

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:

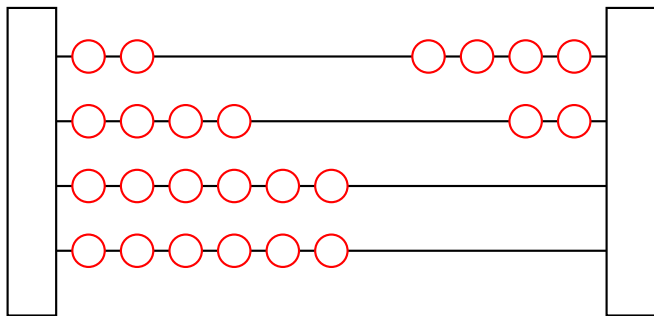
construire une machine qui effectue des **opérations logiques**

Qu'est-ce que c'est ?

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

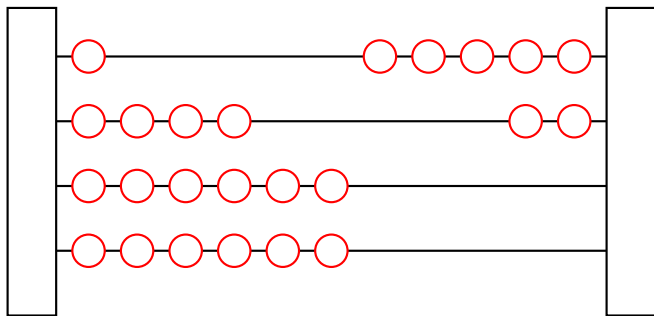
1.1 La préhistoire de l'informatique

Exemple primaire: l'addition avec l'abaque



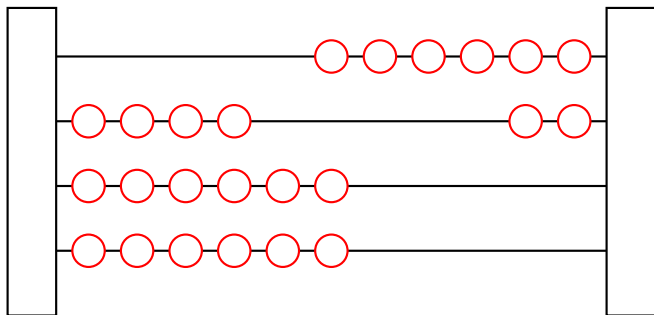
1.1 La préhistoire de l'informatique

Exemple primaire: l'addition avec l'abaque



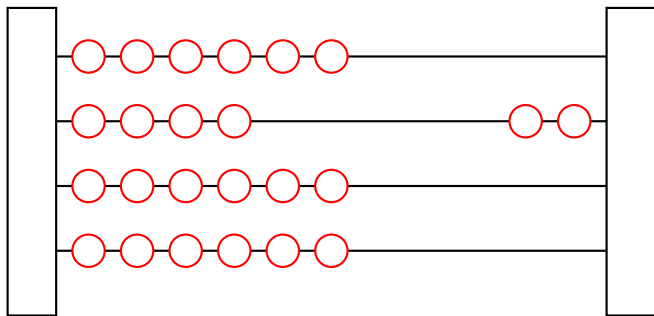
1.1 La préhistoire de l'informatique

Exemple primaire: l'addition avec l'abaque



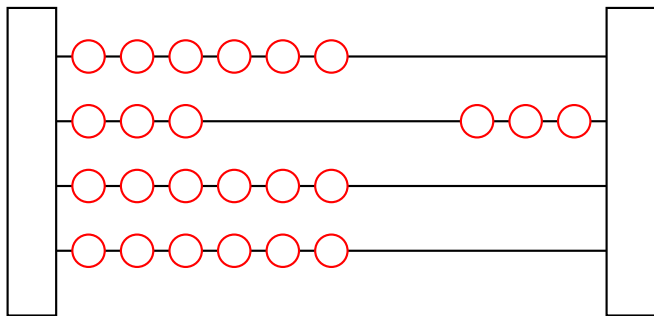
1.1 La préhistoire de l'informatique

Exemple primaire: l'addition avec l'abaque



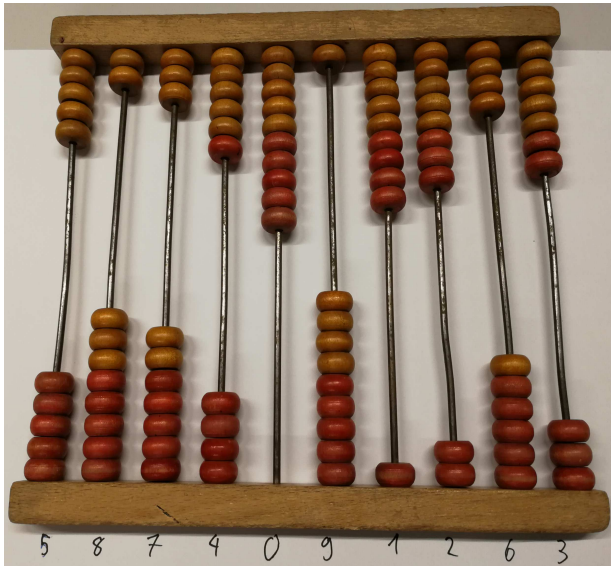
1.1 La préhistoire de l'informatique

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

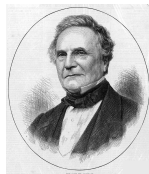
- ▶ Wilhelm Schickard, 1632
- ▶ Blaise Pascal, 1642
- ▶ Gottfried Wilhelm Leibniz, 1672

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)

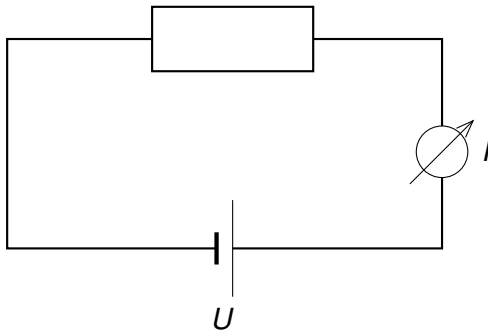
proposition des algorithmes
pour l'analytical engine
afin d'effectuer des calculs spécifiques
(nombres de Bernoulli)

- la première informaticienne du monde



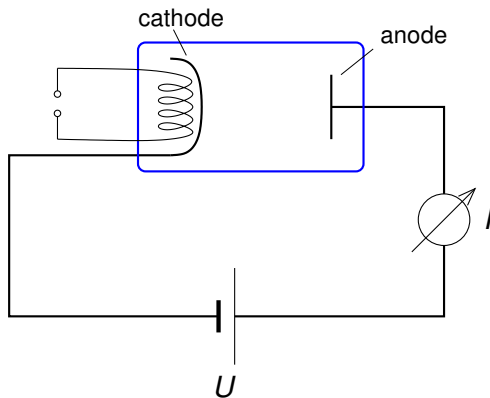
1.2 L'électronique avec les tubes à vide

Un circuit électrique ...



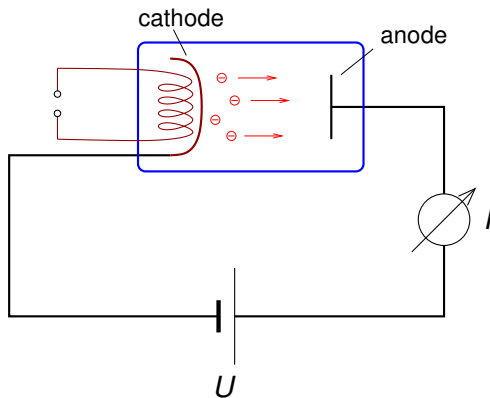
1.2 L'électronique avec les tubes à vide

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



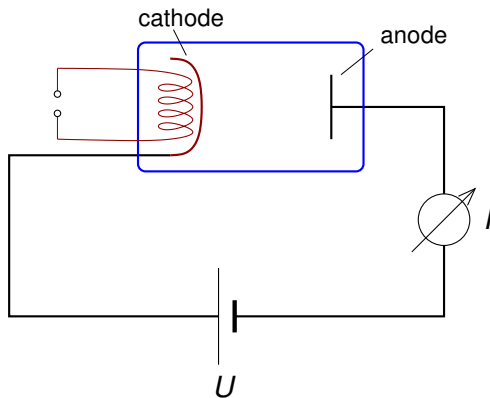
1.2 L'électronique avec les tubes à vide

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



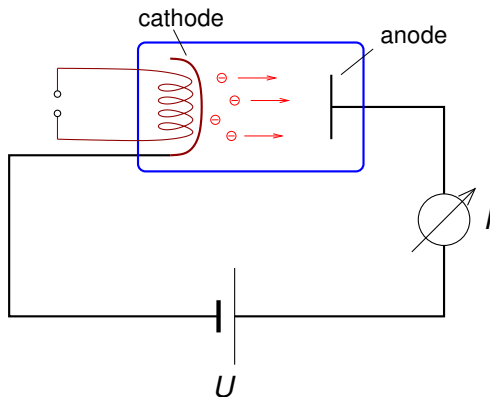
1.2 L'électronique avec les tubes à vide

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



1.2 L'électronique avec les tubes à vide

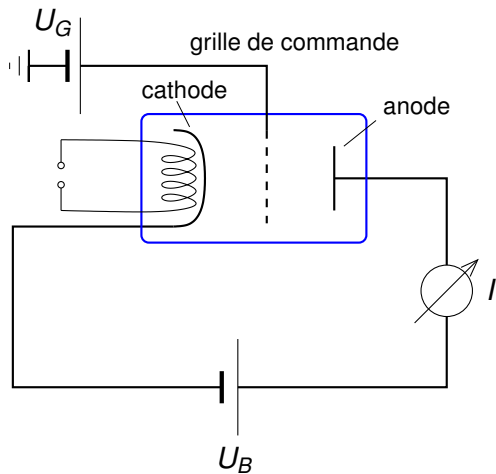
Un circuit électrique avec un **tube à vide**:



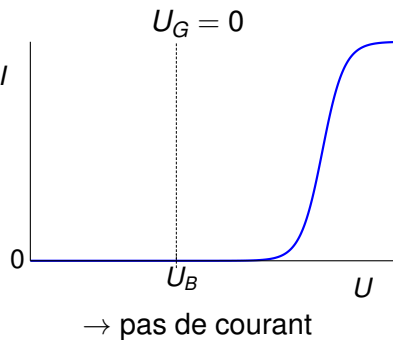
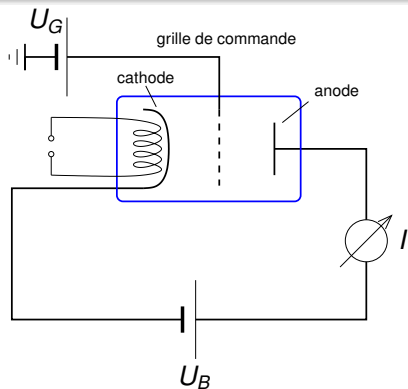
→ rectification du courant électrique: **diode**

J. A. Fleming 1904

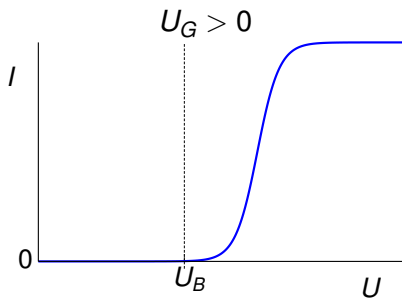
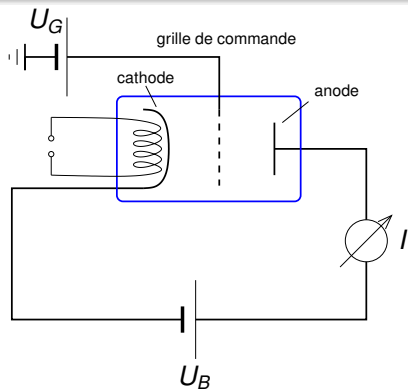
Lee de Forest 1907



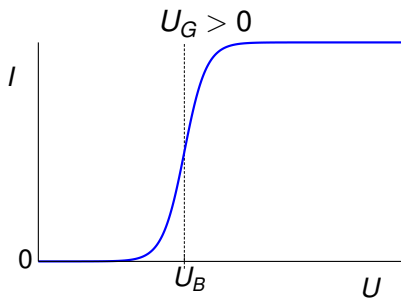
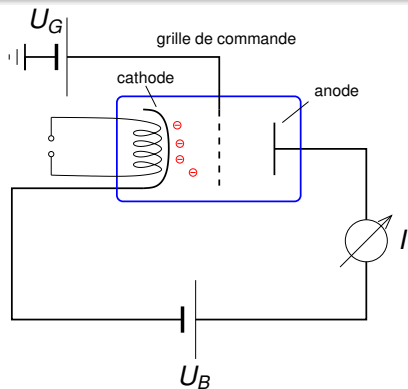
Le fonctionnement d'une triode



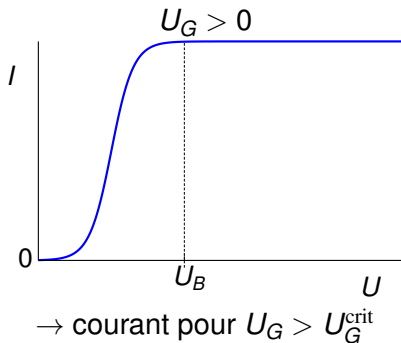
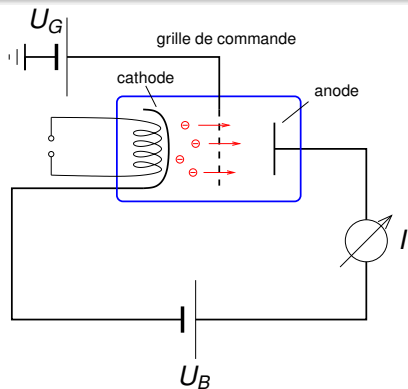
Le fonctionnement d'une triode



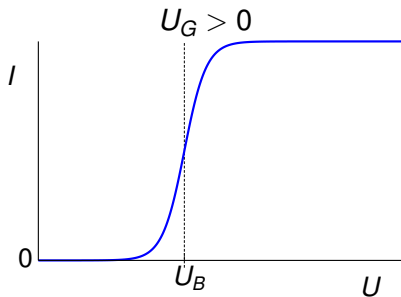
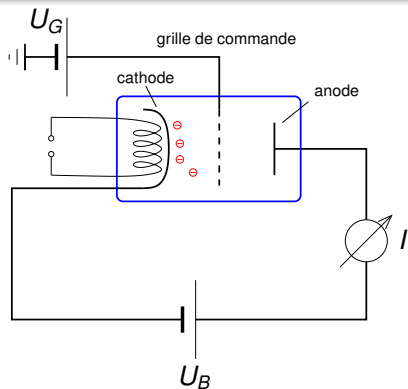
Le fonctionnement d'une triode



Le fonctionnement d'une triode



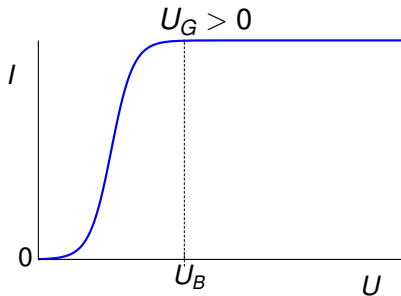
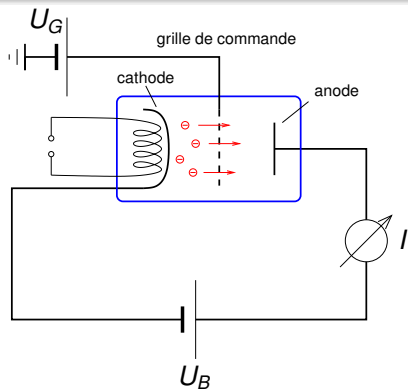
Le fonctionnement d'une triode



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

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

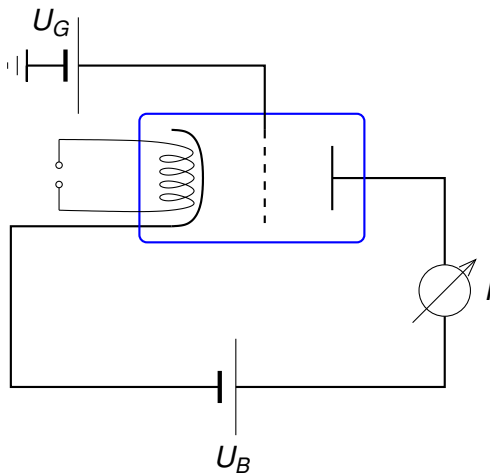
Le fonctionnement d'une triode



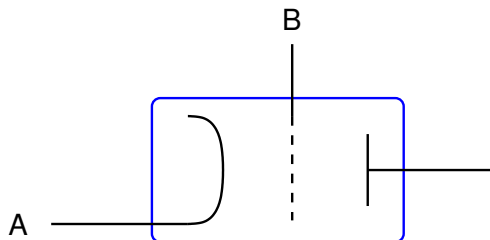
→ courant pour $U_G > U_G^{\text{crit}}$

→ 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



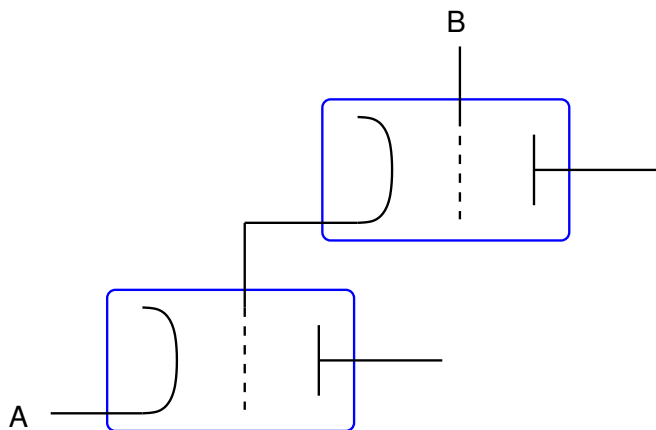
A “est vrai” si B “est vrai”

= 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

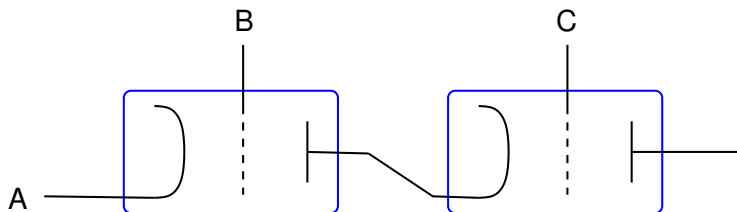
... ou (plutôt) une tension capable à induire d'autres courants

Des opérations logiques avec des triodes



Des opérations logiques avec des triodes

Une opération AND

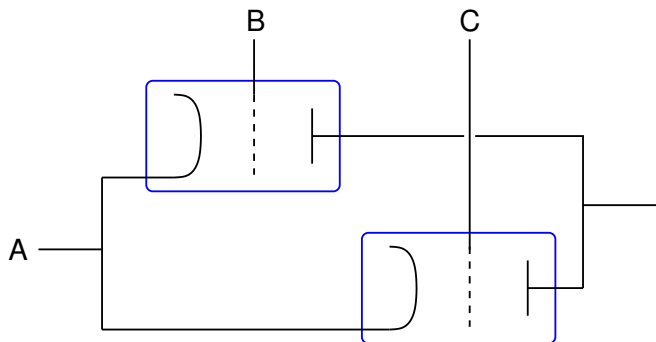


A “est vrai” si B **et** C “sont vrai”

$$A = B \wedge C$$

Des opérations logiques avec des triodes

Une opération OR

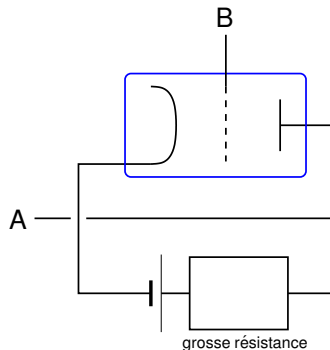


A “est vrai” si B **ou** C “sont vrai”

$$A = B \vee C$$

Des opérations logiques avec des triodes

Une opération NOT

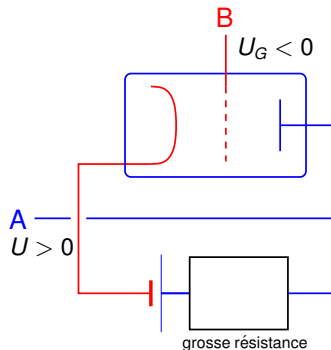


A "est vrai" si B "n'est pas vrai"

$$A = \overline{B}$$

Des opérations logiques avec des triodes

Une opération NOT

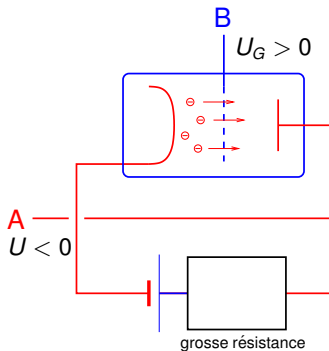


A “est vrai” si B “n’est pas vrai”

$$A = \overline{B}$$

Des opérations logiques avec des triodes

Une opération NOT

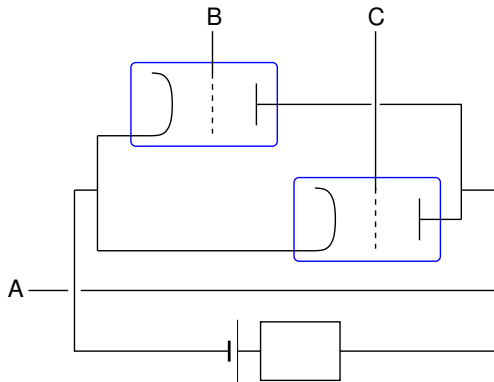


A "n'est pas vrai" si B "est vrai"

$$A = \overline{B}$$

Des opérations logiques avec des triodes

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

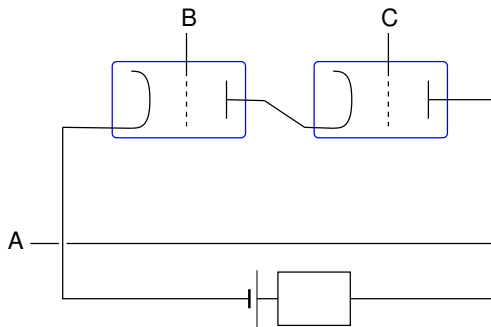


A “est vrai” si **ni B ni C** “sont vrais”

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

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

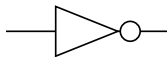
► AND : $A = B \wedge C$



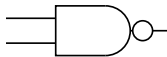
► OR : $A = B \vee C$



► 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

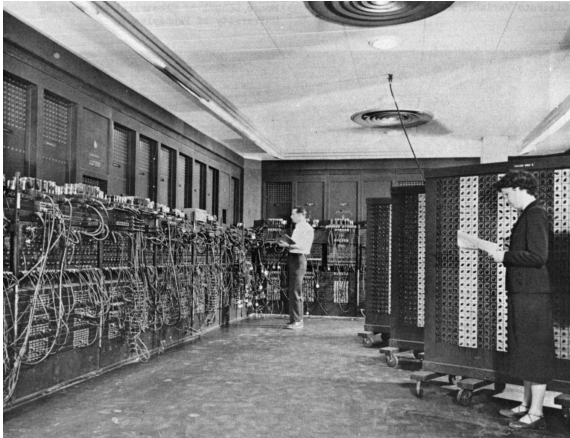
Les premiers ordinateurs électroniques

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)

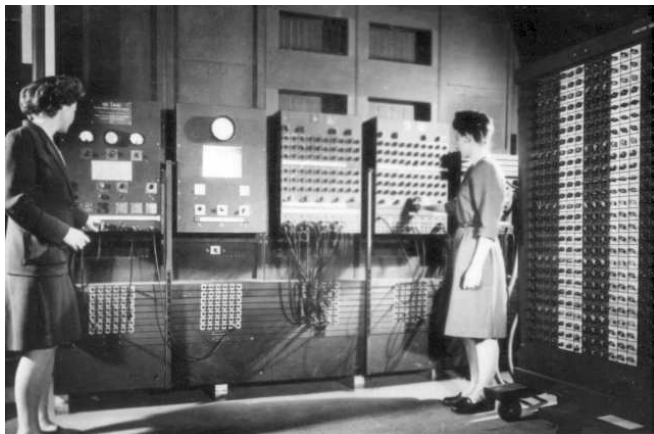
Les premiers ordinateurs électroniques

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

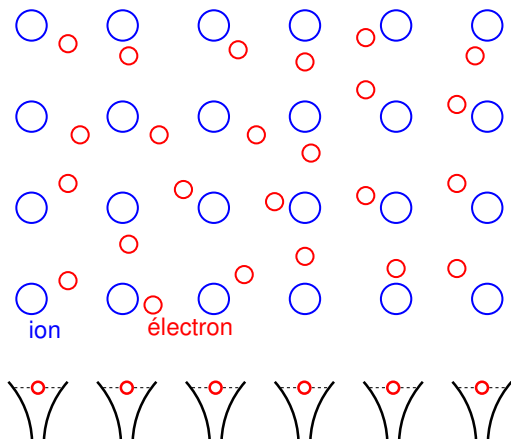
1.3 Les transistors

= des triodes à la base de **matériaux semi-conducteurs** :
(Si, Ge, GaAs, InAs ...)

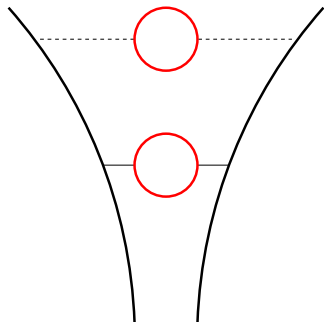
hydrogen 1 H 1.0079																	helium 2 He 4.0026	
lithium 3 Li 6.941	beryllium 4 Be 9.0122																	neon 10 Ne 20.180
sodium 11 Na 22.990	magnesium 12 Mg 24.305																	argon 18 Ar 39.948
potassium 19 K 39.098	calcium 20 Ca 40.078	scandium 21 Sc 44.956	titanium 22 Ti 47.867	vanadium 23 V 50.942	chromium 24 Cr 51.996	manganese 25 Mn 54.938	iron 26 Fe 55.845	cobalt 27 Co 58.933	nickel 28 Ni 58.693	copper 29 Cu 63.546	zinc 30 Zn 65.39	gallium 31 Ga 69.723	germanium 32 Ge 72.61	arsenic 33 As 74.922	selenium 34 Se 78.96	bromine 35 Br 79.904	krypton 36 Kr 83.80	
rubidium 37 Rb 85.468	strontium 38 Sr 87.62	yttrium 39 Y 88.906	zirconium 40 Zr 91.224	niobium 41 Nb 92.906	molybdenum 42 Mo 95.94	technetium 43 Tc [98]	ruthenium 44 Ru 101.07	rhodium 45 Rh 102.91	palladium 46 Pd 106.42	silver 47 Ag 107.87	cadmium 48 Cd 112.41	indium 49 In 114.82	tin 50 Sn 118.71	antimony 51 Sb 121.76	tellurium 52 Te 127.60	iodine 53 I 126.90	xenon 54 Xe 131.29	
cesium 55 Cs 132.91	barium 56 Ba 137.33	57-70 *	lanthanum 57 La 138.905	cerium 58 Ce 140.12	praseodymium 59 Pr 140.908	neodymium 60 Nd 144.24	promethium 61 Pm [145]	samarium 62 Sm 150.36	europium 63 Eu 151.964	gadolinium 64 Gd 157.25	terbium 65 Tb 158.925	dysprosium 66 Dy 162.50	holmium 67 Ho 164.930	erbium 68 Er 167.259	thulium 69 Tm 168.930	ytterbium 70 Yb 173.054	lutetium 71 Lu 174.967	berkelium 97 Bk [247]
francium 87 Fr [223]	radium 88 Ra [226]	89-102 * *	hafnium 72 Hf 178.49	tantalum 73 Ta 180.948	tungsten 74 W 183.84	rhenium 75 Re 186.21	osmium 76 Os 190.23	iridium 77 Ir 192.22	platinum 78 Pt 195.08	gold 79 Au 196.967	mercury 80 Hg 200.59	thallium 81 Tl 204.38	lead 82 Pb 207.2	bismuth 83 Bi 208.98	polonium 84 Po [209]	astatine 85 At [210]	radon 86 Rn [222]	
			actinium 89 Ac [227]	thorium 90 Th 232.038	protactinium 91 Pa [231]	uranium 92 U 238.029	neptunium 93 Np [237]	plutonium 94 Pu [244]	americium 95 Am [243]	curium 96 Cm [247]	berkelium 97 Bk [247]	californium 98 Cf [251]	lawrencium 103 Lr [260]	unquadium 114 Uuq [289]				

Un métal

La structure cristalline d'un métal (caricature):

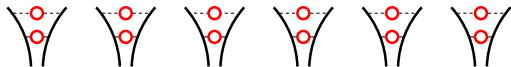


Un métal

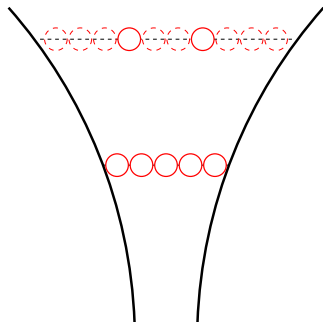


électrons quasi-libres
(bande de conduction)

électrons quasi-liés
(bande de valence)

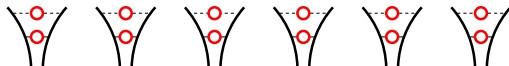


Un métal



électrons quasi-libres
(bande de conduction)

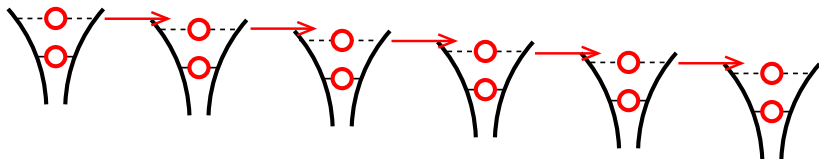
électrons quasi-liés
(bande de valence)



Un métal sous tension

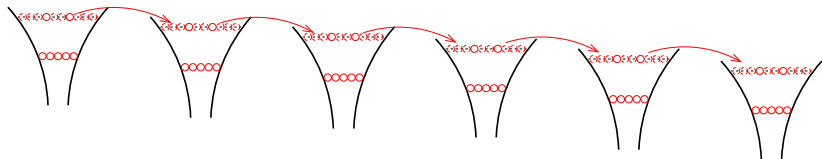


Un métal sous tension



→ courant

Un métal sous tension

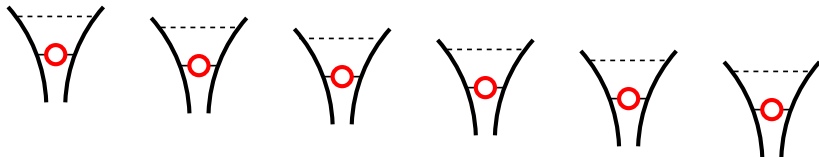


→ courant

Un isolateur (par exemple diamant)

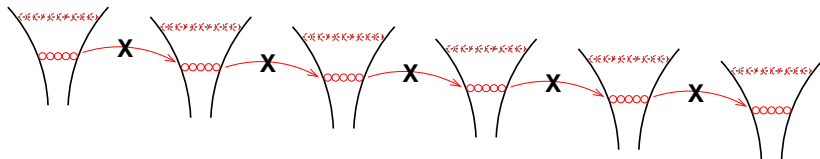


Un isolateur sous tension



→ pas de courant

Un isolateur sous tension



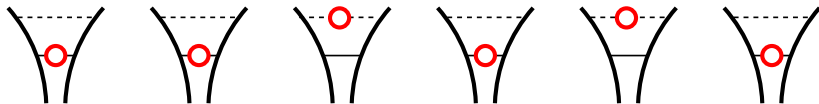
→ pas de courant

Un semi-conducteur (par exemple silicium)

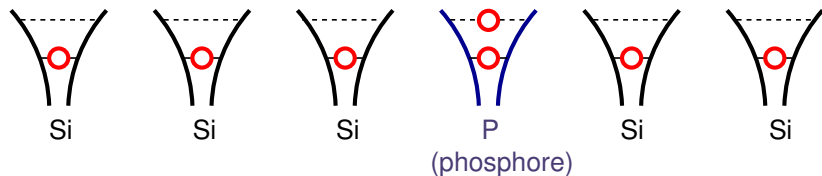


Un semi-conducteur se comporte comme un isolateur ...
à l'exception qu'il est relativement facile à
exciter des électrons

Un semi-conducteur à une haute température



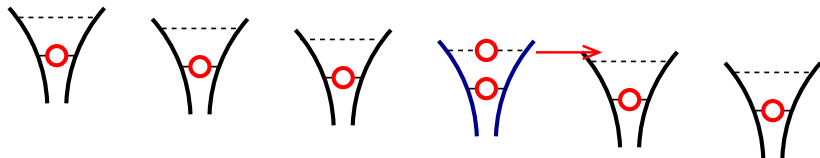
Un semi-conducteur dopé



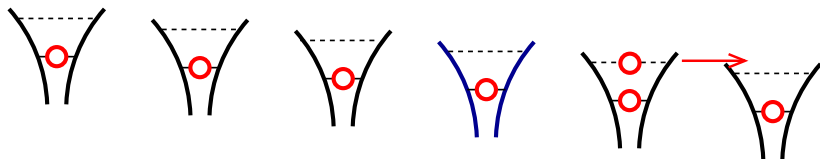
implantation des atomes avec **un électron de plus**

→ **donneurs** d'électrons: **dopage n**

Un semi-conducteur dopé sous tension

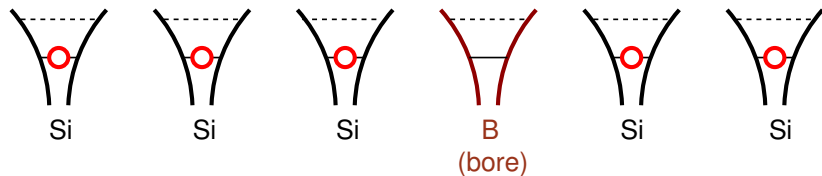


Un semi-conducteur dopé sous tension



→ courant très faible

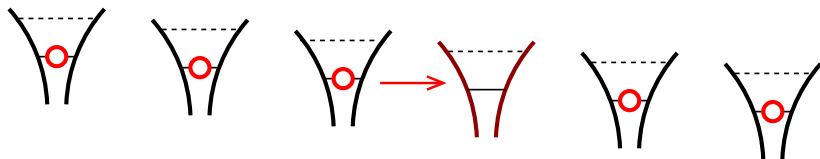
Un semi-conducteur dopé



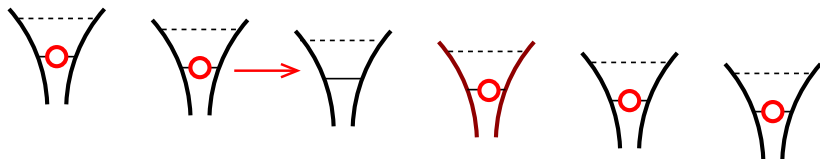
implantation des atomes avec **un électron de moins**

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

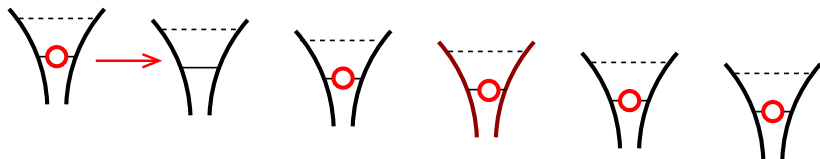
Un semi-conducteur dopé sous tension



Un semi-conducteur dopé sous tension

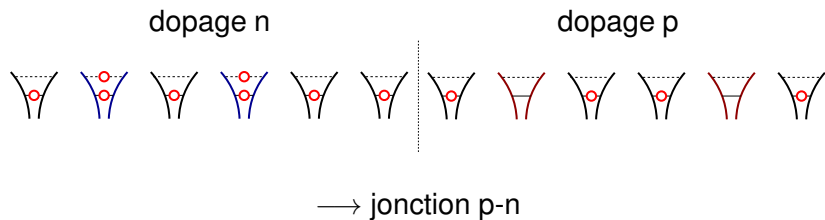


Un semi-conducteur dopé sous tension

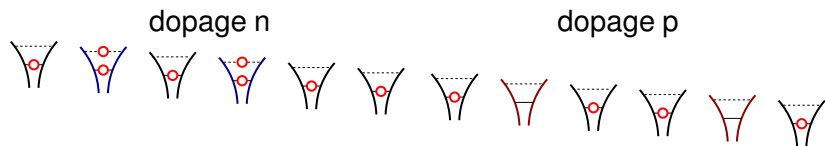


→ courant très faible des **trous** dans l'autre sens

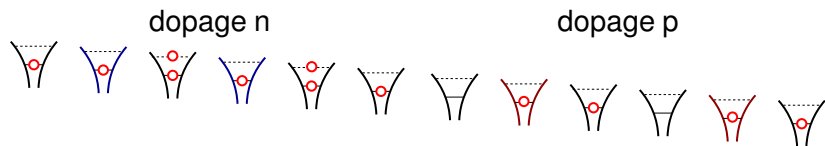
Une diode à la base d'un semi-conducteur



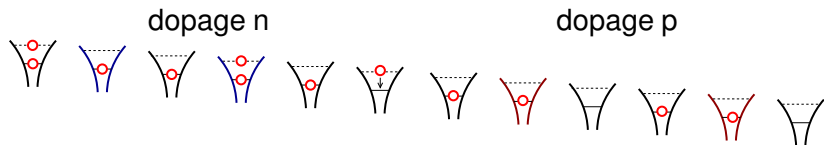
Une diode à la base d'un semi-conducteur



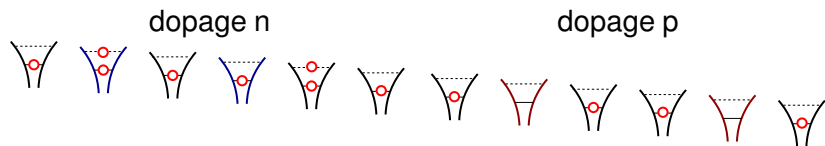
Une diode à la base d'un semi-conducteur



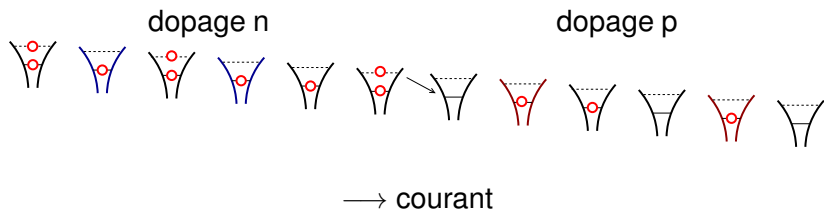
Une diode à la base d'un semi-conducteur



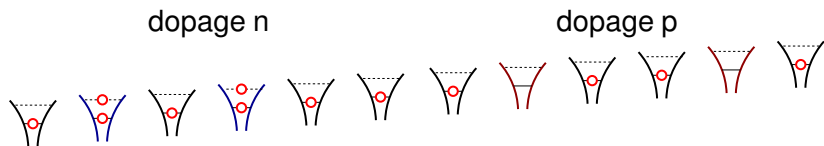
Une diode à la base d'un semi-conducteur



Une diode à la base d'un semi-conducteur



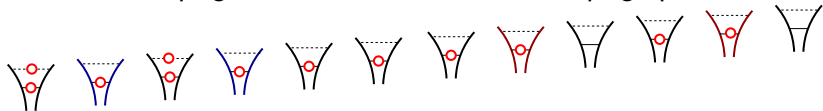
Une diode à la base d'un semi-conducteur



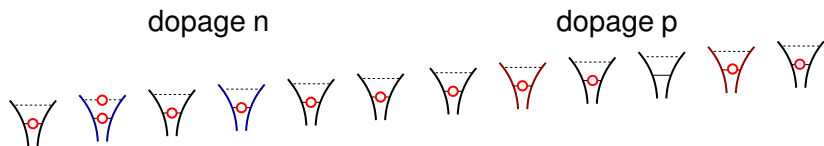
Une diode à la base d'un semi-conducteur

dopage n

dopage p



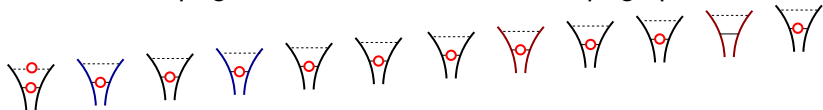
Une diode à la base d'un semi-conducteur



Une diode à la base d'un semi-conducteur

dopage n

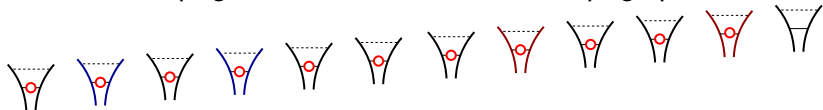
dopage p



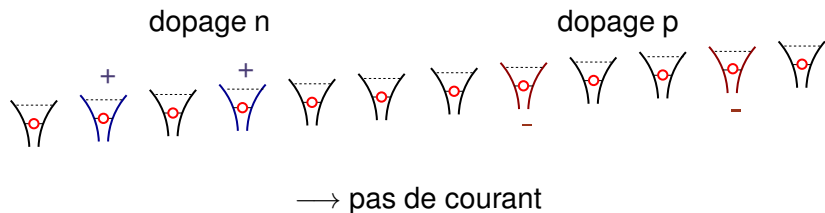
Une diode à la base d'un semi-conducteur

dopage n

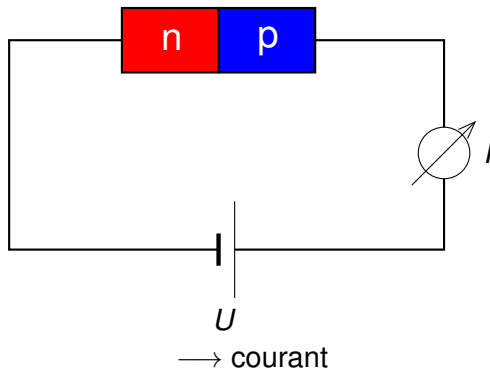
dopage p



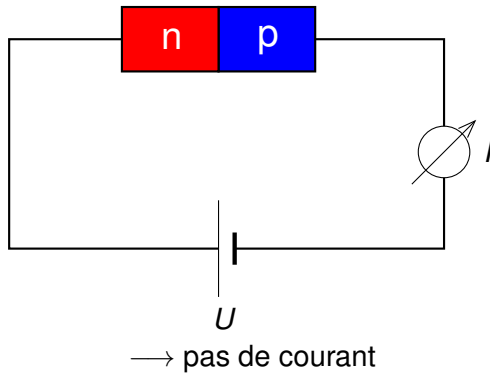
Une diode à la base d'un semi-conducteur



Une diode à la base d'un semi-conducteur

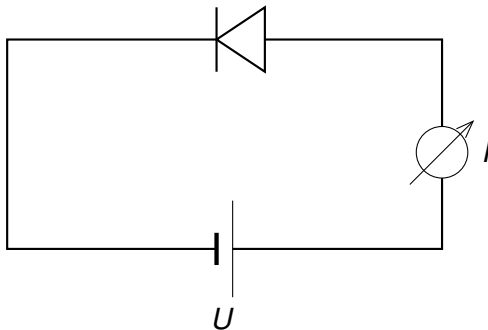


Une diode à la base d'un semi-conducteur

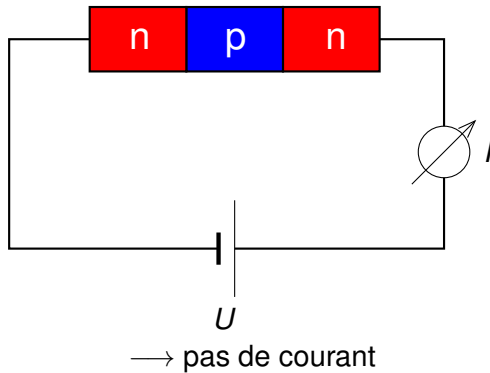


Une diode à la base d'un semi-conducteur

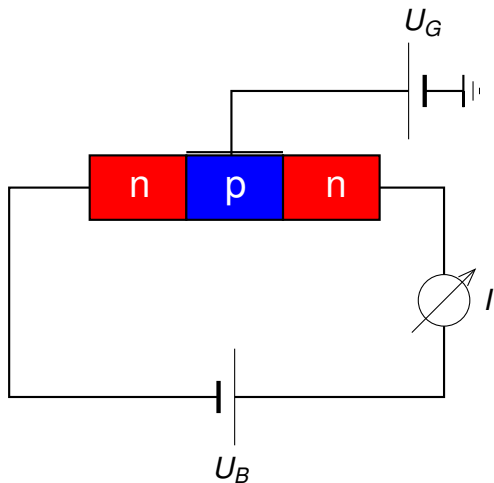
Symbole technique:



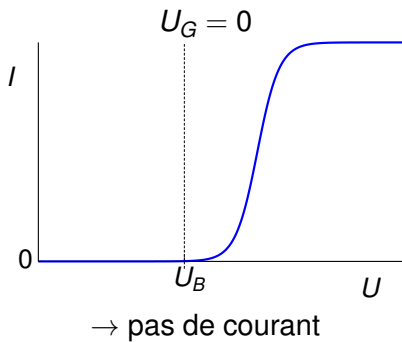
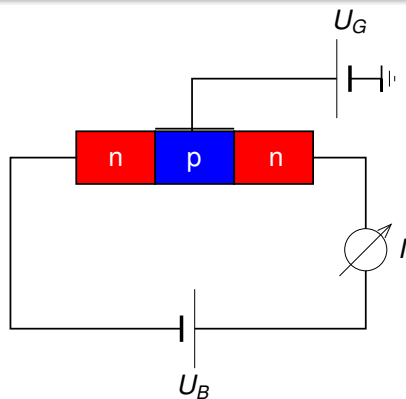
Une triode à la base d'un semi-conducteur



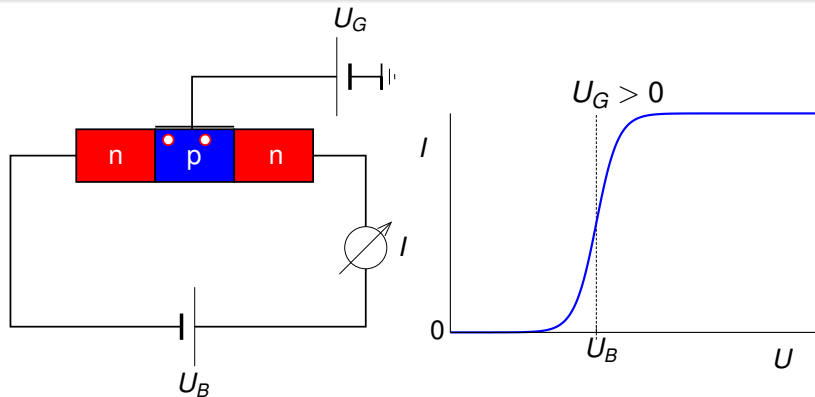
Une triode à la base d'un semi-conducteur



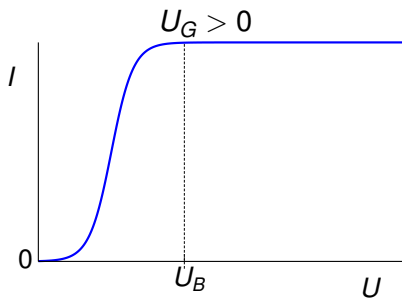
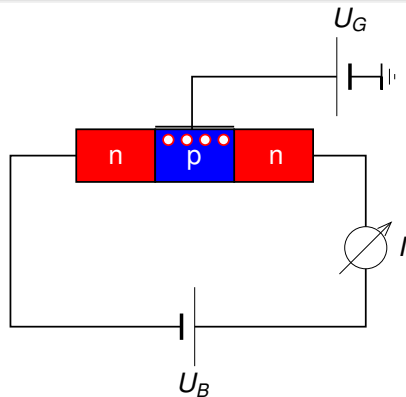
Le fonctionnement d'une triode



Le fonctionnement d'une triode

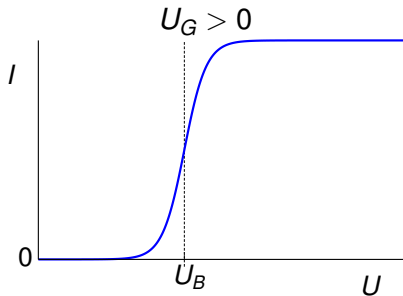
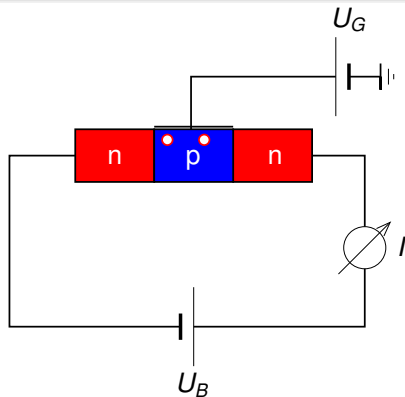


Le fonctionnement d'une triode



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

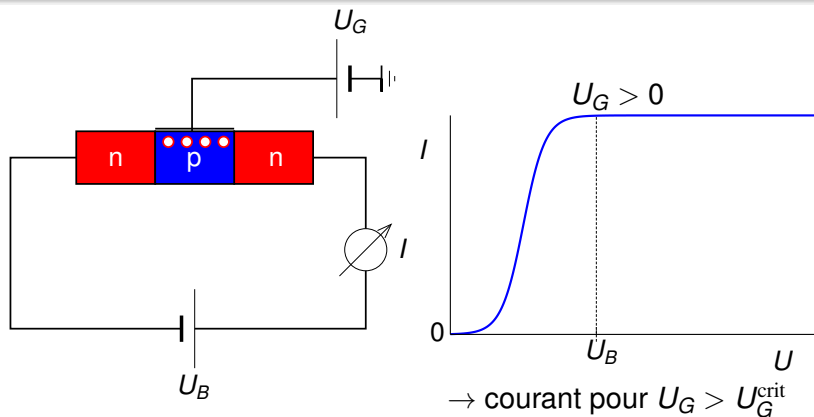
Le fonctionnement d'une triode



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

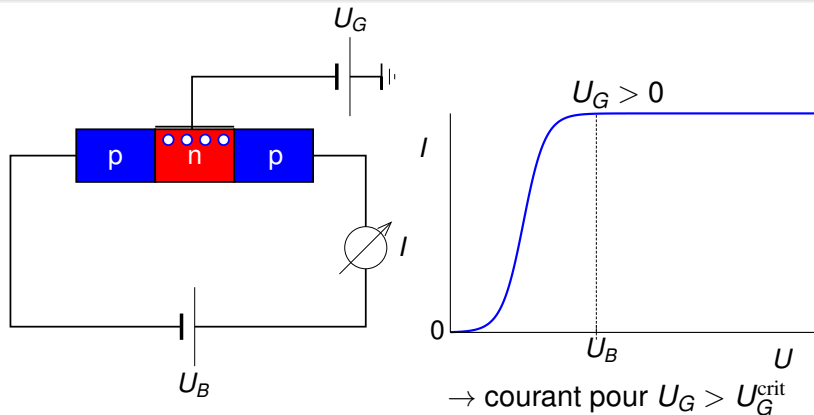
→ **amplificateur** d'un signal électronique:
petite variation en $U_G \Rightarrow$ grande variation en I

Le fonctionnement d'une triode



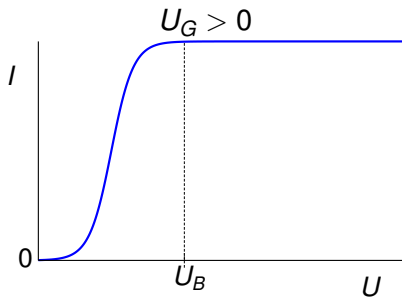
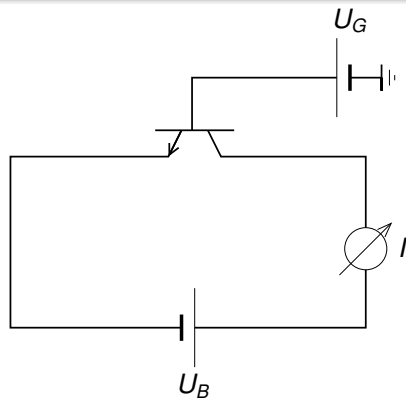
\rightarrow **TRANSISTOR** (= trans-resistor)

Le fonctionnement d'une triode



\rightarrow **TRANSISTOR** (= trans-resistor)

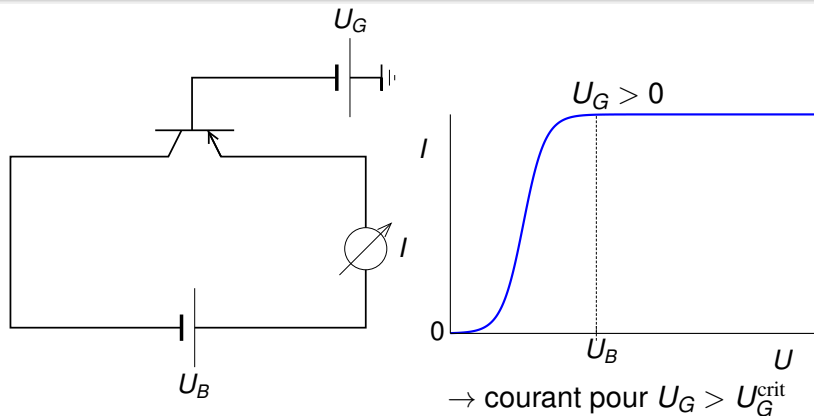
Le fonctionnement d'une triode



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

→ **TRANSISTOR** (= trans-resistor)

Le fonctionnement d'une triode



\rightarrow **TRANSISTOR** (= trans-resistor)

Le transistor

Inventeurs:

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



Le transistor

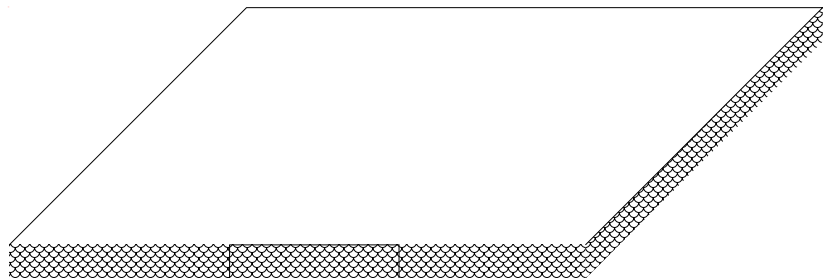
Inventeurs:

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

Avantages comparé au tube à vide:

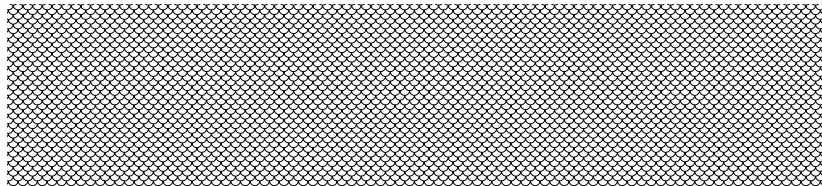
- petite taille \Rightarrow miniaturisation possible
- fonctionne avec des plus petites tensions
- beaucoup plus petite consommation d'énergie
- haute fiabilité, très longue durée de vie
- possibilité de créer des **circuits intégrés**

Fabrication des circuits intégrés (fortement simplifiée)



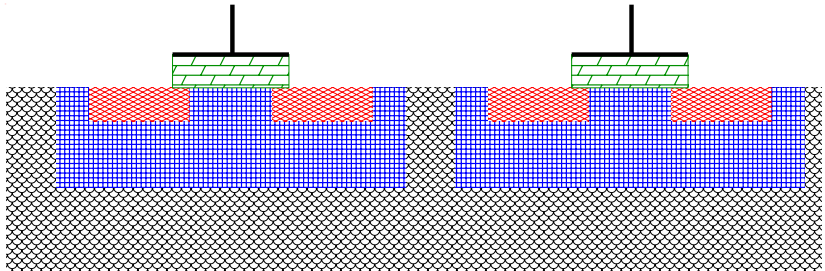
- ▶ wafer (galette) ultra-pur de silicium

Fabrication des circuits intégrés (fortement simplifiée)



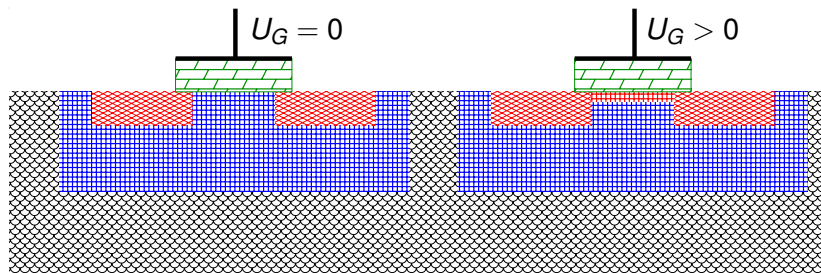
- ▶ wafer (galette) ultra-pur de silicium

Fabrication des circuits intégrés (fortement simplifiée)



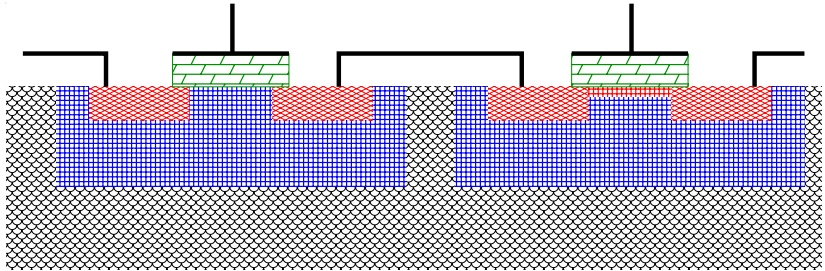
- ▶ wafer (galette) ultra-pur de silicium
- ▶ dopage p
- ▶ dopage n
- ▶ couche isolante (→ transistor MOSFET)
- ▶ contacts métalliques

Fabrication des circuits intégrés (fortement simplifiée)



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

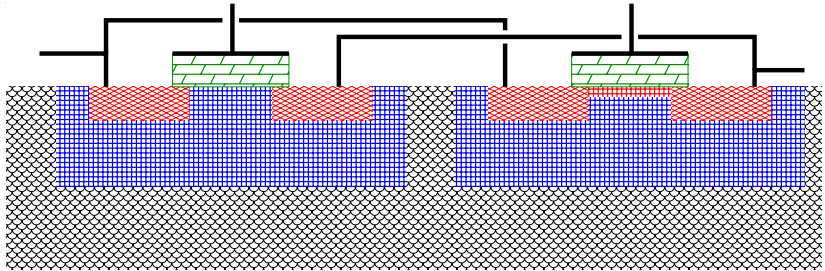
Fabrication des circuits intégrés (fortement simplifiée)



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

→ un circuit AND

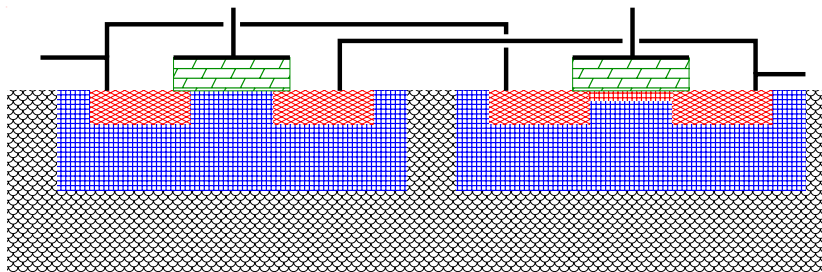
Fabrication des circuits intégrés (fortement simplifiée)



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

→ un circuit OR

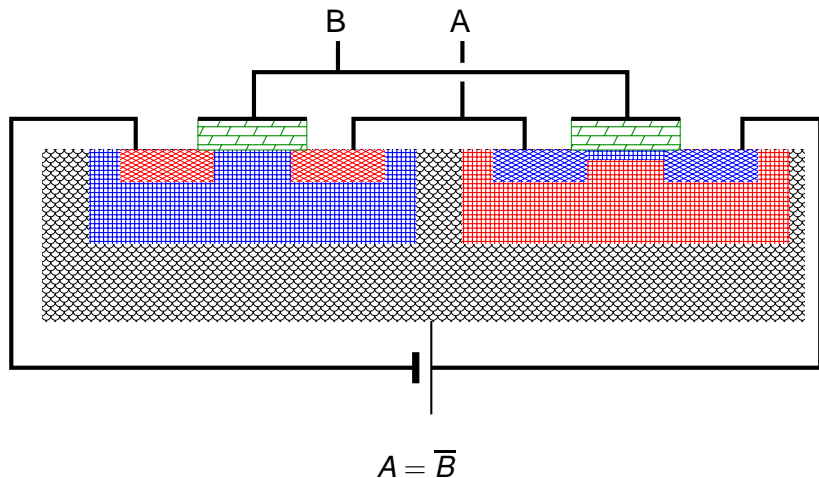
Fabrication des circuits intégrés (fortement simplifiée)



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

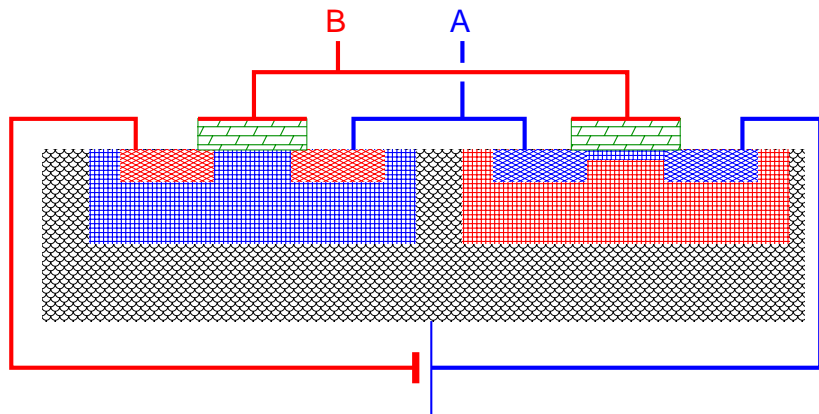
→ fabrication à l'échelle nano (< 100 nm)

Fabrication d'un circuit NOT (technologie CMOS)



“B est faux” ($U_B < 0$)

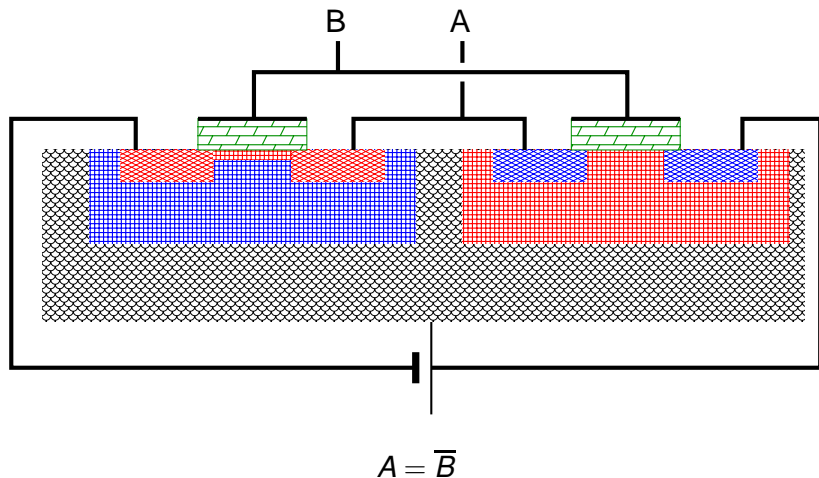
Fabrication d'un circuit NOT (technologie CMOS)



$$A = \overline{B}$$

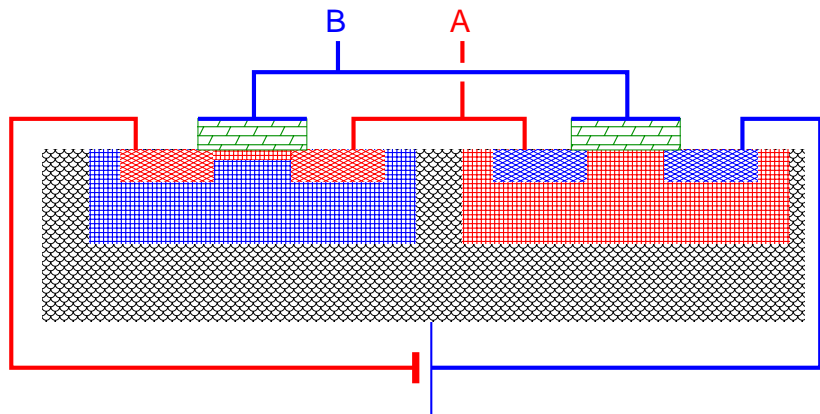
“B est faux” ($U_B < 0$) \Rightarrow “A est vrai” ($U_A > 0$)

Fabrication d'un circuit NOT (technologie CMOS)



“ 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” ($U_A < 0$)