circuit logique est qualifié de combinatoire si une même valeur du vecteur d'entrée  $E$  conduit toujours à la même valeur du vecteur de sortie. On sait que l'information se propage dans un seul sens de  $E$  vers  $S$  et qu'il existe un retard  $\tau_j$  associé à chaque sortie  $S_j$ . Un circuit combinatoire peut alors être représenté par un circuit idéal (délais de propagation nuls) en série avec des éléments de délai caractérisés par ces retards. On considère par la suite, pour simplifier l'étude, que les  $\tau_j$  sont égaux (Fig. I-1-a).

Dans un système séquentiel, le signal de sortie dépend à un instant donné, de la combinaison des entrées et de son état antérieur (c'est-à-dire de la succession ou séquence des états). Il faut donc introduire un certain nombre de variables supplémentaires pour « retourner » l'information de sortie sur l'entrée : fonction mémoire (Fig. I-1-b). Ces variables ( $X_1, X_2, \dots, X_p$ ) sont appelées variables internes ou variables secondaires. Les valeurs des variables internes d'un système évoluent au fil du temps, en fonction des changements sur les entrées et des valeurs des sorties.

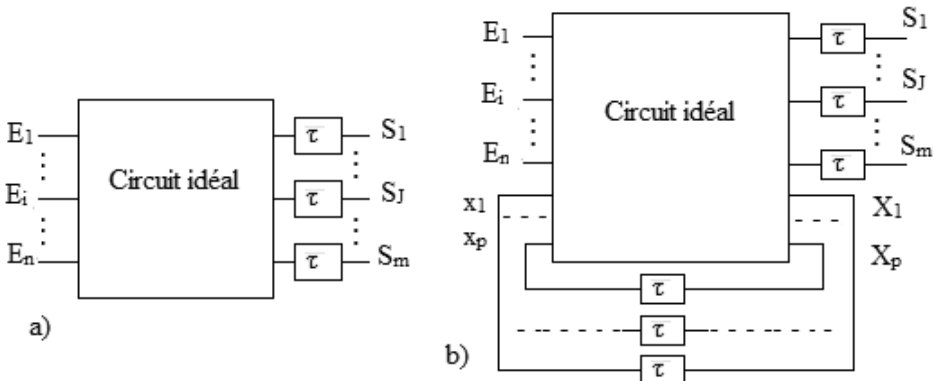


FIG. I-1 a) Circuit combinatoire, b) Circuit séquentiel

Des exemples simples permettent de mieux comprendre le fonctionnement de ces circuits.

## Exemples de circuits séquentiels

### Exemple 1 - Addition de deux nombres

Considérons l'addition de deux nombres  $A$  et  $B$  que nous supposons de 4 bits. Ces nombres apparaissent bit par bit en commençant par le bit de poids faible à l'entrée de l'additionneur représenté à la figure I-2-a.

La somme de  $A_0$  et  $B_0$  donne un résultat partiel  $S_0$  et une retenue éventuelle  $R_0$ , qui est utilisée avec les bits suivants. On forme alors la somme de  $A_1$  et  $B_1$  pour obtenir une somme partiel  $S_1$  et une retenue  $R_1$  et ainsi de suite. Un signal d'horloge  $H$  contrôle la succession des opérations. On obtient alors le schéma de principe représenté à la figure I-2-b.

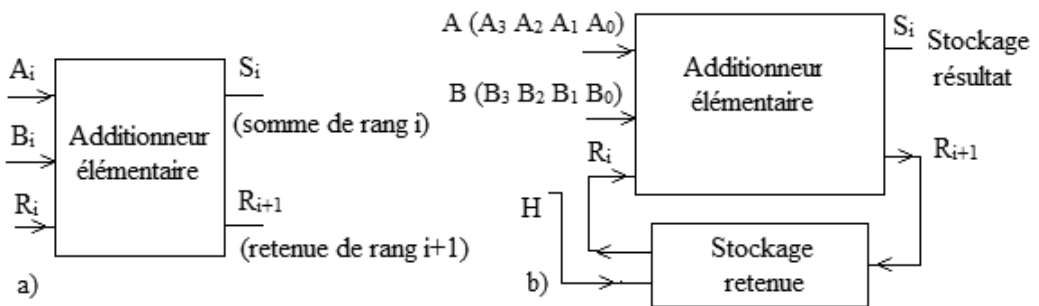


FIG. I-2 Additionneur 4 bits

### Exemple 2 : Commande d'un monte-charge

On considère un monte-charge effectuant la liaison entre deux niveaux d'un bâtiment. Le moteur entraînant ce monte-charge a deux sens de marche : CM (pour monter) et CD (pour descendre). La plate-forme du monte-charge comporte deux boutons poussoir d'appel ( $a_1$  et  $a_2$ ) respectivement aux niveaux 1 et 2 (Fig. I-3-a). Les détecteurs de position au niveau 1 et 2 ne sont pas représentés sur la figure. Le schéma simplifié (Fig. I-3-b) montre que la commande  $C$  du moteur dépend non seulement de l'état des entrées  $a_1$  et  $a_2$  mais aussi de l'état de la sortie (position de la cabine).

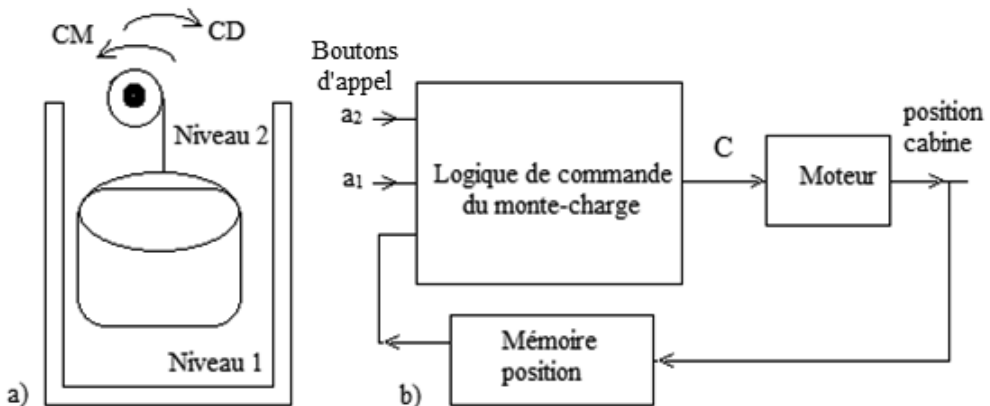


FIG. I-3 Monte-charge

## I.2 Différence entre système synchrone et asynchrone

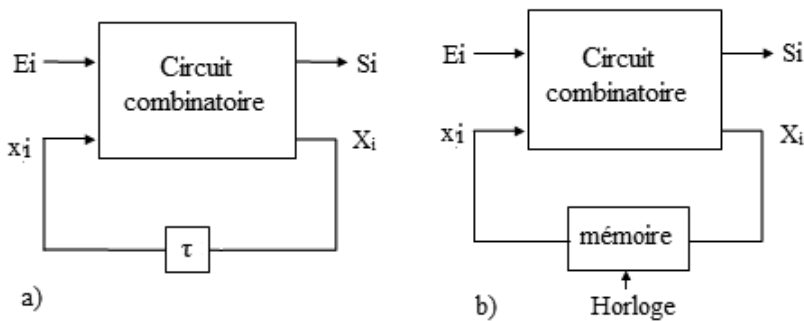
Les systèmes séquentiels peuvent être différenciés en fonction de leur mode de fonctionnement qui peut être synchrone ou asynchrone.

Dans un système asynchrone, l'état des sorties réagit immédiatement au changement de la configuration des variables d'entrée (avec un certain retard propre aux opérateurs).

Dans un système synchrone, la configuration des variables d'entrée n'est effective que lorsqu'un signal de commande appelé (horloge) devient actif.

Dans le mode asynchrone, la fonction de mémorisation est réalisée par de simples boucles de rétroaction. L'évolution des états ne dépend donc que des modifications intervenant sur les entrées  $E_i$  de la machine. Par contre, les systèmes synchrones sont construits à partir des circuits élémentaires tels que les bascules synchrones étudiées au chapitre suivant.

Ces systèmes séquentiels peuvent donc être représentés par deux modèles différents (Fig.I.4).



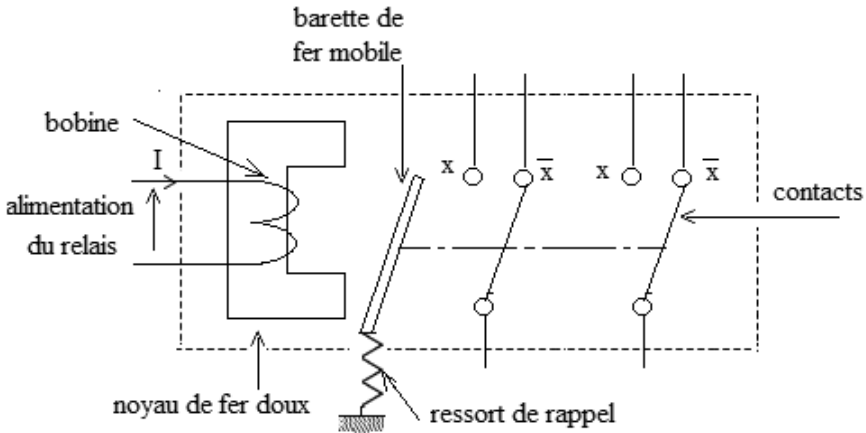
*Fig. I-4* Système séquentiel : a) asynchrone, b) synchrone

Pour mémoriser une information, plusieurs technologies peuvent être employées : électrique (exemple de relais électromagnétique), électronique (exemple de bascule). Nous donnons l'exemple d'une mémoire à relais qui a l'avantage d'être simple, son fonctionnement mécanique est facilement visualisable, d'où son intérêt pédagogique. L'inconvénient est son encombrement, sa consommation et son temps de réponse plus long. Les mémoires électroniques font l'objet des chapitres ultérieurs.

### Mémoire électromagnétique

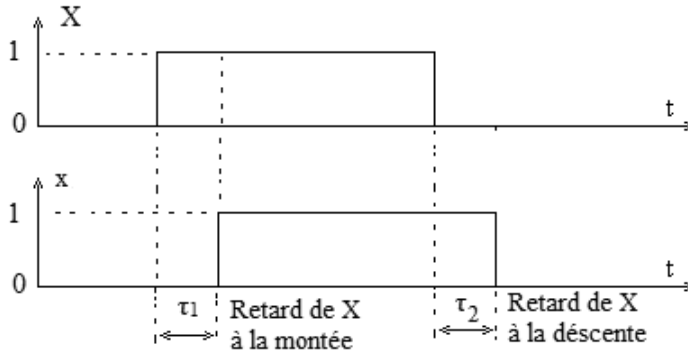
Une mémoire électromagnétique (relais) est constituée d'un électro-aimant et des contacts électriques. La bobine (X) commande la fermeture des contacts  $x$  et l'ouverture des contacts  $\bar{x}$  (Fig. I-5).

Lorsque la bobine du relais X est alimentée ; le relais s'enclenche et ferme simultanément les contacts  $x$  et ouvre les contacts  $\bar{x}$ . Inversement, si la bobine du relais X n'est pas alimentée les contacts  $\bar{x}$  se ferment et les contacts  $x$  s'ouvrent.



*Fig. I-5 Relais électromagnétique*

Le déplacement de l'armature n'est pas instantané, aussi la fermeture et l'ouverture d'un contact s'effectue-t-elle avec un certain retard  $\tau$  par rapport à l'établissement du courant  $I$  parcourant la bobine ( $\tau \neq \tau_1 \neq \tau_2$ ) (Fig. I-6). En effet, il existe un temps  $\tau_1$  pendant lequel la bobine du relais  $X$  est alimentée par un courant alors que son contact, ouvert au repos n'est pas encore fermé. Il existe également un retard  $\tau_2$  lorsque le contact retombe.



*Fig. I-6 Chronogramme du relais*

### Exemple de ce type de mémoire

Un moteur électrique, commandé par deux boutons poussoirs  $m$  (marche) et  $a$  (arrêt) fonctionne selon les états successifs suivants :

- 1- Au repos,  $m$  et  $a$ , non actionnés,
- 2- On appui sur  $m$  seul, le moteur tourne,
- 3- On relâche  $m$ , le moteur continue de tourner,
- 4- On appui sur  $a$  seul, le moteur s'arrête,
- 5- On relâche  $a$ , le moteur reste arrêté.

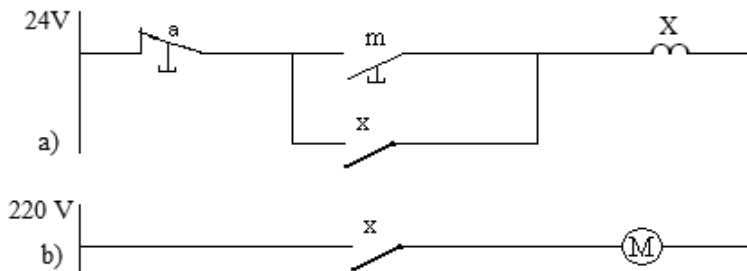
La variable de sortie  $M$  (moteur) est fonction de deux variables d'entrées,  $m$  et  $a$ . Les différents états de ces variables sont représentés par le tableau I-1.

état n°	m	a	M
1	0	0	0
2	1	0	1
3	0	0	1
4	0	1	0

$m = 0, a = 0$

**Tableau I-1** Table de fonctionnement

A La même combinaison des variables d’entrées ( $m = 0$  et  $a = 0$ , cas des lignes 1 et 3) correspond des sorties différentes. La méthode de logique combinatoire ne peut donc pas être appliquée pour résoudre le problème. Il faut introduire d’autres variables appelées variables secondaires (X). Ces variables sont elles-mêmes fonction de l’état du système. Le schéma électrique est donné à la figure 1-7. Le circuit de commande et le circuit de puissance sont représentés séparément, car le premier est alimenté par des courants faibles, tandis que le second est alimenté par des courants forts. La solution complète est détaillée au chapitre V.



**FIG. I-7** a) Circuit de commande, b) Circuit de puissance

### 1.3 Etats d’un système séquentiel

L’état d’un système est défini par les valeurs prises à un instant donné par les variables d’entrées et celles des variables internes.

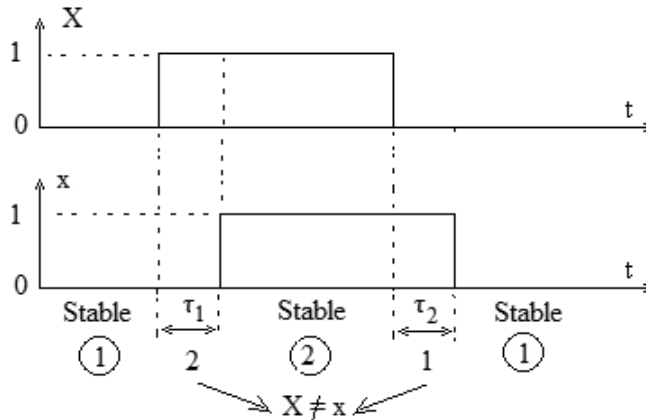
#### Etat stable

L’état stable est l’état pour lequel les sorties du système restent inchangées, les combinaisons des entrées étant fixes. Dans le cas d’un relais, c’est l’état pour lequel la bobine X est dans le même état que son contact x.

#### Etat transitoire

L’état transitoire (ou instable) est l’état intermédiaire entre deux états stables successifs.

Les états stables et transitoires sont illustrés sur la figure suivante :



*Fig. I-8 Chronogramme du relais*

### Notation

Par convention, Les états stables sont entourés par un cercle ou des parenthèses et les états transitoires sont non entourés.

L'introduction de la variable secondaire X (Sortie) et son contact x (entrée) dans le tableau I-1 permet de réécrire la table de fonctionnement comme le montre le tableau I-2.

Etat n°	m	a	x	X	M
①	0	0	0	0	0
②	1	0	1	1	1
③	0	0	1	1	1
④	0	1	0	0	0

*Tableau I-2 Table de fonctionnement*

## 1.4 Modèle des systèmes séquentiels synchrones

Suivant la façon dont les sorties dépendent des états et des commandes, les systèmes séquentiels sont classés en deux catégories :

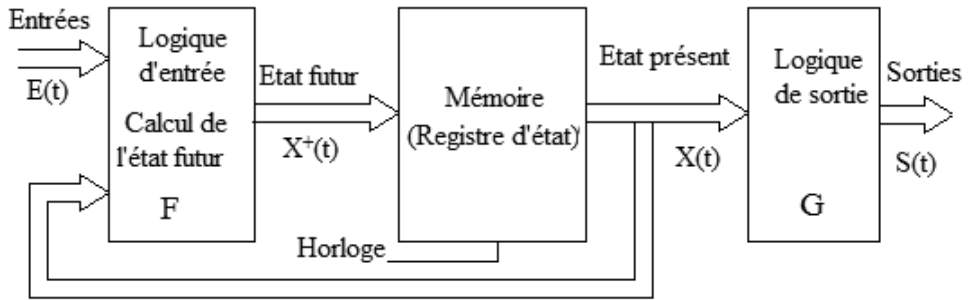
- **La machine de Moore** dans laquelle les sorties principales à un instant donné ( $S(t)$ ) ne sont fonction que des variables internes ( $X(t)$ ). Les états internes sont eux-mêmes fonction des entrées principales ( $E(t)$ ), dont l'une d'elles au moins est le signal d'horloge ( $H(t)$ ).

$$X^+(t) = F(E(t), X(t))$$

$$S(t) = G(X(t))$$

$X^+$  représente la valeur de X juste après l'instant t considéré

F et G sont des fonctions combinatoires

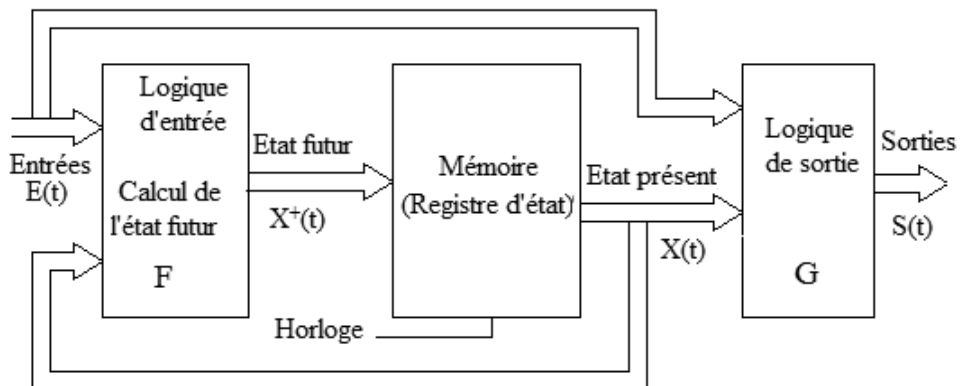


*Fig. I-9 Machine de Moore*

- **La machine de Mealy** dans laquelle les sorties principales du système ( $S(t)$ ) sont fonction des variables principales (entrées  $E(t)$ ) et des variables internes (sorties du registre d'état  $X(t)$ ) :

$$X^+(t) = F(E(t), X(t))$$

$$S(t) = G(E(t), X(t))$$



*Fig. I-10 Machine de Mealy*

## 2. MODES DE REPRESENTATION DES SYSTEMES SEQUENTIELS

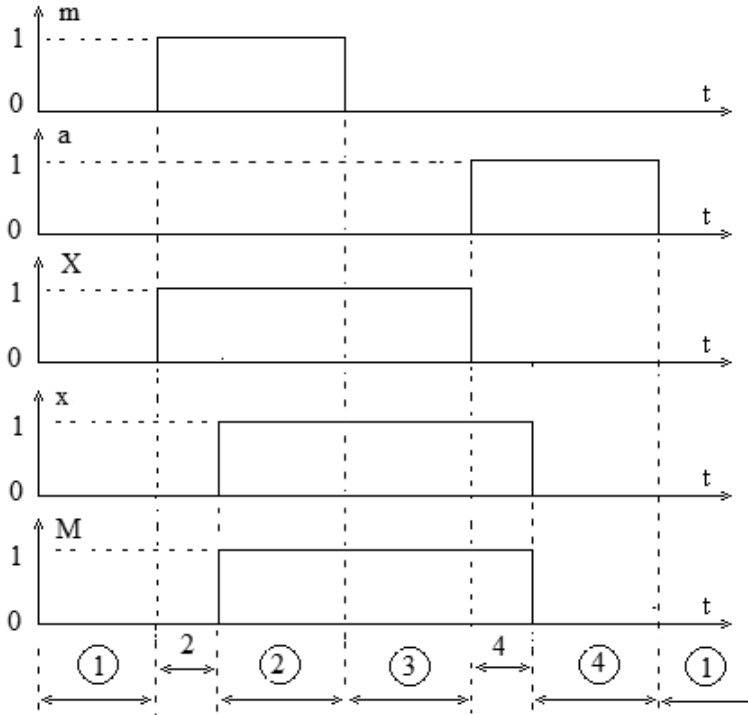
Le cahier des charges est constitué d'une suite de phrases décrivant le fonctionnement désiré du système. C'est la première étape de la conception d'un système. Afin d'analyser et de valider le cahier des charges, on le traduira en un formalisme qui ne permet aucune erreur d'interprétation. On parlera aussi de modélisation. Les modèles obtenus pourront être utilisés aussi pour la synthèse (élaboration matérielle de la commande). Il en existe plusieurs pour décrire un système séquentiel :

- chronogramme (diagramme des temps)
- tableaux d'état
- graphe d'état

Il existe d'autres représentations possibles tels que les réseaux de Pétri et le GRAFCET. Ces représentations sont généralement associées à un type particulier de machine qu'on appelle des automates programmables.

## 2.1 Chronogramme

Le cahier des charges d'un système définit une relation entre ses états d'entrée et ses états de sortie. Le chronogramme est une méthode graphique qui représente l'évolution au cours du temps des entrées/sorties du système. A partir de La table de fonctionnement (Tableau I-2) où chaque combinaison des entrées détermine un état stable des sorties, nous avons représenté l'évolution de  $m$ ,  $a$ ,  $x$ ,  $X$  et  $M$  par le chronogramme de la figure I-11.



*Fig. I-11 Chronogramme*

Le chronogramme présente l'avantage d'être très facile à écrire et à comprendre puisque l'on s'intéresse ici uniquement à la succession des événements, mais ses limites sont vite atteintes dès que le nombre de variables (E/S) augmente (difficultés d'analyse précise et risque d'aléas).

Ce mode de représentation n'est pas synthétique. L'état initial est choisi arbitrairement. Le chronogramme servira plutôt pour représenter un exemple concret de fonctionnement partiel du système.

## 2.2 Table d'états et Graphe d'états

### a) Table d'états

La table d'états (ou des transitions) contient la description complète du fonctionnement d'une machine séquentielle. Elle permet de représenter dans un tableau les transitions qui existent entre les différents états en fonction des entrées.

Soient  $X = \{X_1, \dots, X_i, \dots\}$ ,  $E = \{E_1, \dots, E_j, \dots\}$ ,  $S = g(X, E)$ , respectivement le vecteur d'état, le vecteur d'entrée et le vecteur de sortie d'un système séquentiel, la table associée à ce