

# Circuits logiques combinatoires et séquentiels

---

Guy Bégin

16 novembre 2022

# Logique programmable

---

# Objectifs

- Être familier avec les différents types de composants logiques programmables
- Pouvoir identifier les avantages et limitations des différents types
- Comprendre le fonctionnement d'une matrice logique programmable
- Comprendre le fonctionnement d'un composant logique à matrice programmable
- Comprendre le fonctionnement d'un circuit séquentiel programmable
- Être familier avec le concept de bloc logique programmable
- Comprendre l'organisation d'une cellule logique programmable et apprécier sa flexibilité



# Dispositifs programmables

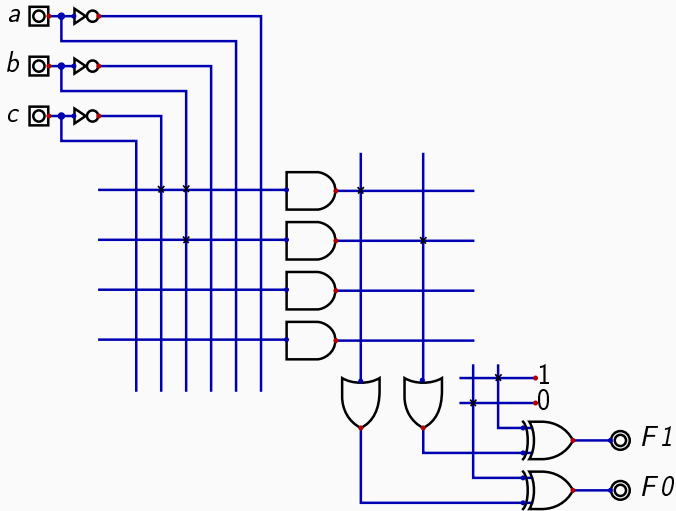
- On a vu qu'une mémoire ROM est un dispositif logique programmable qui, grâce à la matrice d'interconnexion entre son décodeur (qui génère tous les minterms) et les portes OU de sortie, permet de réaliser des fonctions logiques arbitraires.
- D'autres composants utilisent à divers degrés cette approche pour offrir des possibilités de configuration flexibles.
- Il existe une grande variété de dispositifs programmables, des plus simples aux plus complexes.
- De nombreux fabricants offrent des variantes plus ou moins équivalentes dans chacune des gammes de produits.
- Nous allons nous limiter à présenter brièvement les grandes familles typiques, en ordre de complexité croissante.



# Matrice logique programmable (PLA)

- Une **matrice logique programmable** (en anglais, *Programmable Logic Array*, (PLA)) est un dispositif spécifiquement conçu pour la réalisation de fonctions combinatoires arbitraires.
- Elle fonctionne selon une approche qui s'apparente à l'utilisation d'une mémoire morte pour réaliser une fonction logique arbitraire.
- La figure 1 montre une matrice permettant de réaliser deux fonctions pouvant comporter jusqu'à quatre termes produits de trois variables.

# Matrice logique programmable



**Figure 1** – Matrice logique programmable

## Matrice logique programmable (PLA) ... 2

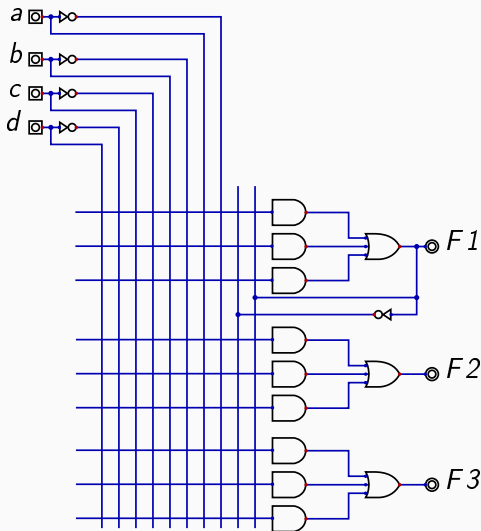
- Puisque le nombre de termes produits est limité, il n'est généralement pas possible de se baser directement sur les minterms des fonctions pour l'implémentation.
- On doit donc simplifier les fonctions avant l'implémentation.
- Un même terme produit peut contribuer à plus d'une fonction.
- La programmation des portes XOR de sortie permet de choisir la fonction directe ou son complément.
- Les PLAs offerts sur le marché proposent des configurations avec des plus grands nombres d'entrées, de termes et de sorties, typiquement des dizaines.

# Logique à matrice programmable (PAL)

- Les dispositifs à **logique à matrice programmable** (en anglais, *Programmable Array Logic* (PAL)) sont une autre variante sur ce thème, avec une matrice OU fixe et une matrice ET configurable.
- Ils sont moins flexibles que les PLAs.
- La figure 2 montre un dispositif de logique à matrice programmable à quatre variables d'entrée, permettant de réaliser trois fonctions pouvant comporter jusqu'à trois minterms.



# Logique à matrice programmable

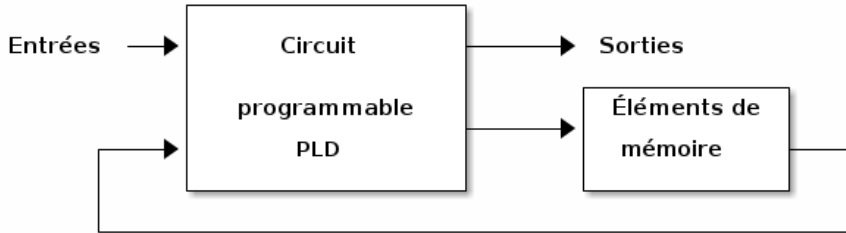


**Figure 2** – Logique à matrice programmable

- Les sorties (directes et complémentée pour la première fonction) peuvent être acheminées aux entrées des autres fonctions.
- Encore ici, le nombre de termes produits est limité, et on doit simplifier les fonctions avant l'implémentation.
- Cependant, puisqu'il n'y a pas de matrice OU, il n'est pas possible de partager un terme produit entre deux fonctions.
- Les PALs offerts sur le marché proposent des configurations avec des plus grands nombres d'entrées d'entrées, de termes et de sorties, typiquement des dizaines.

- En combinant un dispositif logique programmable (en anglais, *Programmable Logic Device*, (PLD)) avec un certain nombre de bascules, il est possible de proposer un circuit programmable séquentiel.
- La configuration générale est telle qu'illustré sur la figure 3.

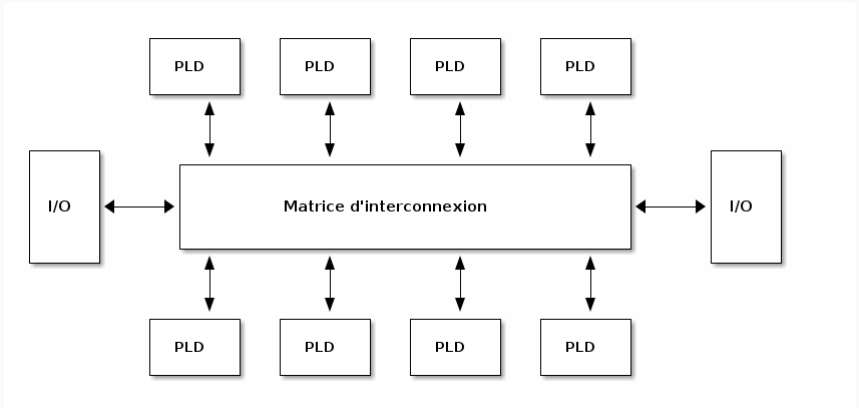
# Modèle de circuit séquentiel programmable



**Figure 3** – Modèle de circuit séquentiel programmable

- Plusieurs fabricants proposent une variété de dispositifs de ce type, avec diverses options de configuration, d'interconnexion, etc.
- On offre par exemple des dispositifs complexes qui combinent plusieurs cellules programmables sur un même circuit intégré, reliables au moyen d'un réseau d'interconnexion configurable.
- La disposition générale de ce genre de dispositif complexe est présentée à la figure 4.

# Modèle de circuit séquentiel programmable complexe



**Figure 4** – Modèle de circuit séquentiel programmable complexe

# Circuits intégrés programmables

- La version la plus sophistiquée des circuits logiques programmables est sans contredit le circuit intégré programmable (en anglais, *Field Programmable gate array*, (FPGA)).
- Un FPGA est constitué d'une matrice de blocs polyvalents appelés **blocs logiques programmables** qui permettent, selon leur configuration, de réaliser n'importe quelle fonction logique.
- Un bloc logique est typiquement constitué d'une ou de quelques **cellules logiques** élémentaires.

La figure 5 montre une version simplifiée d'une cellule logique comportant :

- un tableau de correspondance (LUT) à quatre entrées
- un additionneur complet
- une cellule de mémoire



# Cellule logique

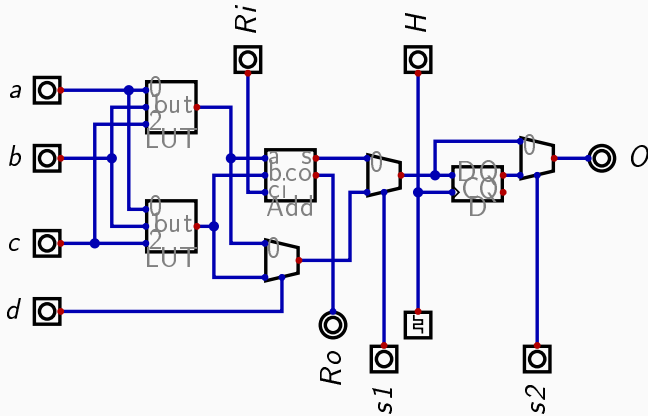


Figure 5 – Cellule logique

- Le tableau de correspondance (LUT) à quatre entrées  $a, b, c, d$  est fractionné en deux LUT de trois entrées, combinés par un multiplexeur contrôlé par l'entrée  $d$ .
- Pour des opérations arithmétiques, les sorties des LUTs à trois entrées sont additionnées avec une retenue externe  $R_i$ .
- Le multiplexeur du centre, commandé par le signal de sélection  $S_1$ , sélectionne le résultat d'addition ou la fonction réalisée par la LUT à 4 entrées.
- Selon le signal de sélection  $S_2$ , la valeur obtenue peut être acheminée directement en sortie de la cellule (cellule en mode combinatoire) ou être stockée dans la bascule D (cellule en mode séquentiel).

Dans d'autres configuration typiques de cellules, l'additionneur complet est remplacé par un tableau de correspondance.

En plus de la matrice de blocs logiques, un circuit intégré programmable comporte également :

- des composants consacrés aux entrées/sorties,
- des lignes d'interconnexion programmables pour relier les blocs entre eux,
- des lignes de distribution de signaux d'horloge,
- et possiblement de la mémoire RAM supplémentaire.

# Tableaux de correspondance LUT

- Les LUTs font appel à de la mémoire RAM pour implémenter les tableaux de vérité, ce qui permet une configuration dynamique qui doit être chargée lors de la mise en route du circuit programmable.
- Un autre avantage est que ces mémoires permettent des vitesses de fonctionnement nettement plus rapides que si on utilisait des mémoires ROM.

- Les données de configuration peuvent être stockées dans de la mémoire *flash* externe par exemple.
- Le circuit FPGA peut donc être reconfiguré et adapté à différentes fonctions, simplement en écrivant de nouvelles données dans la mémoire externe qui contient ses informations de configuration.
- La configuration et la programmation d'un circuit programmable FPGA se fait au moyen d'outils de synthèse spécialisés, souvent en fonction d'une spécification au moyen d'un langage descriptif de matériel (en anglais, *Hardware Description Language*, (HDL)).