
La logique, des tubes aux transistors

L'évolution réciproque des
technologies et des concepts logiques

François ANCEAU
Prof CNAM émérite
Lip6/CIAN

CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 1

Un apparition progressive....

- ❑ Les montages logiques sont apparus progressivement au cours du XXème siècle
- ❑ D'abord (fin du XIX), avec des montages purement **mécaniques** pour la réalisation des machines mécanographiques et des calculatrices sans vraiment développer de concepts logiques.
- ❑ Ensuite les **relais électromagnétiques** furent utilisés pour la réalisation des centraux téléphoniques automatiques avec le développement de la logique de **niveaux** et de la logique de **conduction**.
- ❑ Les tubes ont été ensuite utilisés (WWII) pour accélérer les opérations pour les RADAR et les calculatrices électroniques avec l'**introduction de la logique évènementielle**
- ❑ L'apparition des transistors industriels (1958) a permis le développement rapide de **Mécanos logiques** et l'émergence de l'informatique.
- ❑ Les circuits intégrés (1965) ont permis la portabilité de ces appareils, ainsi que leur complexification exponentielle jusqu'aux **Mécanos informatiques** puis **systèmes** (SOC)

CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 2

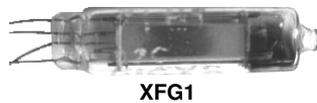
Une évolution très "branchue"

- ❑ La logique mathématique est une **abstraction** de plusieurs phénomènes physiques
- ❑ Nous allons revenir à ses **interprétations** pour en comprendre leurs **limitations** et les **interfaces** entre elles
- ❑ Le développement des circuits logiques électroniques a donné lieu à de nombreuses branches avec des ramifications complexes. Cet exposé ne les citera pas toutes.....
- ❑ Ceux qui se sentiraient frustrés sont invités à proposer des **exposés complémentaires**.....

Les tubes électroniques

Histoire des tubes électroniques

- ❑ Inventés en 1906 par Lee Deforest
- ❑ **Perfectionnés** en taille et en performance jusqu'aux années 195x
- ❑ **Abandonnés** au début des années 196x avec l'arrivée des transistors industriels au silicium.



XFG1



Audion 1906



Tube de puissance
194x - 195x



12AU7
1950



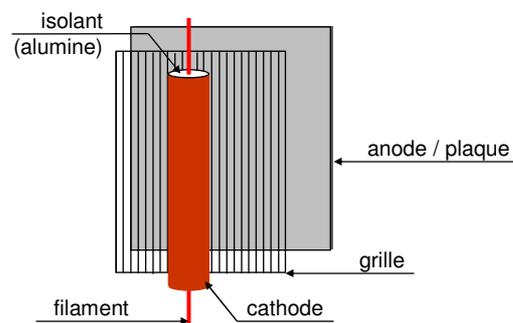
Tube
crayon
1960

CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 5

Anatomie simplifiée d'un tube électronique

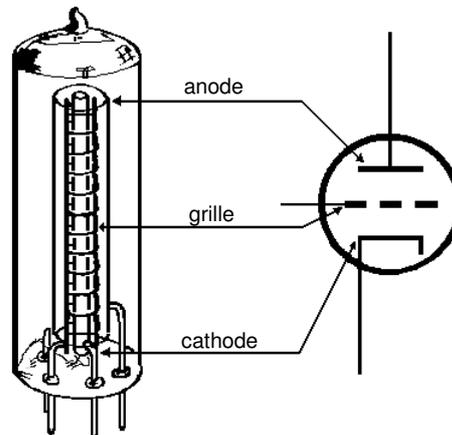
- ❑ La **cathode** est un tube métallique recouvert d'**oxydes** de terres rares émettrices d'électrons à chaud.
- ❑ Elle est portée à environ 500° par un filament isolé.
- ❑ La cathode reçoit un flux d'ions positifs qui l'altèrent relativement rapidement.



CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 6

Anatomie et symbole d'une triode

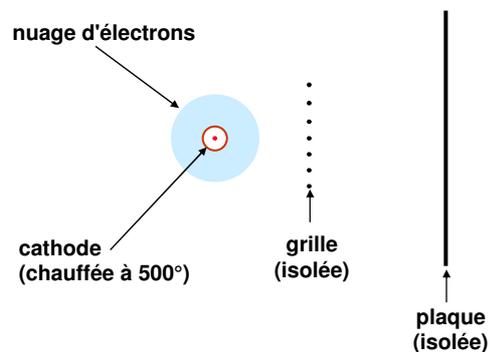


CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 7

Emission d'électrons par la cathode chauffée

- ❑ La cathode est recouverte d'oxydes de terres rares libérant facilement leurs électrons.
- ❑ Le chauffage de la cathode vers 500° provoque l'extraction de certains de ses électrons.
- ❑ Il se forme un nuage d'électrons autour d'elle

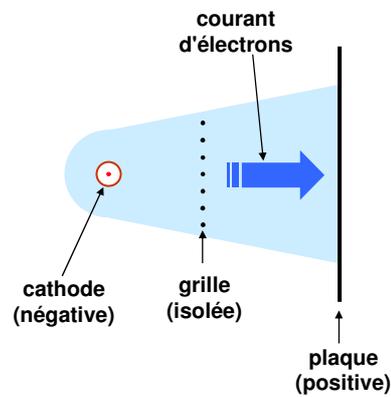


CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 8

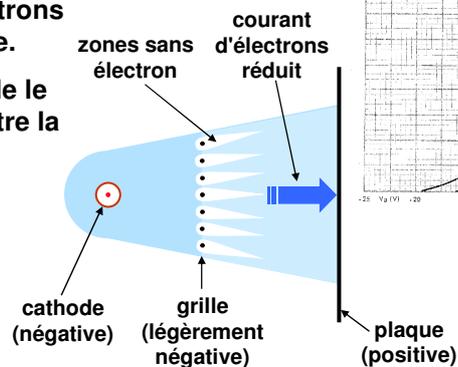
Fonctionnement en diode

- ❑ Si l'anode est portée à un potentiel positif, par rapport à la cathode, cette anode attire les électrons du nuage.
- ❑ Elle les repousse si elle est portée à un potentiel négatif (effet de diode)

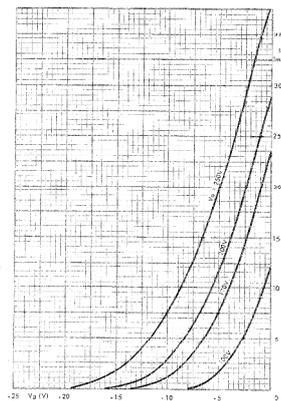


fonctionnement en triode

- ❑ Si la grille est portée à un potentiel négatif, chaque brin crée un zone sans électron autour de lui, ce qui freine le flux d'électrons qui atteignent la plaque.
- ❑ La tension grille module le courant d'électrons entre la cathode et la plaque.

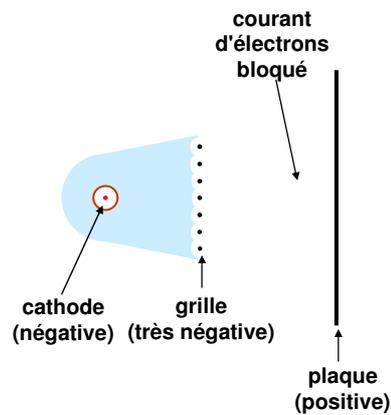


12 AU 7 A
ECC82

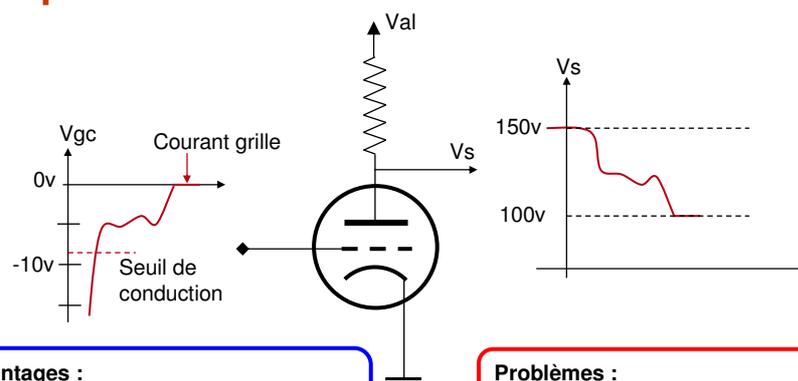


Tube bloqué

- Si le potentiel de la grille est fortement négatif (environ -12v) le courant d'électrons vers l'anode est bloqué.



Amplificateur à tubes



Avantages :

- La grille se comporte comme une diode en entrée pour les potentiels positifs (courant grille)
- Le fonctionnement des tubes est indépendant de la température

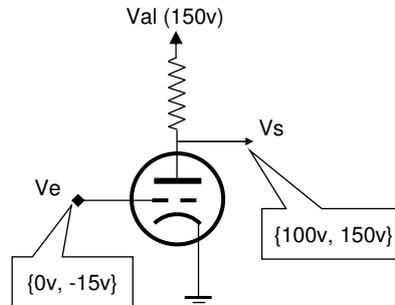
Problèmes :

- La plage d'évolution de la tension de sortie est fortement décalée par rapport à celle d'entrée
- Le seuil de conduction n'est pas net

Logique de niveaux

❑ Il faut impérativement distinguer entre :

- Les niveaux d'entrée (par rapport à la cathode):
 - 0v avec un effet de diode (courant grille) pour $> 0v$
 - -15v avec un effet de seuil (mou) pour $< -15v$
- Les niveaux de sortie :
 - 150v (alimentation)
 - 100v (saturation)



❑ Ces niveaux sont tellement **séparés** que les connexions directes (résistives) sont très difficiles.

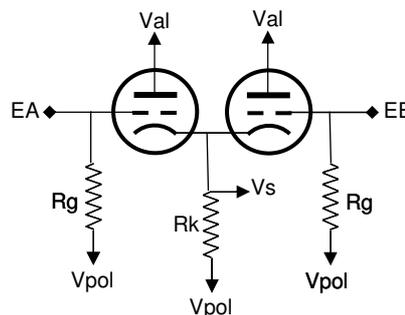
- L'utilisation d'un pont résistif fait **perdre** le gain du tube

Logique de niveau – OU par couplage cathodique

❑ V_s suit la valeur maximale des tensions d'entrée, avec un décalage correspondant à la tension grille-cathode, avec un coefficient dépendant du pont diviseur de sortie.

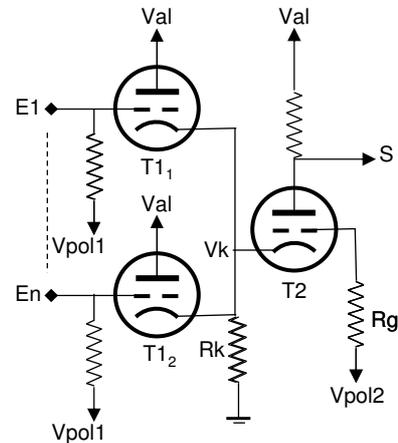
$$V_s = K[\max(EA, EB) - 5]$$

❑ Ce montage réalise le "OU" de deux niveaux de sortie (100-150v) et peut ramener le résultat dans le domaine des tensions d'entrée.



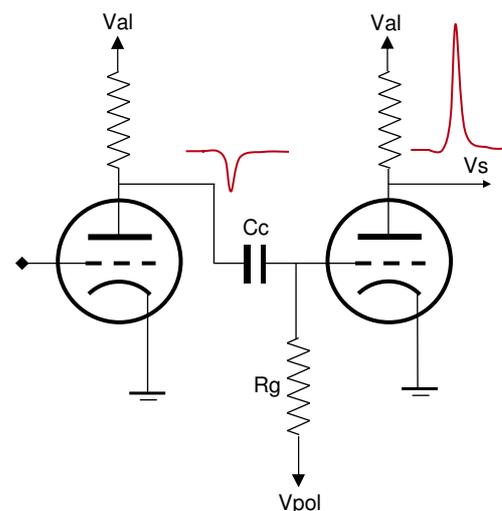
Logique de niveau – NON-OU à couplage cathodique

- ❑ Au départ, les tubes $T1_x$ sont bloqués par une polarisation V_{pol1} adéquate. Le tube T2 conduit à saturation par une polarisation (fixe) V_{pol2} de sa grille à V_k .
- ❑ Le déblocage d'un tube T1 produit une montée de V_k qui bloque T2. La sortie remonte à V_a .



Couplage capacitif

- ❑ La différence entre les niveau d'entrée et de sortie d'un étage à tube nécessitent l'usage d'un moyen de couplage qui ne transmet pas le continu.
- ❑ On utilise une capacité de couplage C_c
- ❑ Les signaux transmis doivent posséder un spectre centré sur les hautes fréquences → par exemple des **impulsions**.
- ❑ Le RC constitué par R_g et C_c peut se comporter comme un différentiateur vis à vis d'un signal amont basé sur des niveaux.

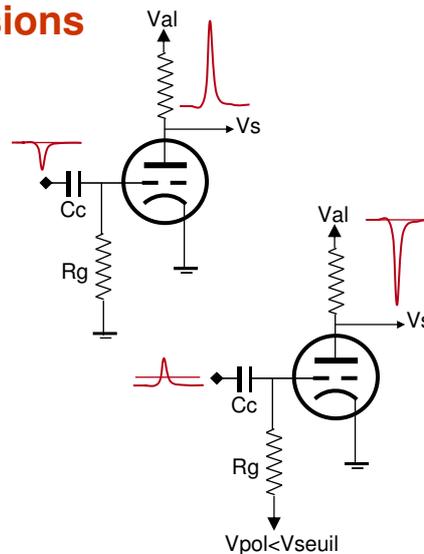


Impulsions positives et négatives

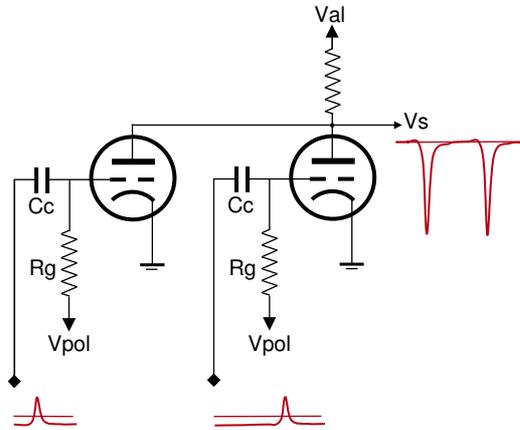
- ❑ Les impulsions positives et négatives correspondent à deux formes possibles des **mêmes évènements** et non à deux valeurs logiques différentes.
- ❑ Les montages à tubes transmettent les impulsions en les changeant de sens.
- ❑ Pour s'y retrouver, les montages à impulsion étaient quelquefois divisés **en couches** dans lesquelles les évènements étaient successivement représentés par des impulsions positives et négatives

Transmission des impulsions

- ❑ La transmission des impulsions négatives se fait par un tube dont la grille est polarisée à 0v, ce qui présente l'avantage d'écrêter tous les parasites positifs (rebonds).
- ❑ La transmission des impulsions positives se fait par un tube dont la grille est polarisée au delà du point de blocage, ce qui introduit un effet de seuil qui masque les petits parasites.



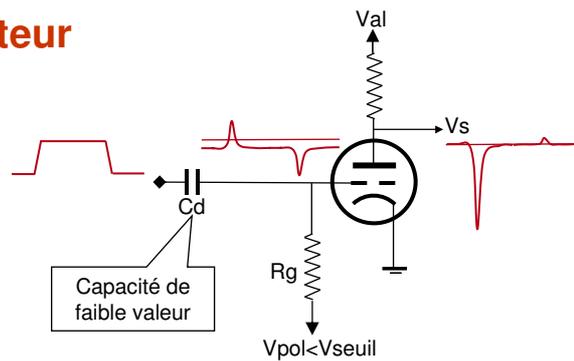
Porte "OU" à impulsions positives



CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 19

Dérivateur



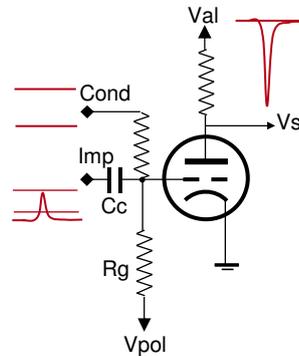
- ❑ La fabrication d'impulsions positives ou négatives se fait à l'aide d'un RC de fréquence élevée.
- ❑ Les impulsions positives ou négatives sont sélectionnées par le choix de la polarisation du tube suivant. Une polarisation de la grille à 0v sélectionne les impulsions négatives.

CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 20

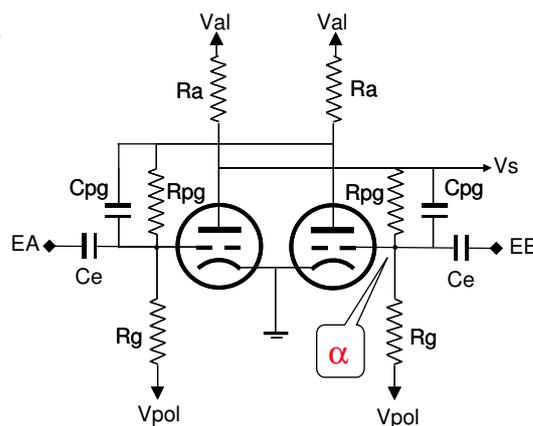
Conditionnement d'une impulsion par un niveau

- L'entrée de conditionnement doit pouvoir polariser le tube à une tension suffisamment négative pour empêcher une impulsion positive de le débloquer.



Les bascules à tubes

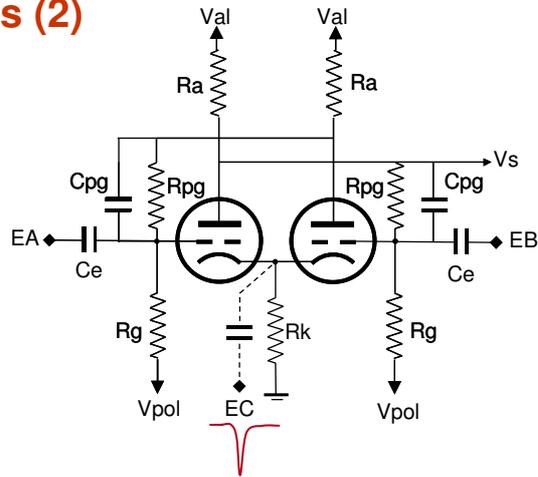
- Première bascule inventée par W. Eccles et F. W. Jordan en 1918
- Les sorties de cette bascule sont des niveaux et ses entrées des impulsions
- Les impulsions d'entrée peuvent avoir des effets opposés suivant leur polarité
- La conception d'une bascule à tube est très difficile et son fonctionnement est souvent délicat.
- L'utilisation dissymétrique d'une bascule provoque une usure dissymétrique de ses tubes qui finit par entraîner des défauts de fonctionnement.



Le basculement est aidé par des capacités Cpg qui court-circuitent les résistances de couplage pour faciliter le passage des transitions.

Les bascules à tubes (2)

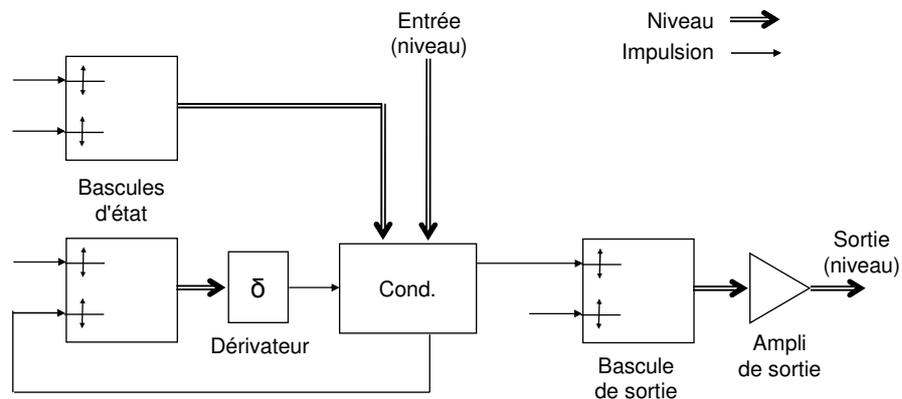
- ❑ Le couplage symétrique et continu entre les deux côtés de la bascule ne peut se faire qu'avec des ponts résistifs qui risquent de diviser l'excursion de sortie au delà du gain du tube.
- ❑ A cause de cette contrainte, l'excursion des bascules n'atteint généralement pas, à la fois, le courant grille et le blocage des tubes.
- ❑ L'attaque commune des cathodes, polarisées par une résistance, peut provoquer l'inversion du contenu de la bascule, donc réaliser un **ou-exclusif** entre le contenu de la bascule et l'impulsion d'entrée. (peu fiable !)



CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 23

Principe de la logique à tubes



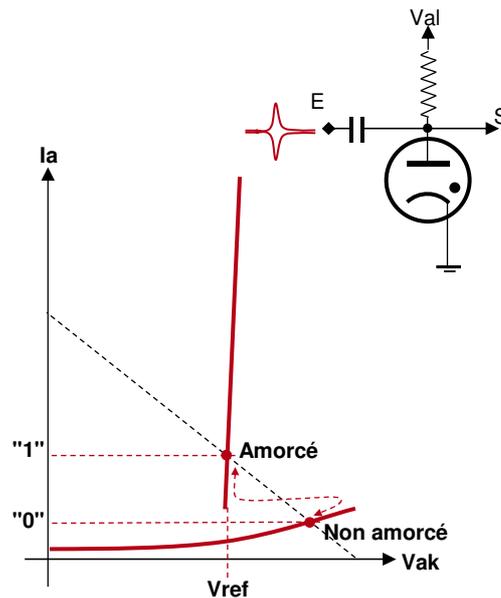
Il s'agit de conditionner des impulsions pour attaquer des bascules

CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 24

Tubes à gaz

- ❑ Dispositifs lents.
- ❑ Diodes à gaz → deux points de fonctionnement → points mémoire + affichage du contenu.
- ❑ Aussi utilisé comme référence de tension



CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 25

Evolution de la logique à tube

- ❑ Conception de nombreux types de porte souvent basées sur des astuces de circuiterie.
 - Par exemple, logique différentielle
- ❑ Mélange de plusieurs types de circuiterie
- ❑ Utilisation de tubes complexes
 - Par exemple, portes NON-ET en utilisant les grilles suppressives de pentodes
- ❑ Utilisation de logiques à porteuse (impulsionnelle ou harmonique)
- ❑ Utilisation de dispositifs à semiconducteurs
 - Utilisation de diodes à semiconducteur (pb de leur tenue à des tensions inverses, fortes pour l'époque)

CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 26

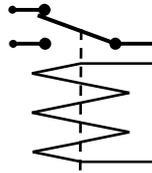
Conclusion sur la logique à tubes

- ❑ **Complexe**
- ❑ **Difficile à régler**
- ❑ **Encore très proche de l'analogique**
- ❑ **Peu fiable (vieillessement rapide des tubes)**
 - mais, bonne tenue en température
- ❑ **Forte dissipation d'énergie (chauffage des tubes)**
 - nécessite un système de refroidissement efficace
- ❑ **Gros volume (armoires ventilées !)**
- ❑ **Rapidement abandonnée dès qu'une solution de remplacement est apparue**

Les relais électromagnétiques

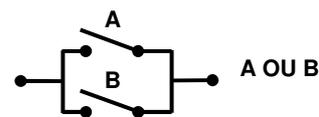
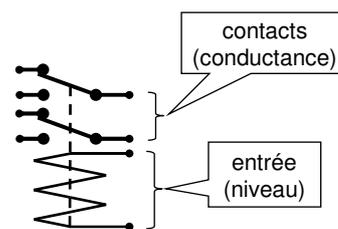
Les relais

- ❑ **Assez fiables mais :**
 - **Usure** et **collages** des contacts
 - **Lent**
 - **Bruyant**
 - **Rebondissements** des contacts
- ❑ **Volume minimal important (quelques cm³) mais plus petit qu'un tube.**
- ❑ **Les relais ont été largement utilisés depuis le début des années 1920 jusqu'à la fin des années 1960 en téléphonie, mécanographie. Ils sont toujours utilisés en automatisme industriel.**



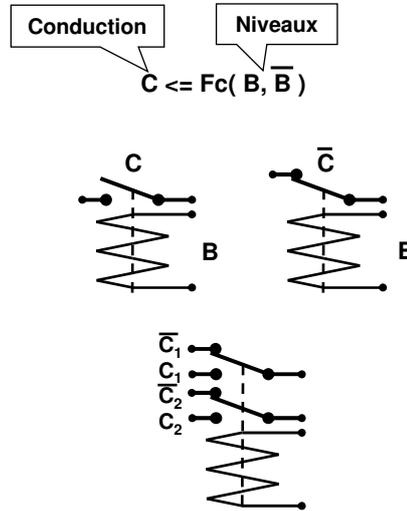
Deux types de logique

- ❑ **Les niveaux (tensions électriques) pour alimenter les bobines.**
 - valeurs : {alimenté, (isolé / non alimenté)}
- ❑ **La conductance des contacts**
 - valeurs : {conduit, isolé}
 - La mécanique du relais produit une liaison entre l'excitation de la bobine et la conduction des contacts
 - Un relais peut avoir plusieurs contacts
- ❑ **L'interconnexion des contacts produit des opérations logiques (logique de contact)**
 - **ET** par mise en série
 - **OU** par mise en parallèle
- ❑ **Constitution de réseaux de conduction complexes**



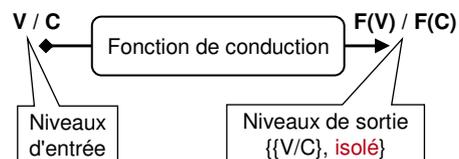
Fonctions de conduction

- ❑ Expressions mixtes :
 - Entrées → niveaux d'excitation des bobines
 - Sortie → état de conduction du réseau de contacts
- ❑ Les opérandes des expressions sont assimilées aux niveaux d'excitation des bobines
- ❑ Négation d'une entrée par l'utilisation du contact de repos
- ❑ Les différents contacts d'un même relais sont identifiés par des indices



Liaison entre les deux types de logique

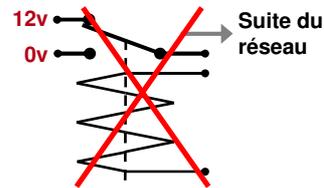
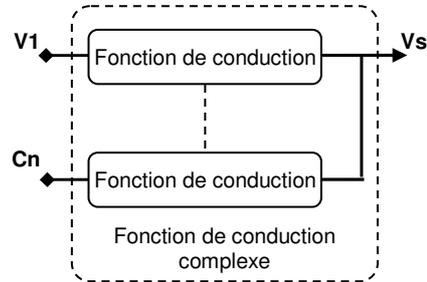
- ❑ Une fonction de conduction détermine le passage **conditionnel** d'un niveau qui peut être :
 - Une **constante** (l'alimentation) (Il est souvent inutile de véhiculer la masse car l'absence d'alimentation lui est souvent équivalente)
 - Un niveau électrique issu d'un **précédent** réseau
- ❑ La fonction de conduction ajoute la valeur **isolée** à l'ensemble des valeurs de son entrée (passage en 3 états)



Fonction de connexion complexe

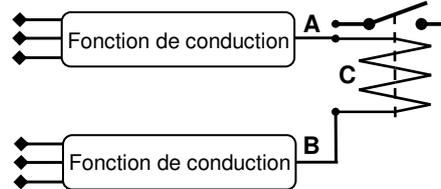
❑ Si un niveau est défini par plusieurs fonctions de conduction, ceux-ci constituent un **réseau de conduction complexe** :

- Les sorties des fonctions de conduction ne doivent pas fournir de valeurs **contradictoires**
- Le réseau de conduction complexe possède plusieurs entrées mais une seule sortie.
- Attentions aux risques de **court-circuit** en cas de panne !



Montages complexes

- ❑ Un relais est excité lorsque la tension entre les bornes de sa bobine est suffisante, quelque soit son sens. (valeur "flottante")
- ❑ Il est donc possible d'alimenter une bobine par deux réseaux de conceptions complexes fournissant chacun une tension (12v) ou 0v.
- ❑ Le relais utilisant cette bobine sera donc excité par le **OUEX** de ces deux réseaux.



A	B	C
0v	0v	0v
12v	0v	12v
0v	12v	12v
12v	12v	0v

Conclusions sur les relais

- ❑ **Les relais ont été utilisés avec satisfaction depuis le début des années 1920 jusqu'à la fin des années 1970**
- ❑ **Leur emploi est beaucoup plus simple que celui des tubes. Il permet des optimisations**
 - Des relais spéciaux permettent d'optimiser les montages
 - Relais de commutation téléphonique
 - Relais à contacts multiples
 - Relais à enclenchement (mémoire mécanique)
 - Relais retardés
 -
- ❑ **Ils permettent des montages complexes comme des centraux téléphoniques**
- ❑ **Leur lenteur ne leur a pas permis de participer aux processeurs informatiques**
- ❑ **Ces techniques seront réutilisées par les transistors MOS.....**

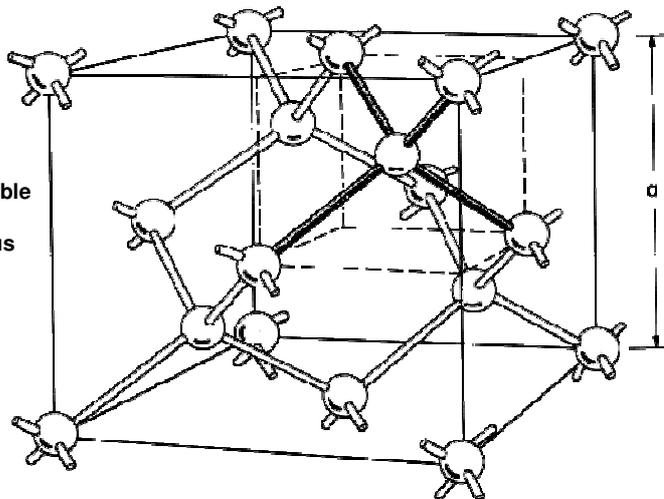
Les dispositifs à semi-conducteurs

Matériaux semiconducteurs

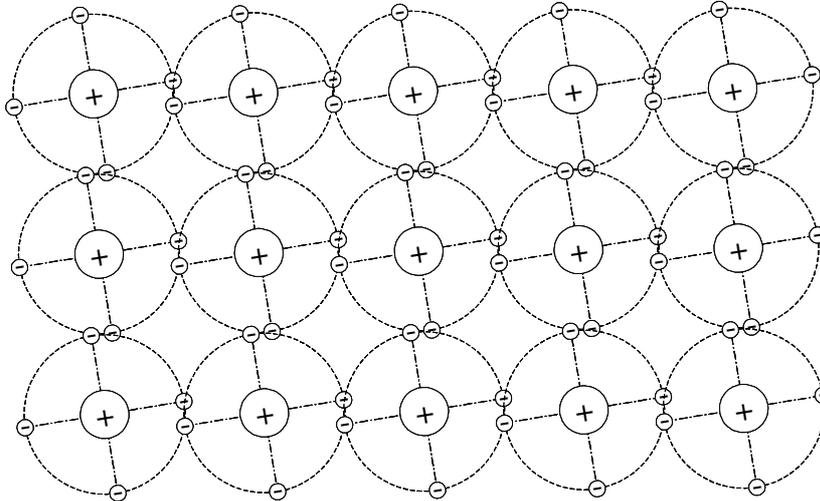
- ❑ Occupent la **colonne centrale** du tableau périodique
- ❑ Possèdent 4 électrons sur leur couche périphérique (valence 4)
- ❑ **Isolants** à l'état pur
- ❑ **Légère conductance** croissant avec la température

Exemple : Silicium

Densité 2,33
Point de fusion 1410°C
Cristallisation cubique
 $5 \cdot 10^{22}$ atomes par cm^3
Très pur $< 10^{-12}$
Constituant principal du sable
Isolé en 1823 par
Jöns Jacob Berzelius



Représentation planeaire d'un cristal semiconducteur

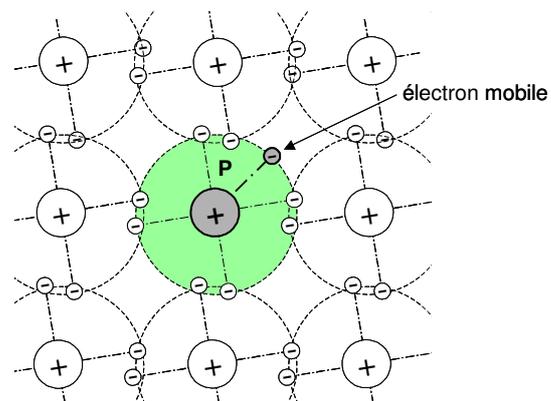


CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 39

Semiconducteur dopé N

- ❑ Adjonction d'une très faible quantité d'un matériau de valence 5, (10^{-7} à 10^{-4}) appelé **dopant N** (ex phosphore)
- ❑ Introduit:
 - des charges négatives **mobiles** (les électrons)
 - des charges positives **fixes** (les atomes de dopant ionisés)
- ❑ Le matériau devient **conducteur**

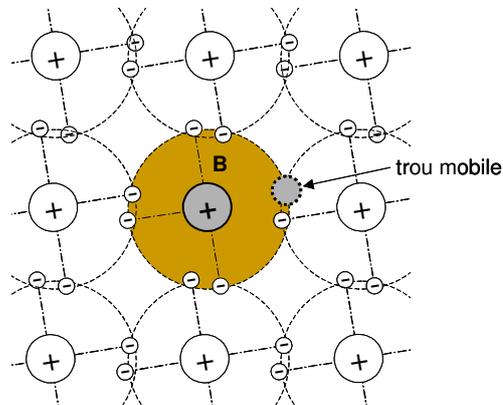


CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 40

Semiconducteur dopé P

- ❑ Adjonction d'une très faible quantité d'un matériau de valence 3 (10^{-19} à 10^{-4}) appelé dopant (ex : Bore)
- ❑ Introduit:
 - des charges positives **mobiles** (les absences électrons)
 - des charges négatives **fixes** (les atomes de dopant ionisés)
- ❑ Le matériau devient conducteur (moins que dans le cas d'un matériau N)

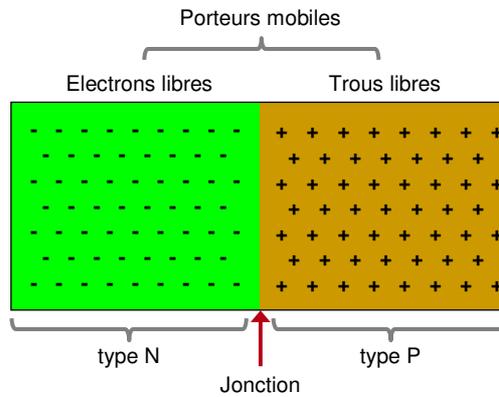


Courant dans un semiconducteur

- ❑ Deux types de porteurs de charge mobiles
 - électrons
 - trous ⇔ absences d'électron (positifs!)
- ❑ Le déplacement d'un trou résulte des **déplacements successifs** d'électrons. Les trous sont donc moins rapides que les électrons.
- ❑ **Mobilité** → Vitesse moyenne, d'un porteur, atteinte sous l'effet d'un champ électrique

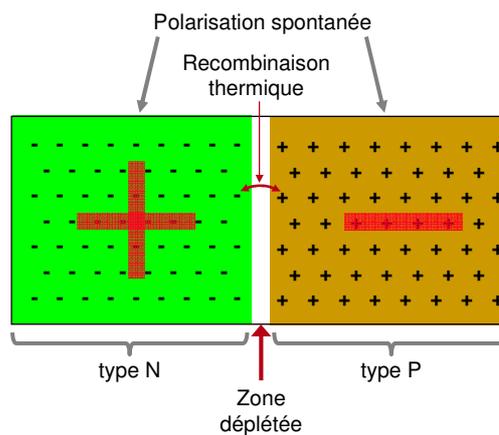
Jonction

- ❑ Coexistence de deux zones N et P contiguës dans un **même** cristal de semiconducteur



Polarisation spontanée

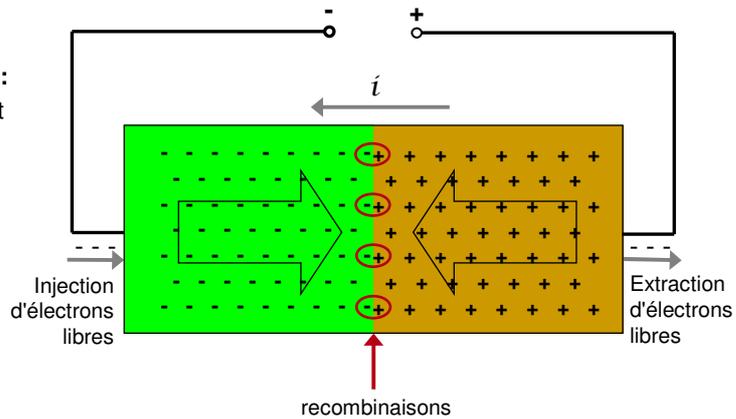
- ❑ Recombinaison **spontanée** (thermique) des porteurs N et P au niveau de la jonction.
- ❑ Diminution du nombre de charges mobiles de chaque côté.
- ❑ Polarisation spontanée de chaque zone:
 - apparition d'une différence de potentiel spontanée.



Polarisation directe d'une jonction

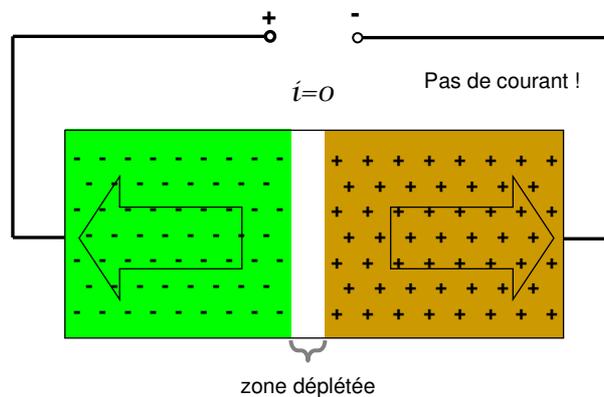
- Lorsque le potentiel appliqué est **supérieur** à la différence de potentiel spontanée:

- Les porteurs sont poussés à se **recombinaison** au niveau de la jonction
- La tension nécessaire pour provoquer cette recombinaison est appelée la **tension de seuil de la diode**



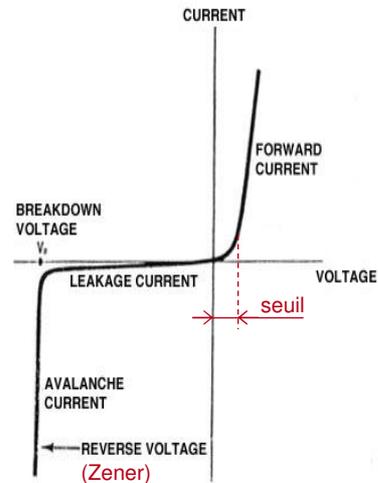
Polarisation inverse d'une jonction

- Les porteurs sont **repoussés** de la jonction.
- Création d'une zone vide de charges d'où **isolante** (dite **déplétée**).
- Formation d'une **capacité** variable avec la tension.
- Si la tension inverse est trop forte, il y a **claquage** de la jonction (effet d'**avalanche**). (peut être maîtrisé → diodes **Zener**)



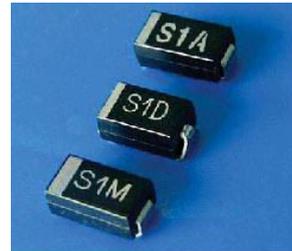
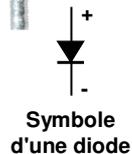
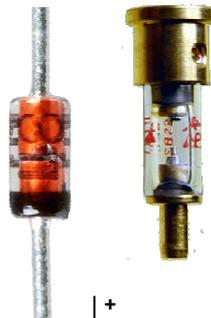
Effet de seuil

- ❑ Caractéristique d'une diode (Fonction exponentielle)
- ❑ Pratiquement assimilée à un seuil dépendant du matériau
 - 0,2v diode Schottky
 - 0,6v diode Germanium
 - 0,8v diode Silicium
- ❑ Utilisé comme un décaleur de tension
- ❑ Il existe un autre seuil, de tension beaucoup plus élevé, dû à l'effet d'avalanche (diode Zener)



Diode

- ❑ Dispositif électronique comportant une jonction
 - A pointe (ex : détecteur à galène) Le contact de la pointe forme un dopage → jonction dite de Schottky
 - A jonction
- ❑ Largement utilisé
 - Détection (radio, radar....)
- ❑ Logique
 - Redressement (alimentation, puissance...)
 - Diodes spéciales : (optoélectronique, capacités variables, de protections, détecteurs nucléaires, éclairage, photo-voltaïque, etc...)

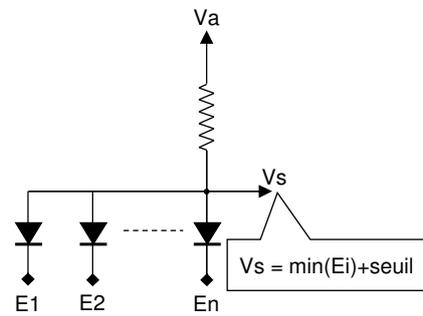


Logique à diode

□ Principe :

- Calcul d'un min / max entre plusieurs tensions
- Fournit le **ET** des entrées

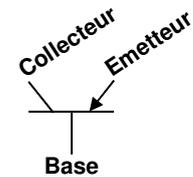
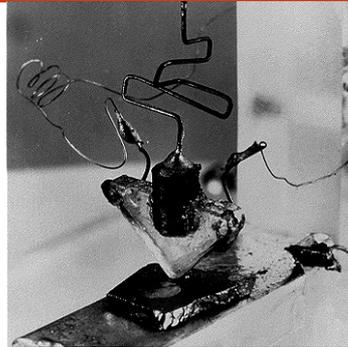
□ Nécessite un organe amplificateur (régénérateur) (tube, transistor)



Les transistors bipolaires

Les transistors à pointes

- ❑ Les premiers transistors bipolaires étaient des transistors à **pointes**.
- ❑ Ils ont été inventés quasiment simultanément par les américains (J. Bardeen et WH. Brattain) et les allemands (Herbert Mataré et Heinrich Welker) juste après la WWII au cours de l'étude des diodes à pointes utilisées par les RADAR.
- ❑ Les transistors à pointes ont été fabriquées en petite série en Allemagne par H. Mataré, mais pas aux USA qui se sont réorientés vers les transistors à **jonctions**.
- ❑ Les noms des électrodes des transistors bipolaires, ainsi que leur symbole viennent des transistors à pointes.

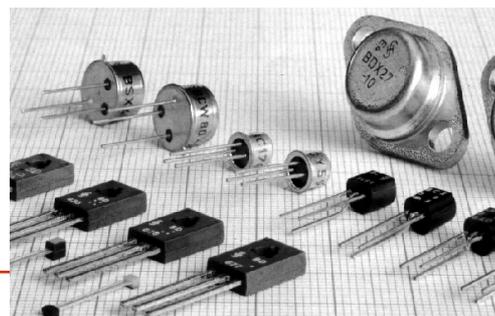
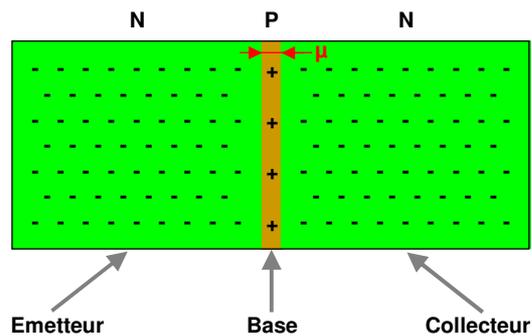


CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 51

Transistor bipolaire

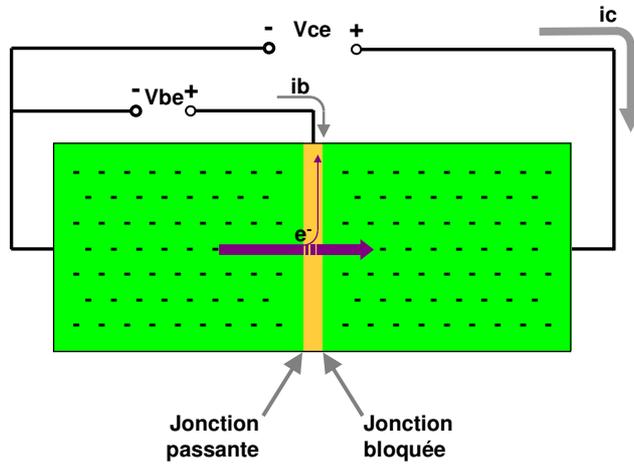
- ❑ Aussi appelé **BJT** (Bipolar Junction Transistor)
- ❑ Constitué de **deux jonctions** très rapprochées
 - Emetteur / base
 - Base / collecteur
- ❑ L'épaisseur de la base est inférieure au micron.....



CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

Fonctionnement du transistor bipolaire à jonctions

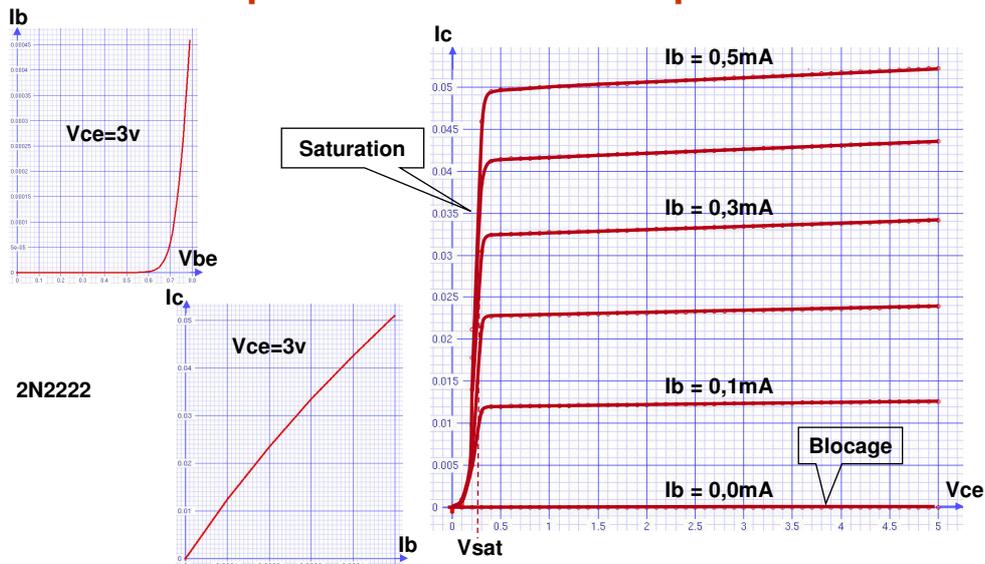
- ❑ La jonction base / collecteur est **bloquée**. La zone déplétée couvre toute la base.
- ❑ La jonction base / émetteur est **passante**. Les porteurs injectés dans la base par l'émetteur sont **piégés** et **attirés** vers le collecteur à plus de 99% (effet de piège).
- ❑ Le courant base commande le courant collecteur avec un coefficient d'amplification **>100**.
- ❑ Le transistor bipolaire semble symétrique. Le collecteur semble **permutable** avec l'émetteur, mais la succession des niveaux de dopage rendent cette permutation **ineffective**.



CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 53

Caractéristiques des transistors bipolaires

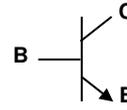


CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

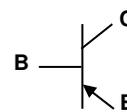
diapo 54

Transistors bipolaires complémentaires

- ❑ Les transistors bipolaires sont typés par la succession des types des dopants de ses 3 zones (ex NPN)
- ❑ Il est possible de fabriquer des transistors **complémentaires** (PNP) qui fonctionnent avec des tensions et des courants **inverses** de ceux des NPN.
- ❑ Il est possible de réaliser des montages logiques **duaux**, mais la commande en courant des transistors rend délicate la conception de ces circuits.

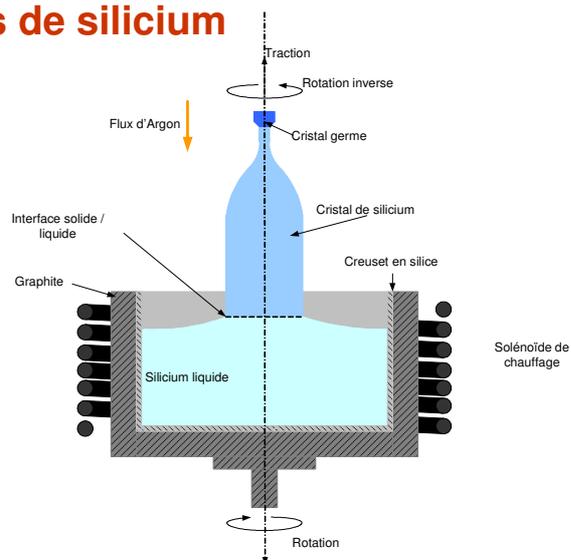
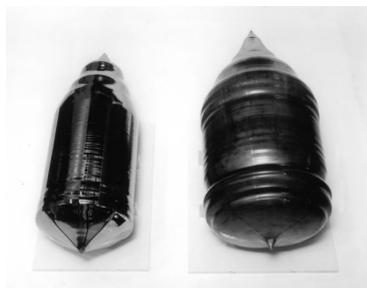


Symbole tr. NPN



Symbole tr. PNP

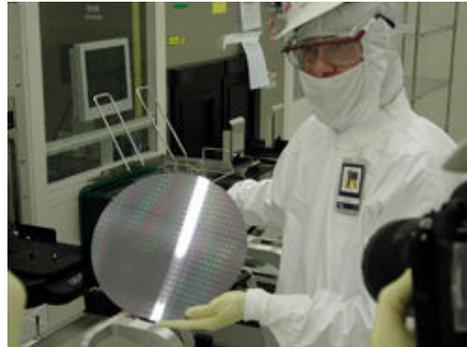
"Tirage" des lingots de silicium



Des "impuretés" sont mises dans le silicium fondu pour produire des lingots P ou N

Sciage des lingots en tranches

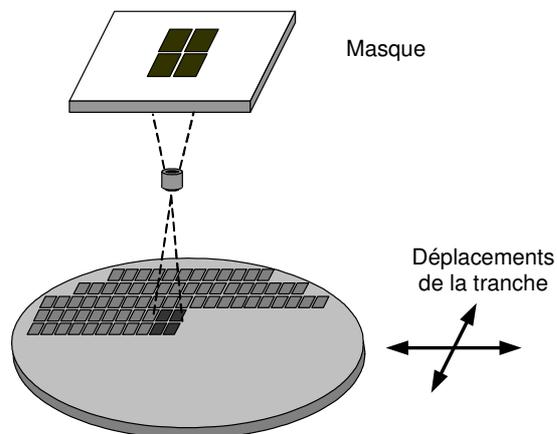
Les tranches font quelques dixièmes de mm d'épaisseur
Leur diamètre a évolué de 25 à 500mm



CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 57

Insolation par groupes de transistors

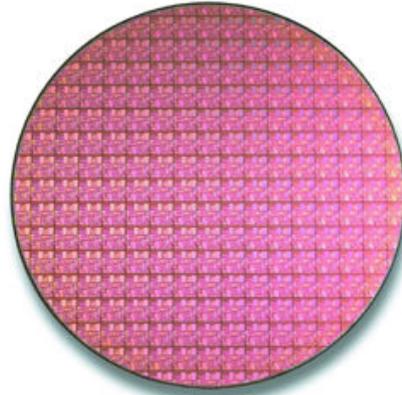


CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 58

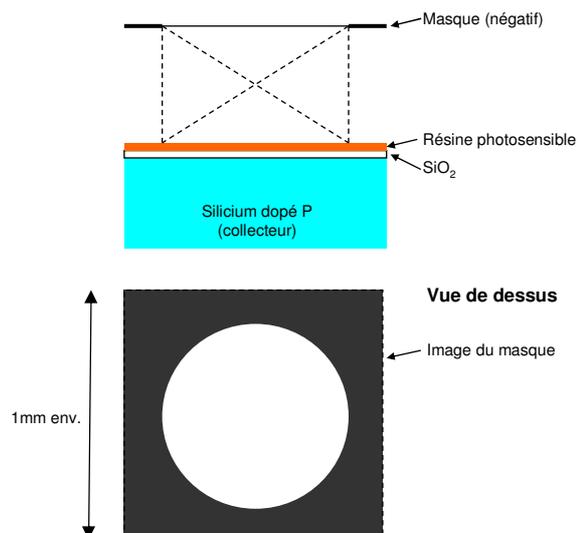
Transistors sur une tranche

- ❑ Les transistors sont réalisés **collectivement** sur la tranche
- ❑ Le coût de fabrication d'un transistor est celui de la tranche divisé par le nombre de transistors bons
- ❑ Le **rendement** du procédé technologique se mesure par:
$$\lambda = \frac{\text{nb de tr. bons}}{\text{nb de tr. potentiellement bons}}$$



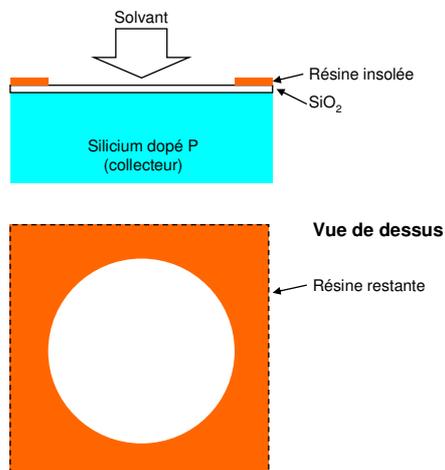
Réalisation des bases - masquage

- ❑ **Processus de photogravure**
- ❑ **Etallement de la résine photosensible**
- ❑ **Masquage et insolation aux UV**



Réalisation des bases – développement de la résine

- ❑ Suite processus de photogravure
- ❑ Développement de la résine (avec un solvant)
- ❑ La résine va servir de masque à la gravure du SiO_2

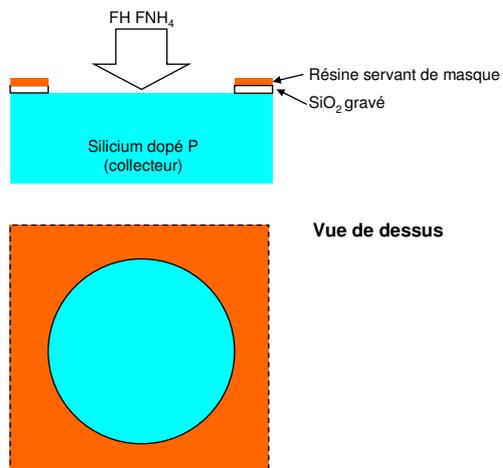


CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 61

Réalisation des bases – gravure du SiO_2

- ❑ Suite processus de photogravure
- ❑ Gravure du SiO_2 avec du FH FNH_4
- ❑ La résine est ensuite enlevée totalement
- ❑ La silice va servir de masque pour diffuser la base



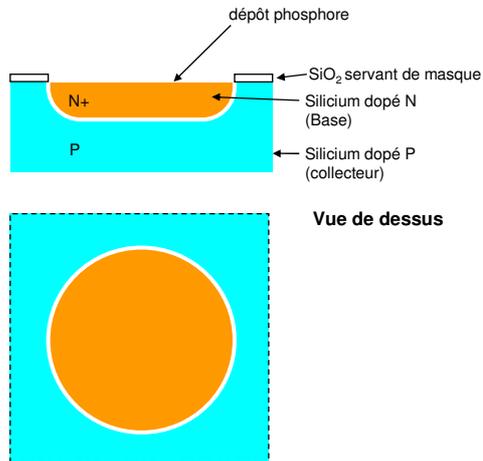
CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 62

Réalisation des bases – diffusion de la base

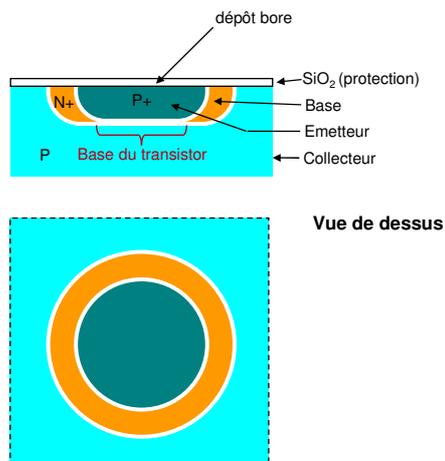
- ❑ Dépôt de Phosphore sur le silicium nu
- ❑ La silice sert de masque pour doper le silicium de la base
- ❑ Diffusion thermique du phosphore dans le silicium (surdopage)
- ❑ Réoxydation

Dans le cas de dopages successifs, seul compte le dopant majoritaire. Le taux de dopage croît donc à chaque surdopage.



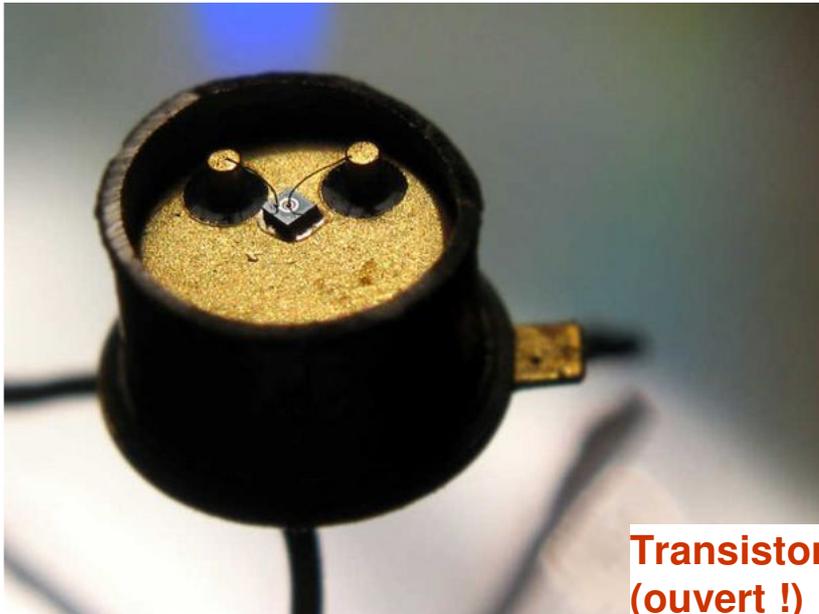
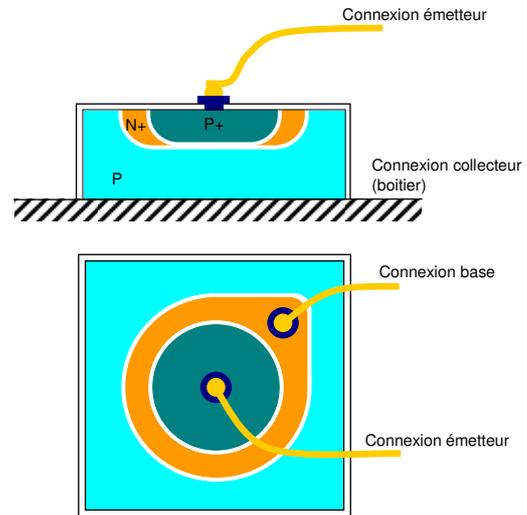
Réalisation des émetteurs

- ❑ Idem que la fabrication des bases
- ❑ Dépôt de bore
- ❑ L'épaisseur de la base doit être une fraction de μm



Finition

- ❑ Dépôt et gravure des plots des connexions des émetteurs et des base
- ❑ Tests des transistors, marquage des mauvais
- ❑ Sciage des puces
- ❑ Pour les bonnes :
 - Soudure sur l'embase du boîtier
 - Pose des fils de connexion
 - Pose du capot
 - Test final



**Transistor fini
(ouvert !)**

Des transistors PLANAR aux circuits intégrés

- ❑ La technologie **Planar** permet d'interconnecter les transistors entre eux.
- ❑ Cette interconnexion conduit aux **Circuits Intégrés**, co-inventés par Robert Noyce (Fairchild) et Jack Kilby (Texas Instruments) en 1965 (La paternité de l'invention a été attribuée à **Jack Kilby**)
- ❑ Apparition des circuits MSI qui ont permis en 1965 la création par TI d'un mécano logique appelé "**Série 54/74**"

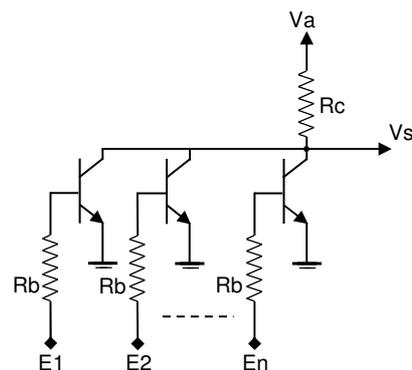


Le circuit de Jack Kilby (1965)



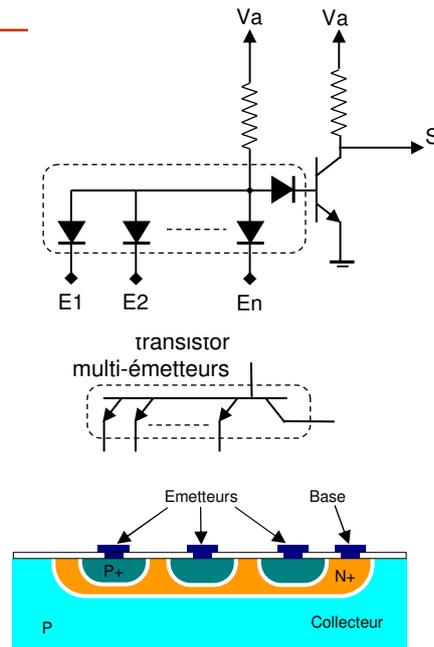
Logique RTL

- ❑ RTL (Resistors Transistors Logic)
- ❑ Consiste à relier directement les transistors d'une chaîne logique pour réaliser des portes NON-OU
- ❑ Les résistances R_b sont nécessaires pour équilibrer les courants dans les bases des tr.
- ❑ Le fonctionnement de ce type de porte est dissymétrique :
 - Temps de descente faible
 - Temps de montée plus important



Logique DTL

- ❑ DTL (Diodes Transistors Logic)
- ❑ Consiste à associer un ET à diodes avec un transistor de régénération pour réaliser une porte **NON-ET**
- ❑ L'ensemble des diodes peut être vu comme un **transistor multi-émetteurs**
- ❑ Il suffit que l'une des entrées soit portée à une tension < seuil pour provoquer le blocage du transistor.
- ❑ Le fonctionnement de ce type de porte est **disymétrique** :
 - Temps de descente faible
 - Temps de montée plus important

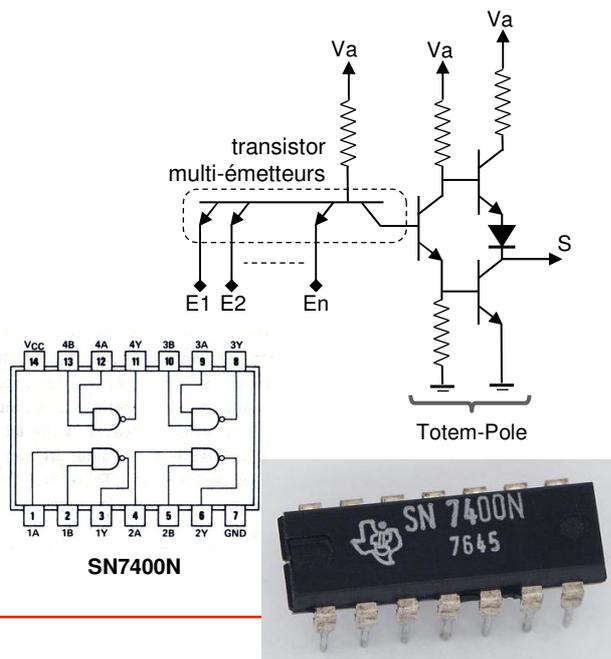


CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 69

Logique TTL

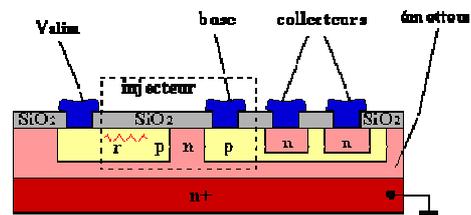
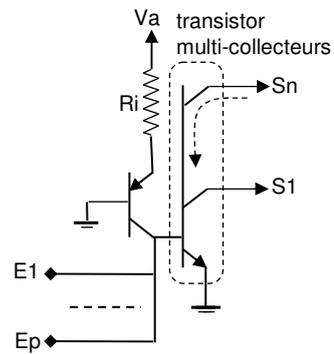
- ❑ TTL (Totem-Pole)
- ❑ Développement d'une porte de base
- ❑ Le fonctionnement de ce type de porte est presque symétrique.
- ❑ Ce type de portes logiques est à l'origine de la série de modules 74xxx devenue un standard de fait.
 - La série 74xxx d'origine est entièrement construite à l'aide de la porte TTL de base 7400 et de ses variantes.
 - Elle contient plusieurs centaines de boîtiers.
 - Cette série a été ensuite déclinée avec d'autres technologies.



CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

Logique I2L

- ❑ Par commutation de courant
- ❑ Forme un ET de connexion en entrée.
- ❑ Niveaux logiques :
 - 0,2v → "0" absorption d'un courant d'injection vers la masse
 - 0,8v → "1" isolé
- ❑ Utilisation "inversée" du transistor multi-émetteurs (qui devient **multi-collecteurs**) et d'un transistor complémentaire "latéral" (utilisation **non rationnelle** de la technologie bipolaire !)
- ❑ Surtout utilisé pour réaliser des circuits intégrés

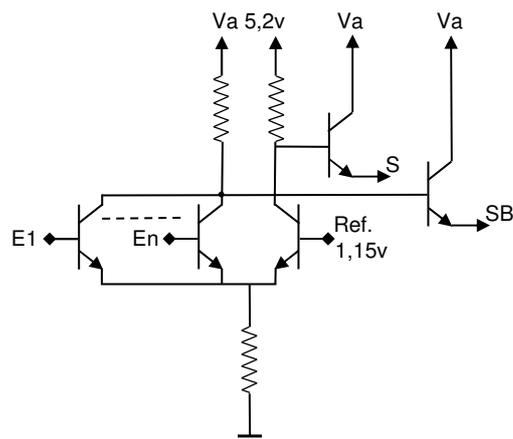


CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 71

Logique ECL

- ❑ ECL (Emitter Coupled Logic)
- ❑ Logique différentielle très **rapide** à signaux de faible amplitude.
- ❑ Sorties directe et complémentée.
- ❑ Ce montage nécessite l'utilisation d'une tension de référence de 1,15v située entre les niveaux 1 et 0.
- ❑ **Consommation** importante, indépendante du niveau logique.

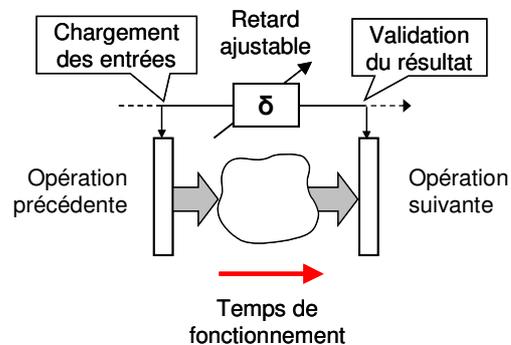


CNAM, Des tubes aux transistors, © F. Anceau, avril 2013

diapo 72

Logique asynchrone

- ❑ Avant l'arrivée de la TTL.... (et même après....)
- ❑ Génération de **signaux d'acquisition**, en parallèle des organes, par des retards ou des multivibrateurs. (**chaîne de retards**)
- ❑ Pb : Difficulté d'**estimation** du pire cas de durée de fonctionnement de l'organe, surtout en prenant en compte son vieillissement et de celui de la chaîne de retards !



Série (54) 74

- ❑ Introduite par Texas Instruments en 1964.
- ❑ Basée initialement sur la logique TTL a ensuite **évolué** avec la technologie.
- ❑ Tension d'alimentation : **5v**
- ❑ Niveaux logiques :
 - $> 2,4v \rightarrow "1"$
 - $< 0,8v \rightarrow "0"$
- ❑ Mécano de plus d'une centaine de boîtiers permettant de réaliser la majorité des applications logiques.
- ❑ Introduction de la **logique synchrone**.
- ❑ Devenue la **base de la culture logique**.

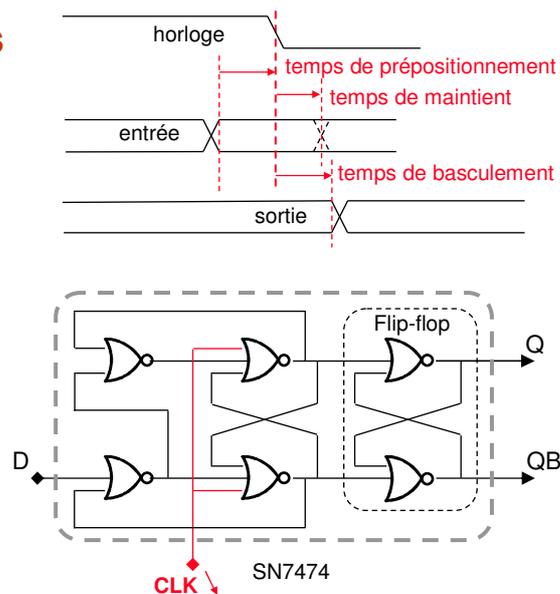


Logique synchrone

- ❑ Deux "êtres" logiques :
 - Les **niveaux** logiques
 - Les **événements** (fronts d'horloge)
 - Manipulables via les signaux dont ils sont les fronts
- ❑ **Idéalement, utilisation d'un signal d'horloge unique, porteur des événements princeps du système (règle très souvent violée !)**

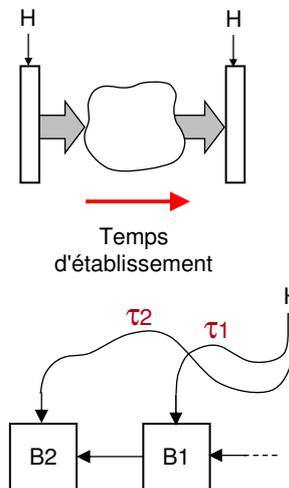
Bascules synchrones

- ❑ Les bascules sont des dispositifs complexes, réalisés par les fondeurs pour simuler le **comportement théorique** des bascules
- ❑ **A l'occurrence de l'horloge, les bascules doivent toutes simultanément :**
 - **Acquérir** leurs nouvelles valeurs d'entrées
 - **Afficher** leurs nouvelles valeurs de sortie
- ❑ **Plusieurs techniques sont utilisées**
 - **Automates asynchrones** (bascule à 28 transistors !)
 - **Bascule à dérivateur** (Partovi)
 - **Maîtres-suiveur** à 20 transistors



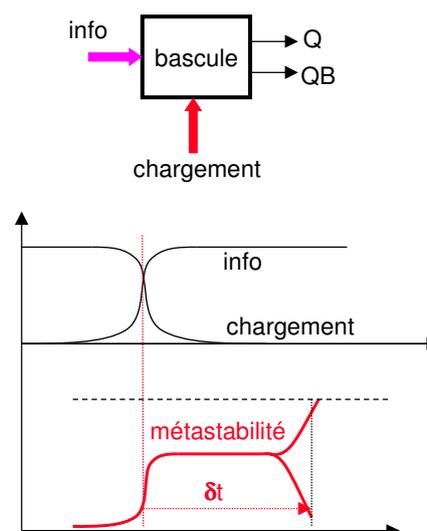
Contraintes de la logique synchrone

- ❑ **Contraintes sur les chaînes longues :**
 - Le temps d'établissement des circuits combinatoires doit toujours être **inférieur** à la période de l'horloge.
- ❑ **Contraintes sur les chaînes courtes :**
 - Les bascules alimentées **directement** par la sortie d'une autre bascule (registre à décalage) doivent toujours disposer de cette valeur au moment de l'occurrence de l'évènement d'horloge. Il faut donc faire très attention aux **décalages** d'horloges.



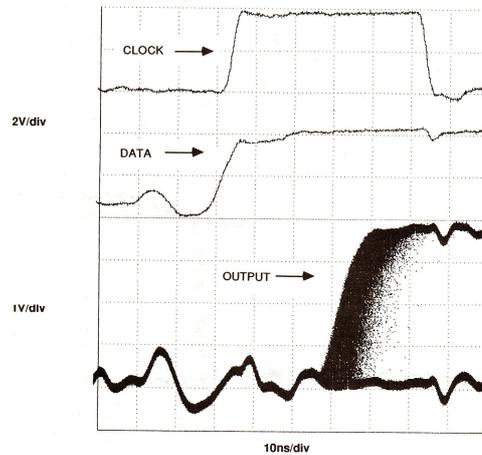
Métastabilité

- ❑ **Dans le cas d'asynchronisme pur entre une variation de l'entrée et le signal de chargement**
- ❑ **Risque de coïncidence pathogène entre la lecture et l'écriture dans une bascule**
 - Coïncidence inférieure à la **picoseconde (10^{-12} s)**
 - Probabilité de l'ordre de 10^{-12} à 10^{-14}
- ❑ **Les sorties sont mises dans un état intermédiaire**
- ❑ **Dure d'autant plus longtemps que la coïncidence est plus précise**



Métastabilité (suite)

- ❑ La mise en métastabilité dépend de la précision de la coïncidence entre la variation de l'entrée et celle du signal d'acquisition
- ❑ La métastabilité se propage dans le système car le retour à un état logique produit une **nouvelle transition asynchrone**
- ❑ Il semble qu'il n'y ait **aucun moyen logique** de supprimer le risque de métastabilité
 - Une façon de réduire ce risque est d'augmenter l'énergie interne des bascules dans l'état métastable.
- ❑ La métastabilité est responsable d'une partie des **pannes transitoires**.



Exemple: SN7474

Règle générale (Loi d'évolution de l'électronique (?))

- ❑ Abandon (progressif) des **solutions opératoires physiques et analogiques** au profit de **dispositifs de base "idéaux"** permettant de les **construire logiquement** (rapides, petits, compatibilité entrées-sorties, dualité, seuils, environnement "humain")
- ❑ Remplacement du **physique** par du **construit**, de l'**analogique** par du **numérique**
 - exemples d'abandon de **technologies** :
 - **Mécanique** (fragilité, usure, lenteur).
 - **Mémoires physiques (Hystérésis et résistances négatives)** (signaux de sortie trop faibles).
 - **Calcul optique** ex : diffraction pour réaliser des FFT (analogique, d'où des convertisseurs).
 - **Supraconductivité** (fonctionnement à très basses températures)
 - **Lumière** pour des connexions internes aux CI (taille des dispositifs, régénération nécessaire).
- ❑ Abandon de dispositifs
 - **Effectifs** : mémoires à tores, afficheurs à tube, tubes électroniques.
 - **Programmés** : disques magnétiques.
 - **Probables** : machines optiques, dispositifs à supraconducteurs, mémoires magnétiques.