

Introduction à l'Electronique Numérique

Jean-Christophe Le Lann

Cours 1A

30 septembre 2026



2– Logique Séquentielle

Rappel : La logique combinatoire

Les sorties ne dépendent que des entrées présentes. Mais en pratique... le temps existe !

Problématiques physiques :

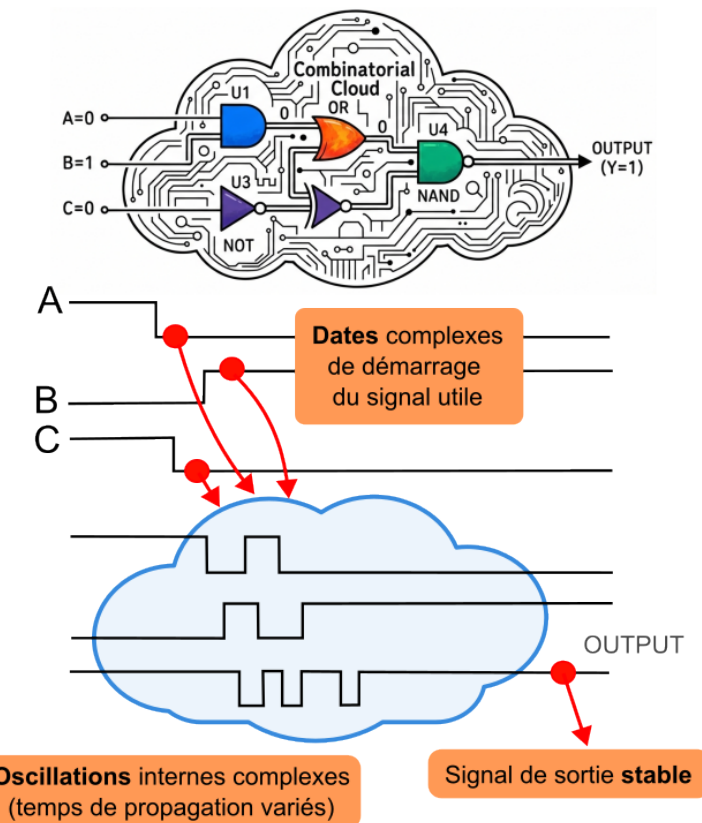
- **Délais de propagation** (τ_{pd}) : Les portes mettent du temps à calculer (durée non-déterministe).
- **Aléas (hazards)** : Apparition de transitoires parasites lors de changements simultanés.

Conséquences en cascade :

- Impossible de prédire exactement à *partir de* **quand** un signal est stable.
- **Composer** de grands blocs combinatoires mène à un chaos temporel ingérable.

Constat

La complexité des systèmes explose et la fiabilité s'effondre.



L'idée directrice

Plutôt que de subir les délais continus, on segmente le temps à l'aide d'un **métronome commun, unique : l'horloge**. Elle est suffisamment lente pour que tous les signaux se stabilisent avant leur échantillonnage.

- **Le quantum de temps** : Le cycle d'horloge (T) devient l'unique unité de référence.
- **Séparation des rôles** :
 - ▶ Le *combinatoire* calcule la nouvelle valeur (pendant que le signal se stabilise).
 - ▶ La *bascule D* mémorise cette valeur au moment précis du front d'horloge (montant pour nous).
- **Bénéfice majeur** : On s'affranchit des variations technologiques et des délais intermédiaires ; on ne raisonne plus en nanosecondes, mais en **coups d'horloge**.

Conclusion

La *bascule D* est la brique de base qui permet de synchroniser le monde et de passer du « temps continu incertain » au « temps discret maîtrisé ».

Bascule D : symbole, table de vérité et chronogramme

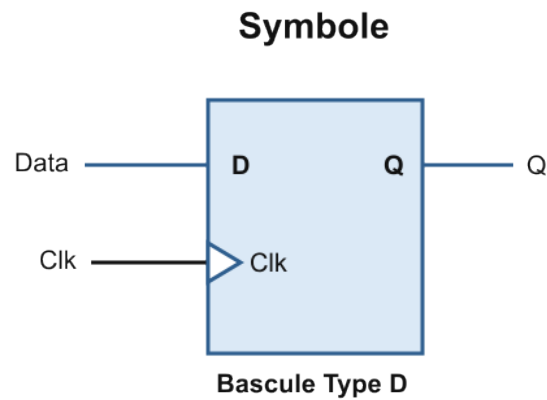


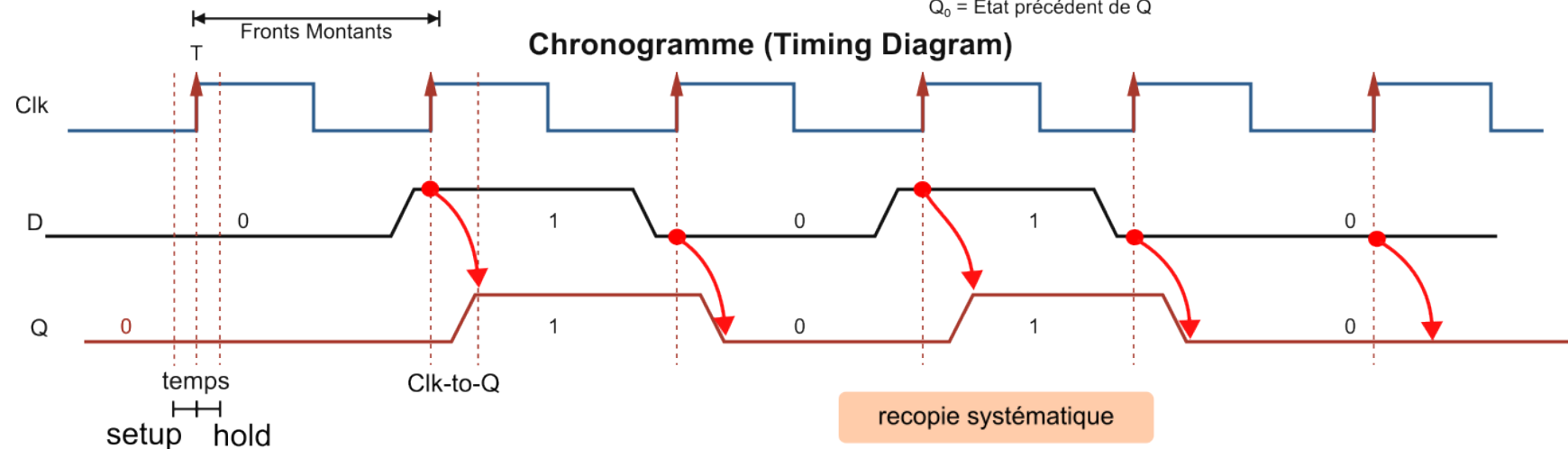
Table de Vérité (Front Montant)

Entrées (Inputs)		Sortie (Output)
Clk	D	Q*
0	X	Q ₀
1	X	Q ₀
Clk ↑		
↑	0	0
↑	1	1

↑ = Front Montant

X = État Indifférent

Q₀ = État précédent de Q



La bascule D : un décalage d'un cycle d'horloge

Ce qu'il faut retenir

Une bascule D recopie l'entrée D sur la sortie Q **au rythme de l'horloge**.

$$Q_{n+1} = D_n$$

Autrement dit : Q est la version de D , retardée d'un cycle.

Vue microscopique (complexe)

- chronogramme détaillé.
- temps de *setup* et de *hold*
- recopie exacte après le délai $t_{\text{Clk} \rightarrow Q}$
- phénomènes transitoires

Vue macroscopique (simple)

- on oublie les détails temporels fins
- on attend que tous les signaux soient stables : $T_{\text{clock}} \gg \max(\{T_{\text{crit}}(f)\}, \forall f \in \mathbb{O})$
- on ne garde que : **un coup d'horloge = un pas de retard**

On bascule dans l'Informatique !

La bascule D transforme un signal continu en **suite numérique**.

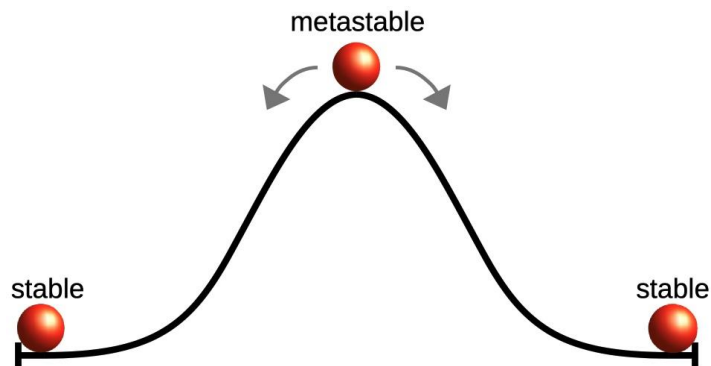
Bascule D : précautions d'utilisation

- 1 Le signal D doit être stable avant et après le front montant.

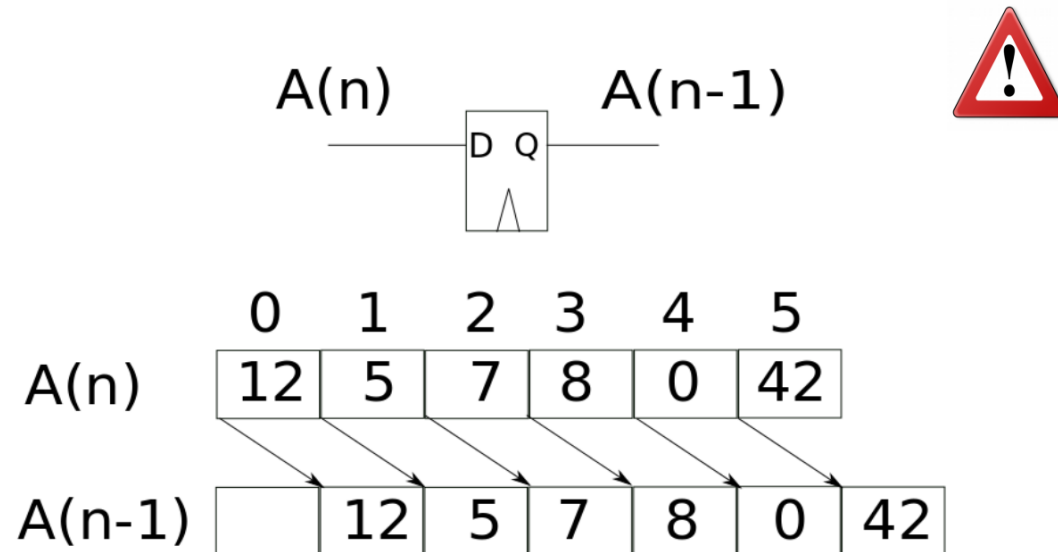
- ▶ temps de setup
- ▶ temps de hold

- 2 Sinon : risque de **métastabilité**

- ▶ tension intermédiaire imprévisible
- ▶ ...avant stabilisation aléatoire (0 ou 1)
- ▶ ...au bout d'un délai variable



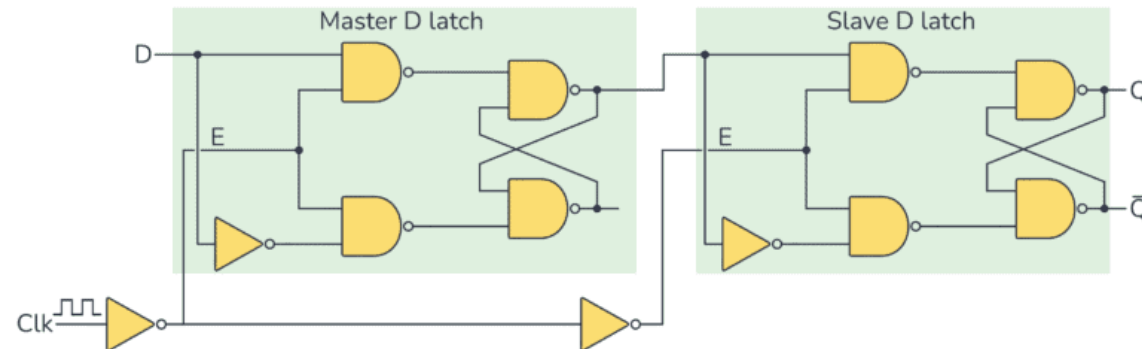
- 3 Le **passé** du signal D se trouve sur la sortie Q



l'indice n'est jamais explicite
dans le circuit : ce sont les ticks d'horloge

Attention : *"Ne pas reproduire à la maison"*

- La règle de conception synchrone **interdit** les **cycles combinatoires**.
 - Il est difficile de savoir si une boucle stabilise ou pas (ici oui).
 - Veiller à ne pas introduire de telles boucles de manière subtile.
 - Ne conservez que la bascule D. Oubliez les autres.



Info

Plusieurs structures internes de bascule D. En CMOS notamment : portes de transmission.

Objectif

Comment mémoriser une même donnée **pendant plusieurs cycles** ?

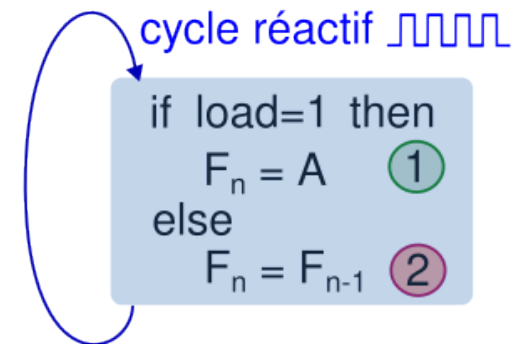
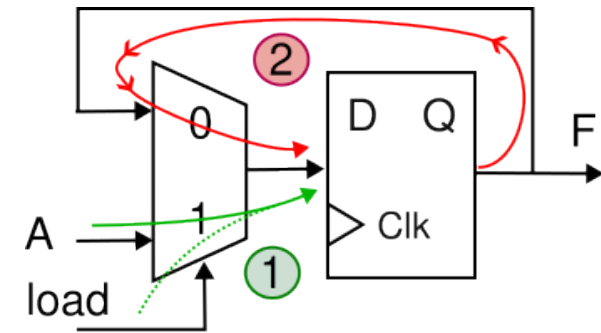
- **Rappel :**

- ▶ la bascule D mémorise son état durant une période d'horloge
- ▶ un nouveau front → échantillonne une nouvelle donnée sur D.

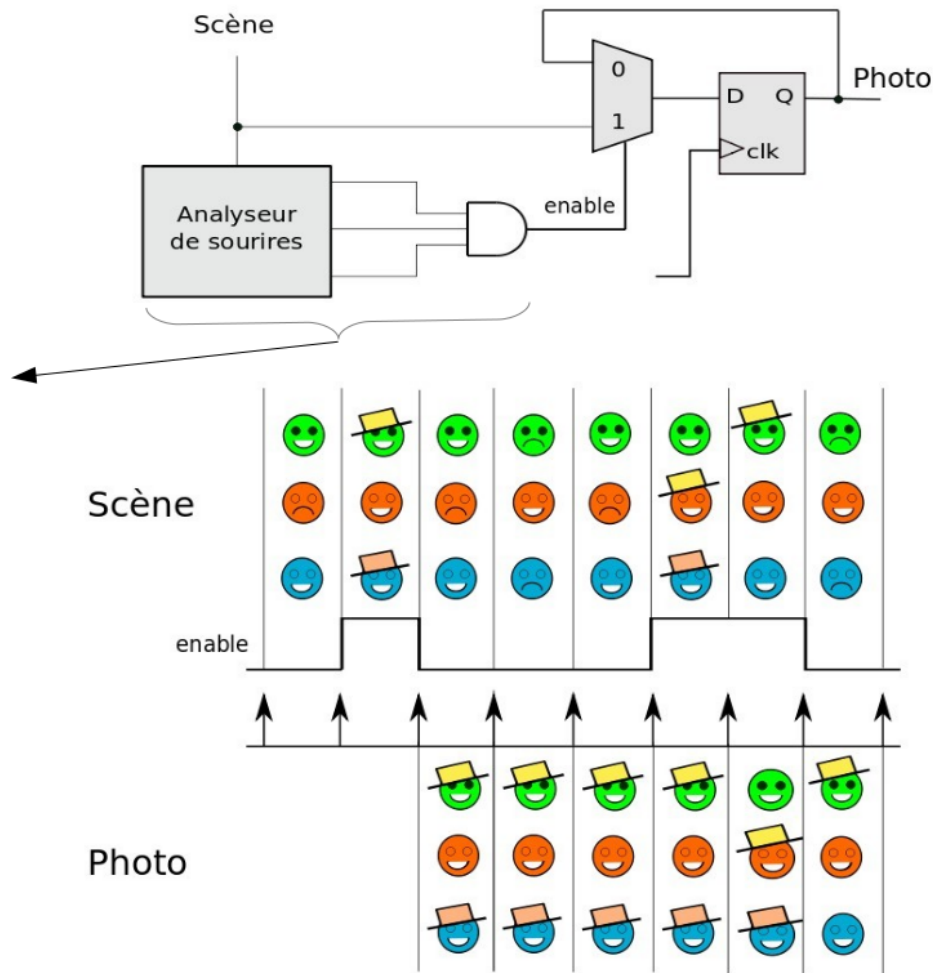
- **Solution :** Recirculation à l'aide d'un multiplexeur^a.

- ① Un signal de contrôle (ici load) accompagne la donnée entrante A.
- ② La bascule D ré-échantillonne la donnée capturée, présente sur F, à chaque cycle.

a. rappel : le multiplexeur est combinatoire



Exemple : analyseur de sourires

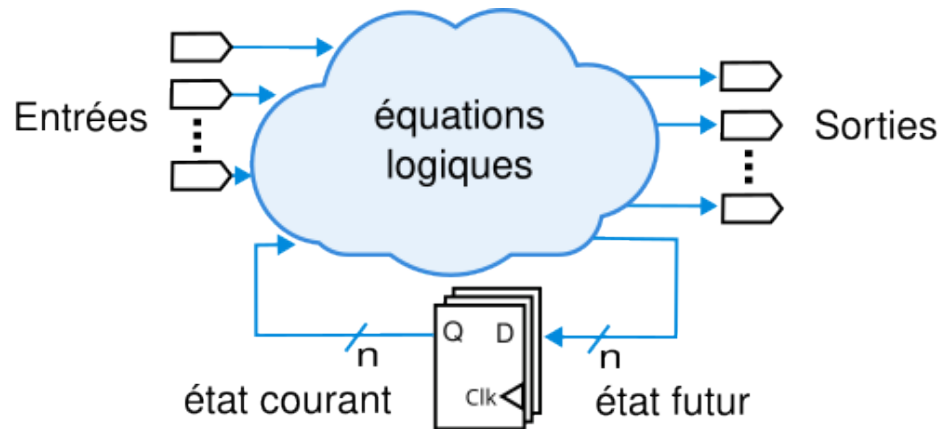


← On suppose que l'analyseur est purement combinatoire....

Apparition d'un schéma générique :

On retient :

- Calculs "verticaux" : combinatoire.
 - Calculs "horizontaux" : séquentiel.
-
- La bascule D permet de passer d'un instant logique à un autre.
 - La bascule D "coupe" des calculs combinatoires.

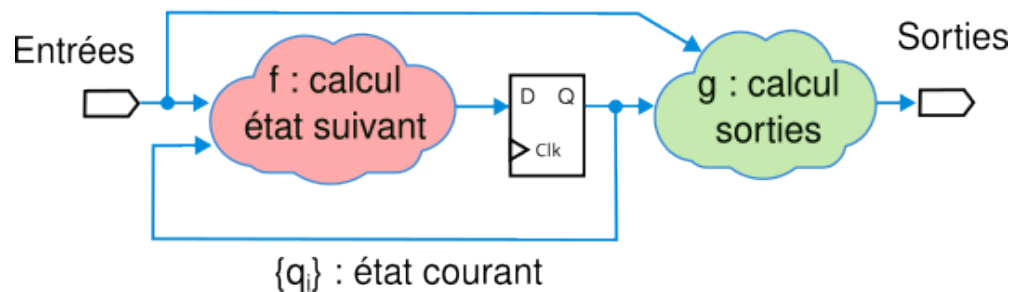


Bascule D : $q(t + 1) = d(t)$

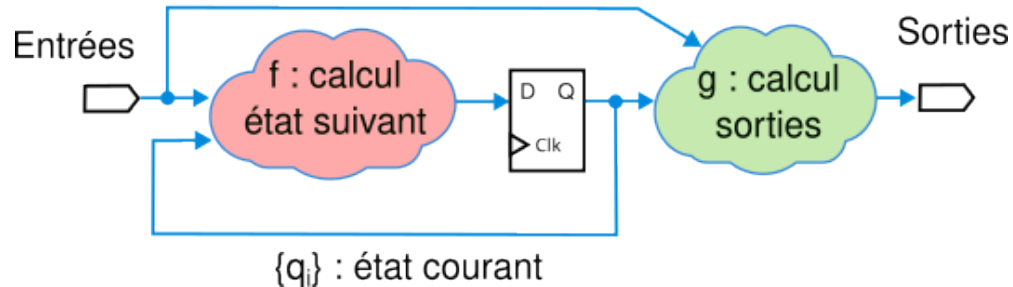
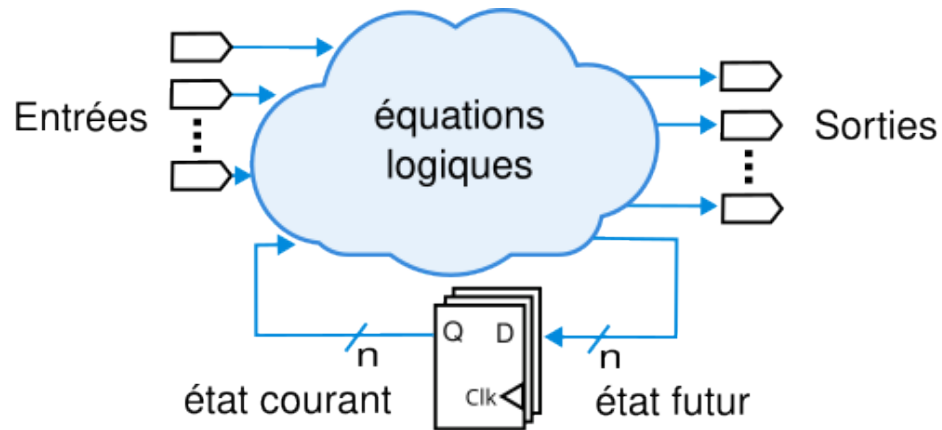
Tout le circuit se ramène à :

$$\begin{cases} q_i(t + 1) = d_i(t) = f_i(e(t), q(t)) & \text{(état suivant)} \\ s_j(t) = g_j(e(t), q_j(t)) & \text{(sorties)} \end{cases}$$

où f_i, g_j sont des équations booléennes.



Horloge implicite : le temps est discret, $t \in \mathbb{N}$.



Horloge implicite : le temps est discret, $t \in \mathbb{N}$.

Analogie avec le monde continu

Monde continu (Physique/Syst. Dyn) :

$$\frac{dQ}{dt} = f(Q, E, t)$$

Monde numérique (Discret) :

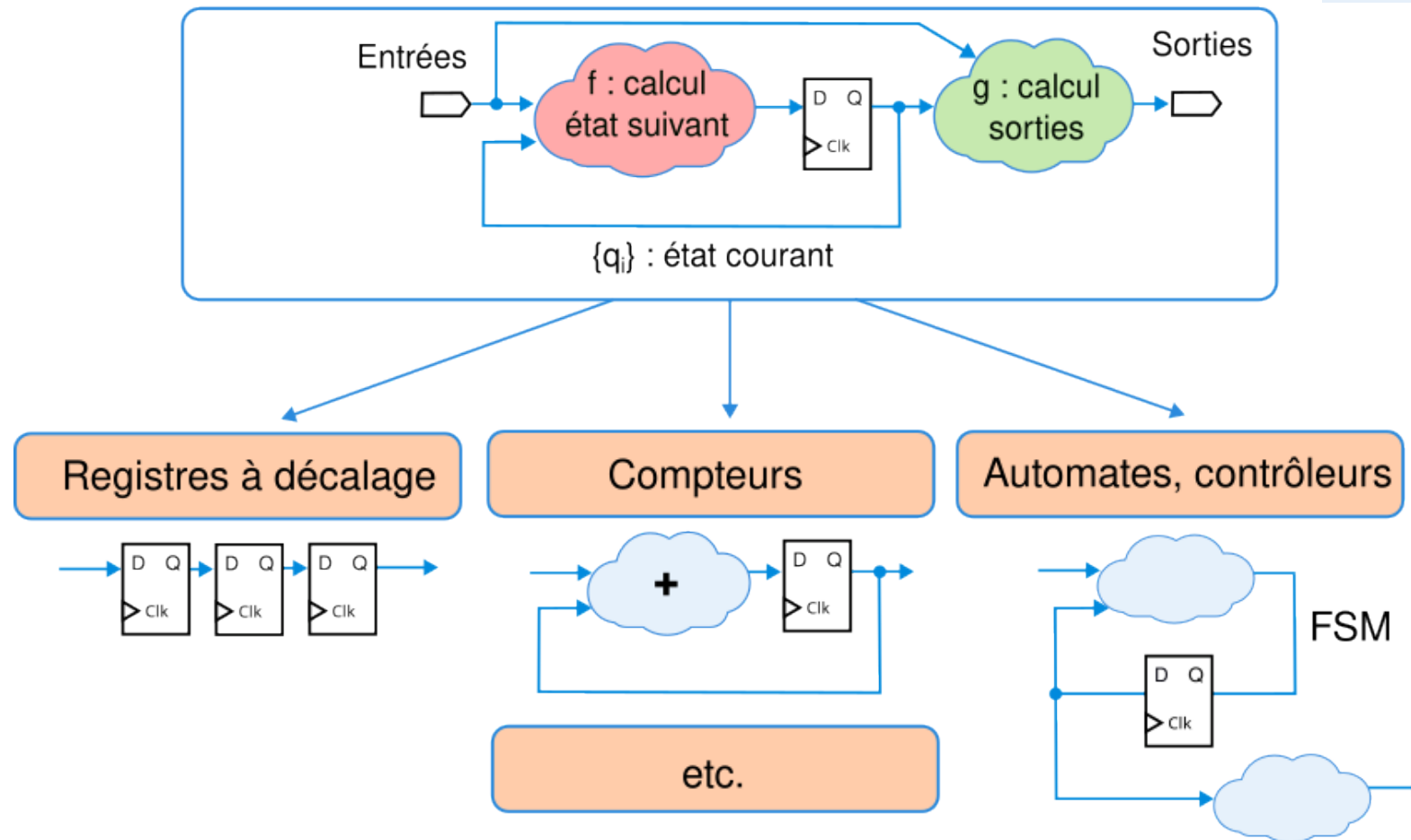
$$Q_{t+1} = \mathcal{F}(Q_t, E_t)$$

L'horloge dicte le pas de temps : $dt \equiv T_{clk}$.

Le caractère « exécutable »

Contrairement aux équations différentielles sur le papier, le silicium **résout et exécute** ces équations en temps réel, front après front.

Systèmes séquentiels : schéma générique et déclinaisons



Conséquence : Tout système dynamique discret, automate ou algorithme peut être **matérialisé et simulé** par un réseau de bascules.