

1 La logique électronique

Peter Schlagheck

Université de Liège

Ces notes ont pour seule vocation d'être utilisées par les étudiants dans le cadre de leur cursus au sein de l'Université de Liège. Aucun autre usage ni diffusion n'est autorisé, sous peine de constituer une violation de la Loi du 30 juin 1994 relative au droit d'auteur.

1 La logique électronique

1.1 La préhistoire de l'informatique

1.2 L'électronique avec les tubes à vide

1.3 Les transistors

1.1 La préhistoire de l'informatique

L'idée de base:

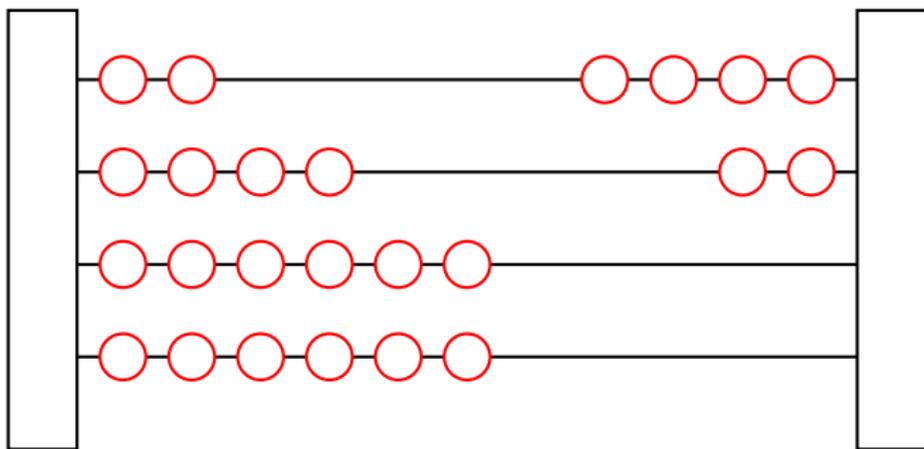
construire une machine qui effectue des **opérations logiques**

Qu'est-ce que c'est ?

→ effectuer une chose **à condition**
qu'une autre chose soit donnée.

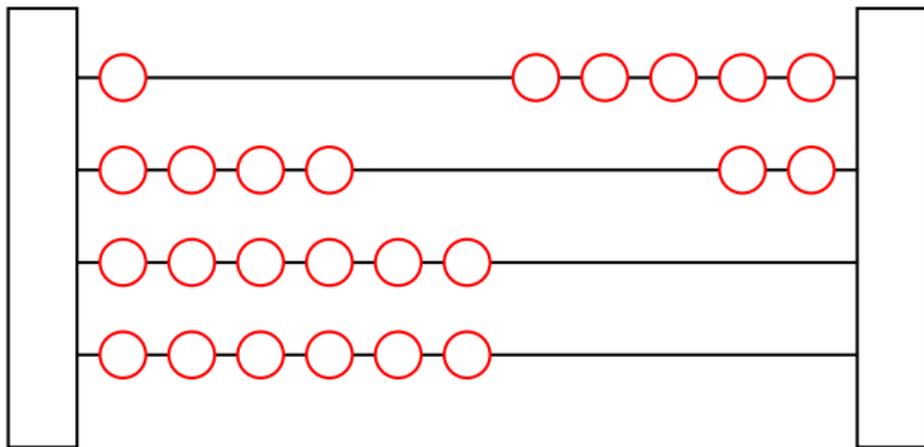
1.1 La préhistoire de l'informatique

Exemple primaire: l'addition avec l'abaque



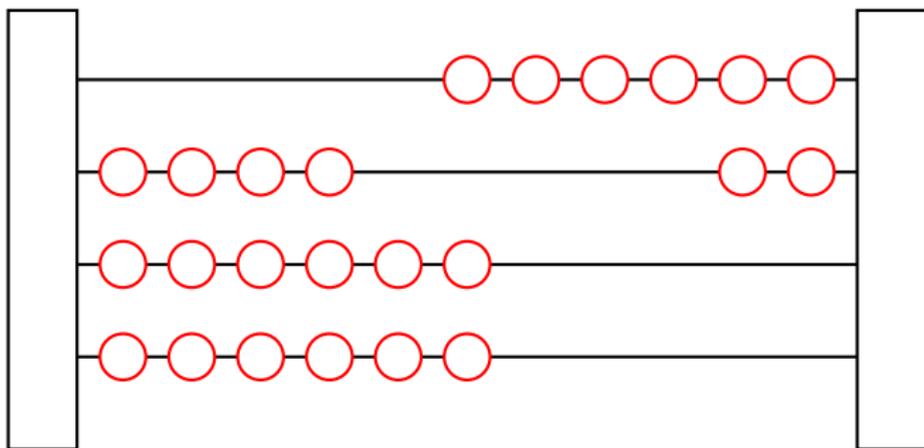
1.1 La préhistoire de l'informatique

Exemple primaire: l'addition avec l'abaque



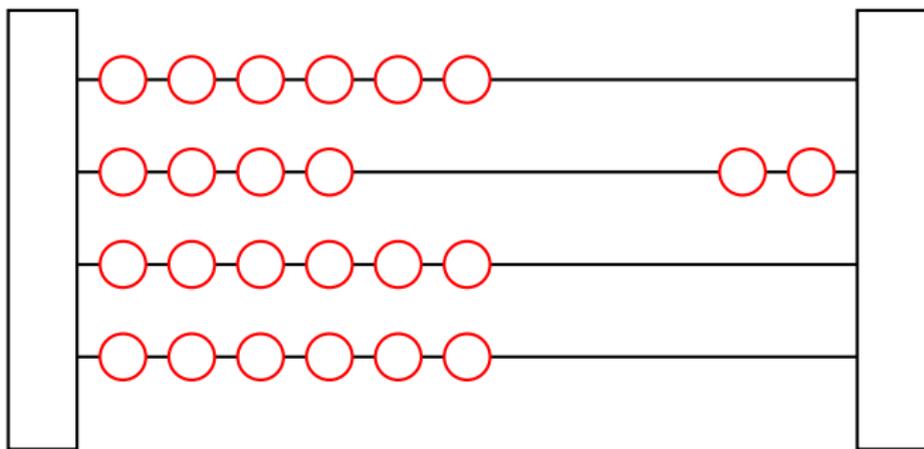
1.1 La préhistoire de l'informatique

Exemple primaire: l'addition avec l'abaque



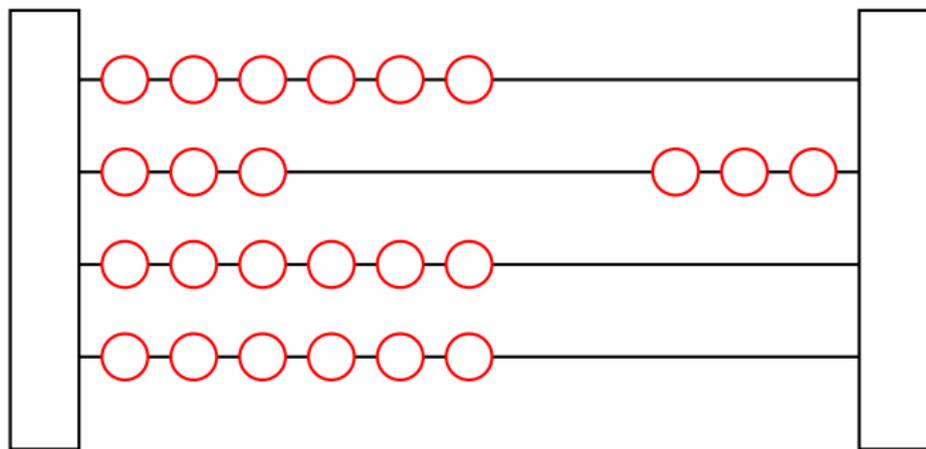
1.1 La préhistoire de l'informatique

Exemple primaire: l'addition avec l'abaque



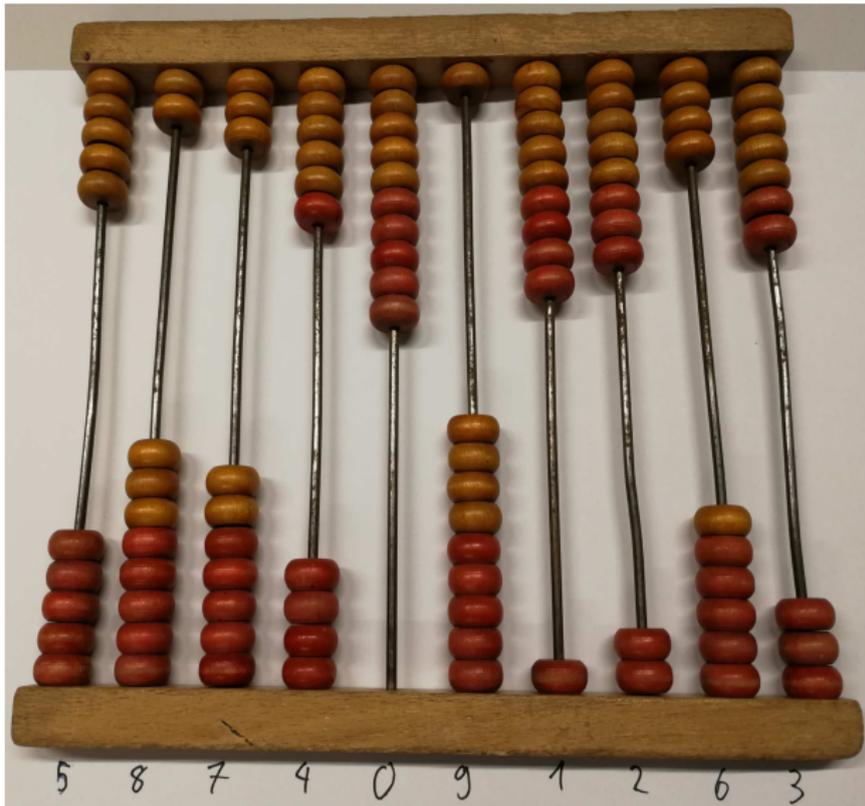
1.1 La préhistoire de l'informatique

Exemple primaire: l'addition avec l'abaque



→ une boule dans la ligne suivante est bougée
à condition que la ligne actuelle soit finie

1.1 La préhistoire de l'informatique



Les premières machines de calcul mécaniques

- ▶ Wilhelm Schickard, 1632
- ▶ Blaise Pascal, 1642
- ▶ Gottfried Wilhelm Leibniz, 1672

Les premières machines de calcul mécaniques

- ▶ Charles Babbage (1791 - 1871)

Difference engine

- évaluation des fonctions polynomielles
(pour le calcul de tableaux)
par l'addition des différences finies
- achevée après sa mort



Les premières machines de calcul mécaniques

- ▶ Charles Babbage (1791 - 1871)

Analytical engine

- machine de calcul pour des opérations mathématiques et logiques plus générales
- jamais achevée

- ▶ Ada Lovelace (1815 - 1852)

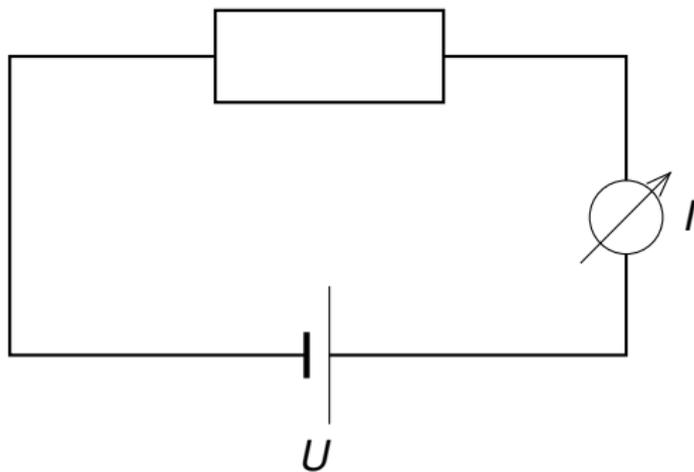
proposition des algorithmes pour l'analytical engine afin d'effectuer des calculs spécifiques (nombres de Bernoulli)

- la première informaticienne du monde



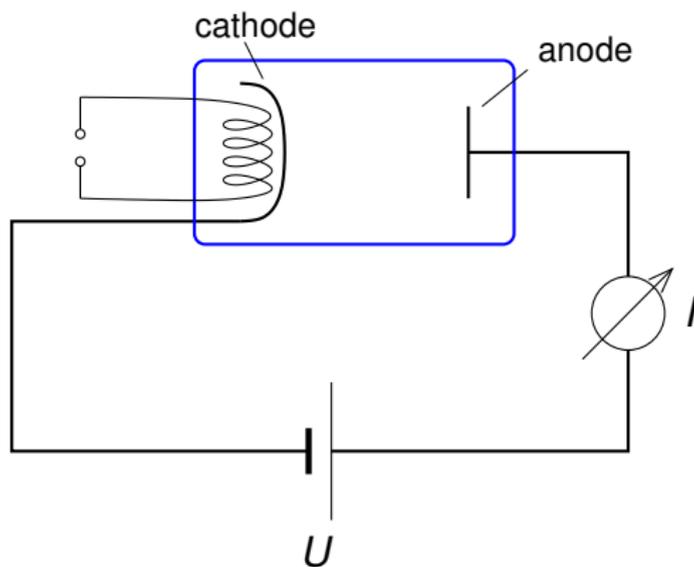
1.2 L'électronique avec les tubes à vide

Un circuit électrique ...



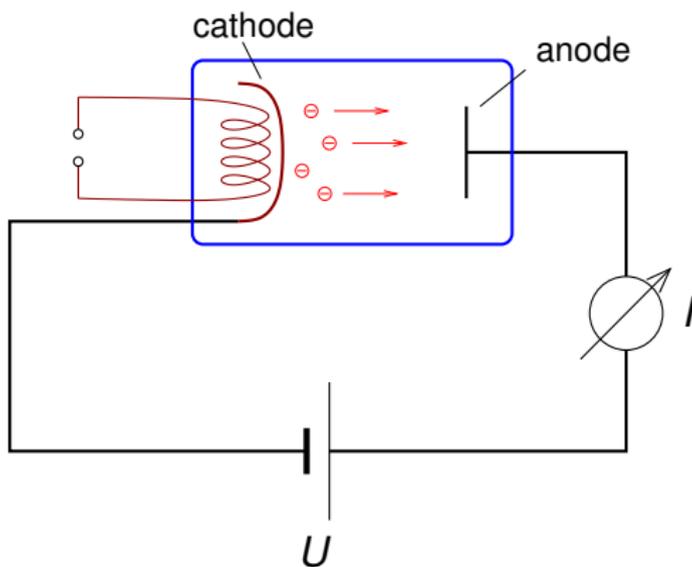
1.2 L'électronique avec les tubes à vide

Un circuit électrique avec un **tube à vide**:



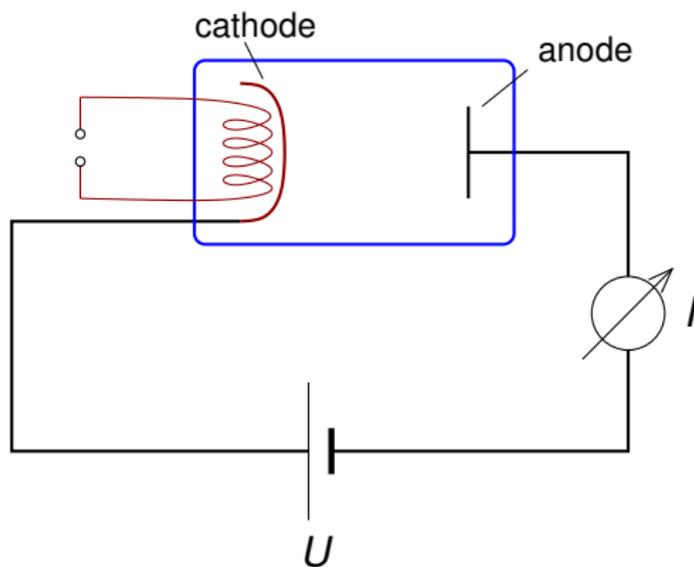
1.2 L'électronique avec les tubes à vide

Un circuit électrique avec un **tube à vide**:



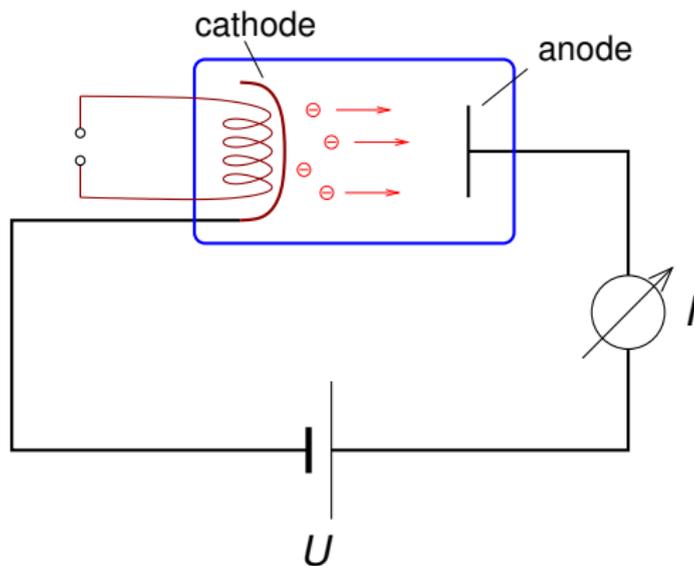
1.2 L'électronique avec les tubes à vide

Un circuit électrique avec un **tube à vide**:



1.2 L'électronique avec les tubes à vide

Un circuit électrique avec un **tube à vide**:

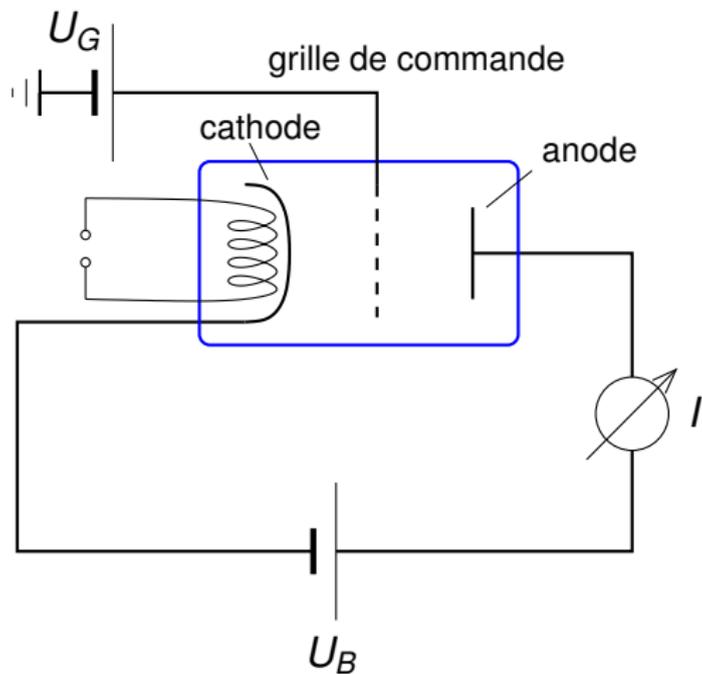


→ rectification du courant électrique: **diode**

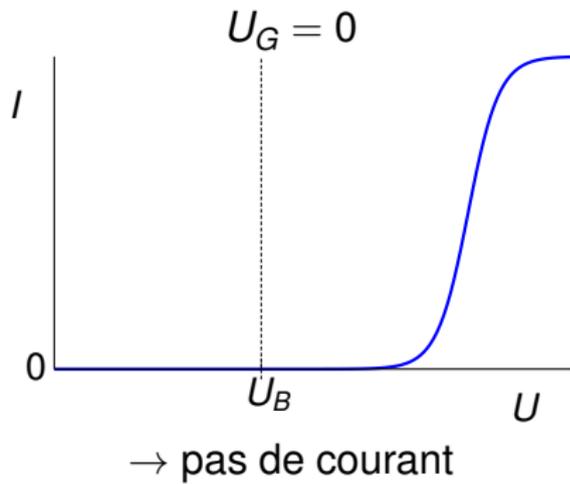
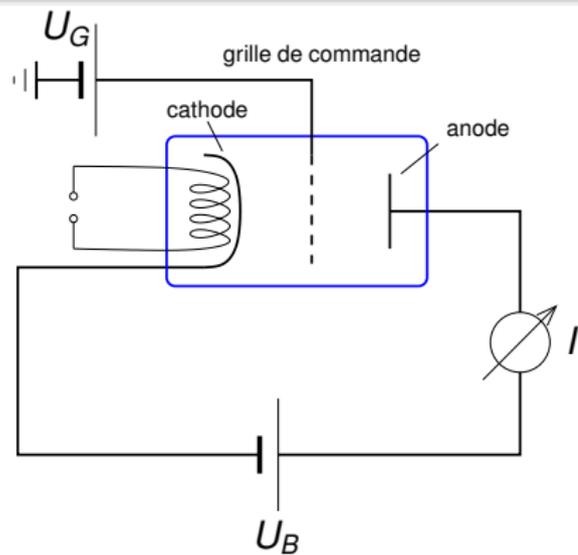
J. A. Fleming 1904

La triode

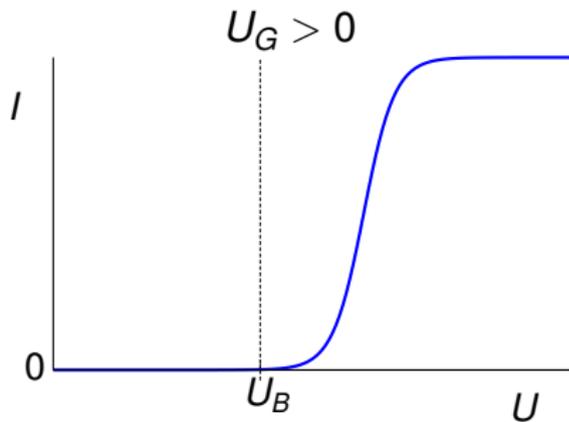
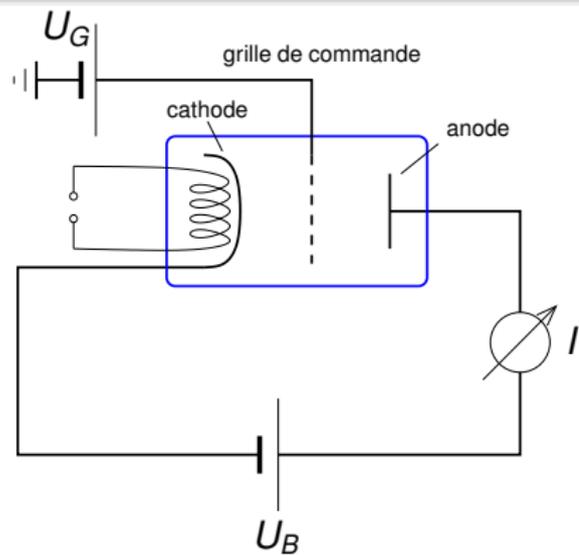
Lee de Forest 1907



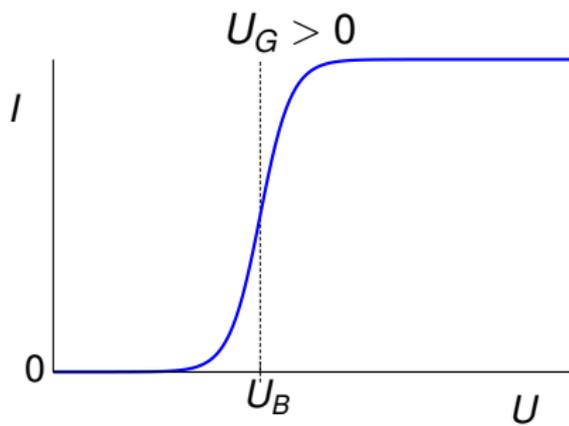
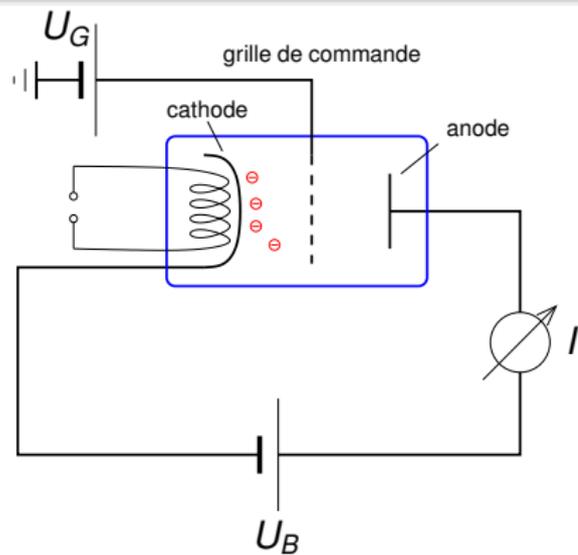
Le fonctionnement d'une triode



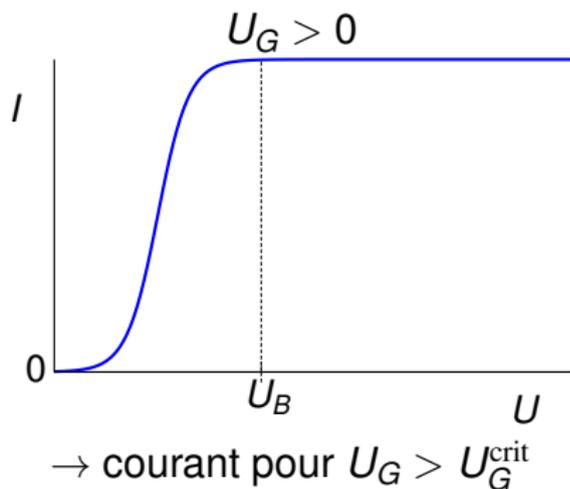
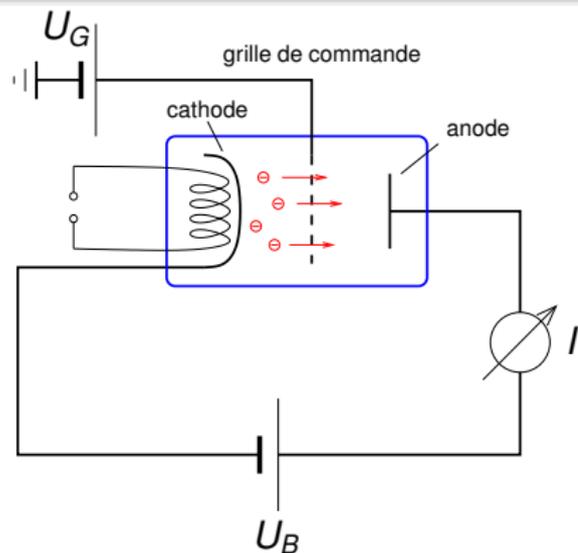
Le fonctionnement d'une triode



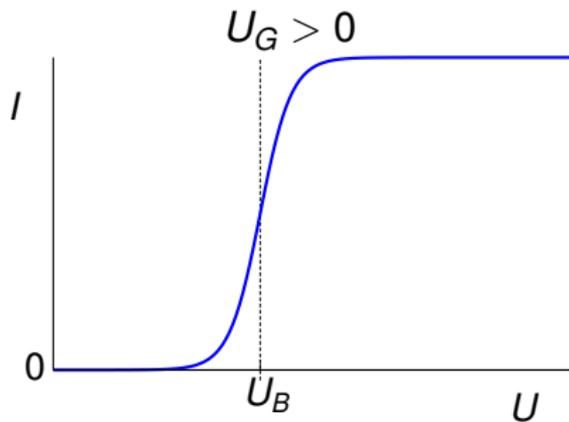
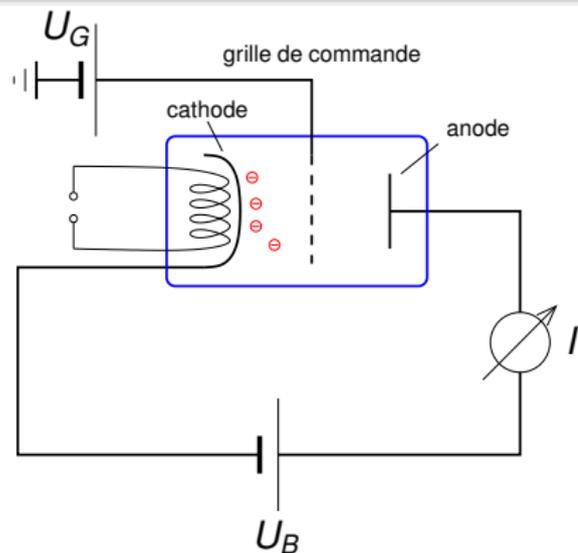
Le fonctionnement d'une triode



Le fonctionnement d'une triode



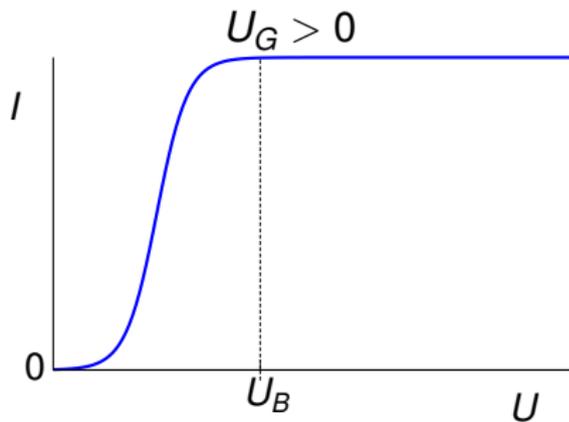
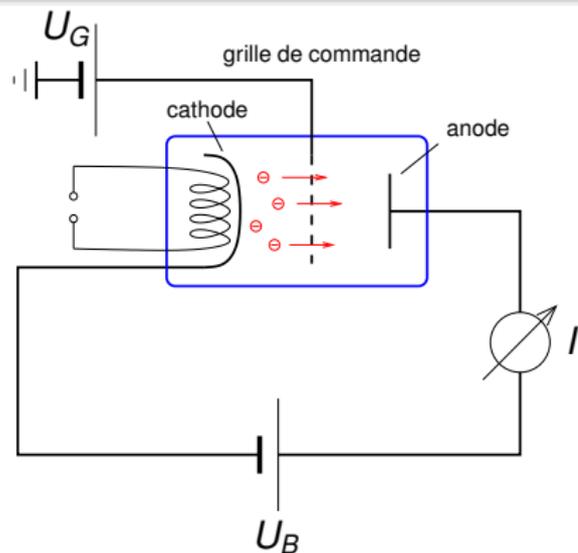
Le fonctionnement d'une triode



→ courant pour $U_G > U_G^{\text{crit}}$

→ **amplificateur** d'un signal électronique:
petite variation en $U_G \Rightarrow$ grande variation en I

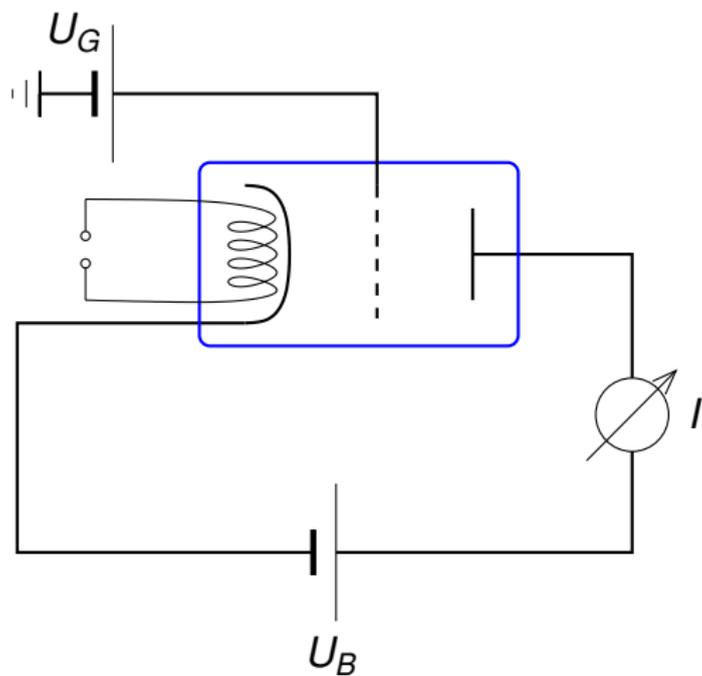
Le fonctionnement d'une triode



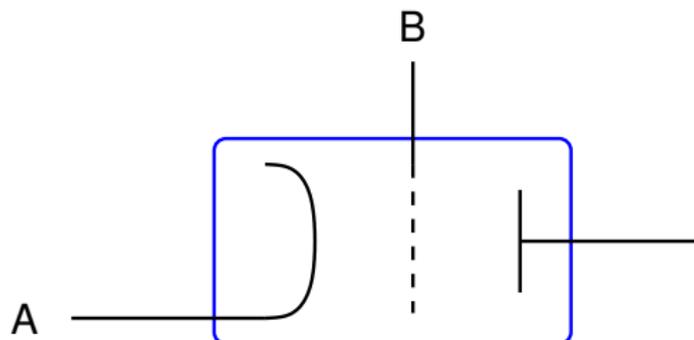
→ courant pour $U_G > U_G^{\text{crit}}$

→ effectuer quelque chose (du courant I) à condition qu'une autre chose (la tension U_G) soit donnée

Des opérations logiques avec des triodes



Des opérations logiques avec des triodes



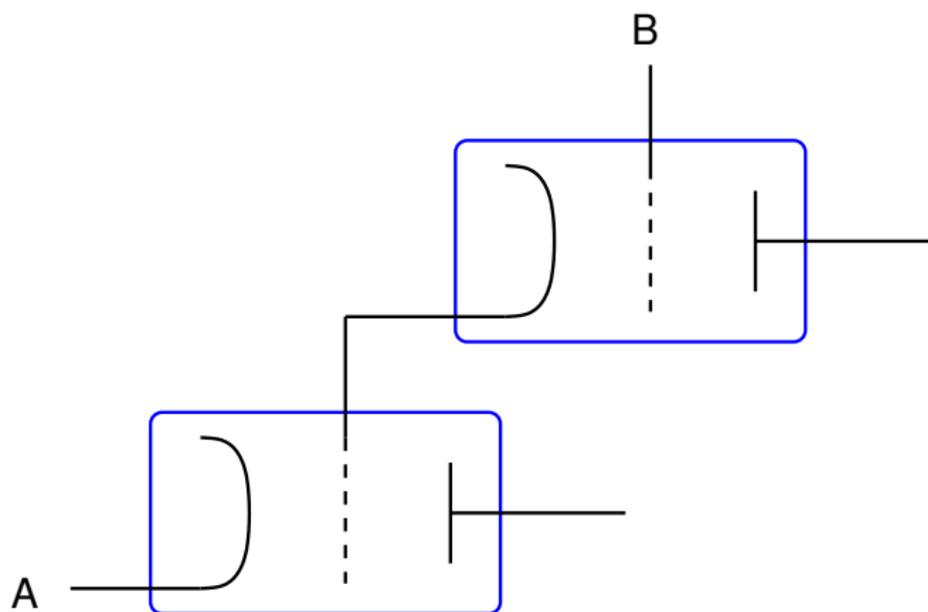
A “est vrai” si B “est vrai”

= si la tension à B est suffisamment forte pour induire un courant au travers du tube à vide

A peut signifier le courant au travers du tube

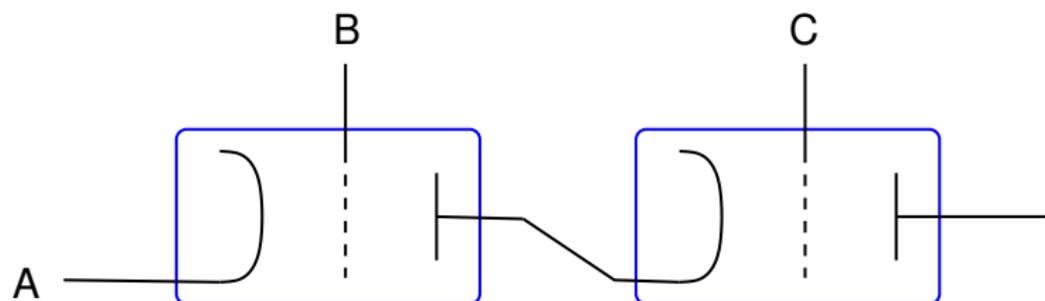
... ou (plutôt) une tension capable à induire d'autres courants

Des opérations logiques avec des triodes



Des opérations logiques avec des triodes

Une opération AND

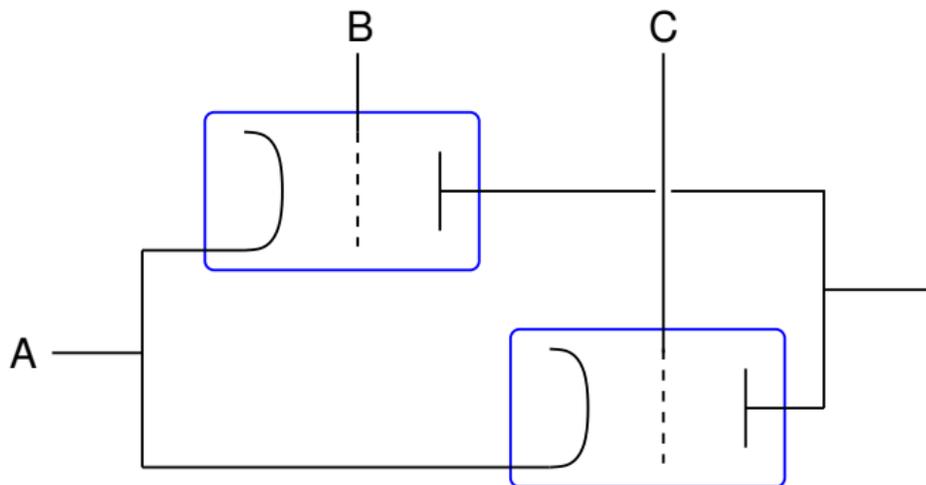


A "est vrai" si B **et** C "sont vrai"

$$A = B \wedge C$$

Des opérations logiques avec des triodes

Une opération OR

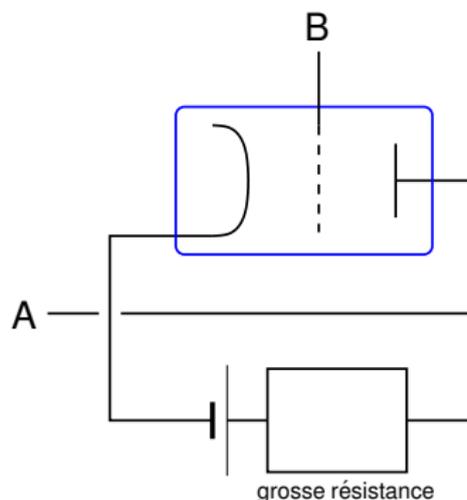


A "est vrai" si B **ou** C "sont vrai"

$$A = B \vee C$$

Des opérations logiques avec des triodes

Une opération NOT

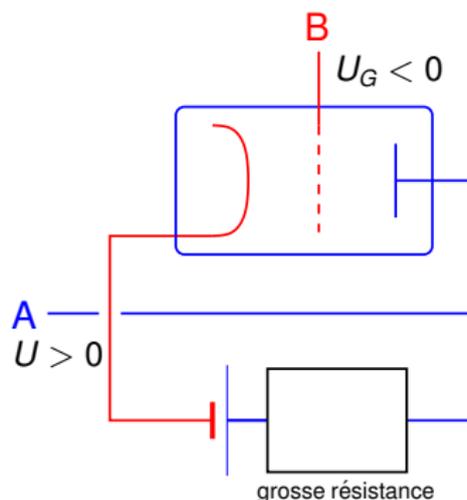


A “est vrai” si B “n’est pas vrai”

$$A = \bar{B}$$

Des opérations logiques avec des triodes

Une opération NOT

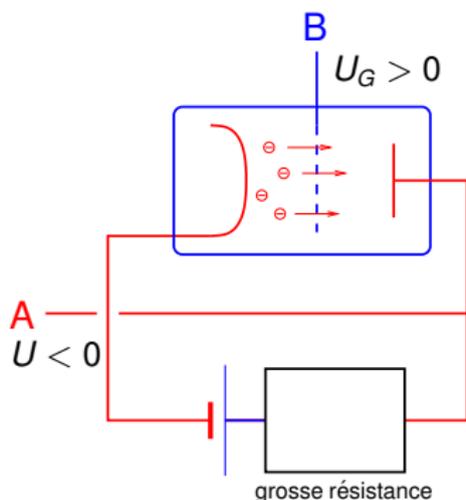


A “est vrai” si B “n’est pas vrai”

$$A = \overline{B}$$

Des opérations logiques avec des triodes

Une opération NOT

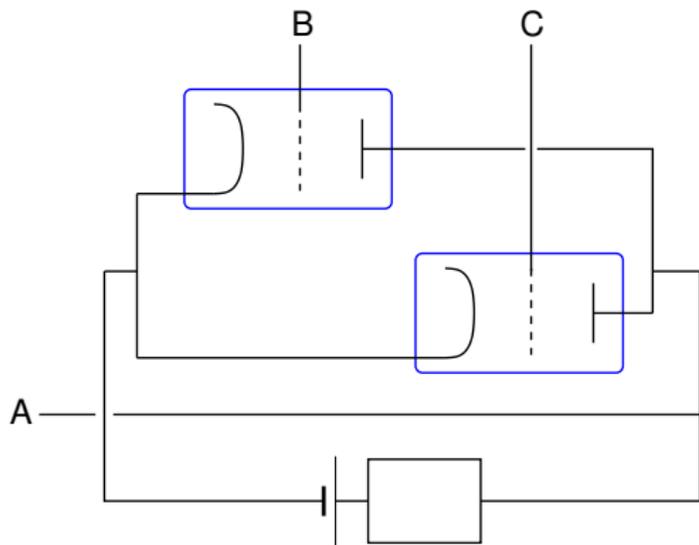


A "n'est pas vrai" si B "est vrai"

$$A = \overline{B}$$

Des opérations logiques avec des triodes

Une opération NOR = NOT OR (ni l'un ni l'autre)

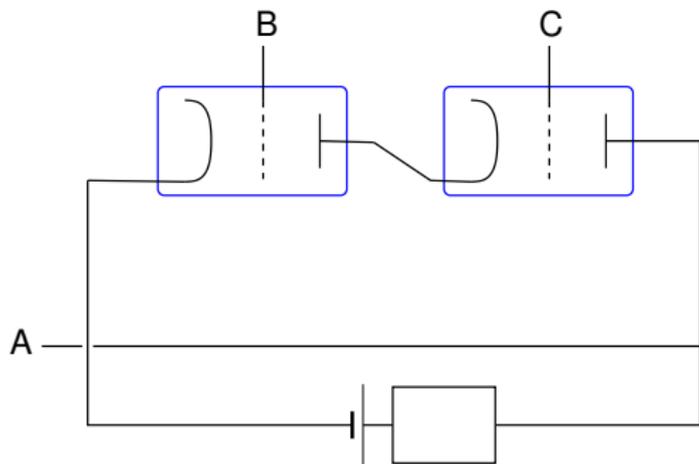


A “est vrai” si **ni B ni C** “sont vrais”

$$A = \overline{B \vee C} = \overline{B} \wedge \overline{C}$$

Des opérations logiques avec des triodes

Une opération NAND = NOT AND

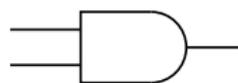


A “est vrai” si B **et** C **“ne sont pas vrais”**

$$A = \overline{B \wedge C} = \overline{B} \vee \overline{C}$$

Des opérations logiques élémentaires

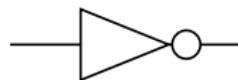
▶ AND : $A = B \wedge C$



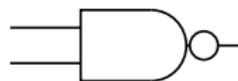
▶ OR : $A = B \vee C$



▶ NOT : $A = \overline{B}$



▶ NAND : $A = \overline{B \wedge C}$



▶ NOR : $A = \overline{B \vee C}$



▶ XOR : $A = (B \wedge \overline{C}) \vee (C \wedge \overline{B})$



▶ XNOR : $A = (B \wedge C) \vee (\overline{B} \wedge \overline{C})$



→ l'algèbre de Bool

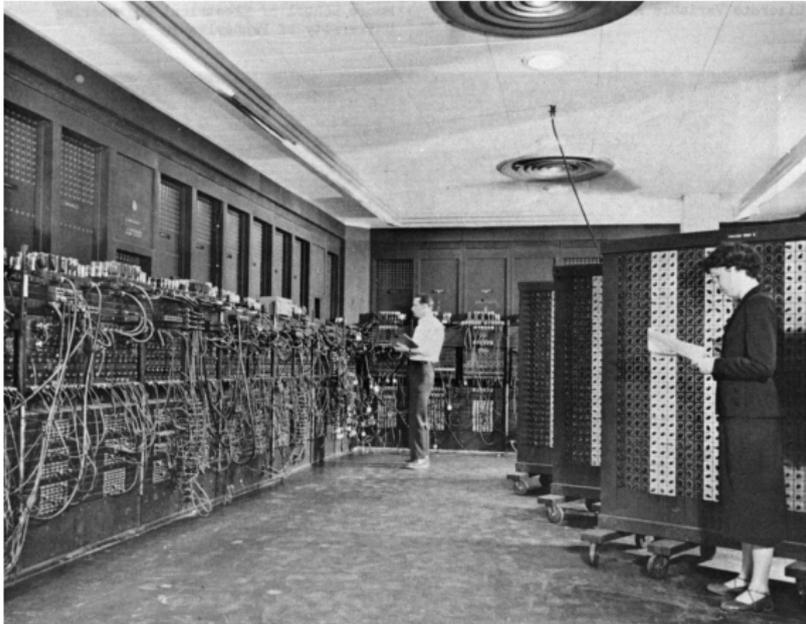
Les premiers ordinateurs électroniques

http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_computing_hardware

- ▶ Z3 (Konrad Zuse, Allemagne, 1941):
construit à la base de relais électromécaniques
(→ pas exactement électronique)
- ▶ Atanasoff-Berry Computer (Iowa State Univ., USA, 1942):
utilisé pour résoudre des équations différentielles linéaires
- ▶ Colossus (Grande Bretagne, 1943):
utilisé pour le déchiffrement des codes allemands
- ▶ ENIAC (University of Pennsylvania, USA, 1946):
premier ordinateur électronique "puissant"
pour des besoins généraux (17 468 tubes à vide)

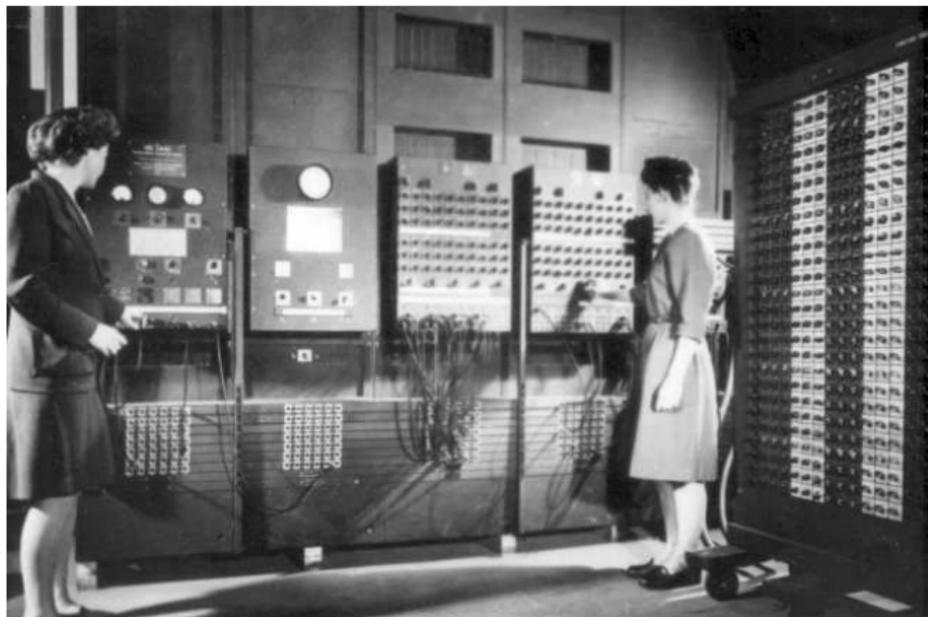
Les premiers ordinateurs électroniques

ENIAC



Les premiers ordinateurs électroniques

ENIAC — la programmation



Les premiers ordinateurs électroniques

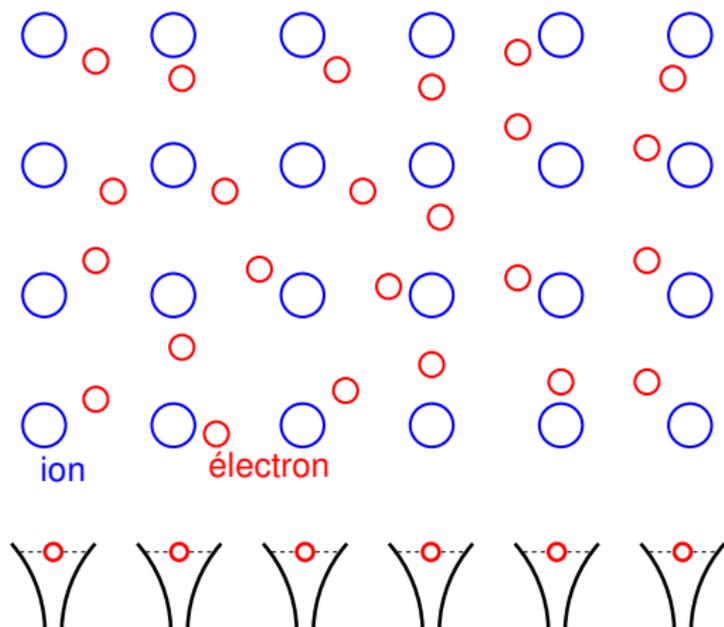
Problèmes:

- ▶ grande consommation d'énergie
- ▶ grande production de chaleur
- ▶ occupation de beaucoup d'espace
→ augmentation de puissance difficile
- ▶ problèmes de fiabilité
si un ou plusieurs tubes tombent en panne
(ENIAC: un tube en panne tous les deux jours)

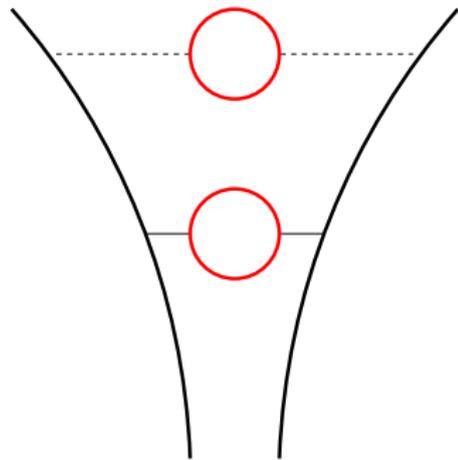
→ utilisation des **transistors** au lieu de tubes électroniques

Un métal

La structure cristalline d'un métal (caricature):

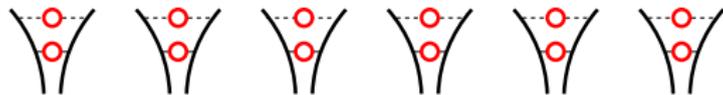


Un métal

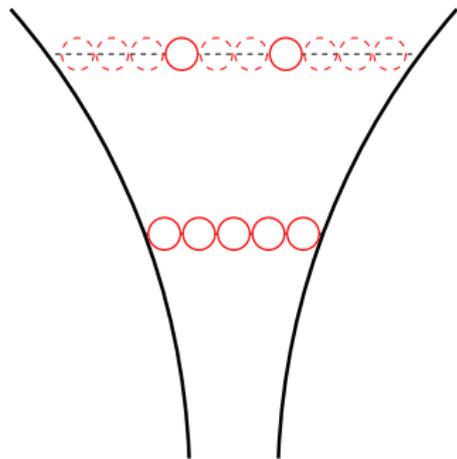


électrons quasi-libres
(bande de conduction)

électrons quasi-liés
(bande de valence)

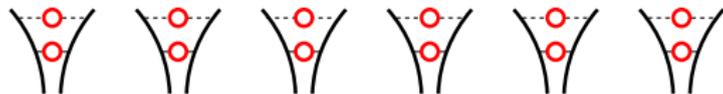


Un métal

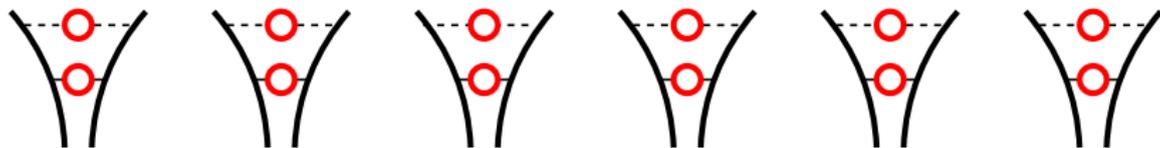


électrons quasi-libres
(bande de conduction)

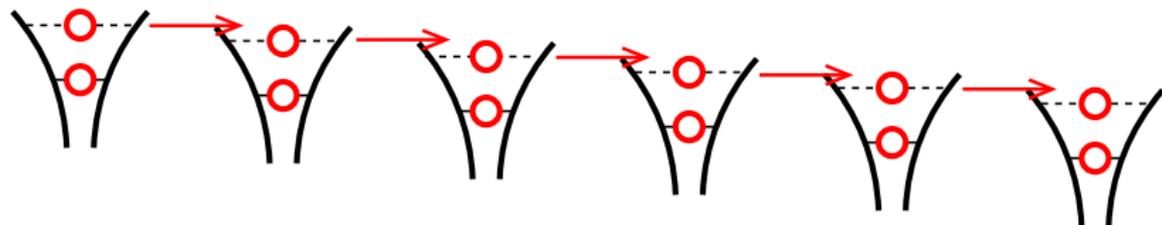
électrons quasi-liés
(bande de valence)



Un métal sous tension

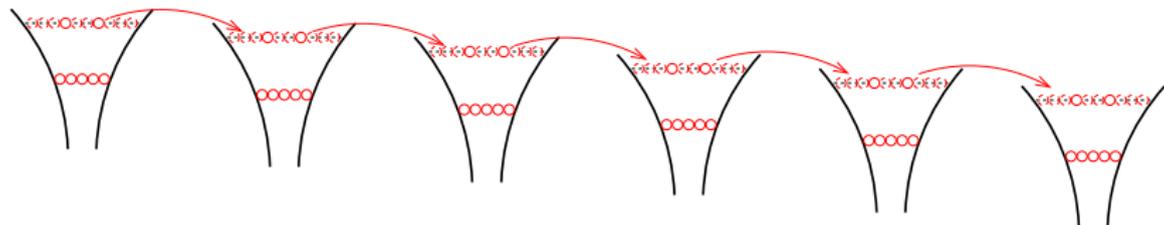


Un métal sous tension



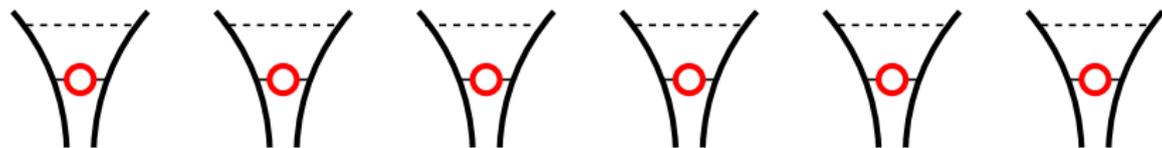
→ courant

Un métal sous tension

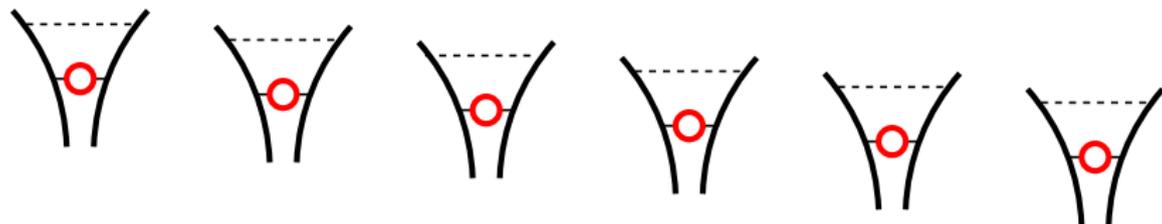


→ courant

Un isolateur (par exemple diamant)

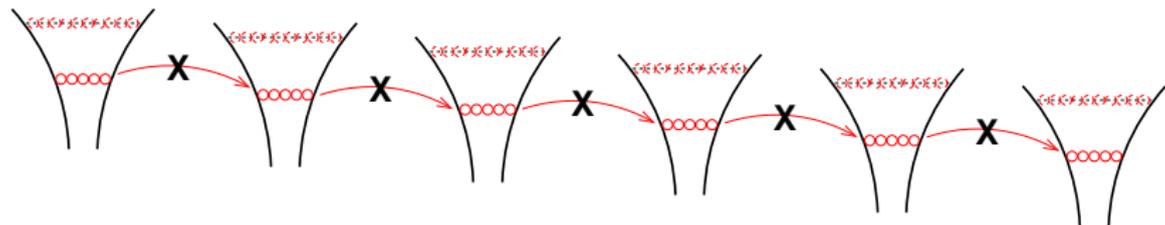


Un isolateur sous tension



→ pas de courant

Un isolateur sous tension



→ pas de courant

Un semi-conducteur (par exemple silicium)

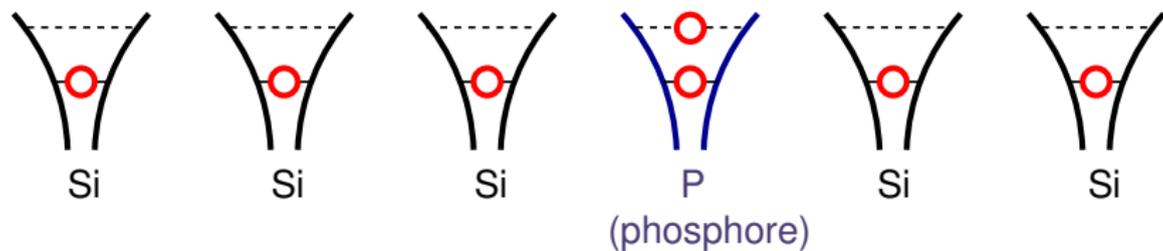


Un semi-conducteur se comporte comme un isolateur ...
à l'exception qu'il est relativement facile à
exciter des électrons

Un semi-conducteur à une haute température



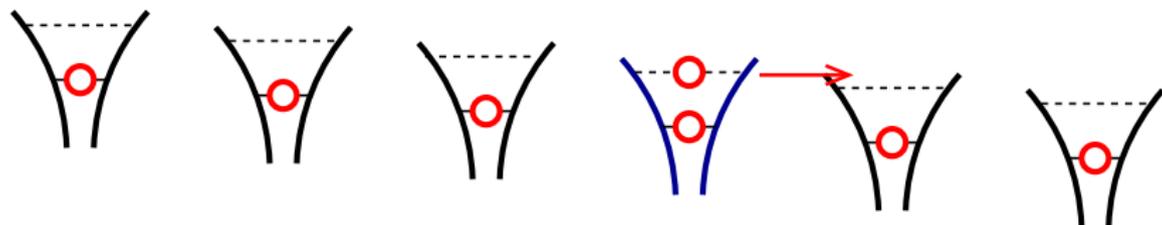
Un semi-conducteur dopé



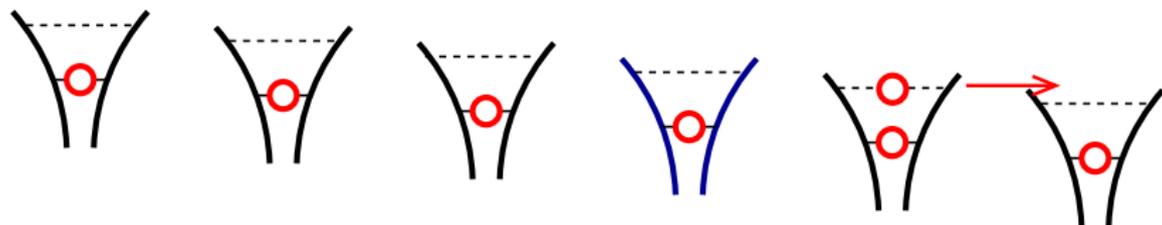
implantation des atomes avec **un électron de plus**

→ **donneurs d'électrons: dopage n**

Un semi-conducteur dopé sous tension

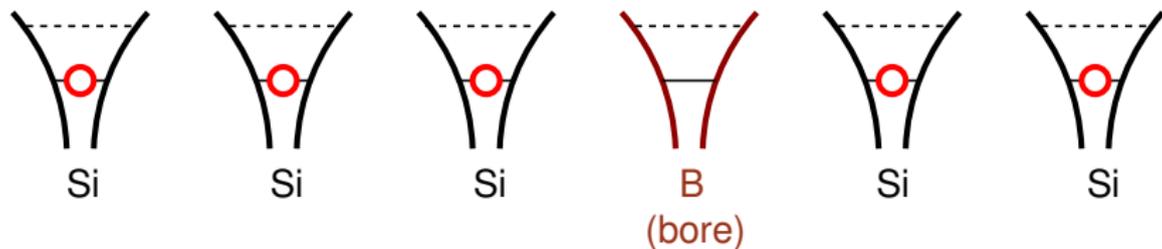


Un semi-conducteur dopé sous tension



→ courant très faible

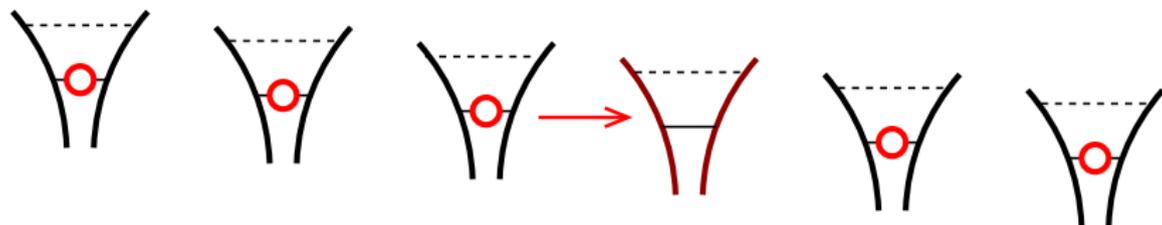
Un semi-conducteur dopé



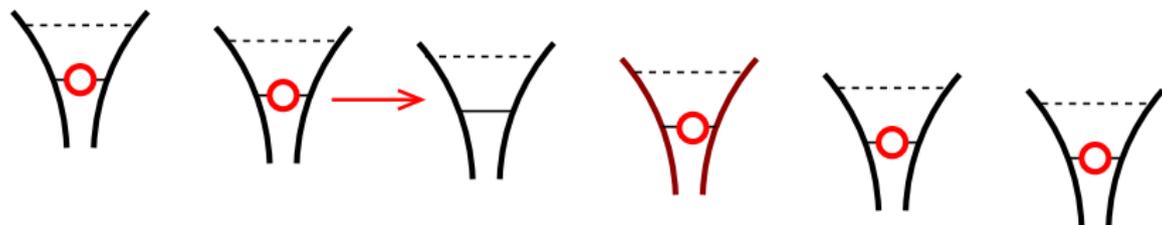
implantation des atomes avec **un électron de moins**

→ **accepteurs** d'électrons: **dopage p**

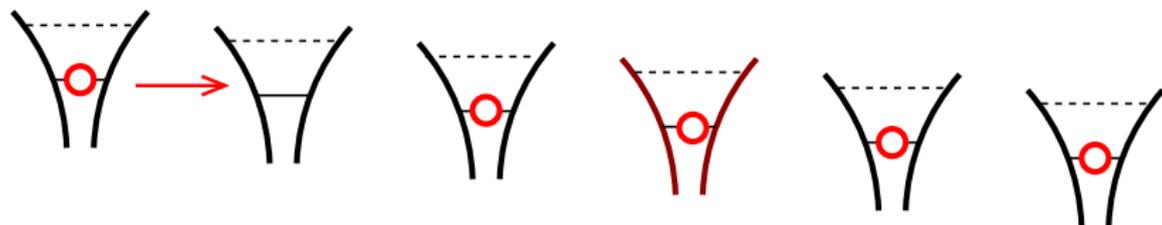
Un semi-conducteur dopé sous tension



Un semi-conducteur dopé sous tension

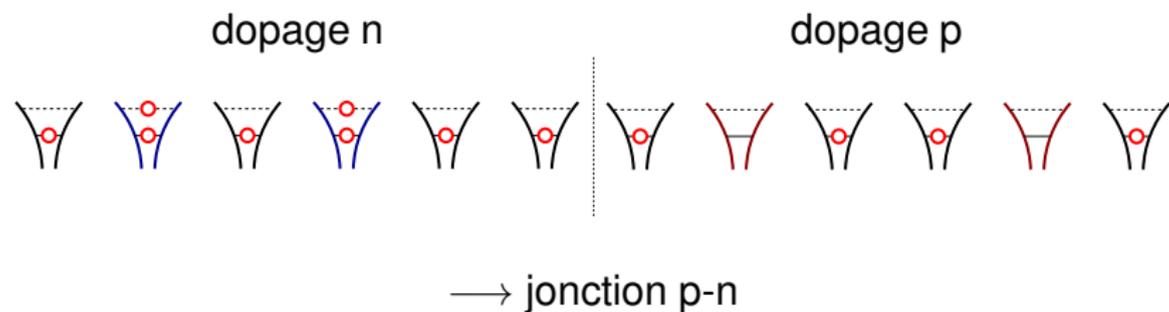


Un semi-conducteur dopé sous tension

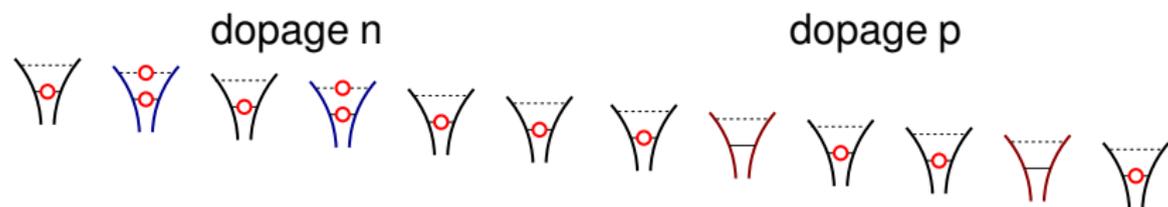


→ courant très faible des **trous** dans l'autre sens

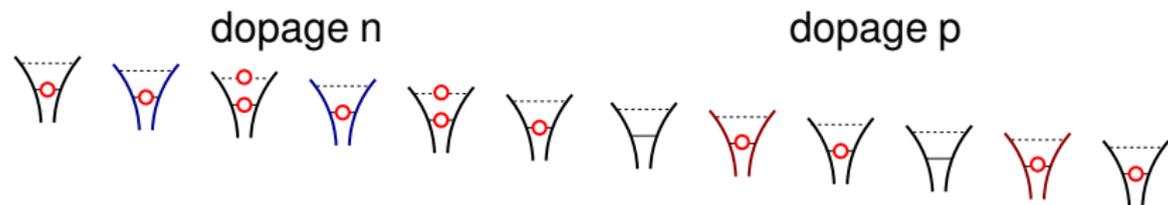
Une diode à la base d'un semi-conducteur



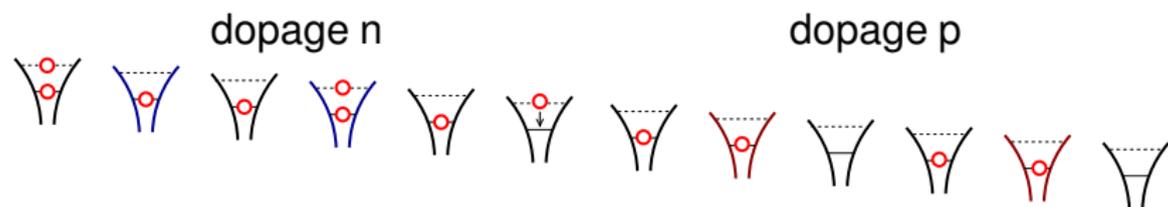
Une diode à la base d'un semi-conducteur



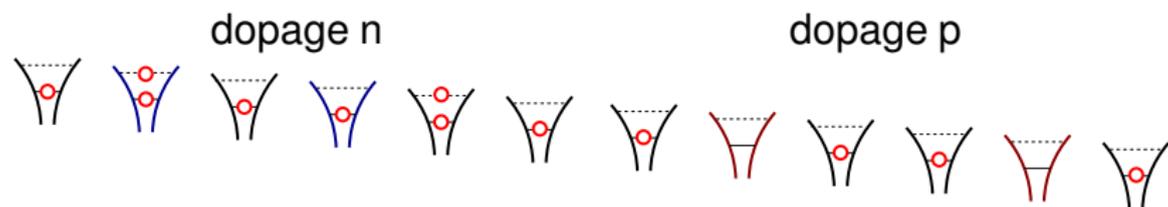
Une diode à la base d'un semi-conducteur



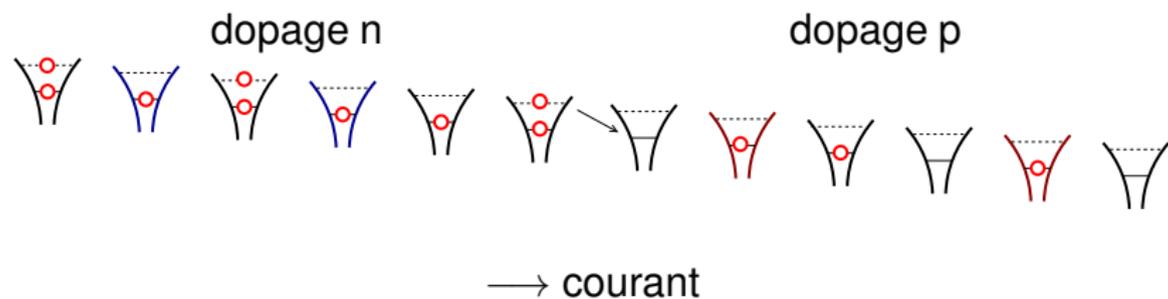
Une diode à la base d'un semi-conducteur



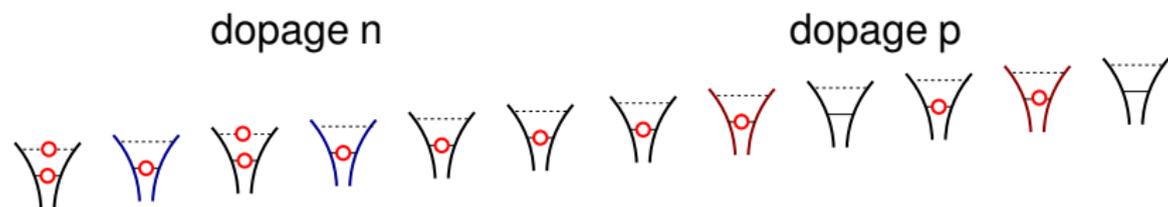
Une diode à la base d'un semi-conducteur



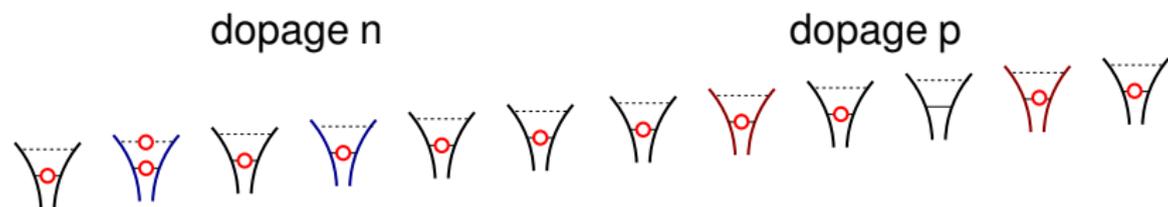
Une diode à la base d'un semi-conducteur



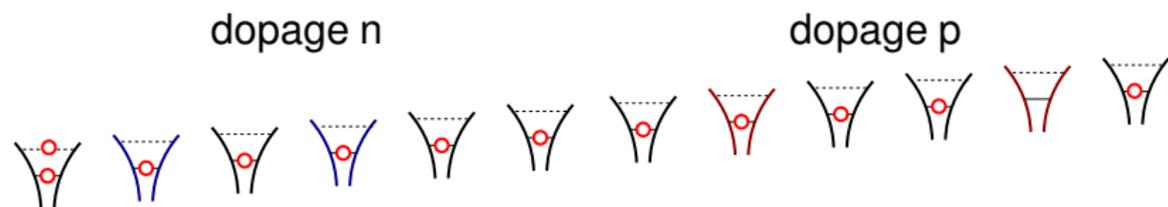
Une diode à la base d'un semi-conducteur



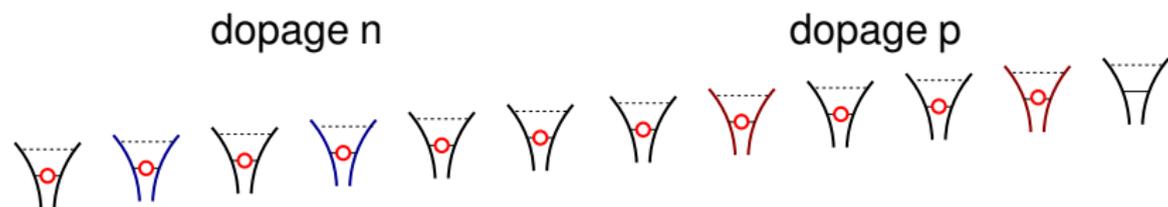
Une diode à la base d'un semi-conducteur



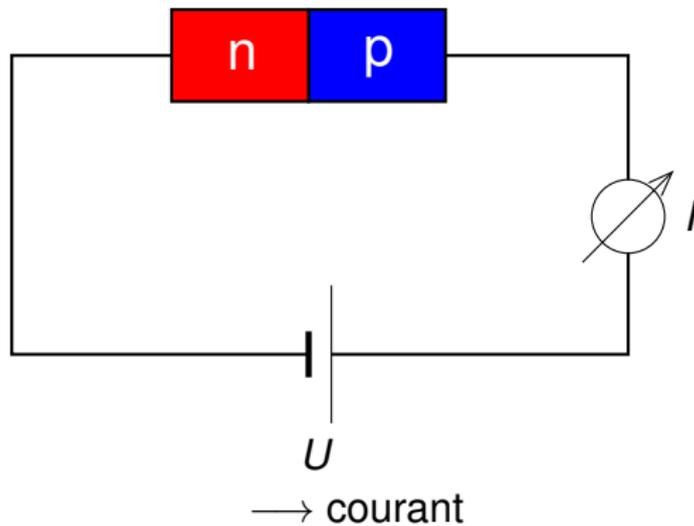
Une diode à la base d'un semi-conducteur



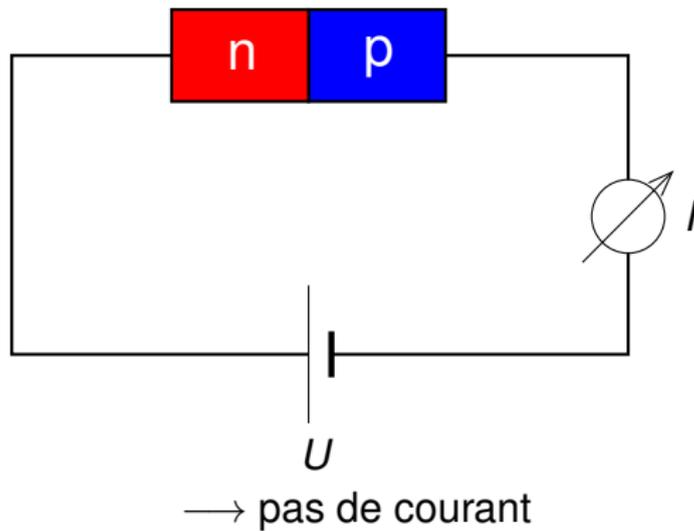
Une diode à la base d'un semi-conducteur



Une diode à la base d'un semi-conducteur

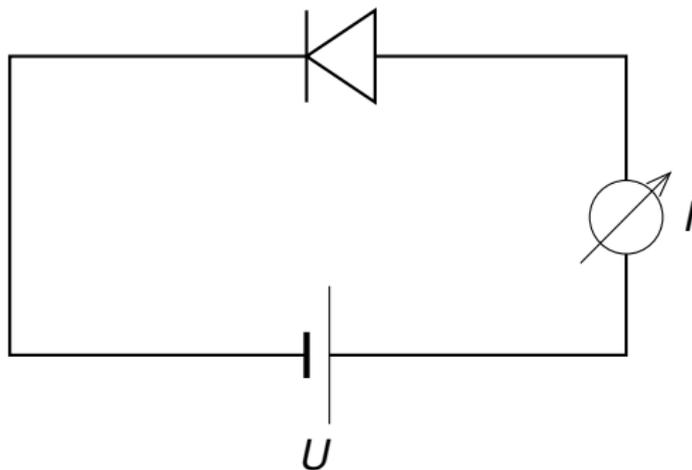


Une diode à la base d'un semi-conducteur

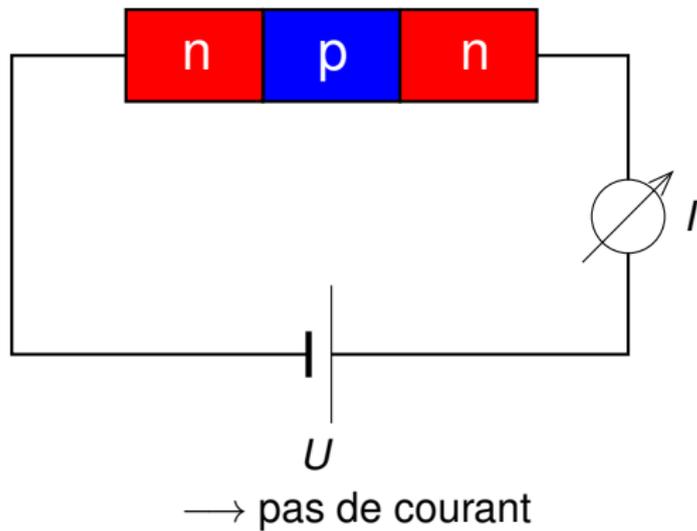


Une diode à la base d'un semi-conducteur

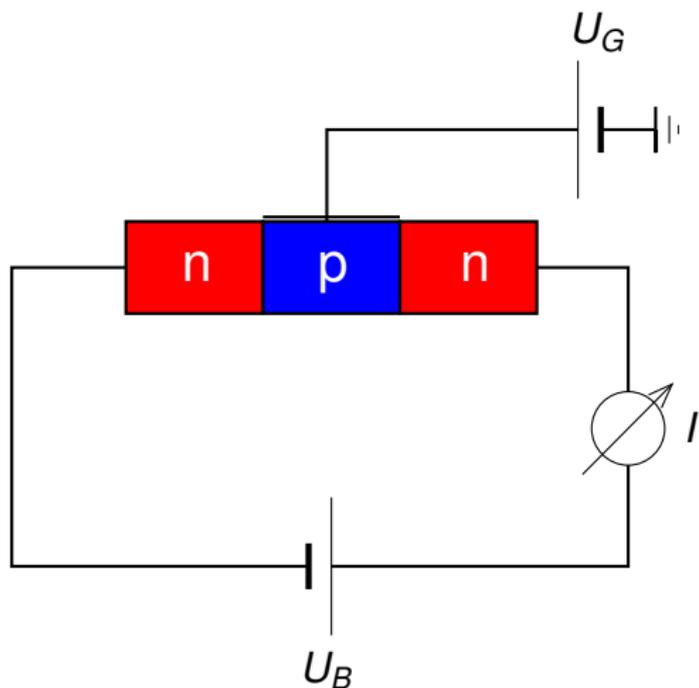
Symbole technique:



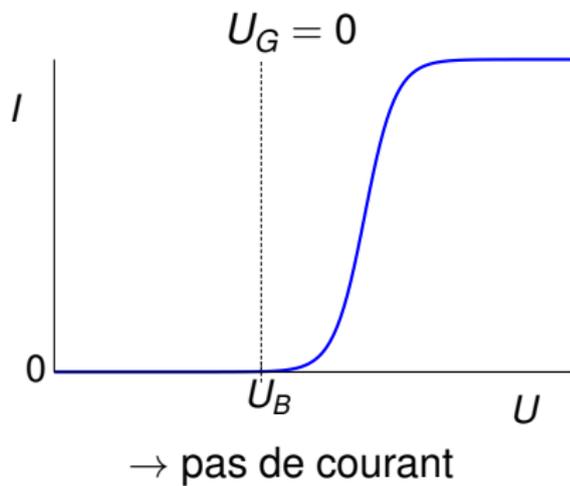
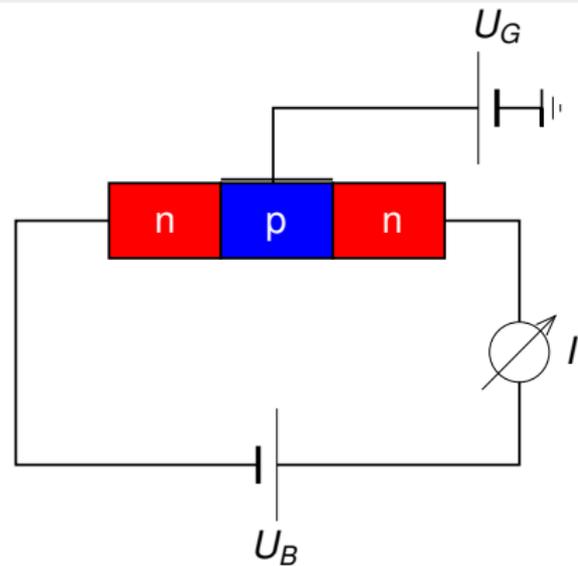
Une triode à la base d'un semi-conducteur



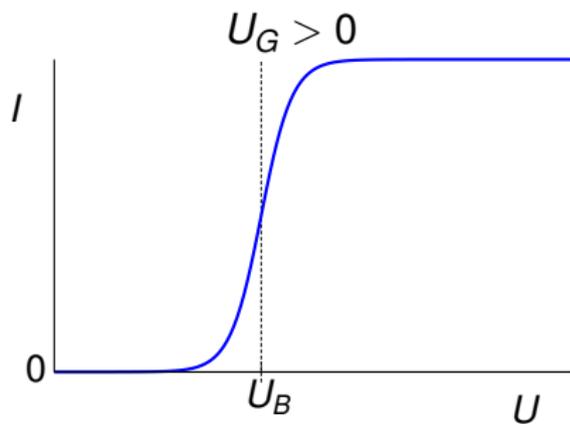
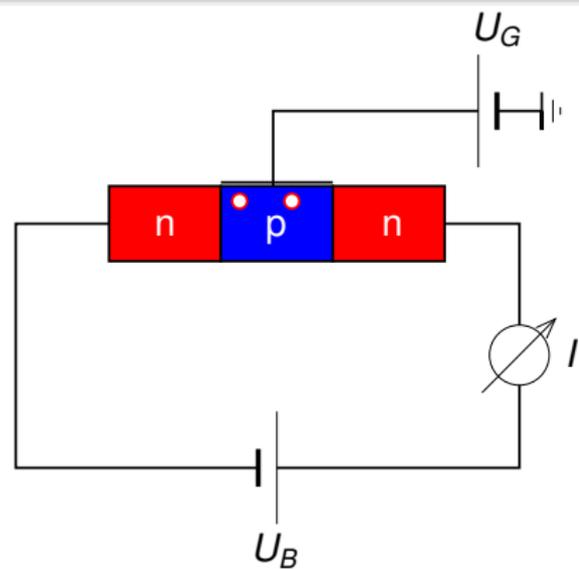
Une triode à la base d'un semi-conducteur



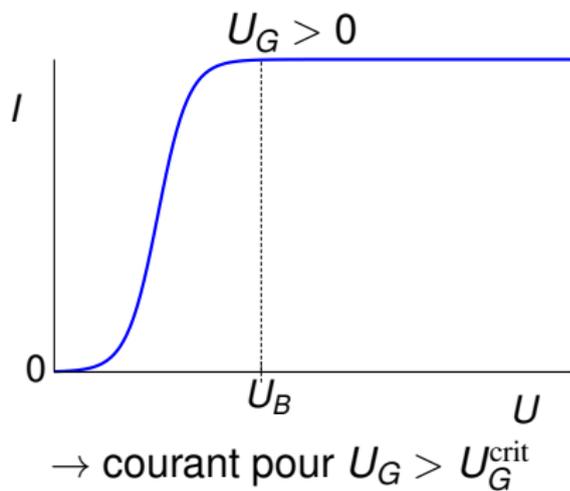
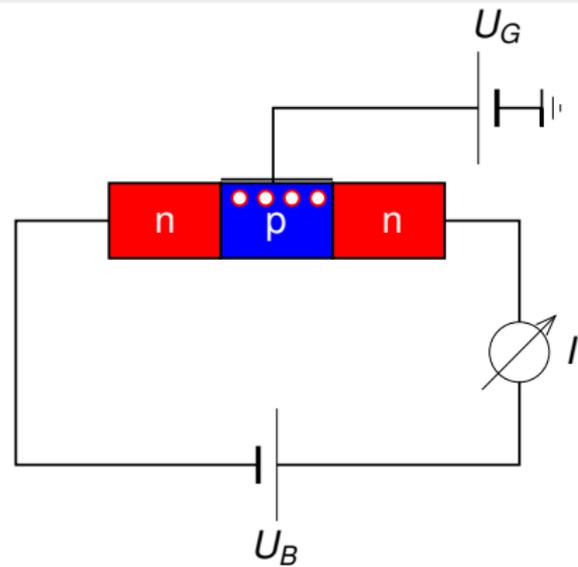
Le fonctionnement d'une triode



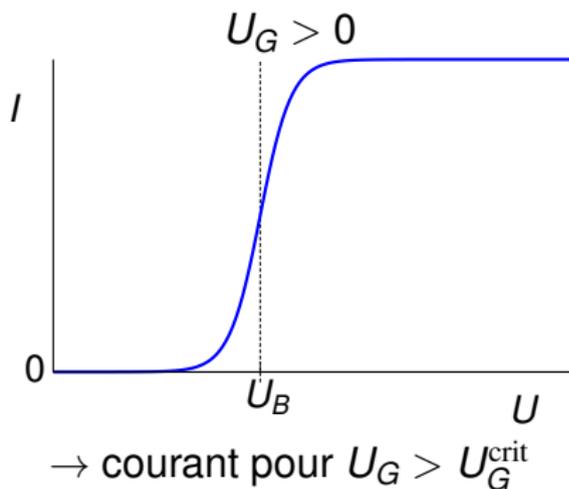
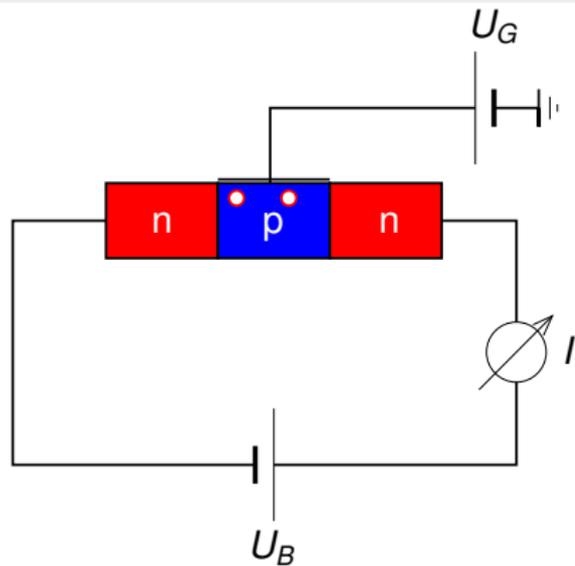
Le fonctionnement d'une triode



Le fonctionnement d'une triode

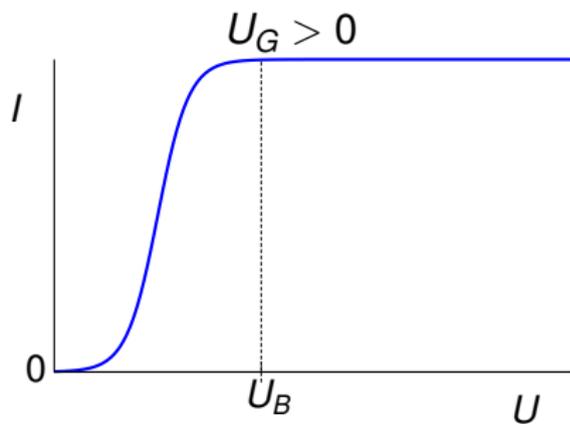
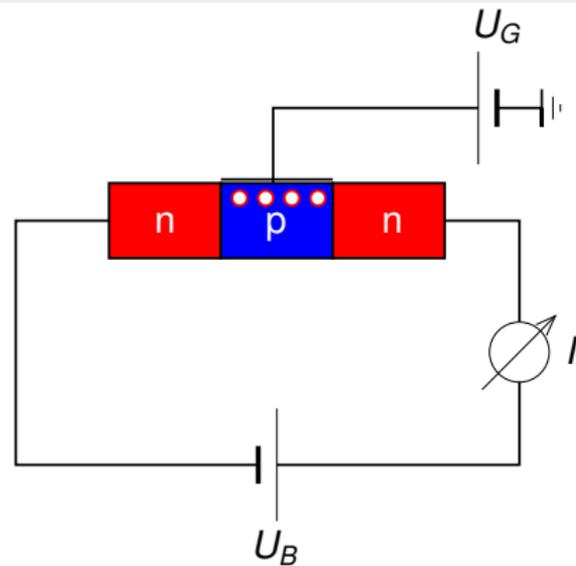


Le fonctionnement d'une triode



→ **amplificateur** d'un signal électronique:
petite variation en $U_G \Rightarrow$ grande variation en I

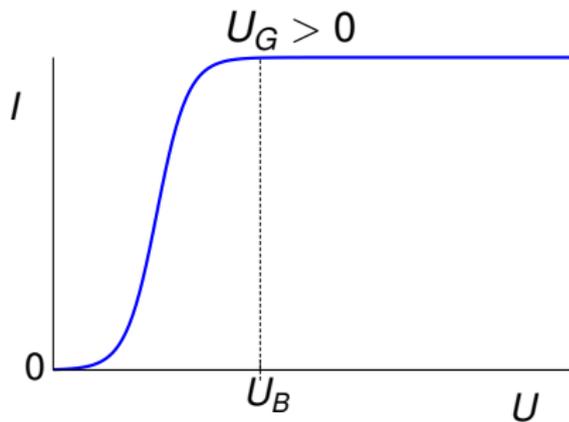
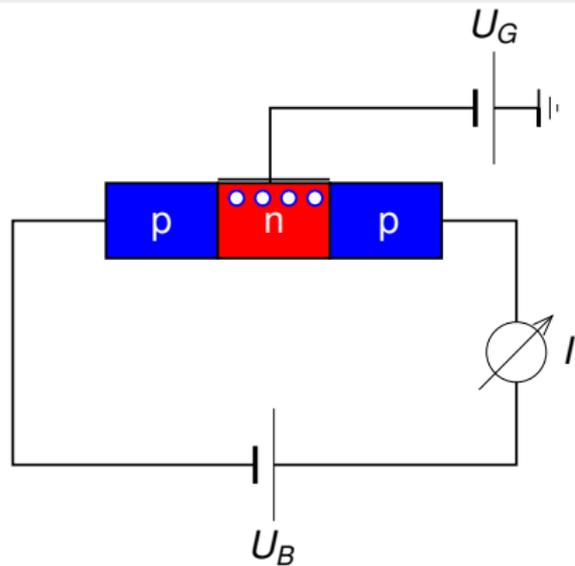
Le fonctionnement d'une triode



→ courant pour $U_G > U_G^{\text{crit}}$

→ **TRANSISTOR** (= trans-resistor)

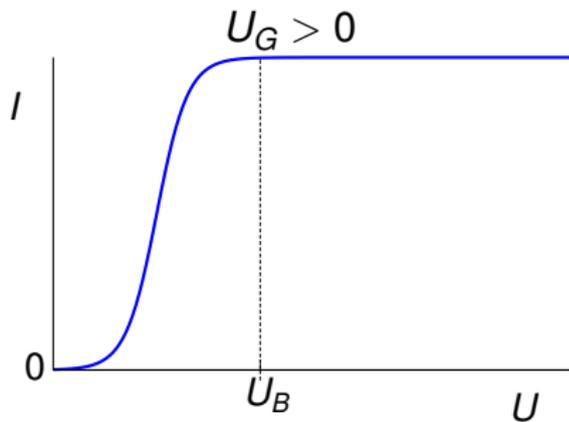
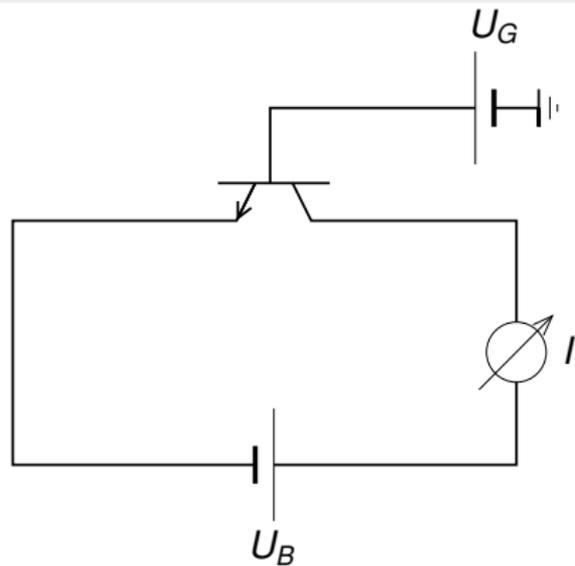
Le fonctionnement d'une triode



→ courant pour $U_G > U_G^{\text{crit}}$

→ **TRANSISTOR** (= trans-resistor)

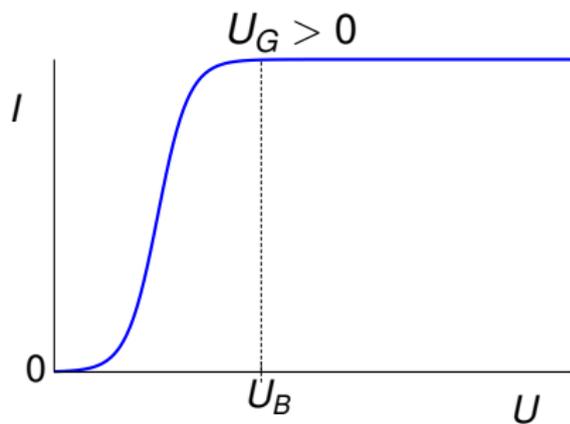
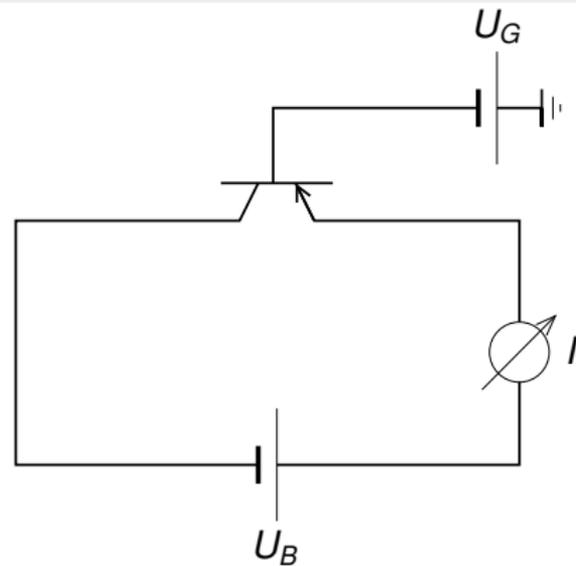
Le fonctionnement d'une triode



→ courant pour $U_G > U_G^{\text{crit}}$

→ **TRANSISTOR** (= trans-resistor)

Le fonctionnement d'une triode



→ courant pour $U_G > U_G^{\text{crit}}$

→ **TRANSISTOR** (= trans-resistor)

Le transistor

Inventeurs:

John Bardeen, Walter Brattain, and William Shockley,
AT&T Bell Labs (USA), 1947 (prix Nobel 1956)



Le transistor

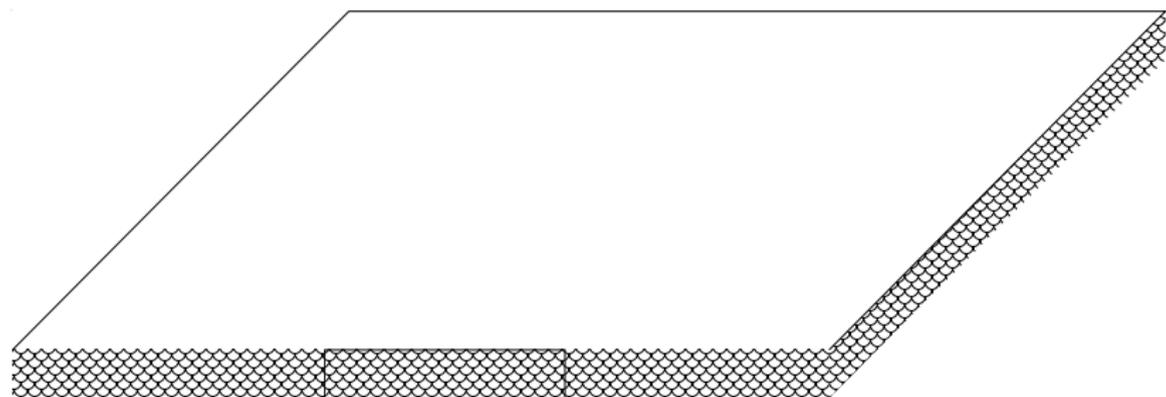
Inventeurs:

John Bardeen, Walter Brattain, and William Shockley,
AT&T Bell Labs (USA), 1947 (prix Nobel 1956)

Avantages comparé au tube à vide:

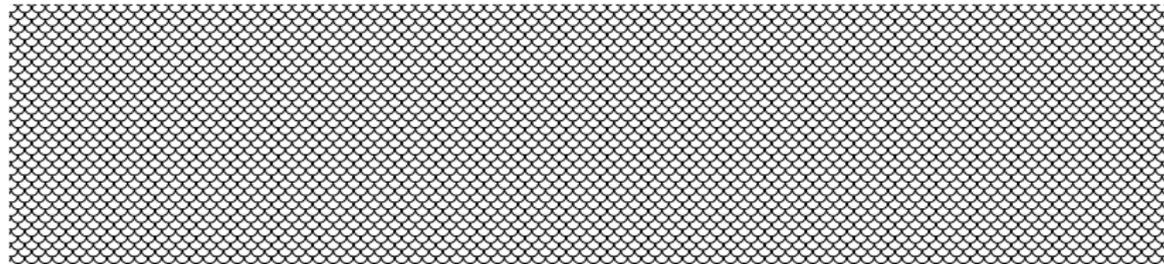
- petite taille ⇒ miniaturisation possible
- fonctionne avec des plus petites tensions
- beaucoup plus petite consommation d'énergie
- haute fiabilité, très longue durée de vie
- possibilité de créer des **circuits intégrés**

Fabrication des circuits intégrés (fortement simplifiée)



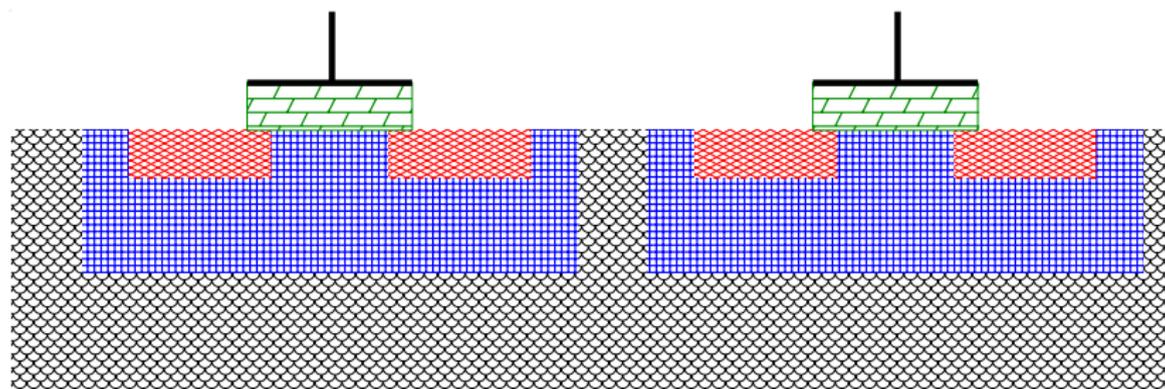
- ▶ wafer (galette) ultra-pur de silicium

Fabrication des circuits intégrés (fortement simplifiée)



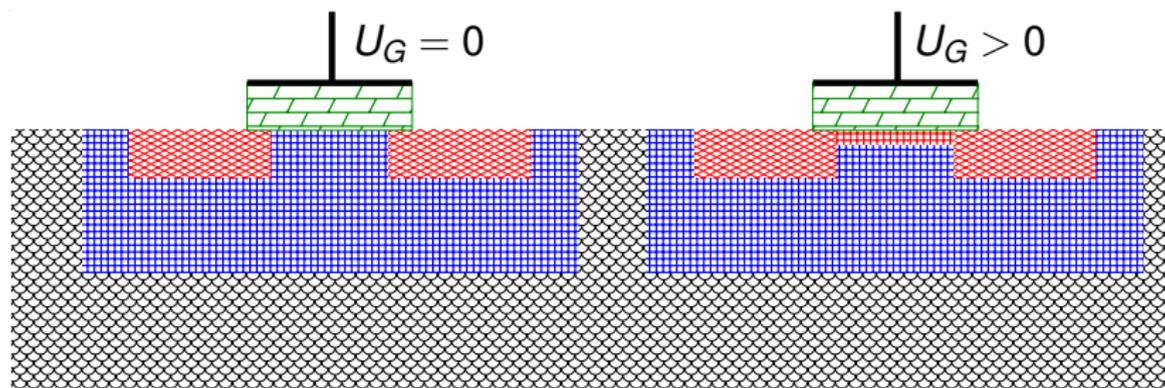
- ▶ wafer (galette) ultra-pur de silicium

Fabrication des circuits intégrés (fortement simplifiée)



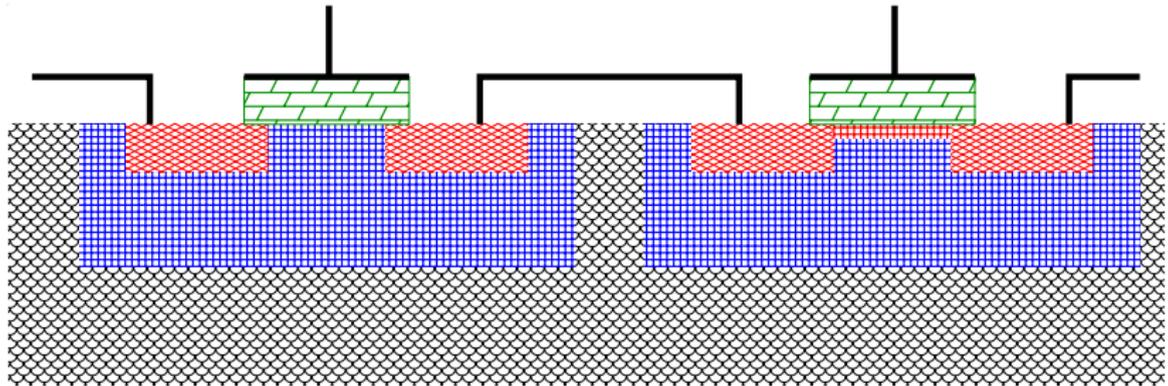
- ▶ wafer (galette) ultra-pur de silicium
- ▶ dopage p
- ▶ dopage n
- ▶ couche isolante (→ transistor MOSFET)
- ▶ contacts métalliques

Fabrication des circuits intégrés (fortement simplifiée)



- ▶ wafer (galette) ultra-pur de silicium
- ▶ dopage p
- ▶ dopage n
- ▶ couche isolante (→ transistor MOSFET)
- ▶ contacts métalliques

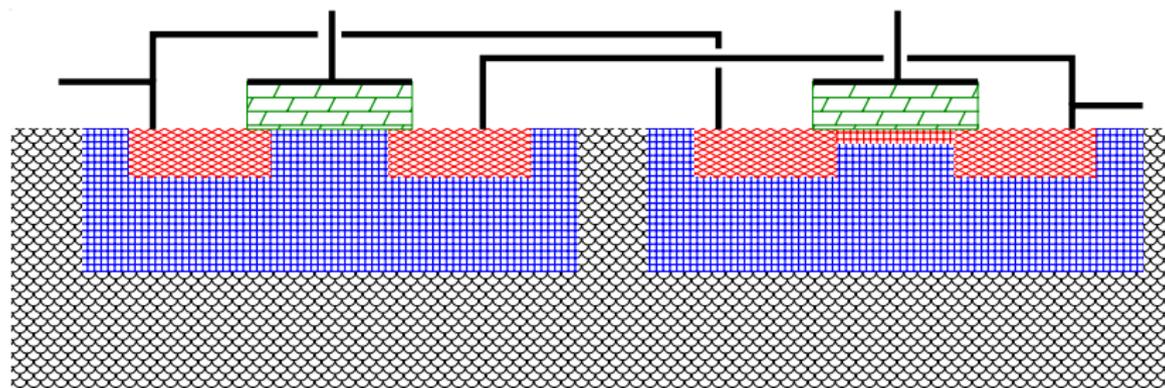
Fabrication des circuits intégrés (fortement simplifiée)



- ▶ wafer (galette) ultra-pur de silicium
- ▶ dopage p
- ▶ dopage n
- ▶ couche isolante (→ transistor MOSFET)
- ▶ contacts métalliques

→ un circuit AND

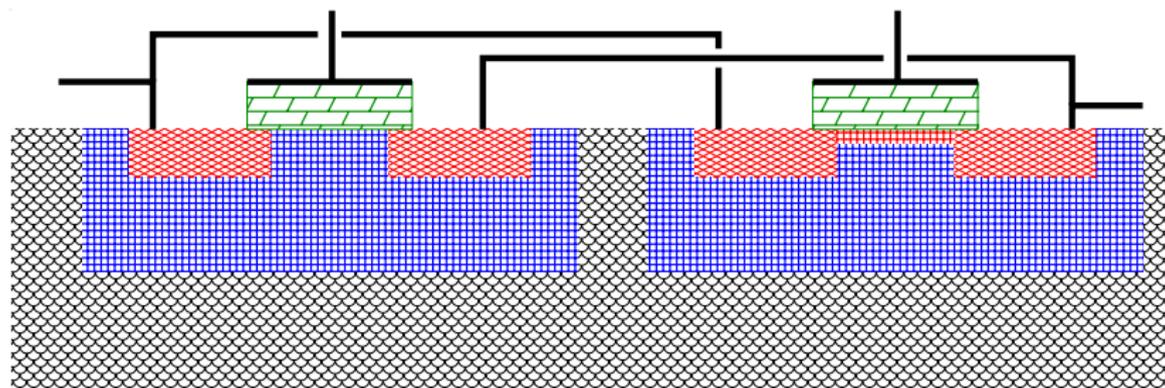
Fabrication des circuits intégrés (fortement simplifiée)



- ▶ wafer (galette) ultra-pur de silicium
- ▶ dopage p
- ▶ dopage n
- ▶ couche isolante (→ transistor MOSFET)
- ▶ contacts métalliques

→ un circuit OR

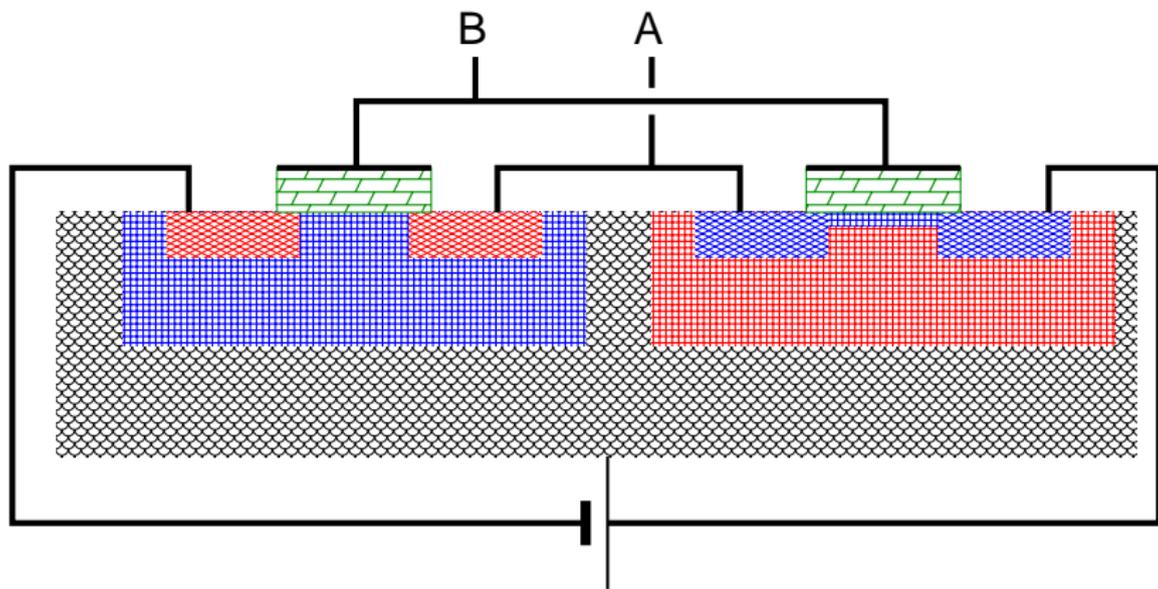
Fabrication des circuits intégrés (fortement simplifiée)



- ▶ wafer (galette) ultra-pur de silicium
- ▶ dopage p
- ▶ dopage n
- ▶ couche isolante (→ transistor MOSFET)
- ▶ contacts métalliques

→ fabrication à l'échelle nano (< 100 nm)

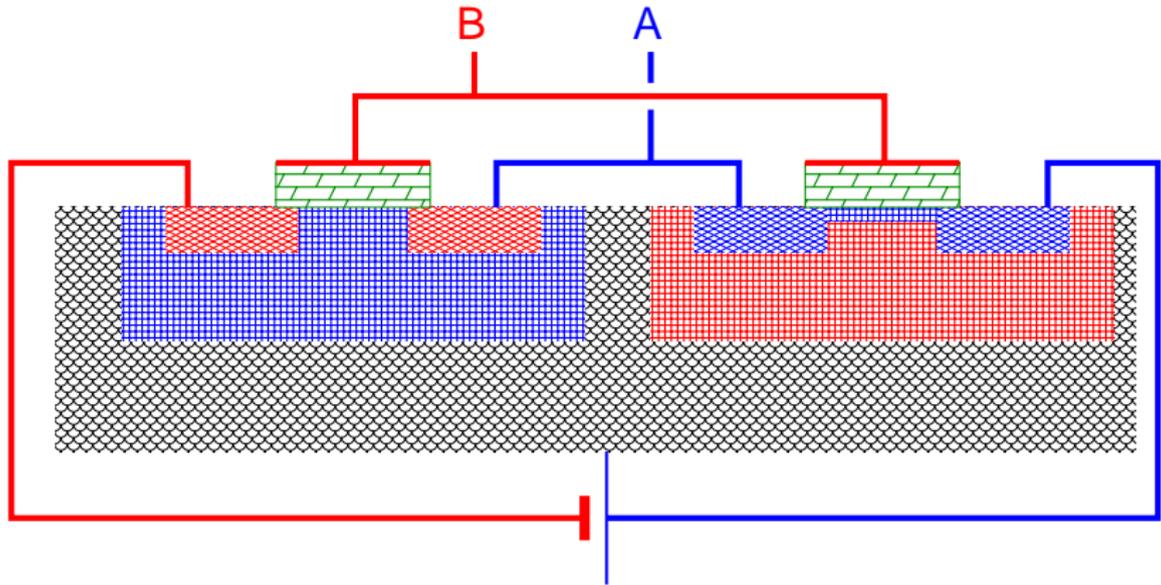
Fabrication d'un circuit NOT (technologie CMOS)



$$A = \overline{B}$$

“B est faux” ($U_B < 0$)

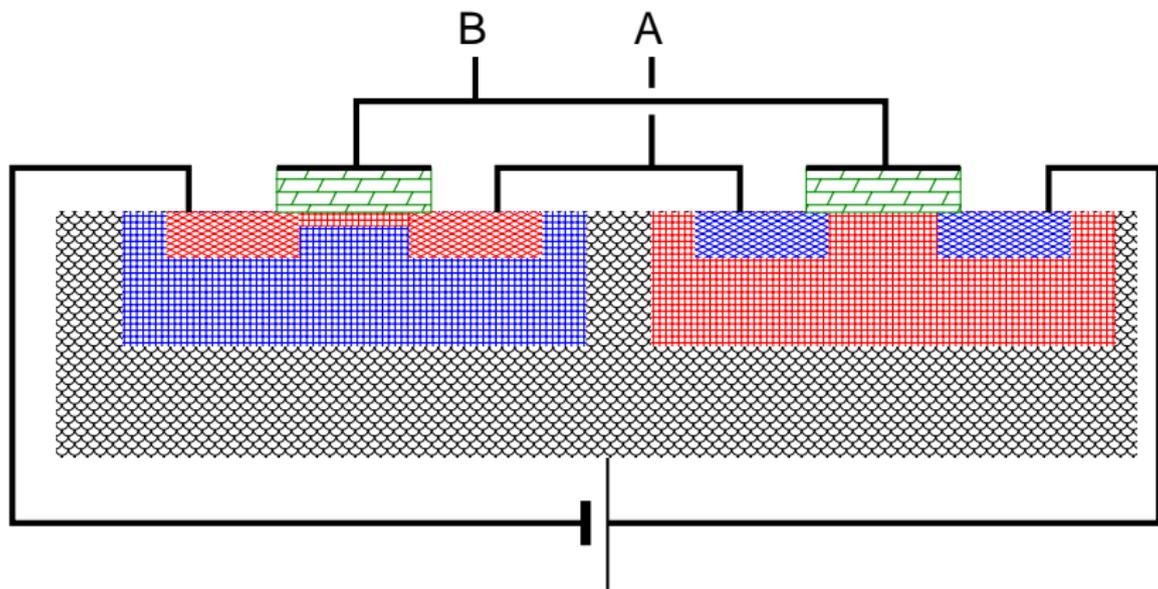
Fabrication d'un circuit NOT (technologie CMOS)



$$A = \overline{B}$$

“ B est faux” ($U_B < 0$) \Rightarrow “ A est vrai” ($U_A > 0$)

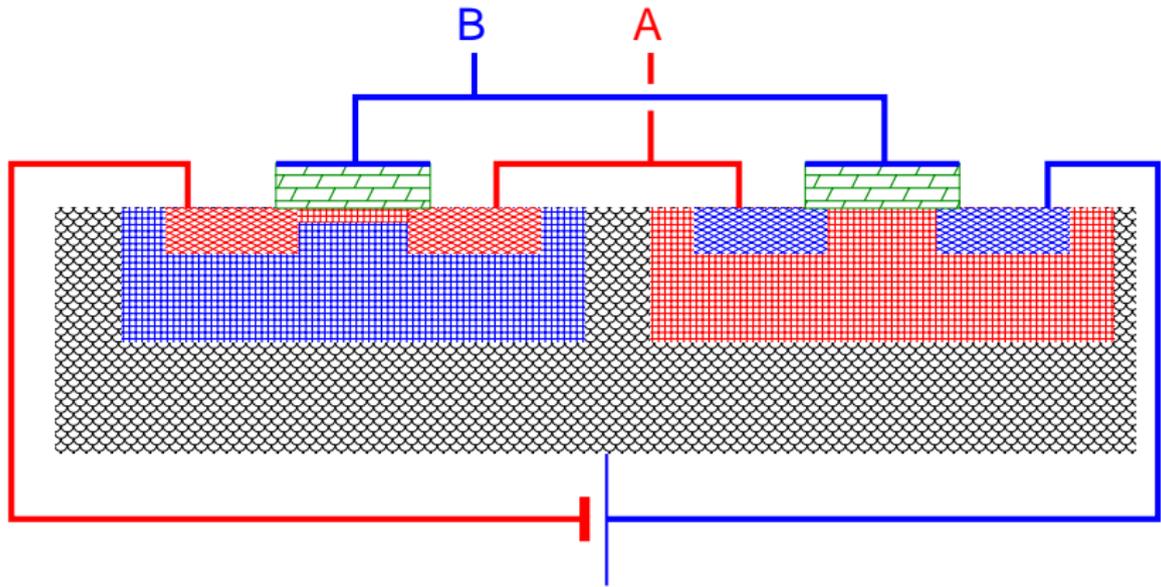
Fabrication d'un circuit NOT (technologie CMOS)



$$A = \overline{B}$$

“B est vrai” ($U_B > 0$)

Fabrication d'un circuit NOT (technologie CMOS)



$$A = \overline{B}$$

“ B est vrai” ($U_B > 0$) \Rightarrow “ A est faux” ($U_A < 0$)