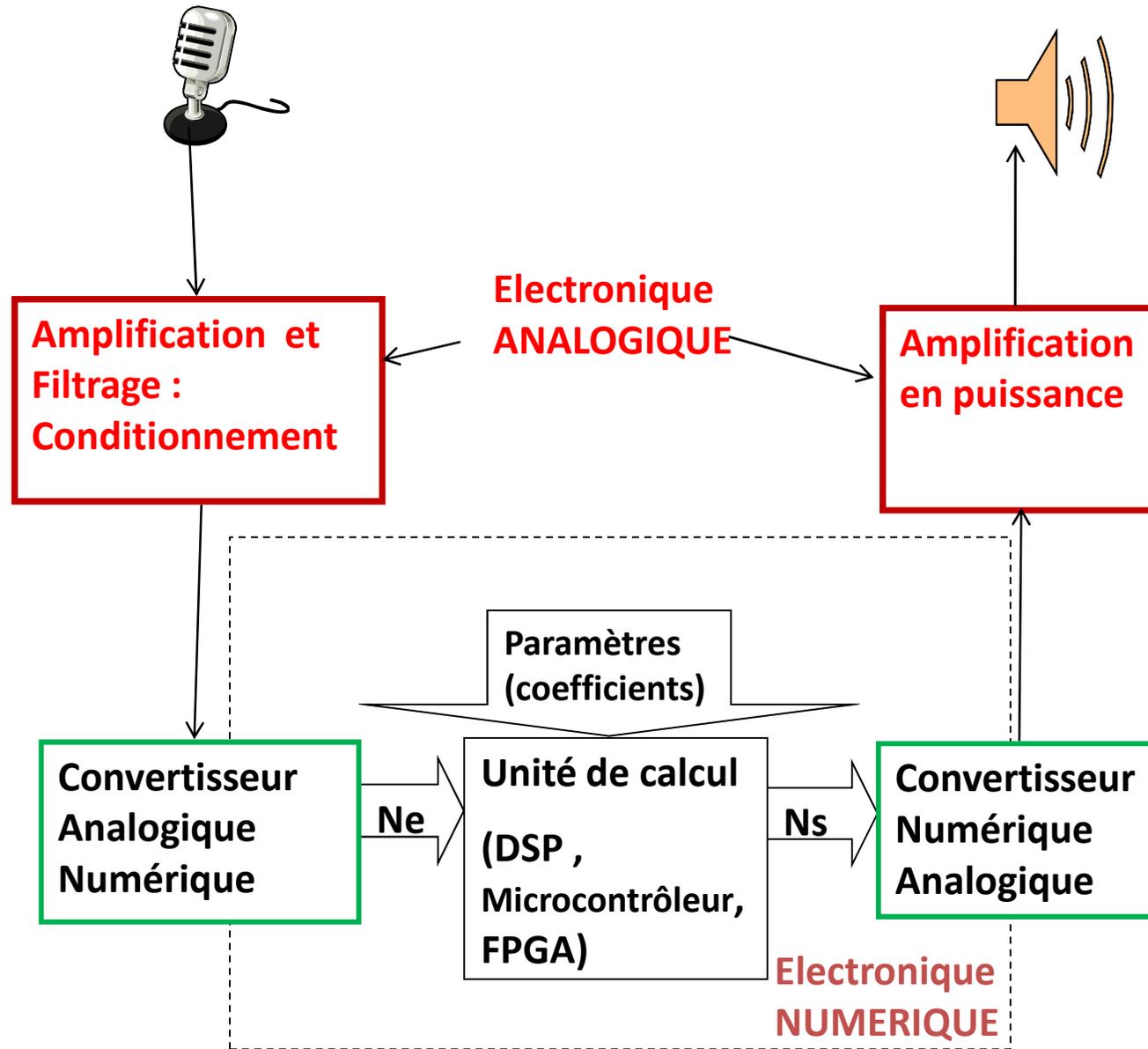


SEMI-CONDUCTEURS : DIODES-TRANSISTORS MOS AOP

Christian Dupaty – Jean Max Dutertre
pour l' EMSE
D'après un diaporama original de Thomas Heiser
Institut d'Electronique du Solide et des Systemes



Architecture analogique – numérique – analogique



• ***Pourquoi quelles applications ?***

Instrumentation



Robotique



Communications



Multimédia



Systèmes informatiques



Cartes mémoires



...

Histoire des semi-conducteurs

1904 invention de a **Diode** par John FLEMING Premier tube à vide.

1904 **Triode (Lampe)** par [L. DE FOREST](#) [Musée](#) . C'est un amplificateur d'intensité électrique.

1919 **Basculeur (flip-flop)** de W. H. ECCLES et F. W. JORDAN .Il faudra encore une quinzaine d'années avant que l'on s'aperçoive que ce circuit pouvait servir de base à l'utilisation électronique de l'algèbre de BOOLE.

1937 **Additionneur binaire à relais** par [G. STIBITZ](#)

1942 **Diodes au germanium** Le germanium est un semi-conducteur, c'est à dire que "dopé" par des impuretés, il conduit dans un sens ou dans l'autre suivant la nature de cette impureté. Par l'association d'un morceau de germanium dopé positivement (P) et un morceau dopé négativement (N), on obtient une diode qui ne conduit le courant que dans un seul sens.

Et les transistors ...

Le transistor à effet de champ a été inventé en 1925-1928 par J.E. Lilienfeld (bien avant le transistor bipolaire). Un brevet a été déposé, mais aucune réalisation n'a été possible avant les années 60.

March 7, 1933.

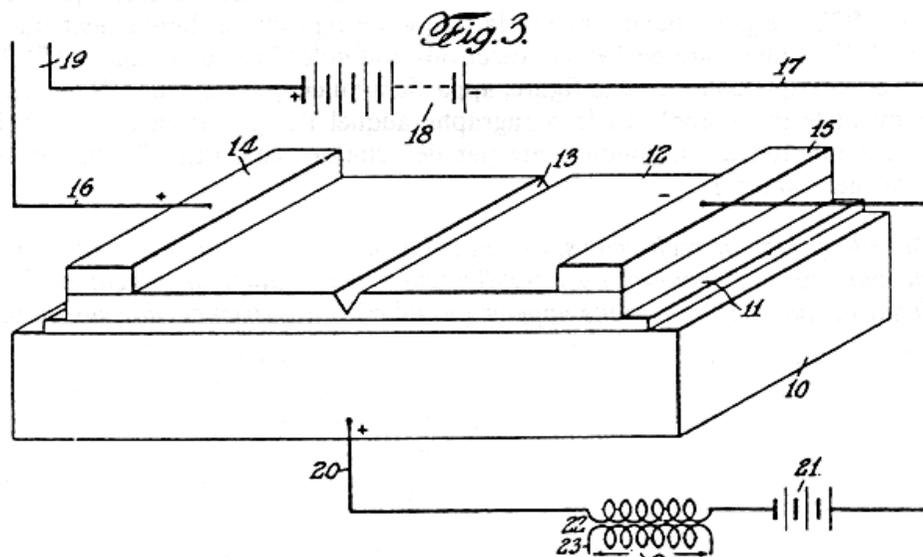
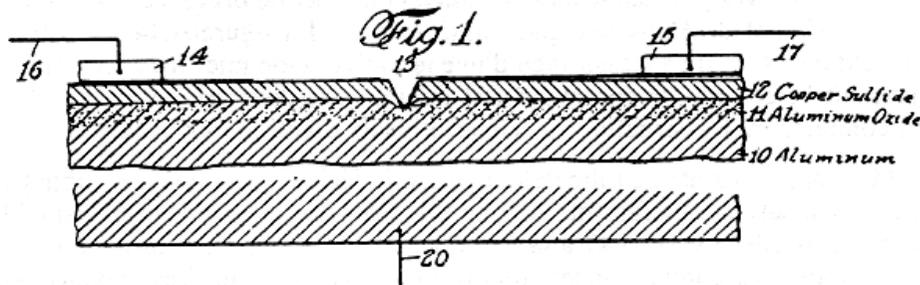
J. E. LILIENFELD

1,900,018

DEVICE FOR CONTROLLING ELECTRIC CURRENT

Filed March 28, 1928

3 Sheets-Sheet 1



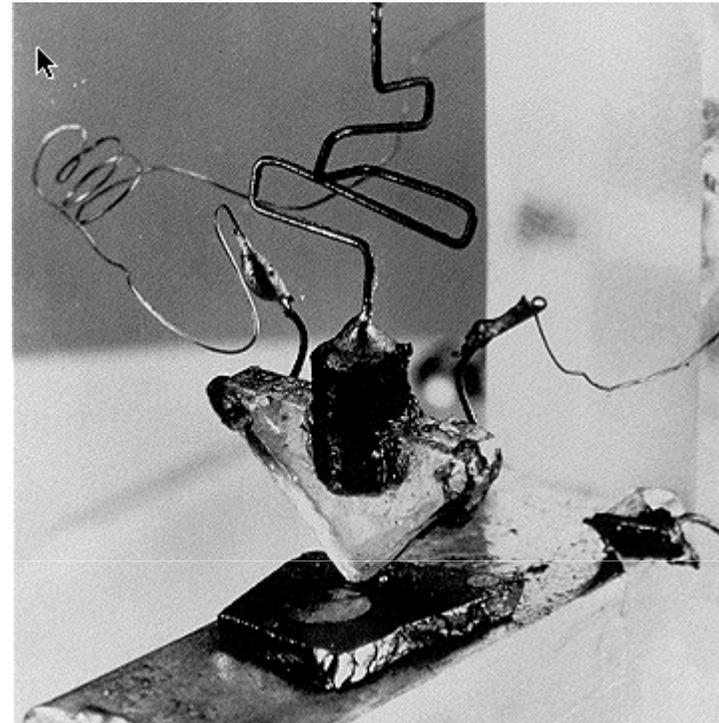
Scanned at the American Institute of Physics



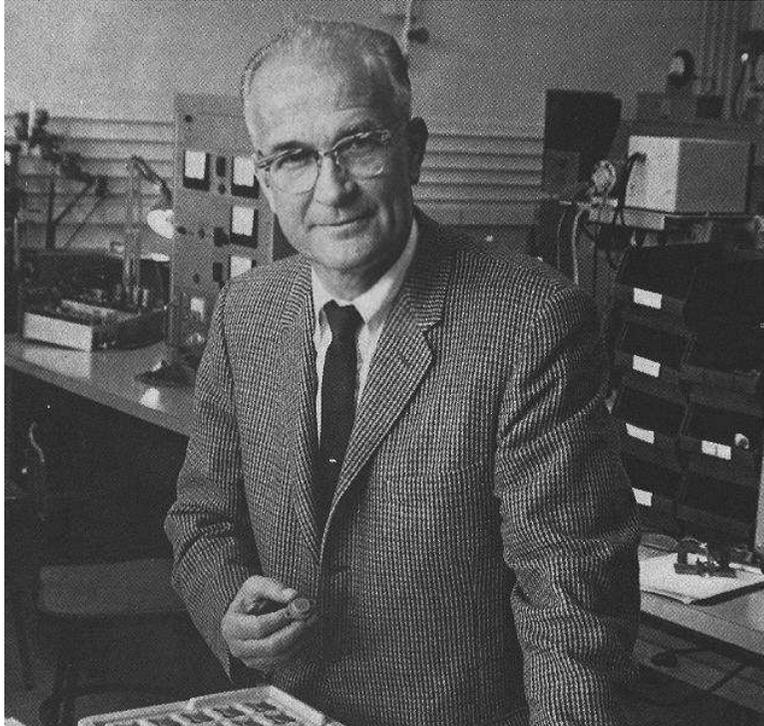
1959 : MM. Attala, D. Kahng et E. Labate fabriquent le premier transistor à effet de champ (FET)

- ***Parallèlement le premier prototype du transistor bipolaire est fabriqué en 1947***

En 1947 : le premier transistor bipolaire



En 1957 : le premier CI (Texas-Instruments)



**William Shockley 1910-
1989**
[prix Nobel de physique
1956](#)

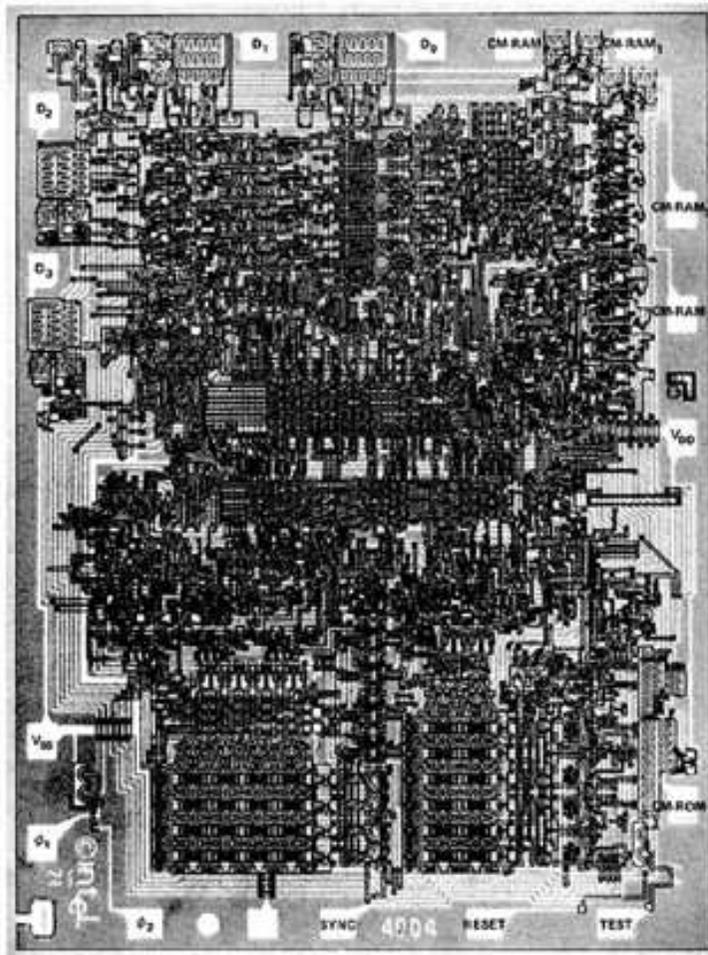


**William Shockley (assis), John
Bardeen, and Walter Brattain,
1948.**



Le premier récepteur radio à transistors bipolaires

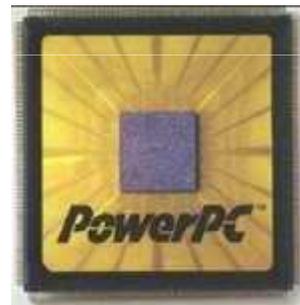
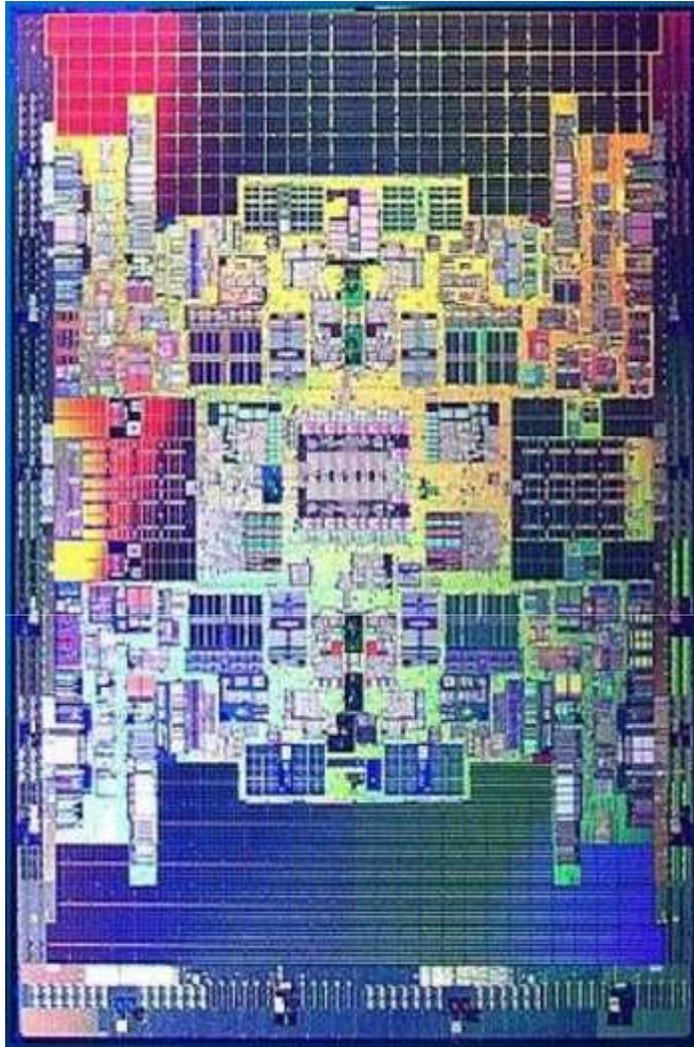
En 1971 : le premier Processeur



4004 Photomicrograph With Pin Designation

4004 d'INTEL : 15/11/1971
(2250 Transistors Bipolaires,
108 KHz, 4bits)

INTEL ITANIUM Tukwila core



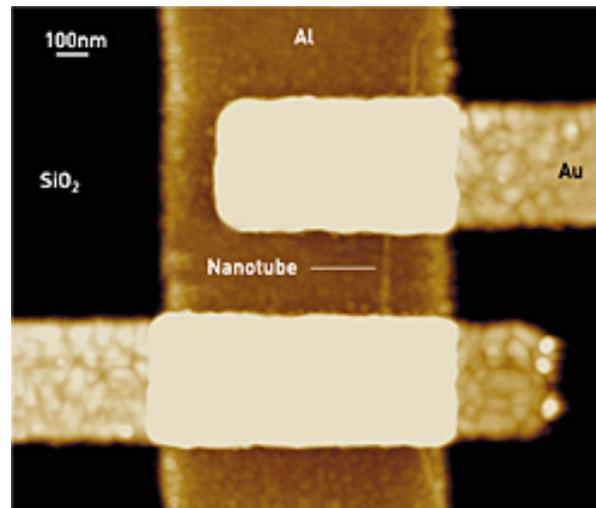
2010 processeur IBM POWER7 , INTEL XEON et ITANIUM
10⁹ Transistors MOS
(taille d'un transistor : 45nm)

Les technologies émergentes

Electronique sur plastique



Electronique moléculaire
Une molécule comme composant



Mais ça ne se fait pas tout seul...



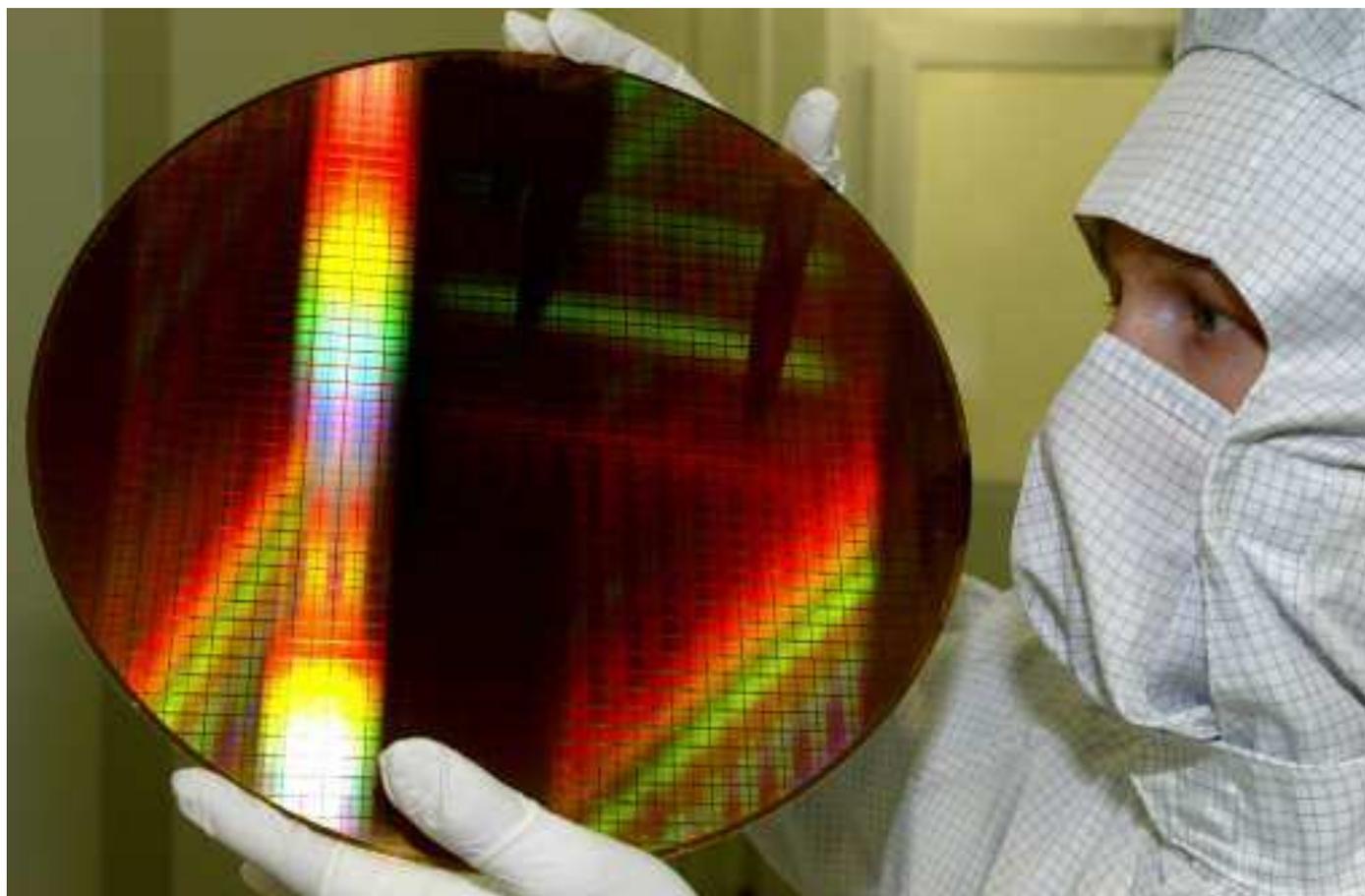
Contenu du cours d'électronique analogique 1

1. Introduction aux semi-conducteurs, jonction PN
2. Les Diodes
3. Applications des diodes
4. Les Transistors à effet de champ
5. Amplificateur opérationnel

Bibliographie

- ✉ *Electronique: composants et systèmes d'application*, Thomas L. Floyd, Dunod, 2000
- ✉ *Microélectronique*, Jacob Millman, Arvin Grabel, Ediscience International, 1994
- ✉ ELECTRONIQUE Fondements et applications DUNOD 2006
- ✉ ELECTRONIQUE ANALOGIQUE VALKOV Educalivre 1994
- ✉ **Comprendre l'électronique par la simulation", Serge Dusausay, Ed. Vuibert**
- ✉ **Principes d'électronique", A.P. Malvino, Dunod**
- ✉ **Microelectronics circuits", A.S. Sedra, K.C. Smith, Oxford University Press**
- ✉ CMOS Analog Circuit Design", P.E. Allen, D.R. Holberg
- ✉ Design of Analog CMOS Integrated Circuits", B. Razavi, McGraw Hill

LES SEMI-CONDUCTEURS



Introduction aux semi-conducteurs, la jonction PN

I - Matériaux semi-conducteurs.

1 - Introduction.

Qu'est ce qu'un semi-conducteur ?
Ni un conducteur, ni un isolant.

Colonne IVA : Si, Ge.

Association IIIA-VA : AsGa, etc.

>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
V	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII B	VIII B	VIII B	IB	II B	IIIA	IVA	VA	VI A	VII A	VIIIA
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn ²	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
* Lanthanides			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
** Actinides			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

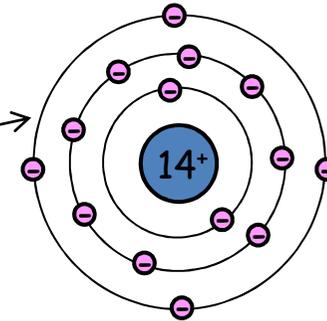
I - Matériaux semi-conducteurs

2 - Modèle des bandes d'énergie.

Atome de silicium : le noyau comporte 14 protons - nuage comportant 14 e⁻

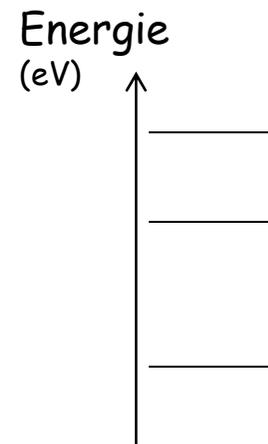
Répartition électronique : 1s² 2s² 2p⁶ 3s² 3p²

couche de valence : 4 e⁻



Les électrons évoluent sur des orbites stables correspondant à des niveaux d'énergie discrets (séparés les uns des autres).

Niveaux d'énergie électronique d'un atome isolé :

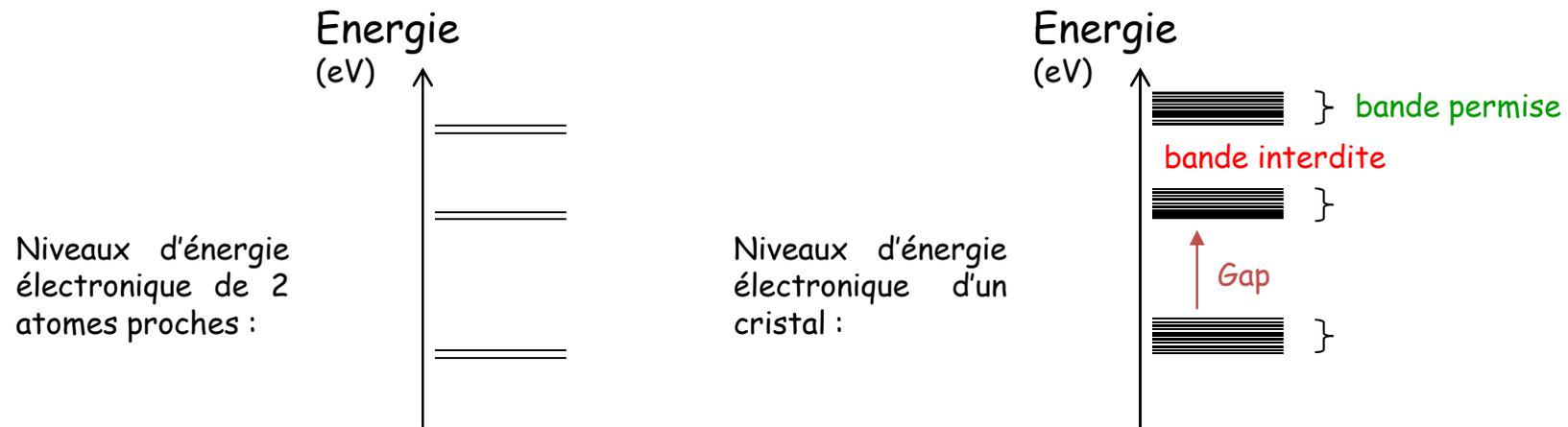


I - Matériaux semi-conducteurs

Principe d'exclusion de Pauli : deux électrons ne peuvent occuper le même état quantique.

En conséquence, si deux atomes identiques sont approchés à une distance de l'ordre de leur rayon atomique les niveaux d'énergie se dédoublent.

Dans le cas d'un cristal, la multiplication des niveaux crée des **bandes d'énergie permise** (quasi-continuum), séparées par des **bandes d'énergie interdites** (c.-à-d. ne contenant pas d'état stable possible pour les e^-).



Bande de valence : contient les états électroniques des couches périphériques des atomes du cristal (c.-à-d. les e^- de valence, 4 pour le Si)

Bande de conduction : bande permise immédiatement supérieure en énergie à la bande de valence. Les e^- y sont quasi-libres, ils ont rompu leur lien avec leur atome d'origine, ils permettent la conduction d'un courant.

I - Matériaux semi-conducteurs

3 - Comparaison isolants, conducteurs, et semi-conducteurs.

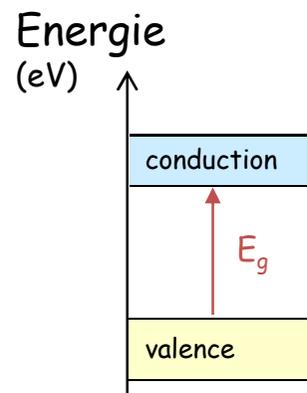
Classification en fonction de leur résistivité ρ [$\Omega.m$]

Isolant : $\rho > 10^6 \Omega.m$

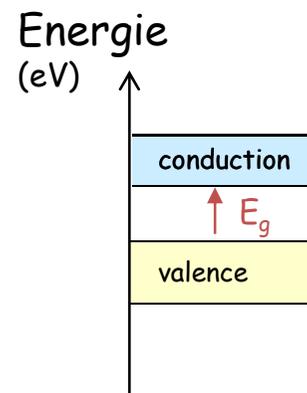
Conducteurs : $\rho < 10^{-6} \Omega.m$

Semi-conducteur : intermédiaire

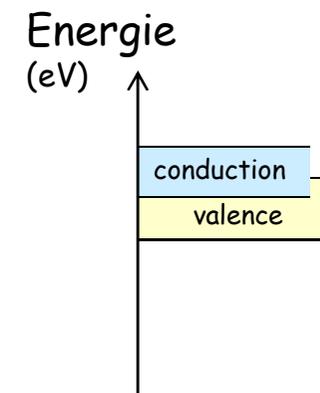
$$\left(R = \rho \cdot \frac{l}{s} \right)$$



Isolant
 $E_g \sim qqs \text{ eV}$



Semi-conducteur
 $E_g \sim 1 \text{ eV}$



Conducteur
 $E_g \sim 0 \text{ eV}$

300°K	Si	Ge	AsGa
E_g (eV)	1,12	0,66	1,43

I - Matériaux semi-conducteurs

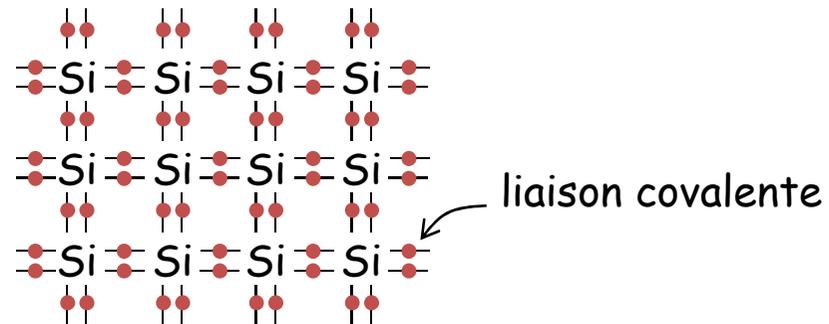
4 - Le silicium.

a. Semi-conducteur intrinsèque (cristal pur).

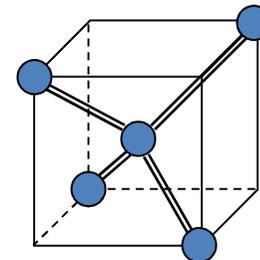
Cristal de silicium : 4 e^- de valence



→ association avec 4 atomes voisins pour obtenir 8 e^- sur la couche de valence (règle de l'octet, la couche de valence est saturée) :



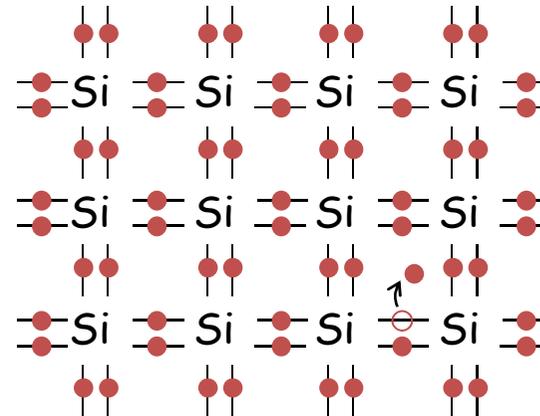
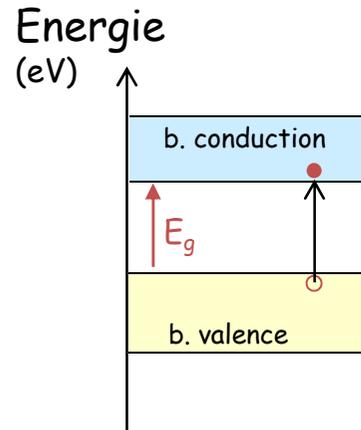
Structure de la maille cristalline : cubique face centrée



I - Matériaux semi-conducteurs

Création de paires électrons - trous

→ sous l'action d'un apport d'énergie thermique (par exemple)

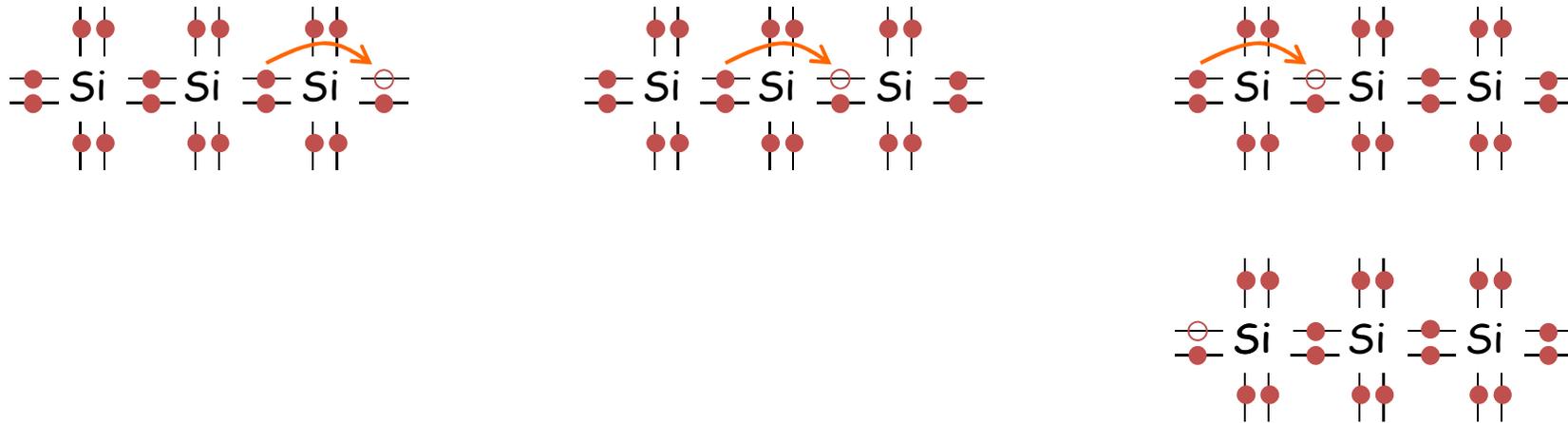


Le *bandgap* E_g représente l'énergie minimale nécessaire pour rompre la liaison.

Déplacement des e^- libres → courant

I - Matériaux semi-conducteurs

Déplacement des trous : de proche en proche \rightarrow courant (de charges +)



Dans un semi-conducteur il existe 2 types de porteurs de charges :

- des porteurs négatifs : les électrons de la bande de conduction,
- et des porteurs positifs : les trous de la bande de valence.

Le phénomène de création de paires e^- - trous s'accompagne d'un phénomène de recombinaison (les e^- libres sont capturés par les trous, ils redeviennent e^- de valence)

Durée de vie d'un porteur = temps séparant la recombinaison de la génération.

I - Matériaux semi-conducteurs

Le cristal est électriquement neutre : $n = p = n_i$

Concentration intrinsèque de porteurs à l'équilibre thermodynamique :

$$n_i = A.T^{3/2}.\exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad [cm^3]$$

A cste spécifique au matériau [$cm^3/K^{3/2}$]

E_g bandgap [eV]

$k = 1,38.10^{-23}$ J/K

E_g bandgap [eV]

T température [K]

300°K, Si :

$$n_i \cong 1,4.10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

Loi d'action de masse : $n.p = n_i^2(T, E_g)$

elle est **toujours** vérifiée pour un cristal à l'équilibre thermique (qu'il soit intrinsèque ou non).

I - Matériaux semi-conducteurs

Phénomène de transport de charges :

- courant de conduction créé sous l'action d'un champ électrique,
- courant de diffusion créé par un gradient de concentration de porteurs.

→ densité de courant [A/cm^2] :

$$\vec{J}_n = q\mu_n n \vec{E} + q\mu_n V_T \overrightarrow{\text{grad } n}$$
$$\vec{J}_p = q\mu_p p \vec{E} - q\mu_p V_T \overrightarrow{\text{grad } p}$$

$V_T = 26 \text{ mV}$ à 300°K , potentiel thermodynamique [V]

$\mu_{n,p}$ mobilité [$cm^2/V.s$]

Pour le Si $\mu_n = 1400 \text{ cm}^2/V.s$, $\mu_p = 500 \text{ cm}^2/V.s$

I - Matériaux semi-conducteurs

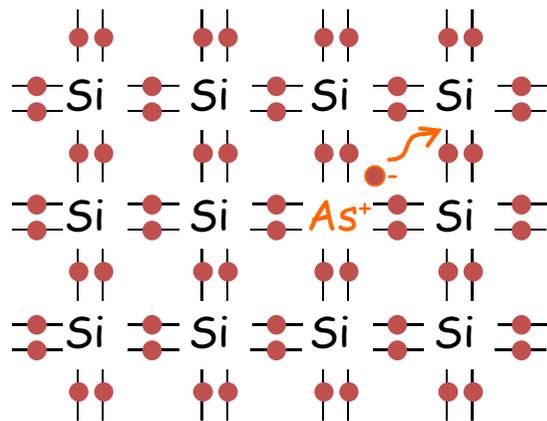
Intérêt des semi-conducteurs : possibilité de contrôler la quantité de porteurs de charges libres (e^- et trous) et par conséquent la résistivité.

Comment ? → dopage, radiations, température, injection de courant, etc.

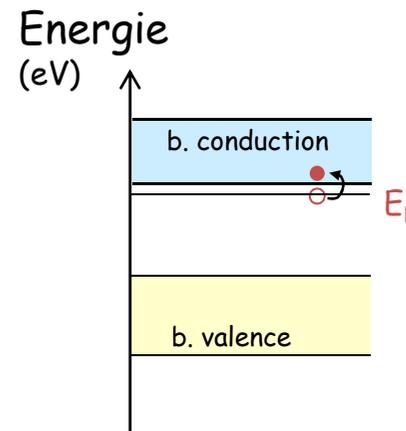
b. Semi-conducteur extrinsèque de type N (négatif = signe des porteurs de charge majoritaires).

Obtenus par dopage = introduction d'atomes du groupe V (cf. classification périodique, 5 e^- sur la couche de valence) en lieu et place d'atomes de Si, généralement du phosphore P ou de l'arsenic As.

→ libération d'un e^- libre, les 4 autres se lient aux atomes de Si voisins (atome donneur) :



As^+ : cation fixe



I - Matériaux semi-conducteurs

Le cristal garde sa neutralité électrique globale (à chaque électron libre *donné* par les atomes d'impureté correspond un cation fixe).

Porteurs de charges :

- majoritaires : e^- tq $n \approx N_D$, concentration du dopage,
- minoritaires : trous issus de la générations thermique de paires e^- - trous tq

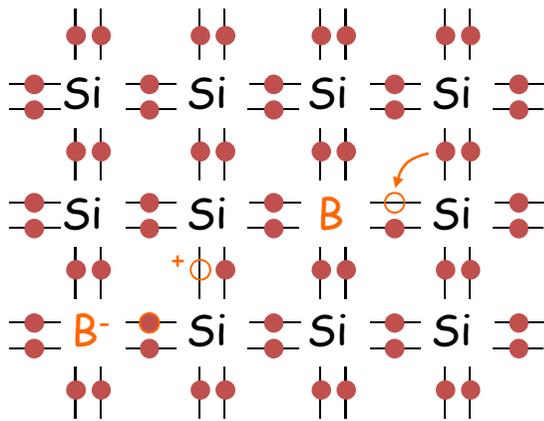
$$p \approx n_i^2 / N_D$$

I - Matériaux semi-conducteurs

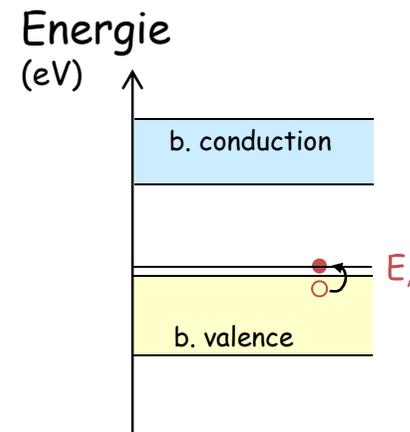
c. Semi-conducteur extrinsèque de type P (positif = signe des porteurs majoritaires).

Obtenus par dopage = introduction d'atomes du groupe II (cf. classification périodique, 3 e⁻ sur la couche de valence) en lieu et place d'atomes de Si, généralement du bore B ou du gallium Ga.

→ seules trois liaisons covalentes peuvent être créées, la 4^{ème} reste incomplète, un trou est créé pour chaque atome de dopage. Il va pouvoir être comblé par un e⁻ d'une liaison covalente proche (atome accepteur).



B⁻ : anion fixe



I - Matériaux semi-conducteurs

Le cristal garde sa neutralité électrique globale (pour chaque électron libre *accepté* par les atomes d'impureté créant un anion fixe, un trou est créé).

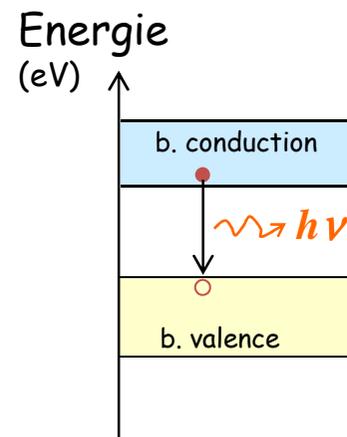
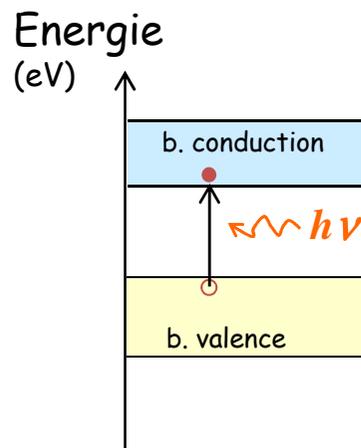
Porteurs de charges :

- majoritaires : trous tq $p \approx N_A$, concentration de dopage,
- minoritaires : e^- issus de la générations thermique de paires e^- - trous tq

$$n \approx n_i^2 / N_A$$

d. Phénomènes de génération et de recombinaison.

→ génération sous l'effet d'apport d'énergie thermique, photonique, d'un champ électrique, de radiations ionisantes, etc.

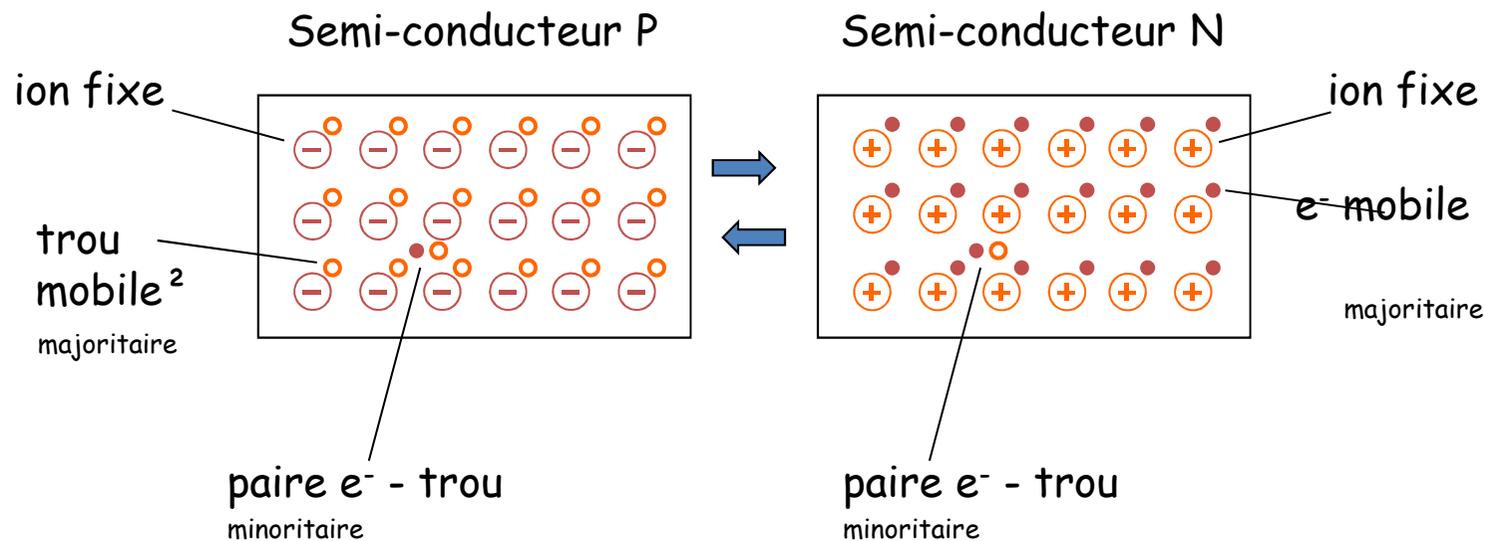


I - Matériaux semi-conducteurs

5 - La jonction PN.

Un semi-conducteur seul (N ou P) présente peu d'intérêt, c'est l'association de plusieurs SC dopés qui permet de créer des composants semi-conducteurs. Le plus simple d'entre eux est la jonction PN (ou diode), il permet en outre d'appréhender le fonctionnement des transistors.

a. Jonction PN non polarisée, à l'équilibre.



Que se passe-t-il si l'on met en contact un s.-c. de type P avec un s.-c. de type N pour réaliser une jonction PN ? (! Attention ! c'est simplement une vue de l'esprit, ce n'est pas ainsi que l'on procède)

I - Matériaux semi-conducteurs

Considérant la jonction dans son ensemble, il existe un gradient de porteurs de charges :

→ création d'un courant de diffusion :

- des trous mobiles du s.-c. P vers le s.-c. N, au moment de leur entrée dans la zone N contenant des e^- majoritaires les trous se recombinent avec les e^- ,
- des e^- mobiles du s.-c. N vers le s.-c. P, au moment de leur entrée dans la zone P contenant des trous majoritaires les e^- se recombinent avec les trous.

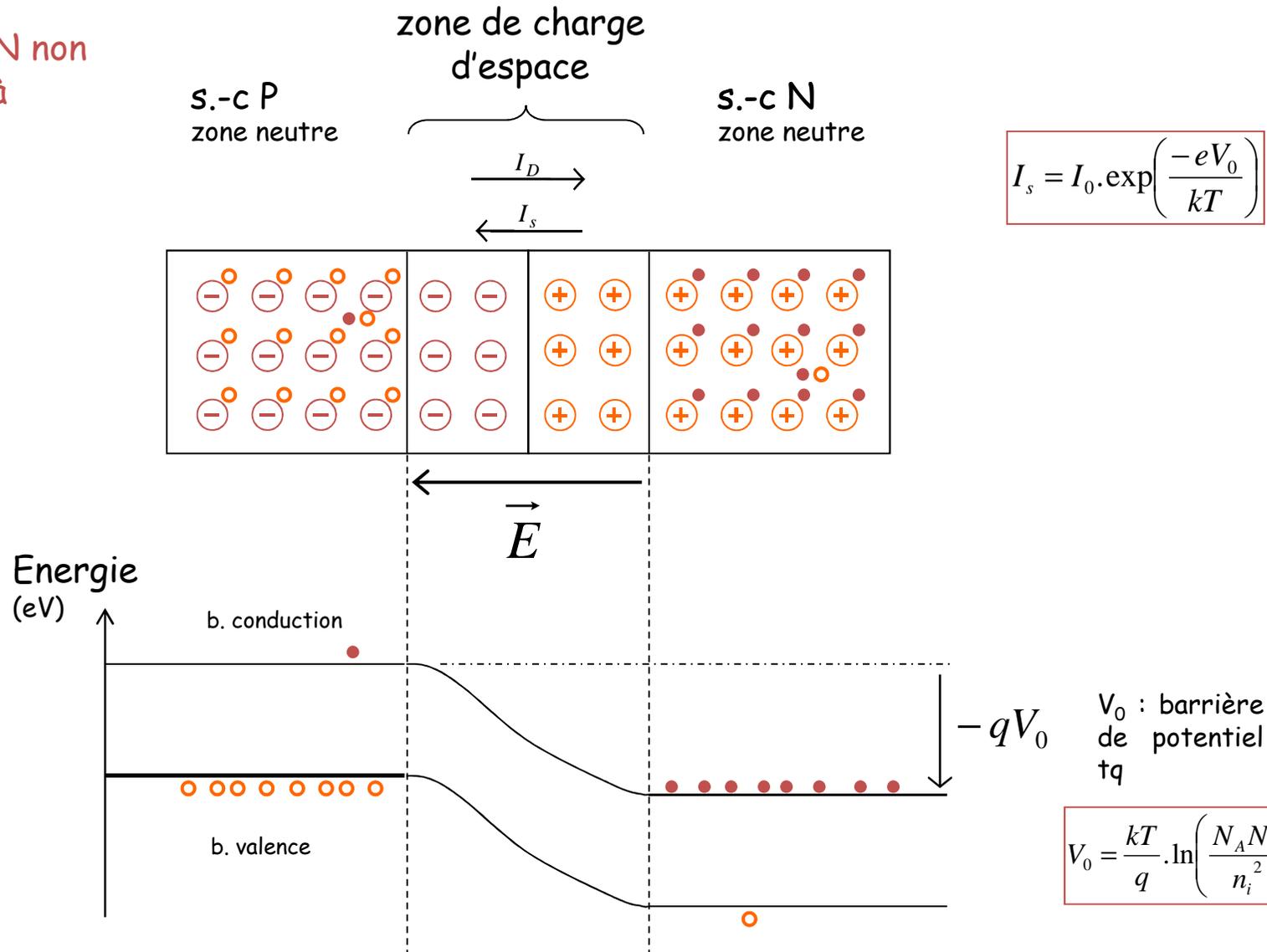
Chaque trou (resp. e^-) majoritaire quittant le s.-c. P (N) laisse derrière lui un anion (cation) fixe et entraîne l'apparition d'un cation (anion) fixe dans le s.-c. N (P) du fait de sa recombinaison avec un e^- (trou). Ces ions sont localisés à proximité de la zone de contact entre les deux s.-c. (la zone de charge d'espace, ZCE), ils sont à l'origine de la création d'un champ électrique qui s'oppose au courant de diffusion. Ce champ électrique est équivalent à une différence de potentiel appelée **barrière de potentiel** ($V_0 = 0,7$ V pour le silicium, 0,3 V pour le germanium).

Un état d'équilibre est atteint ou :

- seuls qqs porteurs majoritaires ont une énergie suffisante pour franchir la ZCE et contribuer au courant de conduction I_D , ils est compensé par,
- un **courant de saturation inverse**, I_s , créé par les porteurs minoritaires lorsqu'ils sont capturés par le champ électrique de la ZCE.

I - Matériaux semi-conducteurs

Jonction PN non polarisée, à l'équilibre :



$$I_s = I_0 \cdot \exp\left(\frac{-eV_0}{kT}\right)$$

$$V_0 = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

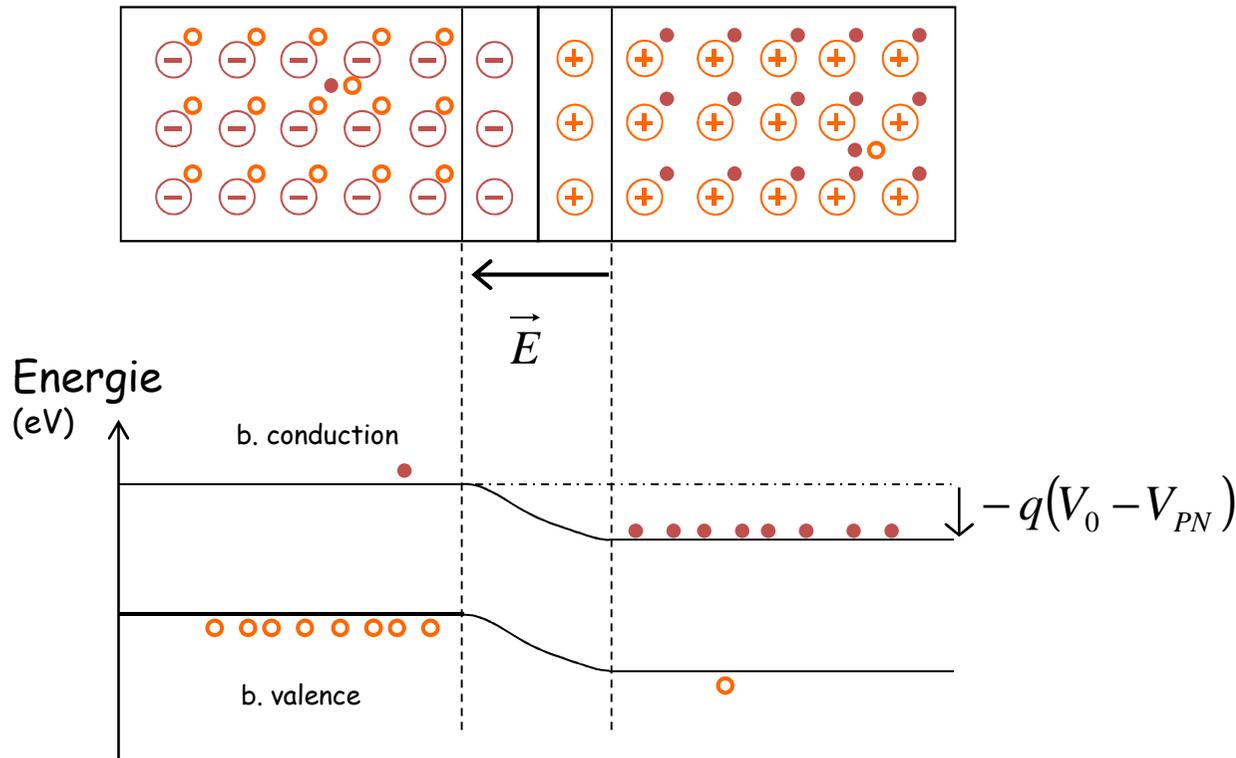
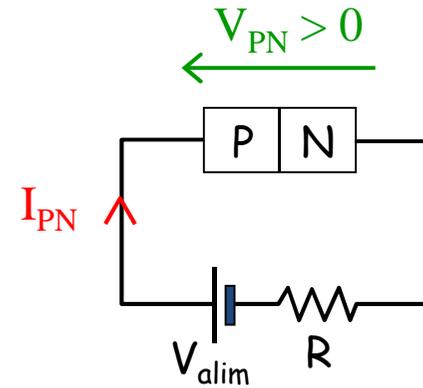
ZCE = zone de déplétion = zone désertée

I - Matériaux semi-conducteurs

b. Jonction PN polarisée en direct.

→ abaissement de la barrière de potentiel

réduction de la ZCE et du champ électrique



I - Matériaux semi-conducteurs

On établit :

$$I_{PN} = I_s \cdot \left[e^{V_{PN}/V_T} - 1 \right]$$

On retiendra que le courant traverse facilement une diode polarisée en direct ($V_{PN} > V_0$)

Résistance dynamique d'une jonction polarisée en direct :

$$V_{\text{alim}} = V_{\text{alim}} + dV \Rightarrow I_{PN} = I_{PN} + dI$$

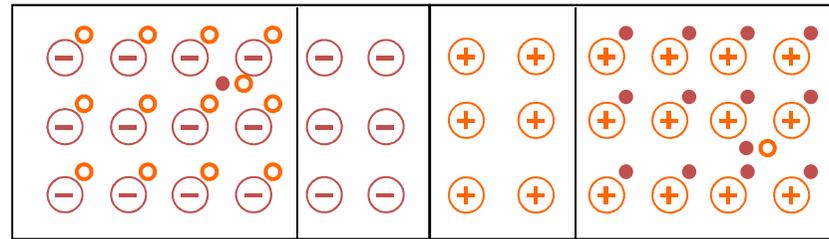
On obtient :

$$r = \frac{dV}{dI} = \frac{V_T}{I_{PN}}$$

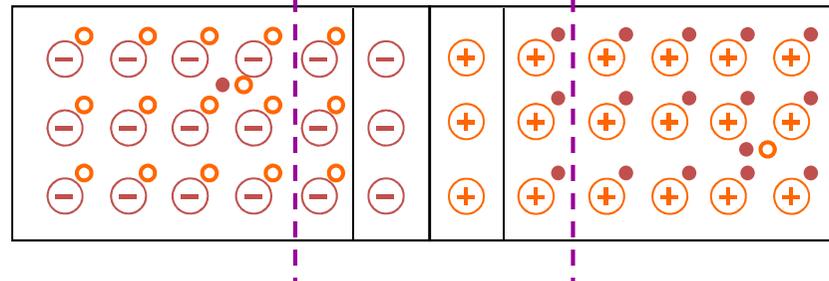
I - Matériaux semi-conducteurs

Charge stockée dans une jonction polarisée en direct :

Non polarisé :



Polarisation directe :

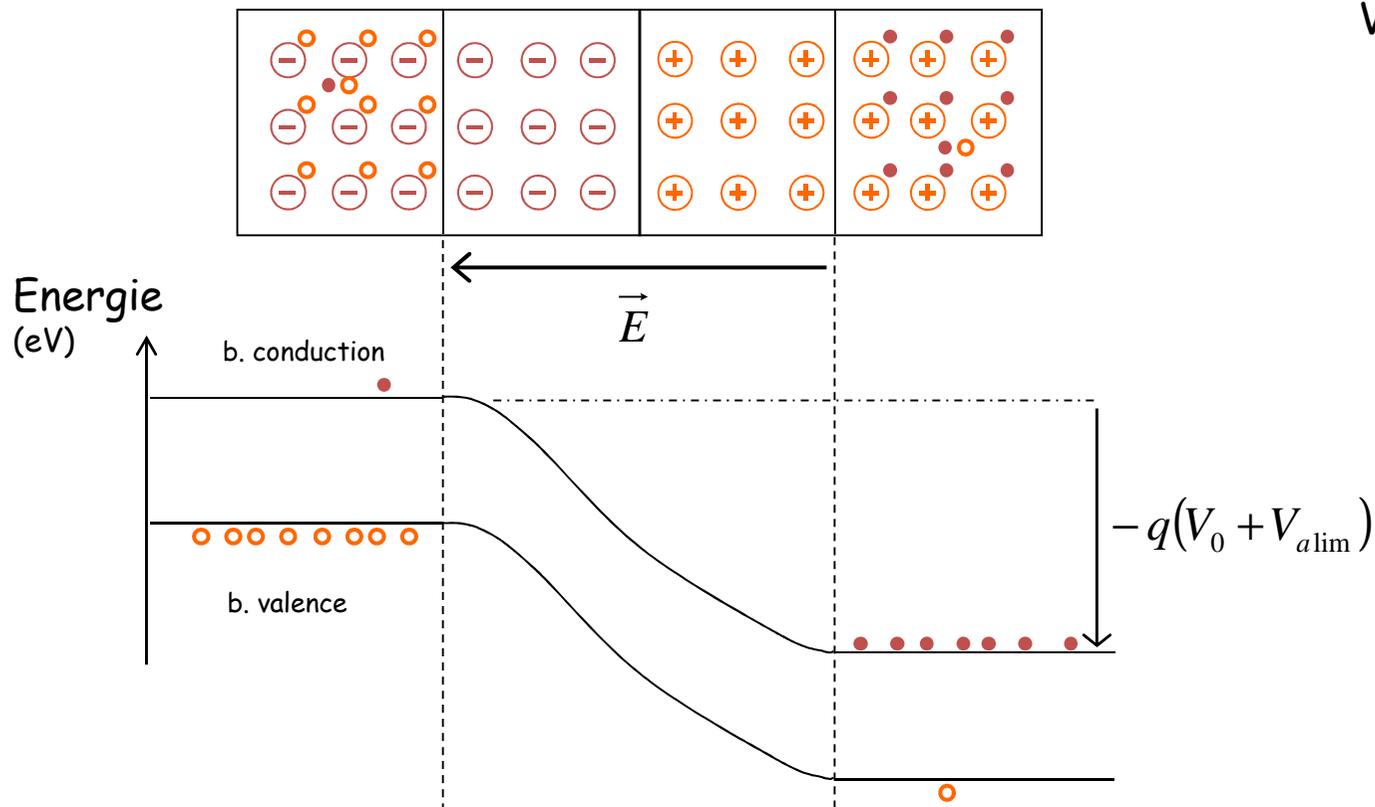
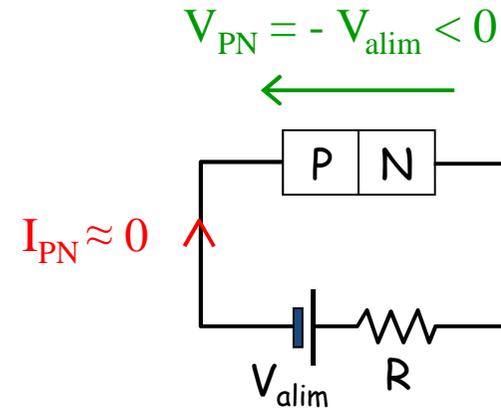


Avant de bloquer une jonction PN polarisée en directe il faut évacuer ces charges en excès par rapport à la situation d'équilibre → courant inverse transitoire (cf. temps de recouvrement dans la suite du cours).

I - Matériaux semi-conducteurs

c. Jonction PN polarisée en inverse.

→ augmentation de la barrière de potentiel
élargissement de la ZCE et intensification du champ électrique



I - Matériaux semi-conducteurs

→ le courant de diffusion (porteurs majoritaires) est quasi-nul.

→ seul subsiste un courant inverse très faible, $I_{PN} = -I_s$, de porteurs minoritaires.

Claquage :

Tension de claquage = tension inverse limite supportable au-delà de laquelle apparaît le phénomène d'avalanche.

Sous l'effet d'une tension inverse élevée les porteurs minoritaires sont accélérés et acquièrent suffisamment d'énergie pour arracher à leur tour d'autre e^- de valence lors des chocs. Une *réaction en chaîne* apparaît.

→ le courant inverse devient très important (claquage).

d. Influence de la température.

- Sur I_s :

courant dû aux porteurs minoritaires créés par génération thermique, il augmente rapidement avec $T^\circ \rightarrow$ pour le Si il double tout les 7°C .

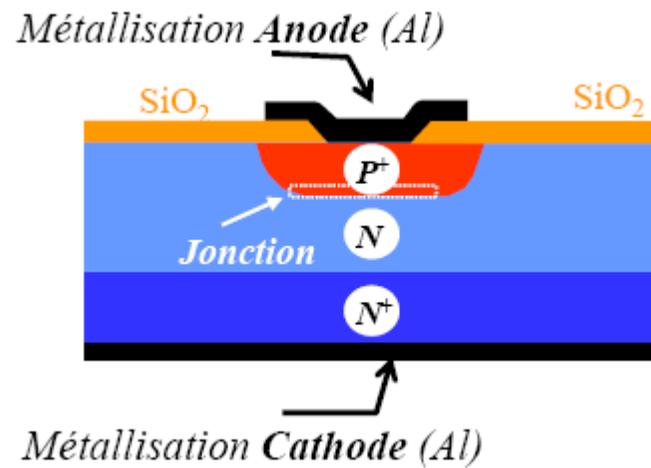
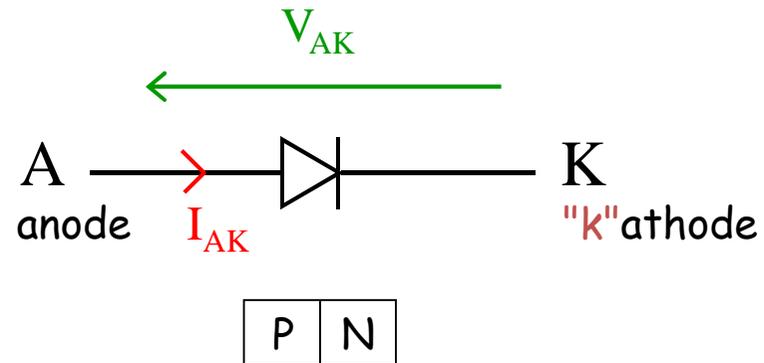
- Sur V_0 la barrière de potentiel :

pour le Si autour de 300°K elle décroît de 2 mV pour une augmentation de 1°C .

$$\frac{dV_0}{dT} = -2 \text{ mV} / ^\circ$$

I - Matériaux semi-conducteurs

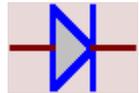
6 - La diode à jonction PN.



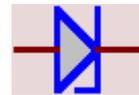
Différentes diodes : Symboles

Anode « A »

Cathode « K »



Diode



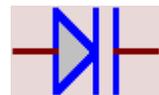
Diode Zener

En inverse pour la régulation



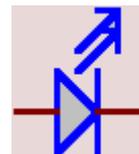
Diode Schottky

Pour les commutations rapide



Diode Varicap

En HF



Diode électro luminescente (LED)

Faut il la présenter ?

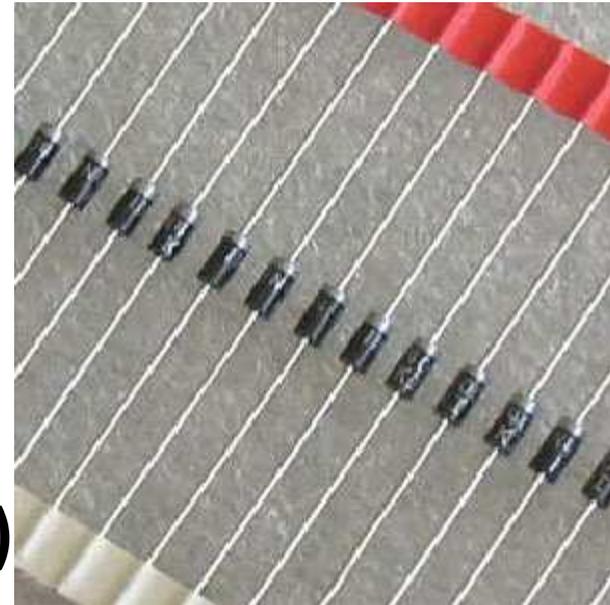
Diodes de signal (ex 1N914)

- Faible intensité (jusqu'à 100 mA)
- Faible tension inverse (jusqu'à 100V)
- Souvent très rapides ($t_{rr} < 10\text{ns}$)
donc adaptée à la commutation
- Boîtier verre (ou CMS)
- L'anneau repère la cathode
- Marquage le plus souvent en clair

Diodes de redressement (ex 1N400x)



- Forte intensité (1A)
- Forte tension inverse (jusqu'à 1000V)
- Lente en commutation ($t_{rr} > 100\text{ns}$)
réservée aux basses fréquences
- Boîtier plastique
- L'anneau repère la cathode
- Marquage le plus souvent en clair

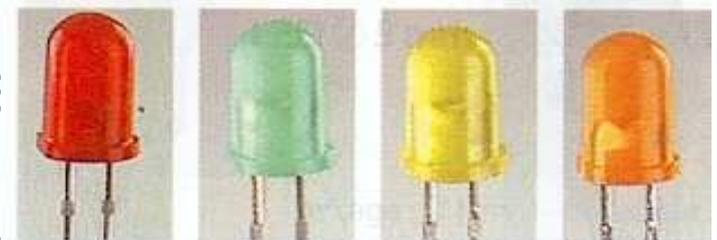


Diodes LEDs

- Choisies pour leur couleur, luminosité et taille
- La tension V_f dépend de la couleur (énergie)
- L'intensité est pulsée pour accroître l'efficacité lumineuse
- Bicolores à deux ou multicolore par combinaisons de courants
- Isolées ou assemblées

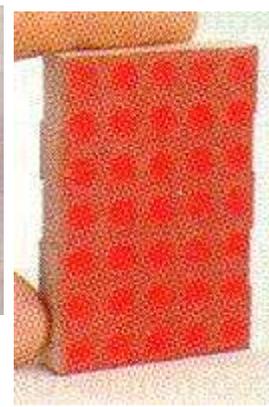
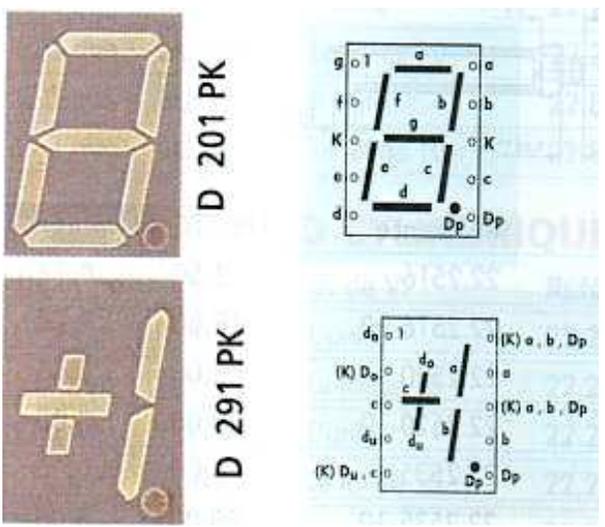
Longueurs d'ondes :
 Rouge : 650 à 660 nm - Jaune : 585 à 590 nm
 Vert : 565 nm - Orange : 610 à 620 nm - Bleu : 430 nm.

LED À BOÎTIER DIFFUSANT TEINTÉ
 LED ROUGE - Eclairage pour $I_f = 10 \text{ mA}$: > à 5 mcd.

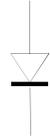


BOÎTIER ROND À 2 PATTES

Changement de couleur par inversion de polarité.

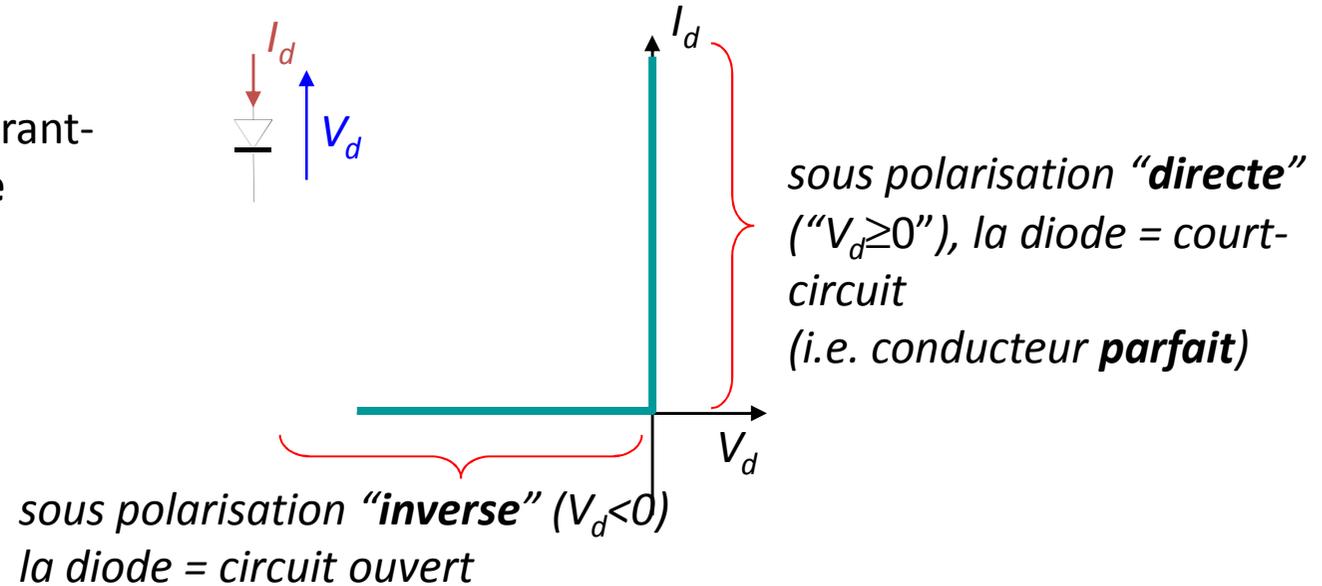
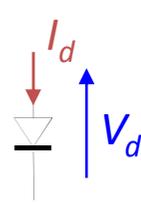


2. Les Diodes



2.1 Définition

- Caractéristique courant-tension d'une **diode idéale** :



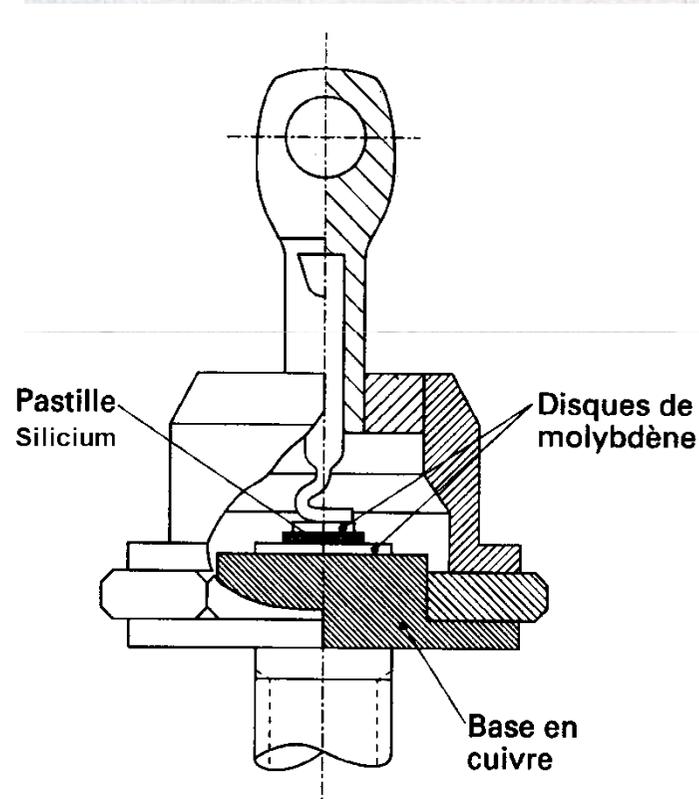
✉ Ce type de composant est utile pour réaliser des **fonctions électroniques** telles que le redressement d'une tension, la mise en forme des signaux (écrêtage, ...).

✉ La diode (même idéale) est un composant **non-linéaire**

✉ ON NE SAIT PAS FABRIQUER UNE DIODE IDEALE !!!!

Diodes de puissance

BOÎTIERS



Utilisées généralement pour le redressement de puissance
Dans les onduleurs par exemple
 $I_F > 100A$

Autres diodes

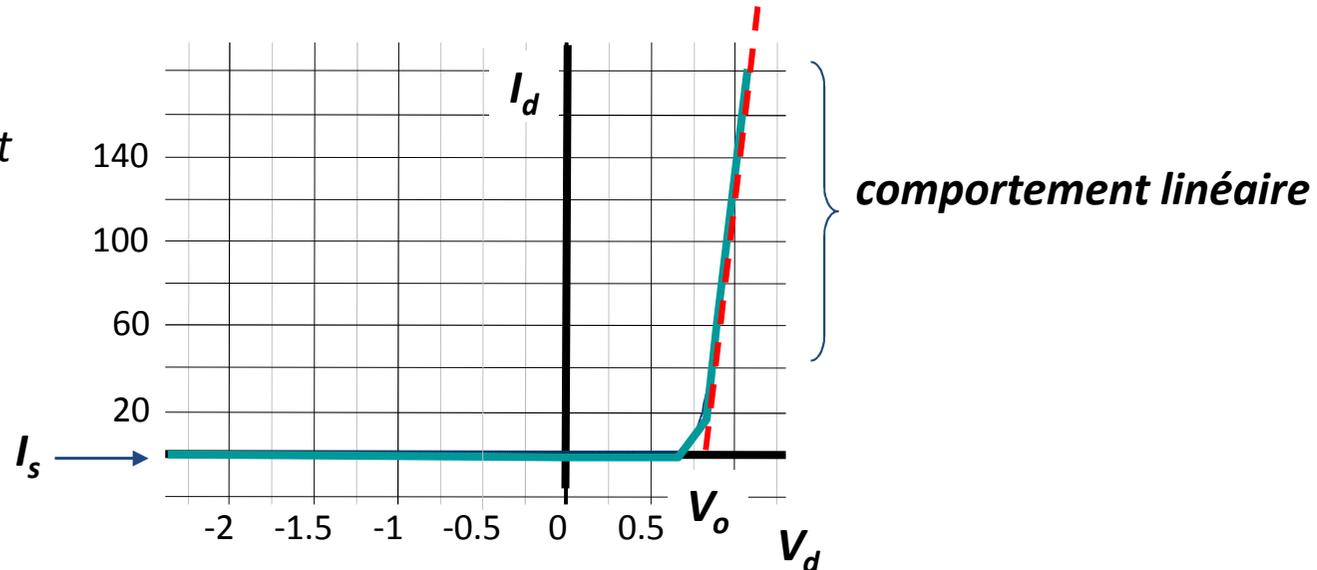
- **SCHOTTKY** pour la commutation rapide en puissance et la faible chute V_f
- **TRANSIL** pour absorber les courants dues aux surtensions (protection aux décharges)
- **PHOTODIODE** polarisée en inverse c'est un convertisseur lumière/courant

2.2 Caractéristiques d'une diode réelle à base de Silicium

hyp: régime

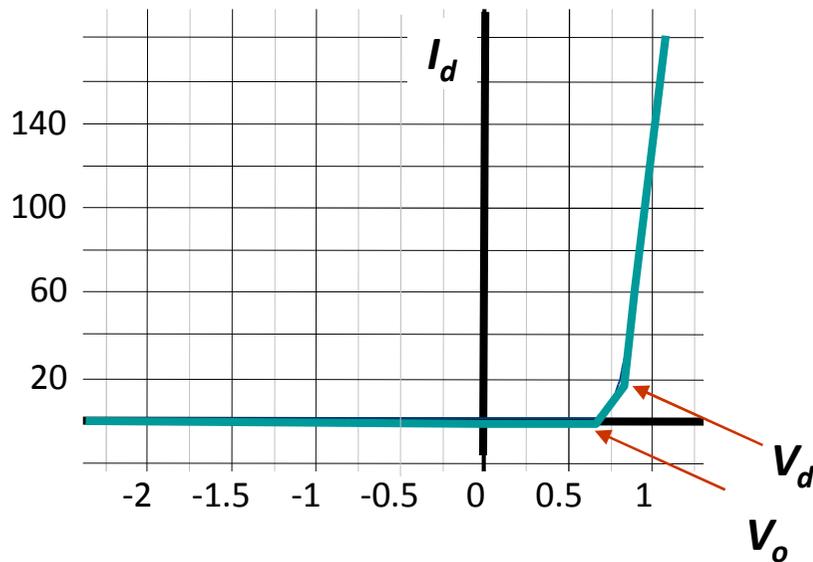
statique

*(tension et courant
indépendants du
temps)*



- Pour $V_d < 0$, la diode se comporte comme un **bon isolant** : $I_s \sim 1 \text{ pA} - 1 \mu\text{A}$,
 - ➔ la diode est dite "**bloquée**"
 - ➔ dans ce **domaine** son comportement est approximativement **linéaire**
 - ➔ le courant "**inverse**", I_s , augmente avec la température

- Pour $V_d \gg \sim 0.6\text{v}$, le courant augmente **rapidement** avec une **variation** à peu près **linéaire**
 - ➔ la diode est dite "**passante**"
 - ➔ mais I_d **n'est pas proportionnel** à V_d (il existe une "**tension seuil**" $\sim V_o$)



- ↙ le comportement est fortement **non-linéaire**
- ↙ **variation** avec la **température**
- ↙ **Rq** : pour $V_d \gg V_T$ le terme **(-1)** est **negligeable**

■ **Zone « du coude »** : $V_d \in [0, \sim V_0]$: augmentation **exponentielle** du courant

$$I_d \cong I_s \left[e^{\left(\frac{V_d}{mV_T} \right)} - 1 \right]$$

avec $1 \leq m \leq 2$ (facteur "d'idéalité")

$V_T = k \cdot T/e$, pour $T=300K$ ($26,85^\circ C$), $V_T=26mV$

$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{Coulomb}$, T la température en **°Kelvin**

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} =$ constante de Boltzmann

$I_s =$ courant inverse

■ **Influence de T** : diode **bloquée** : $I_d = I_s$ **double** tous les $10^\circ C$ (diode en Si)

diode **passante** : V_d (à I_d constant) diminue de $\sim 2mV/^\circ C$

Limites de fonctionnement :

■ Zone de claquage inverse

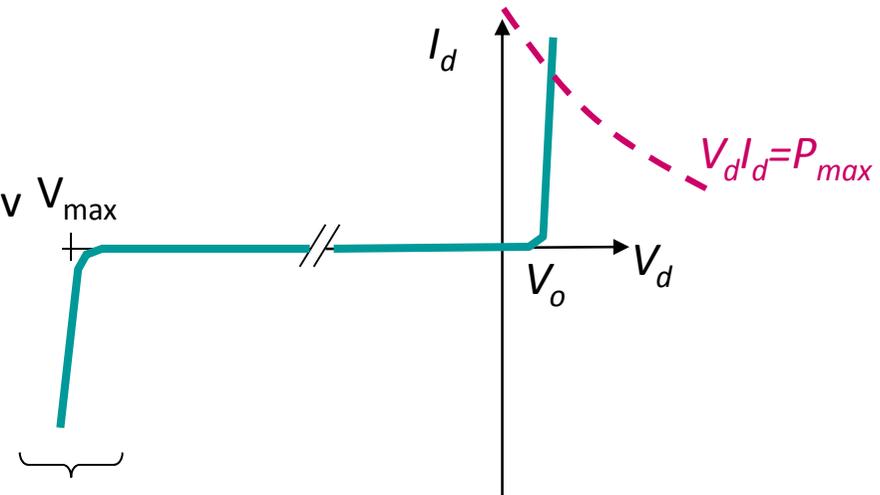
Ordre de grandeur :

V_{max} = quelques dizaines de Volts à qq 1000v

👉 peut conduire à la destruction pour une diode non conçue pour fonctionner dans cette zone.

👉 V_{max} = « P.I. V » (Peak Inverse Voltage) ou « P.R.V » (Peak Reverse Voltage)

claquage par effet Zener ou Avalanche



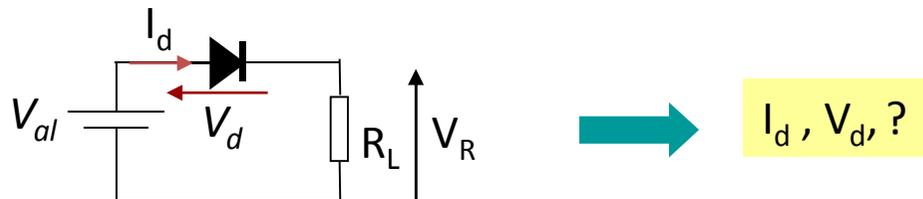
■ Limitation en puissance

Il faut que $V_d I_d = P_{max}$

2.3 Diode dans un circuit et droite de charge

2.3.1 Point de fonctionnement

- Comment déterminer la tension aux bornes d'une diode insérée dans un circuit et le courant qui la traverse?

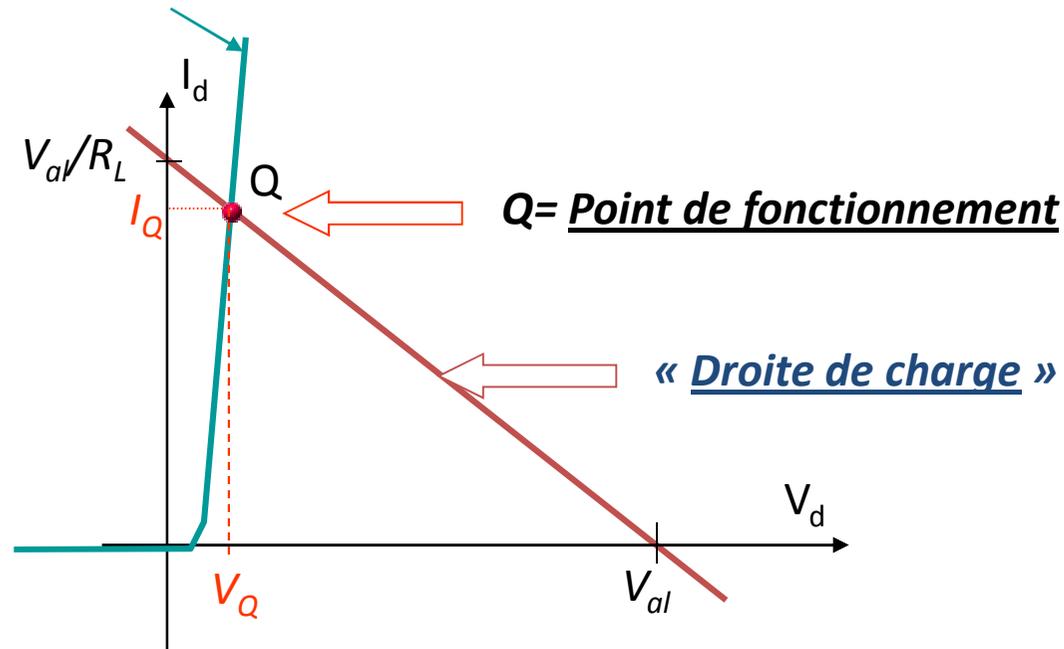


- ⇒ I_d et V_d respectent les **Lois de Kirchhoff** (conservation d'énergie, loi des nœuds, loi des mailles)
- ⇒ I_d et V_d sont sur la **caractéristique $I(V)$** du composant
- ⇒ Au **point de fonctionnement** de la diode, (I_d, V_d) remplissent ces **deux** conditions

2.3.2 Droite de charge

■ Loi de Kirchoff : $\dots \rightarrow I_d = \frac{V_{al} - V_d}{R_L}$ = **Droite de charge** de la diode dans le circuit

Caractéristique $I(V)$



⇒ Connaissant $I_d(V_d)$ on peut **déterminer graphiquement** le point de fonctionnement
☞ *procédure valable quelque soit la caractéristique $I(V)$ du composant !*

⇒ On peut **“calculer”** le point de fonctionnement en décrivant la diode par un **modèle simplifié.**

2.4 Modèles Statiques à segments linéaires ↔ *hyp*: I_d, V_d constants

2.4.1. "Première" approximation: Diode « idéale »

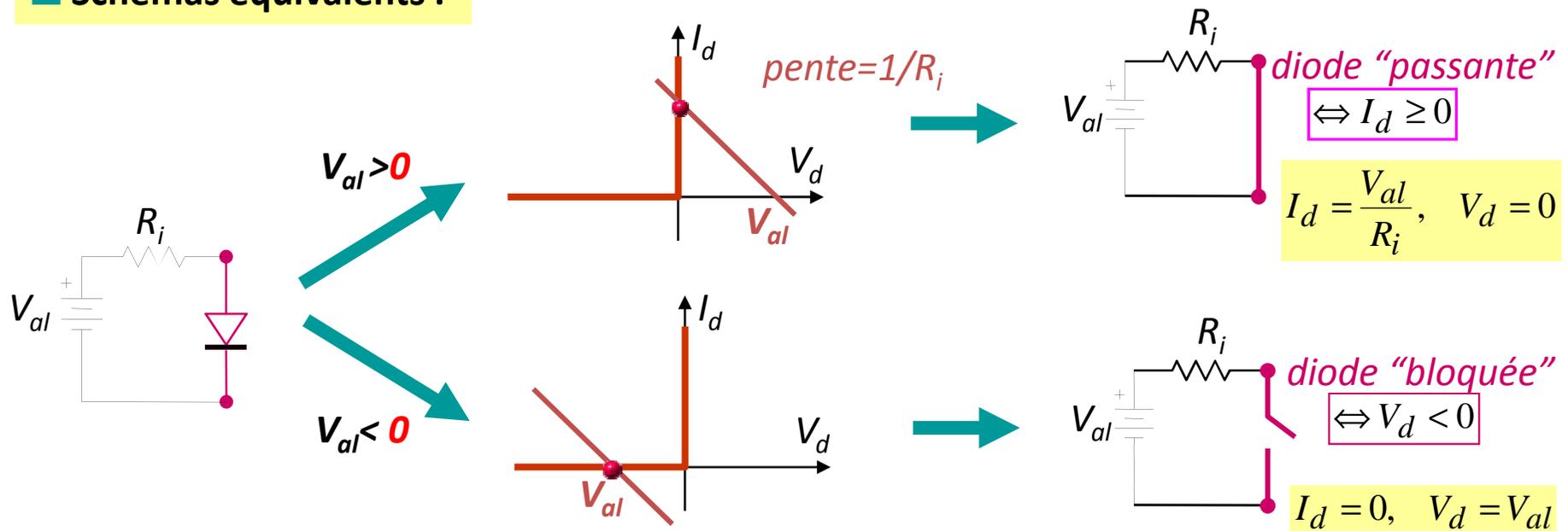
↔ On néglige l'écart entre les caractéristiques réelle et idéale

↔ Ce modèle est surtout utilisé en électronique numérique

- pas de tension seuil
- conducteur parfait sous polarisation directe
- $V_d < 0$: circuit ouvert

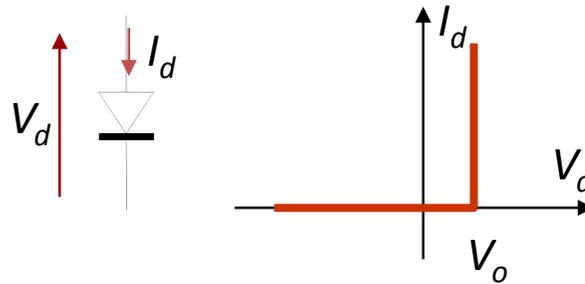


■ Schémas équivalents :



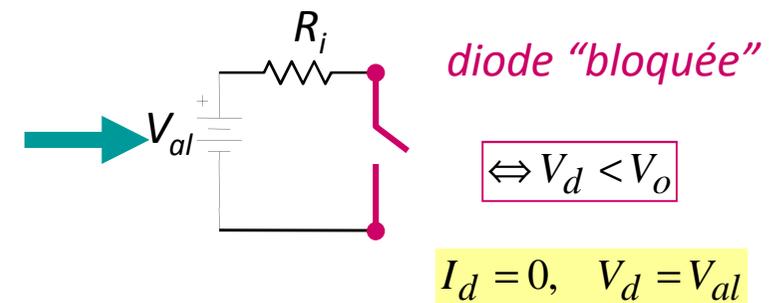
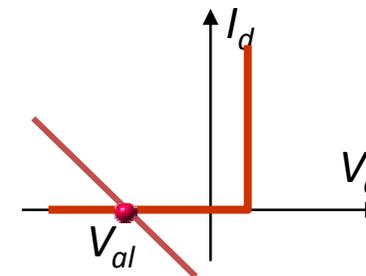
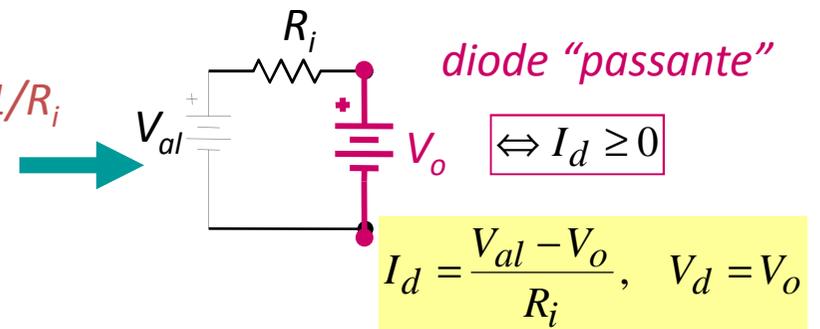
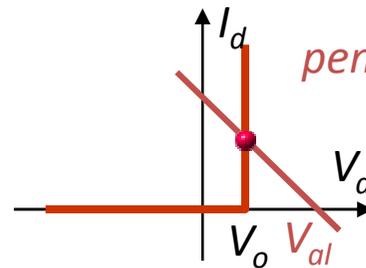
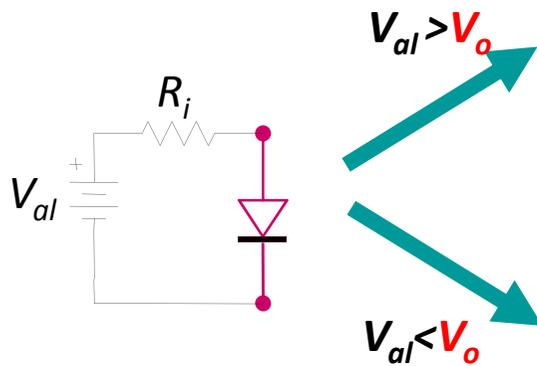
2.4.2 Seconde approximation

- tension seuil V_o non nulle
- caractéristique directe verticale (pas de "résistance série")
- $V_d < 0$: circuit ouvert



✉ Pour une diode en Si: $V_o \approx 0,6-0,7 \text{ V}$

Schémas équivalents

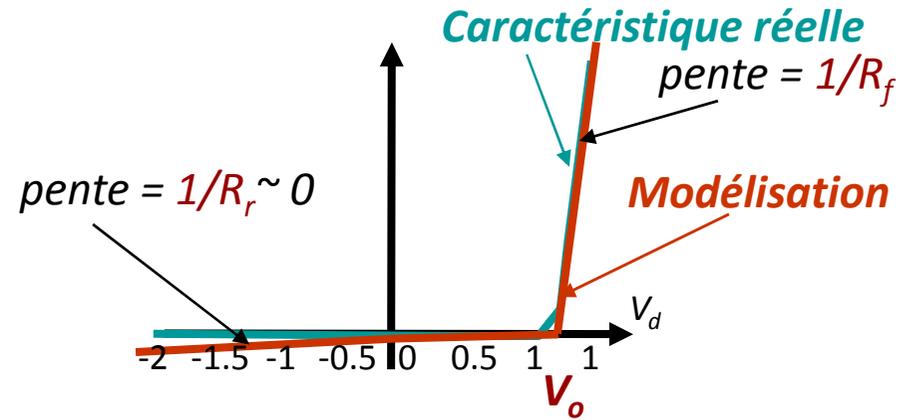
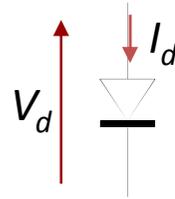


2.4.3 3^{ème} Approximation

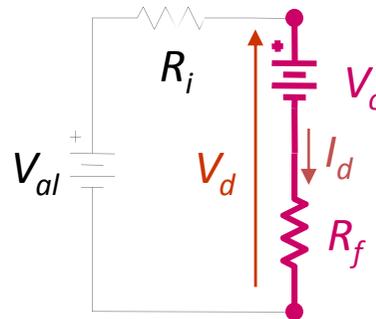
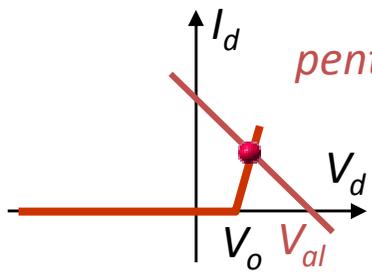
- tension seuil V_o non nulle
- résistance directe R_f non nulle
- $V_d < 0$: résistance R_r finie

☞ Pour une diode en silicium,
 $V_o = 0,6-0,7V$, $R_f \sim q.q \cdot 10\Omega$,
 $R_r \gg M\Omega$,

■ Schémas équivalents



$V_{al} > V_o$:



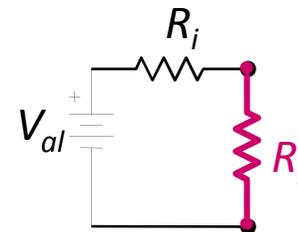
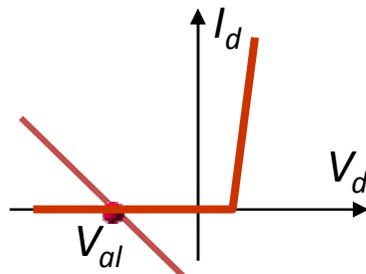
schémas équivalents :

diode passante

$$\Leftrightarrow I_d \geq 0 \text{ et } V_d \geq V_o$$

$$\rightarrow V_d = V_o + R_f I_d$$

$V_{al} < V_o$:

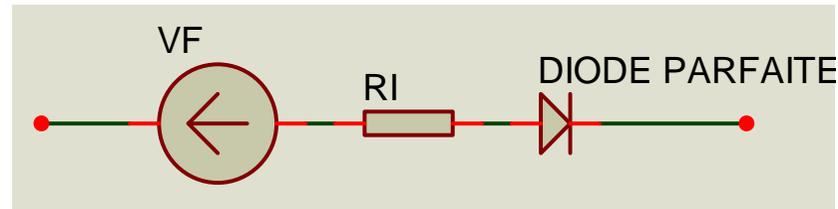


diode bloquée

$$\Leftrightarrow V_d < V_o$$

Remarques :

$$R_f \neq \frac{V_d}{I_d} \quad R_f = \frac{dv_d}{di_d}$$



■ Modèle couramment utilisé

■ R_f dépend du point de polarisation

■ Les effets **secondaires** (influence de la température, non-linéarité de la caractéristique inverse, ...) sont pris en compte par des modèles plus évolués (modèles utilisés dans les simulateurs de circuit de type SPICE).

Exemple de modèle SPICE : diode 1N757

```
.model D1N757 D(Is=2.453f Rs=2.9 Ikf=0 N=1 Xti=3 Eg=1.11 Cjo=78p
```

```
M=.4399
```

```
+ Vj=.75 Fc=.5 Isr=1.762n Nr=2 Bv=9.1 Ibv=.48516 Nbv=.7022
```

```
+ Ibv1=1m Nbv1=.13785 Tbv1=604.396u)
```

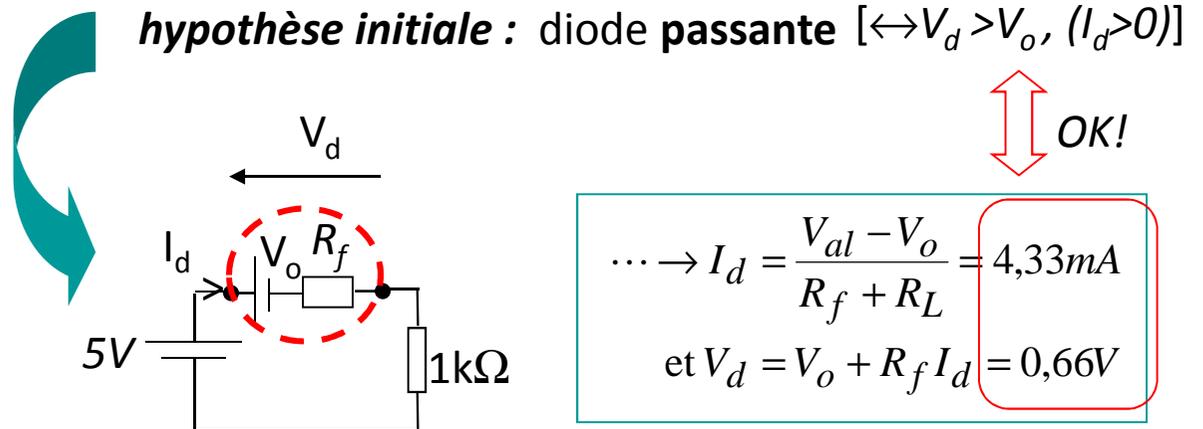
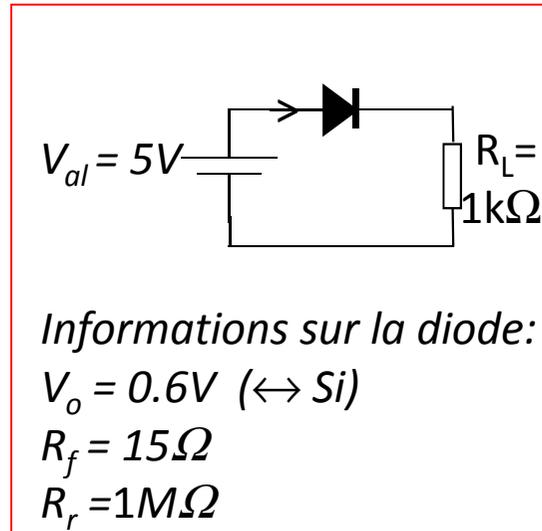
```
* Motorola pid=1N757 case=DO-35
```

```
* 89-9-18 gjg
```

```
* Vz = 9.1 @ 20mA, Zz = 21 @ 1mA, Zz = 7.25 @ 5mA, Zz = 2.7 @ 20mA
```

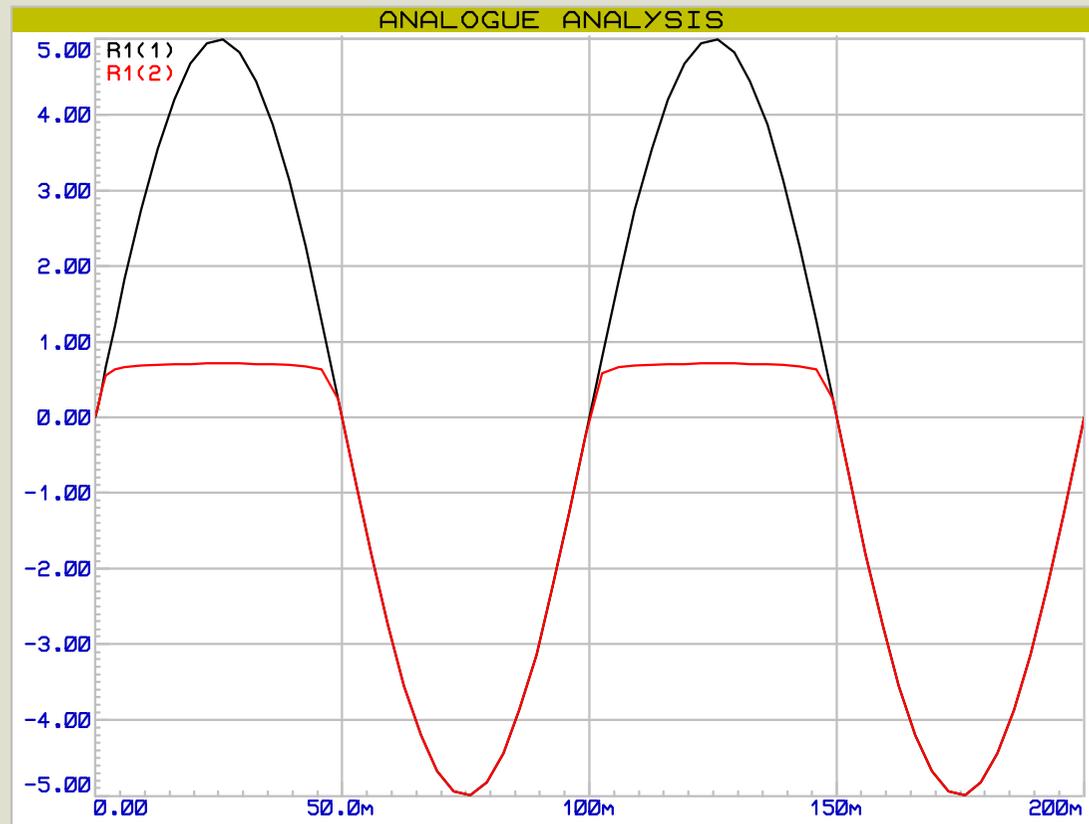
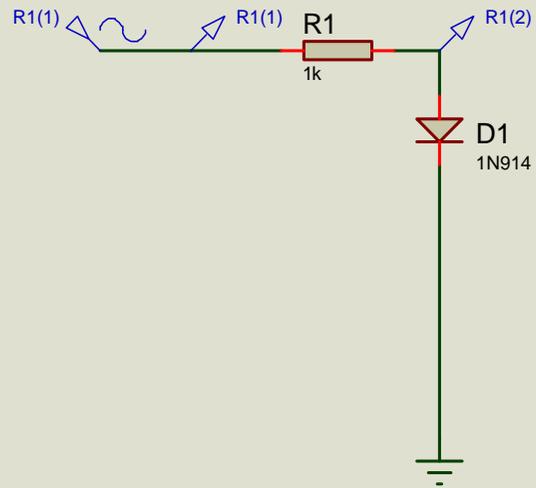
2.4.4 Calcul du point de fonctionnement via l'utilisation des schémas équivalents :

Exemple : Calcul de Q du circuit suivant, en utilisant la **3^{ième}** approximation pour la diode.



En utilisant la **2^{ième}** approximation: ($R_f = 0, R_r = \infty$) $\dots \rightarrow I_d = 4,4mA$ et $V_d = 0,6V$

→ La 2^{ième} approx. est souvent suffisante pour une étude **qualitative** du fonctionnement d'un circuit .



DIODE0

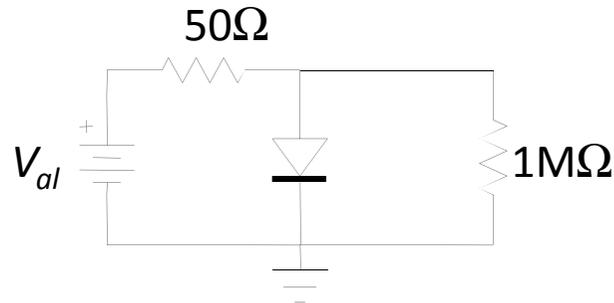
La courbe R1(2) représente la tension aux bornes de la diode, lorsque la diode conduit la tension à ses bornes est V_F , quasiment constante

EXERCICES:

Caractéristiques des diodes :

$R_f = 30\Omega$, $V_o = 0.6V$, $I_s = 0$ et R_R infinie

1)



Calcul de I_d et V_d

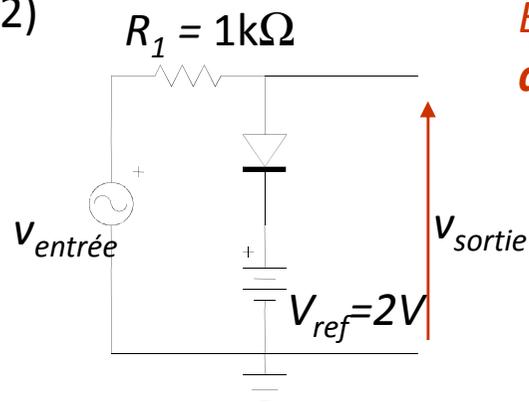
pour :

- a) $V_{al} = -5V$
- b) $V_{al} = 5V$

**$V_{al} = -5V$ diode bloquée $I_d = 0$, $V_d = -5V$
 $V_{al} = +5V$ diode passante $V_d = 0,6V$
 $I_d = (V_{al} - V_d) / 50 = 8,8mA$**

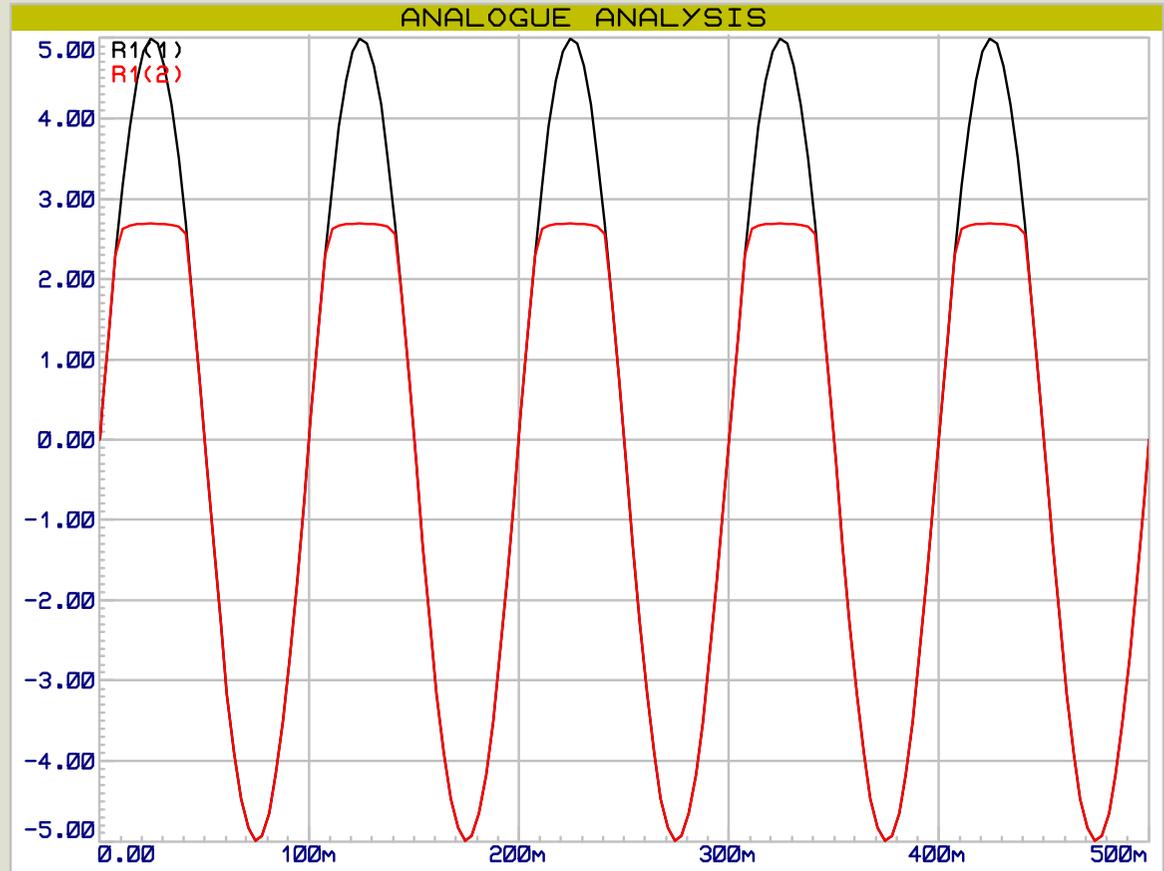
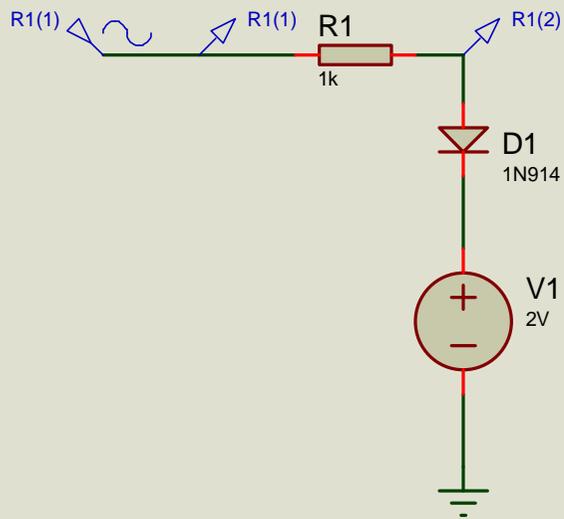
Conseil: simplifier le circuit d'abord avant de vous lancer dans des calculs

2)



Etude du **signal de sortie** en fonction de **l'amplitude du signal d'entrée** :

- avec $v_{entrée}$ signal sinusoïdal basse fréquence 10Hz - 5V/+5V tel que le modèle statique reste valable (période du signal < temps de réponse de la diode ↔ pas d'effet "capacitif")

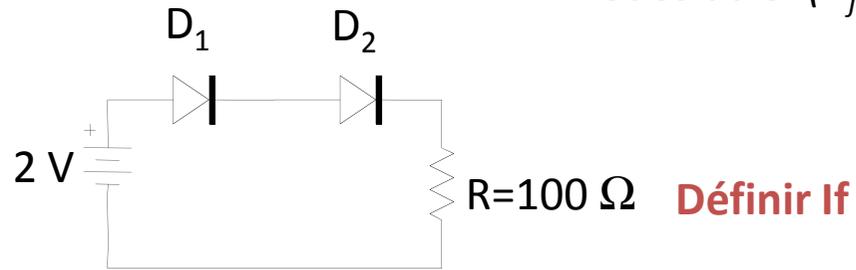


DIODE1

La courbe R1(2) représente la tension aux bornes de la diode plus 2v, lorsque la diode conduit la tension à ses bornes est VF

Diodes au Si ($R_f = 30\Omega$, $V_o = 0.6V$, $I_s = 0$ et R_R infinie)

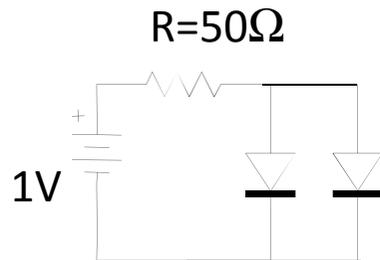
3)



$$I_f = (2 - 2 \cdot V_f) / R = 8\text{mA}$$

EXERCICES

4)

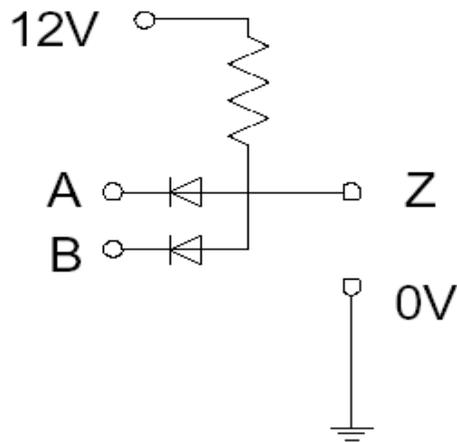


Définir I_R

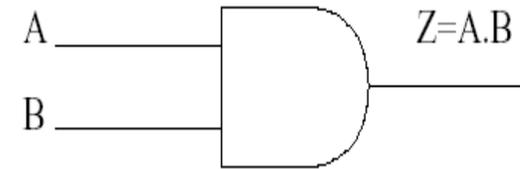
$$I_R = (1 - V_f) / R = 0.4 / 50 = 8\text{mA}$$

Exemples d'application de la diode en LOGIQUE

↳ Réalisation d'une fonction logique avec R, D



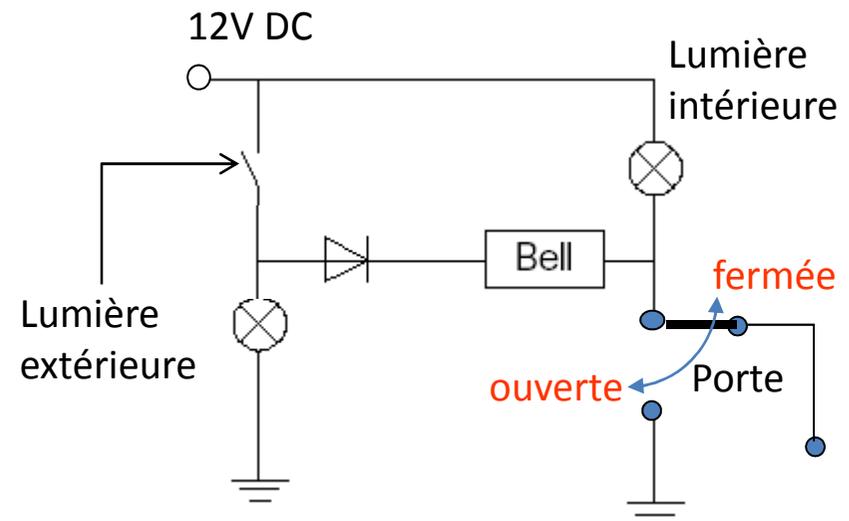
- Diode Resistor Logic (DTL)
- Output Z will be high (12V) if A and B are both connected to 12V (or left open circuit in this case)
- If either A or B is connected to ground (0V) the output will be low (0.7V)
- The diodes are required so A doesn't short out to B.



↳ Témoin sonore de la lumière externe non éteinte dans les automobiles

- la lumière interne s'allume lorsque la porte est ouverte et elle s'éteint si la porte est fermée
- Une alarme sonne si la lumière externe est allumée et la porte s'ouvre
- pas de sonnerie si la lumière externe est allumée mais la porte est fermée

Donner les deux positions de la porte et placer un circuit type Diode + Alarme pour répondre à ce besoin.



2.5 Comportement dynamique d'une diode

2.5.1 *Préambule* : Analyse statique / dynamique d'un circuit

L'Analyse statique

... se limite au calcul des **valeurs moyennes** des grandeurs électriques
(ou **composantes continues (DC)**, ou encore composantes statiques)

L'analyse statique permet de définir le point de polarisation

✉ = Analyse complète du circuit si seules des sources statiques sont présentes

L'Analyse dynamique

... ne concerne que les **composantes variables** des tensions et courants (ou “**signaux**”
électriques, ou encore composantes alternatives (**AC**))

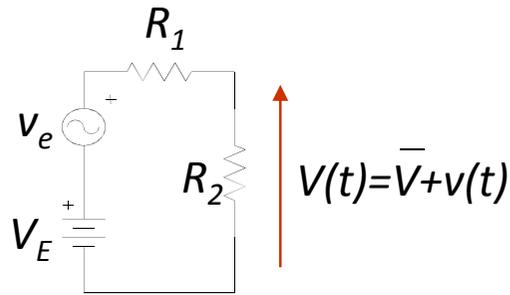
L'analyse dynamique permet de définir la fonction de transfert informationnelle

☞ n'a d'intérêt que s'il y a des sources variables!

Notation : lettres **majuscules** pour les composantes **continues**

lettres **minuscules** pour les composantes **variables**

Illustration : Etude la tension aux bornes d'un composant inséré dans un circuit.



hypothèses:

$v_e =$ signal sinusoïdal, à valeur moyenne nulle

$V_E =$ source statique

Calcul complet

$$\longrightarrow V(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} [V_E + v_e(t)] = \underbrace{\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_E}_{\bar{V}} + \underbrace{\frac{R_2}{R_1 + R_2} v_e(t)}_{v(t)}$$

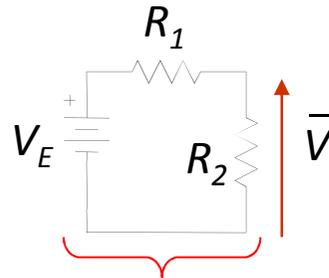
Principe de superposition :

✉ Comme tous les composants sont **linéaires**, le principe de superposition s'applique

➔ la source statique V_E est à l'origine de \bar{V} , et v_e est à l'origine de v

Analyse statique :

$$\bar{v}_e = 0 \longrightarrow$$

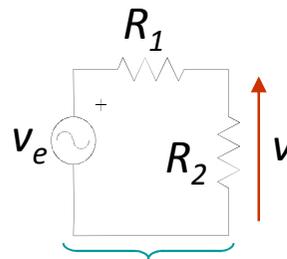


$$\bar{V} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_E$$

“schéma **statique**” du circuit

☛ En statique, une source de tension variable à valeur moyenne nulle correspond à un court-circuit

Analyse dynamique : $\Delta V_E = 0$



$$v(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_e(t)$$

“schéma **dynamique**”

☛ Une source de tension statique correspond à un “**court-circuit dynamique**”

Autres exemples:

1)

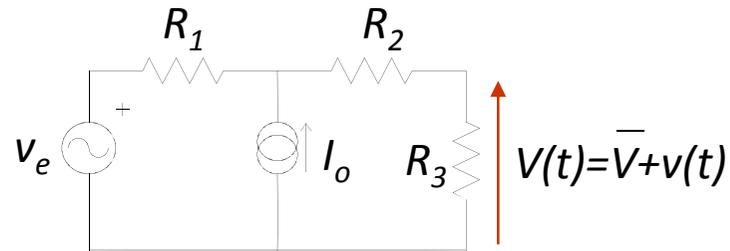


Schéma statique

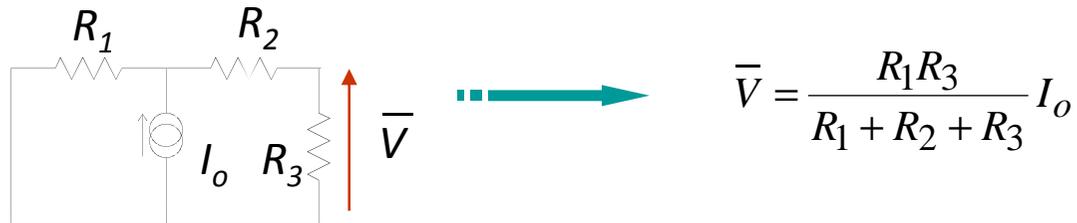
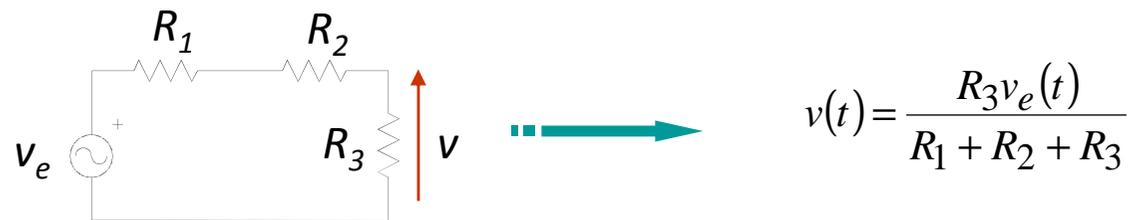
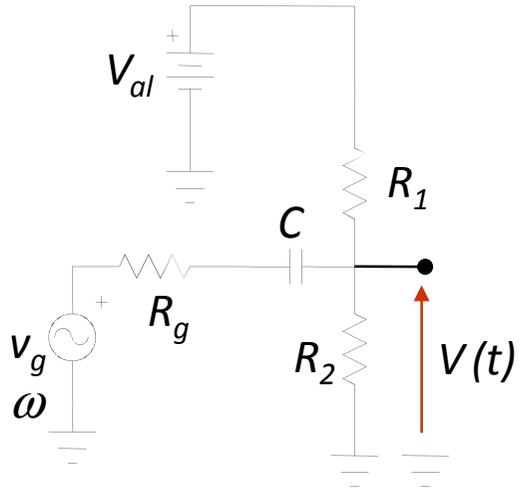


Schéma dynamique



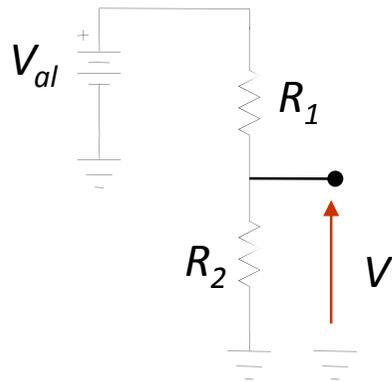
☞ Une **source de courant statique** est équivalent **en régime dynamique** à un **circuit ouvert**. [puisque $i(t)=0!$]

2)



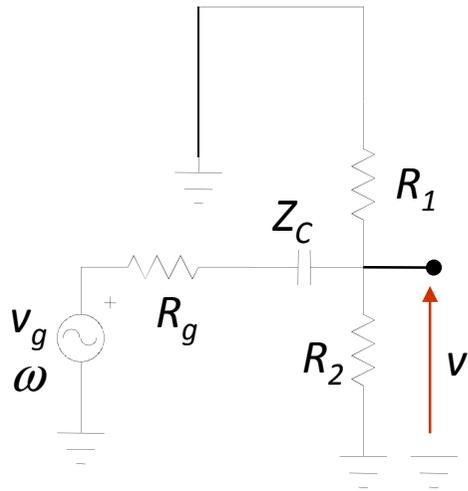
☒ C = composant *linéaire* caractérisé par une impédance qui dépend de la fréquence du signal

Schéma statique : à fréquence nulle C = circuit ouvert



$$\rightarrow V = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{al}$$

Schéma dynamique :



$$Z_c = \frac{1}{iC\omega}$$

$$\rightarrow v = \frac{R_2 // R_1}{R_2 // R_1 + Z_g} v_g \quad \text{avec } Z_g = R_g + \frac{1}{jC\omega}$$

schéma équivalent dynamique

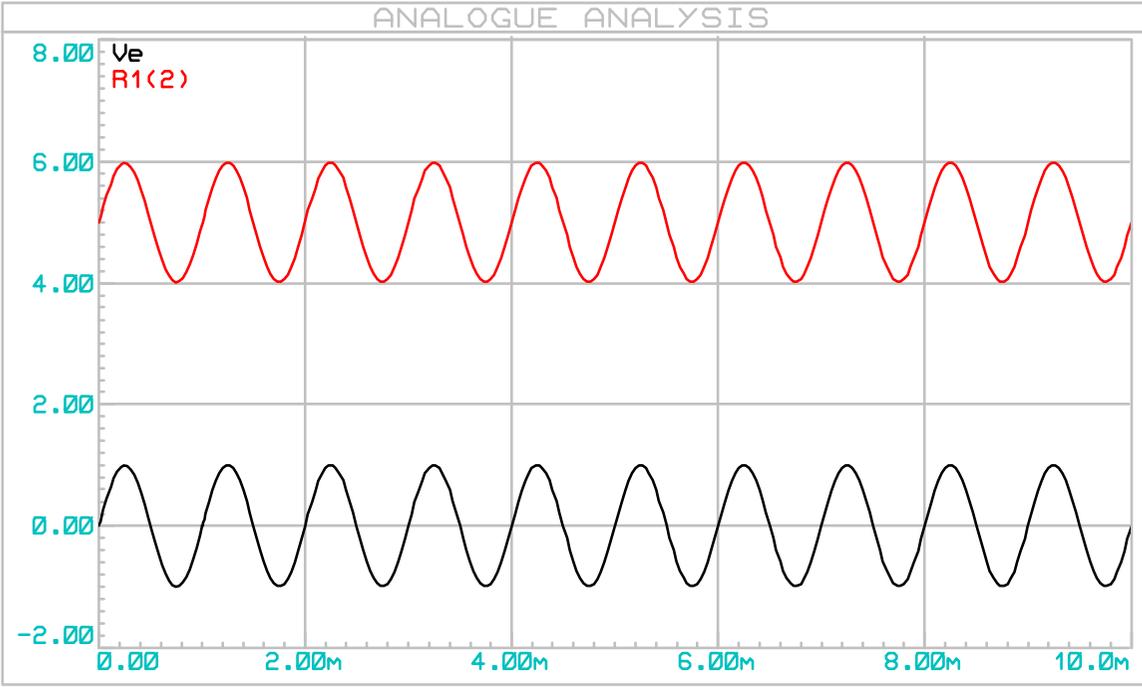
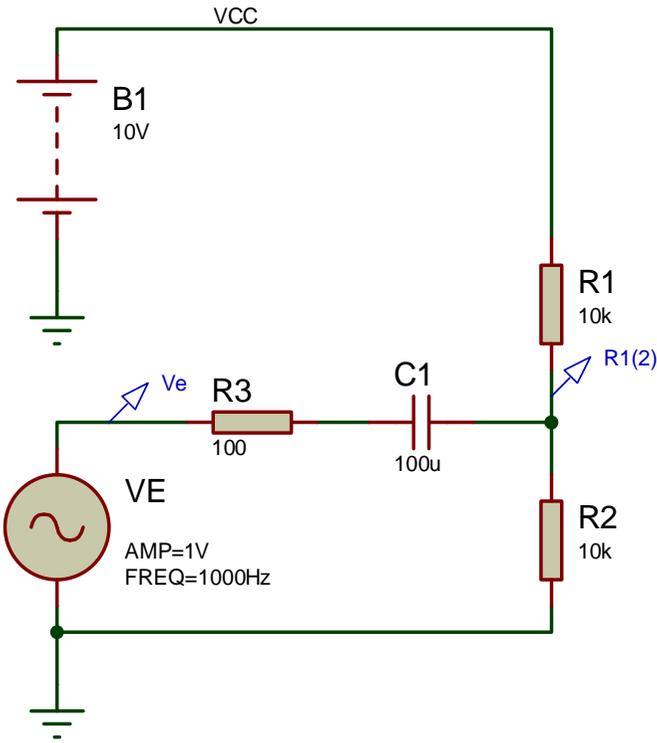
pour ω suffisamment élevée : $Z_g \approx R_g$

et

$$v = \frac{R_2 // R_1}{R_2 // R_1 + R_g} v_g$$

👉 A “très hautes” fréquences (à préciser suivant le cas), le condensateur peut être remplacé par un court-circuit.

POLARISATION et signal



☞ Le **principe de superposition** n'est plus **valable** en présence de composants **non-linéaires** !

Extrapolations possibles:

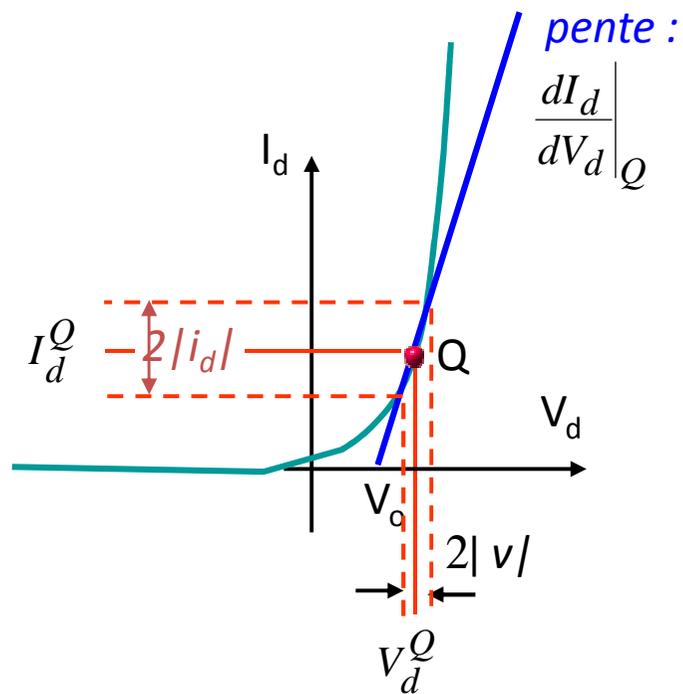
- le **point de fonctionnement** reste dans un des **domaines de linéarité** du composant non-linéaire
- l'**amplitude du signal** est suffisamment **faible** pour que le comportement du composant reste **approximativement linéaire**.
 - ➔ “**modèle linéaire petits signaux**” de la diode

2.5.2 Modèle petits signaux (basses fréquences)

hypothèse: variation suffisamment lente (basse fréquence) pour que la caractéristique “statique” reste valable.

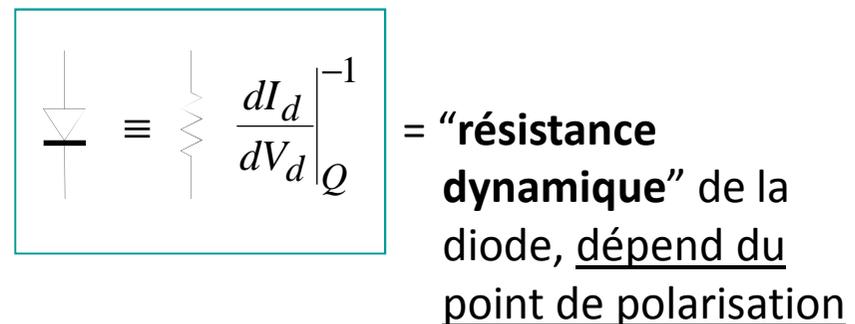
■ Variation de **faible amplitude** autour du point de fonctionnement statique Q :

➔ la caractéristique $I_d(V_d)$ peut être **approximée par la tangente en Q**



$$\Rightarrow i_d \cong \frac{dI_d}{dV_d}\bigg|_Q \cdot v_d$$

➔ schéma équivalent **dynamique** correspondant au point Q :



⊠ Ce schéma ne peut être utilisé **QUE** pour une analyse **dynamique** du circuit !

■ Notation :

$$r_f = \left. \frac{dI_d}{dV_d} \right|_{V_d > 0}^{-1} = \text{résistance dynamique pour } V_d^Q > 0$$

$$r_r = \left. \frac{dI_d}{dV_d} \right|_{V_d < 0}^{-1} = \text{résistance dynamique pour } V_d^Q < 0$$

➔ Pour $V_d \gg V_o$, $r_f \approx R_f$

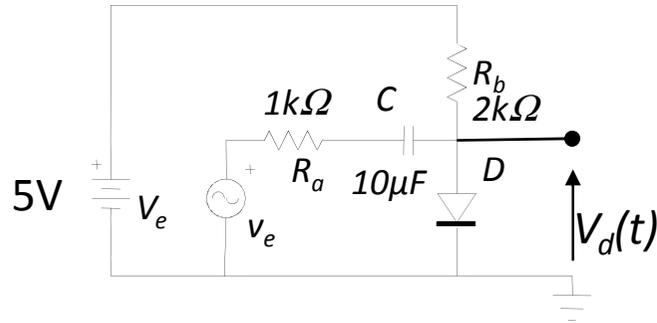
➔ Pour $V_d \in [0, \sim V_o]$, $r_f = \left. \frac{dI_d}{dV_d} \right|_{V_d}^{-1} \cong \left[\frac{d}{dV_d} \left(I_s e^{\frac{V_d}{mV_T}} - I_s \right) \right]^{-1} = \left[\frac{1}{mV_T} I_s e^{\frac{V_d}{mV_T}} \right]^{-1} = m \frac{V_T}{I_d}$

➔ Pour $V_d < 0$, $r_r \approx R_r$

✉ à température ambiante : $r_f \approx \frac{26}{I_d(\text{mA})} \Omega \quad (m=1)$

✉ proche de V_o la caractéristique $I(V)$ s'écarte de la loi exponentielle
 ↙ r_f ne devient jamais inférieure à R_f (voir courbe expérimentale)

Exemple :



diode: Si, $R_f = 10\Omega$, $V_o = 0,6V$,
Température : 300K (27°C)

$F(v_e) = 1\text{KHz}$, 0,1V

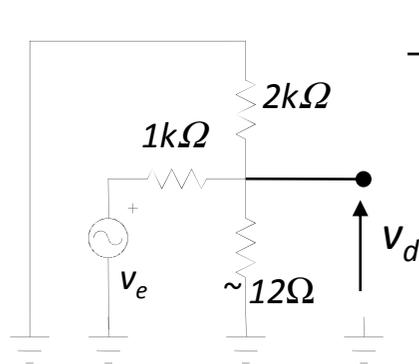
$$|Z_c| = \frac{1}{C \cdot \omega}$$

$$v_e = 0,1 \cdot \sin(10^3 \cdot 2\pi \cdot t)$$

● **Analyse statique :** $\rightarrow I_D \approx \frac{5 - 0,6}{2000} = 2,2\text{mA}$, $V_D \approx 0,62V$

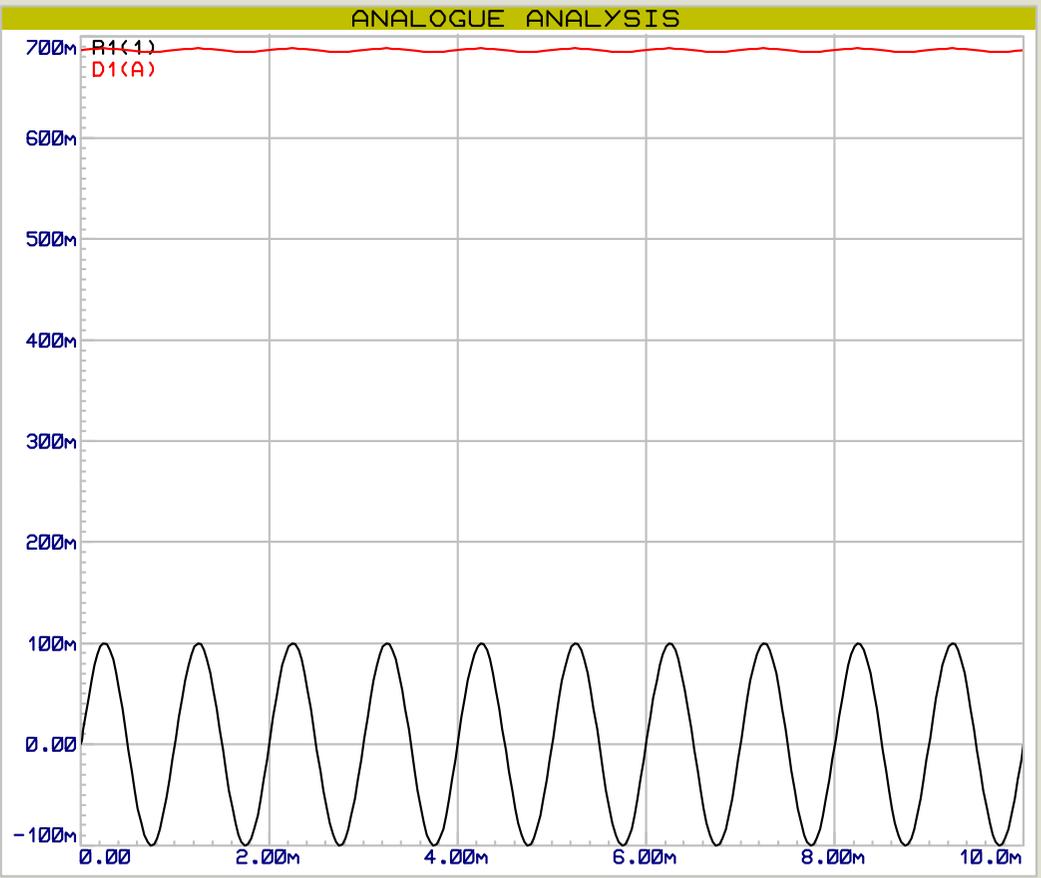
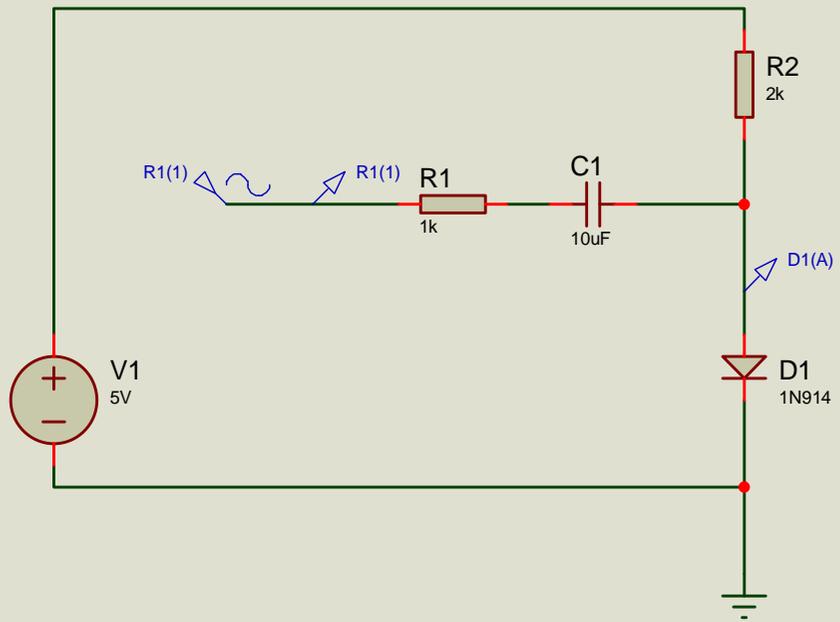
● **Analyse dynamique :** $r_f \approx \frac{26}{2,2} = 12\Omega$, $Z_c = 16\Omega \ll R_a$

Schéma dynamique :



$$\rightarrow v_d \approx 1,2 \cdot 10^{-3} \sin(10^3 \cdot 2\pi \cdot t)$$

\rightarrow Amplitude des ondulations résiduelles : 1,2 mV



DIODE3

2.5.3 Réponse fréquentielle des diodes

■ Limitation à haute fréquence :

Pour des **raisons physiques**, le courant I_d ne peut suivre les variations instantanées de V_d au delà d'une certaine fréquence.

➡ apparition d'un déphasage entre I_d et V_d

➡ le **modèle dynamique basse fréquence** n'est plus valable

■ Le temps de réponse de la diode dépend :

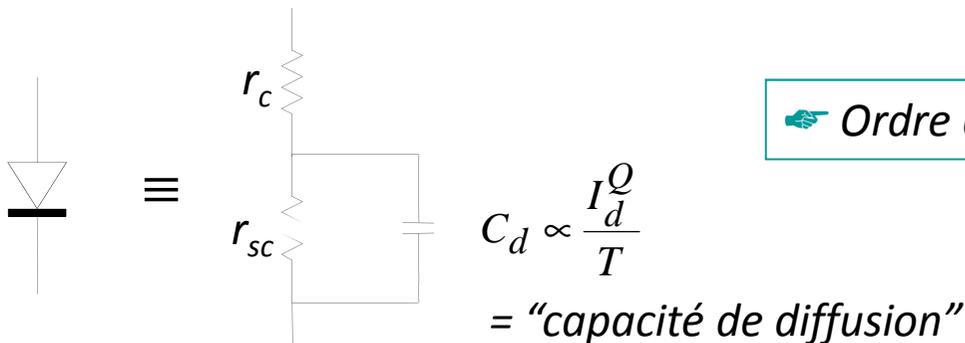
⇨ du **sens de variation** (passant → bloqué, bloqué → passant) (⇔ signaux de grande amplitude)

⇨ du **point de fonctionnement** statique (pour des petites variations)

■ Variation de V_d de faible amplitude, sous polarisation directe ($V_d^Q > 0$)

- ☒ une **petite variation** de V_d induit une **grande variation** I_d , c'est -à-dire des charges qui traversent la diode
- ☒ A haute fréquence, des charges restent "stockées" dans la diode (elle n'arrivent pas à suivre les variations de V_d)
- ☒ ~ Comportement d'un condensateur, dont la valeur augmente avec I_d
(cf physique des dispositifs semiconducteurs)

Modèle petits signaux haute fréquence ($V_d > 0$) :

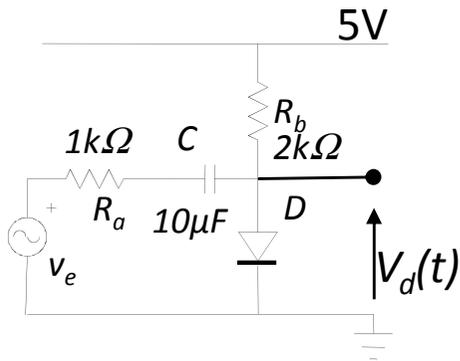


☞ Ordre de grandeur : $C_d \sim 40 \text{ nF}$ à 1 mA , 300 K .

- ☒ à basse fréquence : $r_c + r_s = r_f$
- ☒ la séparation en deux résistances tient mieux compte des phénomènes physiques en jeu.

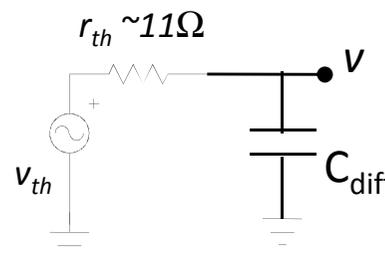
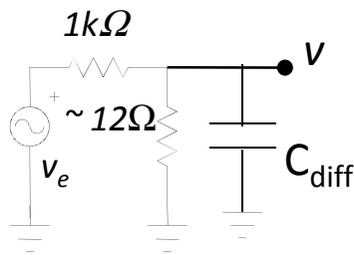
suite de l'exemple précédent...:

A quelle fréquence la capacité dynamique commence-t-elle à influencer la tension v_d ?

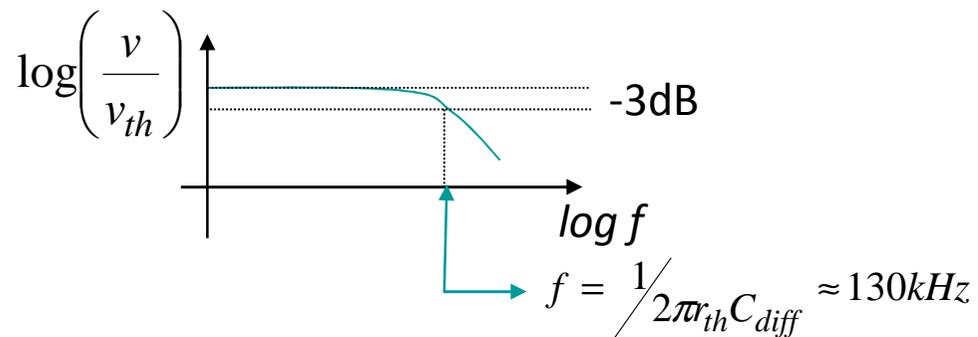


$$I_d = 2,2mA \rightarrow C_{diff} \sim 100nF$$

Schéma dynamique en tenant compte de C_{diff} : (hyp simplificatrice: $r_c \sim 0$)

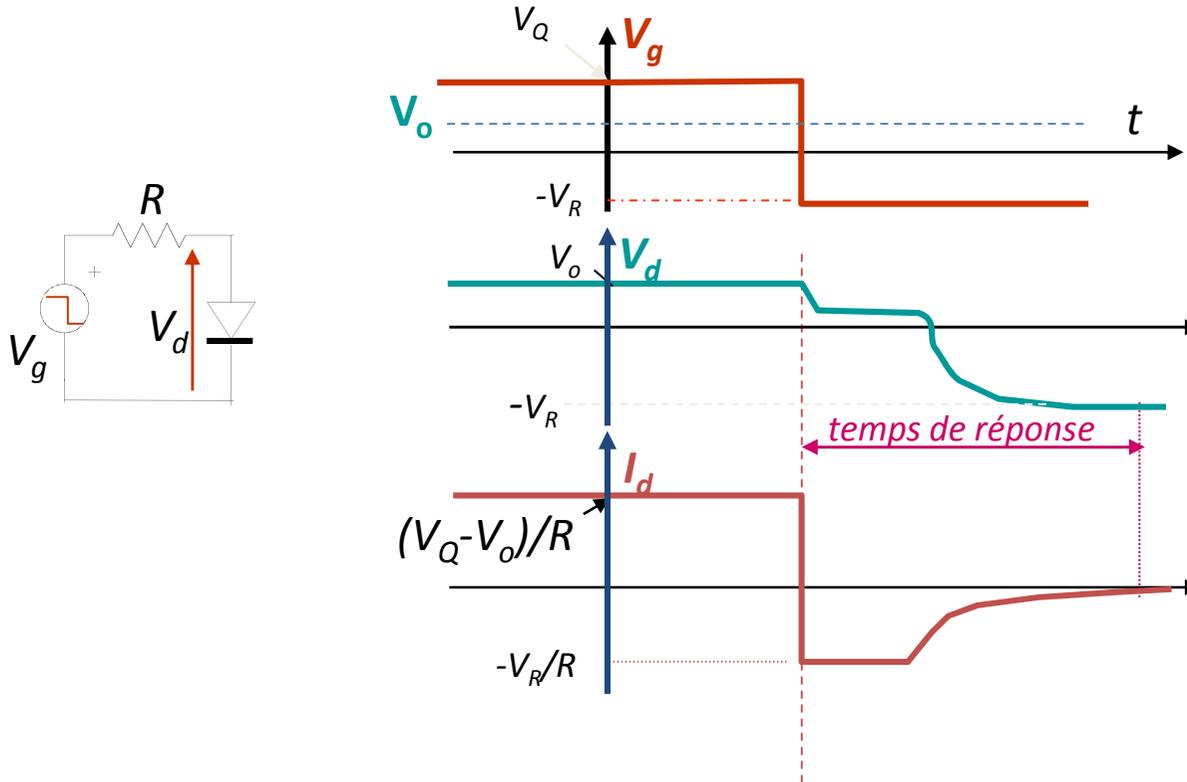


= « filtre » passe-bas

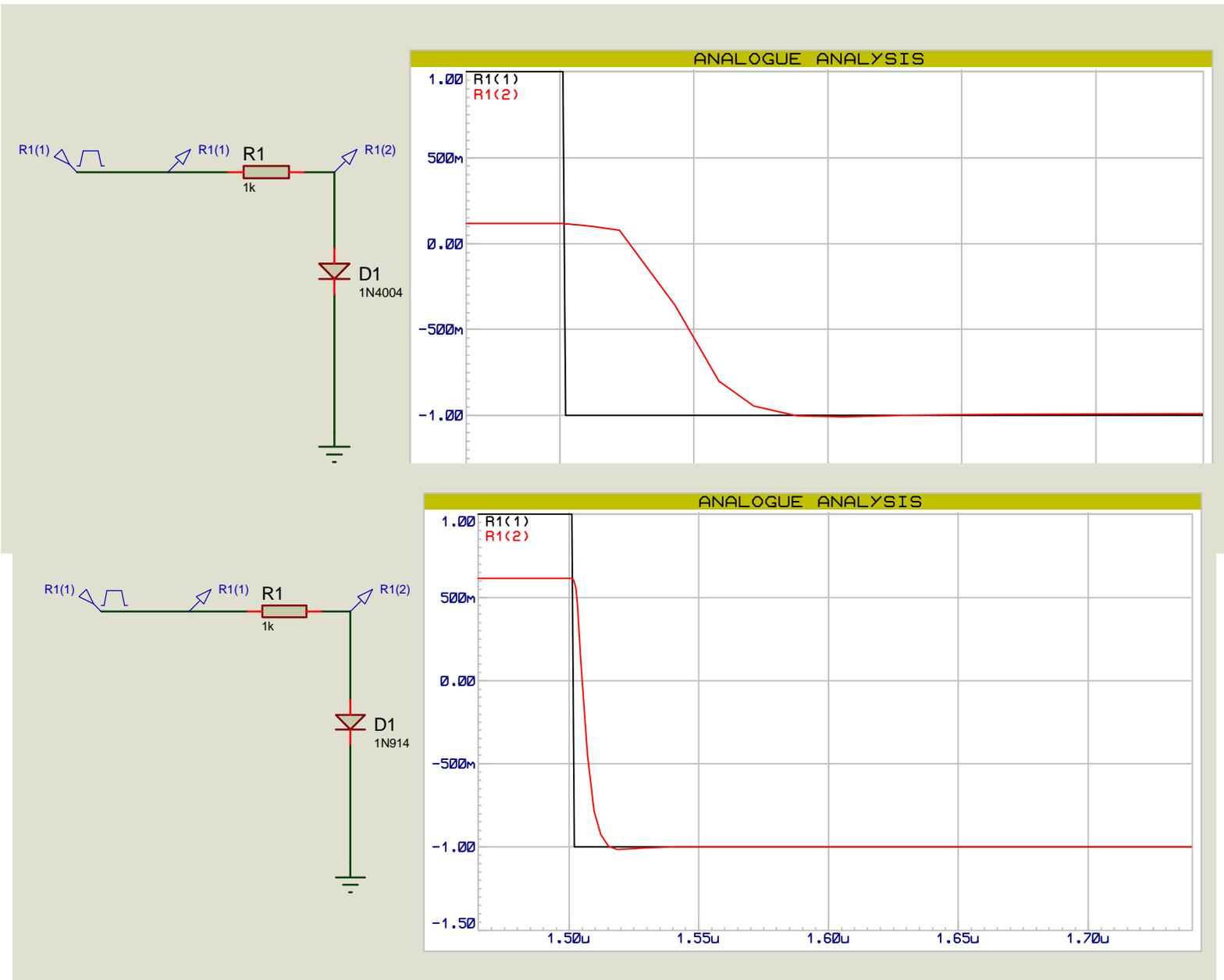


■ Diode en « commutation » : Temps de recouvrement direct et inverse

Le **temps de réponse fini** de la diode s'observe aussi en « **mode impulsif** », lorsque la diode bascule d'un état passant vers un état bloqué et vice-versa.



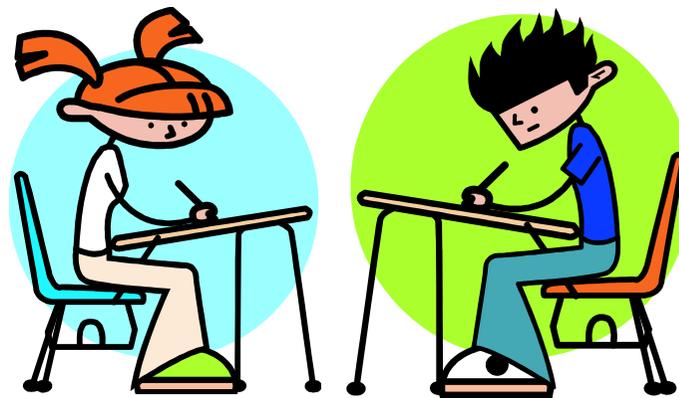
- ↓ le temps de réponse dépend du courant avant commutation.
- ↓ ordre de grandeur : ps → ns

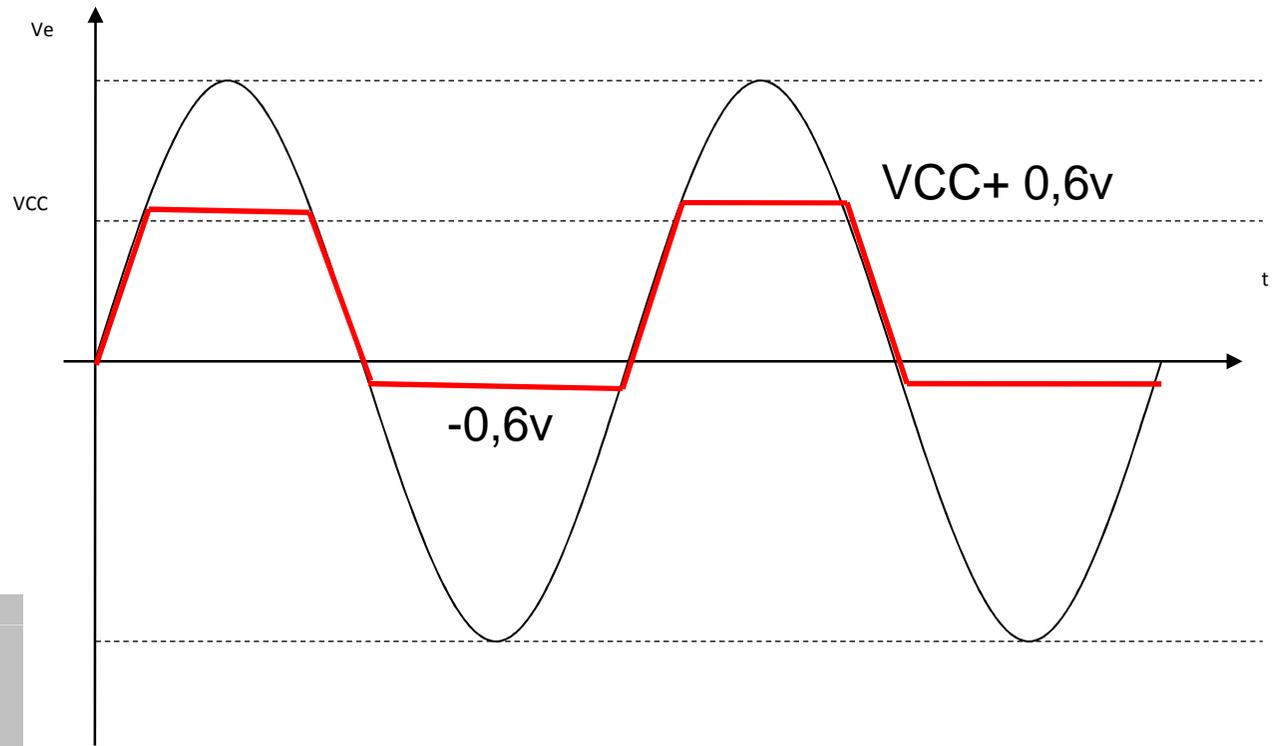
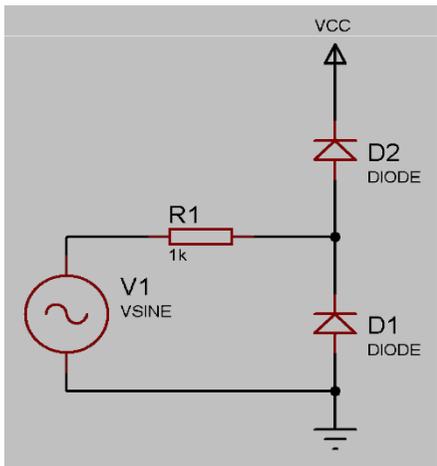


Le simulateur SPICE tient compte du temps de recouvrement des diodes (1N914 vs 1N4004)

DIODE4

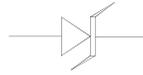
EXERCICES 1 et 2





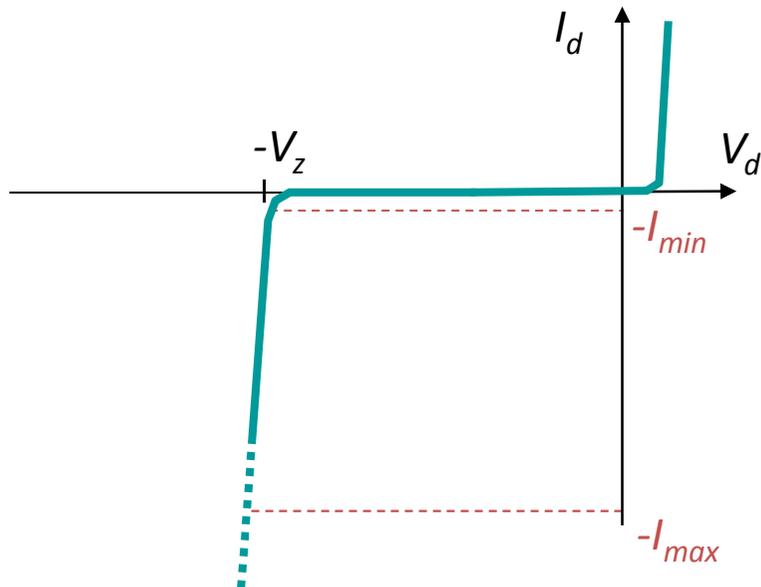
2.6 Quelques diodes spéciales

2.6.1 Diode Zener



☒ Diode conçue pour **fonctionner** dans la **zone de claquage inverse**, caractérisée par une tension seuil négative ou « **tension Zener** » (V_Z)

■ Caractéristiques



V_Z : tension Zener (par définition: $V_Z > 0$)

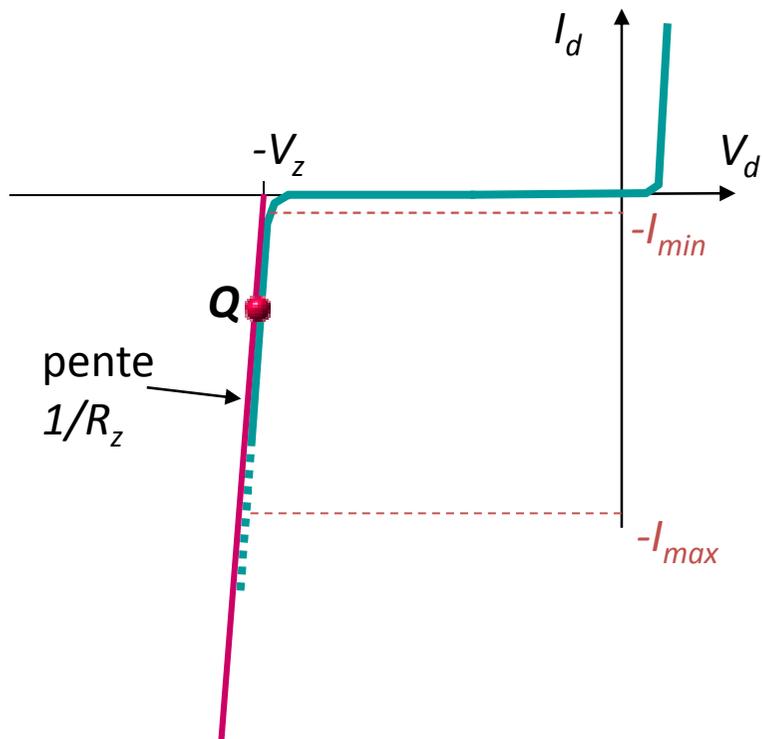
I_{min} : courant minimal (en valeur absolue) au delà duquel commence le domaine linéaire "Zener"

I_{max} : courant max. supporté par la diode
(puissance max: $P_{max} \sim V_Z I_{max}$)

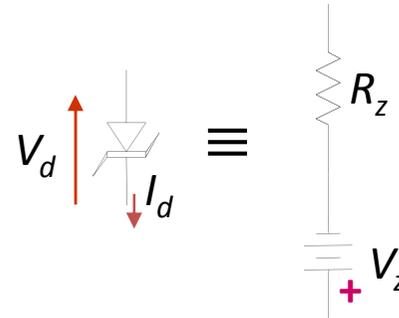
Ordre de grandeur : $V_Z \sim 1-100 \text{ V}$, $I_{min} \sim 0,01-0,1 \text{ mA}$, $P_{max} \leftrightarrow$ régime de fonctionnement

■ schémas équivalents

hyp : $Q \in$ domaine Zener



⇒ *Modèle statique :*



⇒ *Modèle dynamique, basses fréquences, faibles signaux :*

$$r_z = \left[\frac{dI_d}{dV_d} \Big|_Q \right]^{-1} \cong R_z \quad \text{pour } |I_d| > I_{min}$$

2.6.2 Diode électroluminescente (ou LED)

■ **Principe** : La **circulation du courant** provoque la luminescence

⇒ Fonctionnement sous **polarisation directe** ($V > V_o$)

⇒ L'intensité lumineuse \propto courant électrique I_d

⇒ Ne marche pas avec le Si

→ $V_o \neq 0.7V$!

→ V_o dépend de la couleur



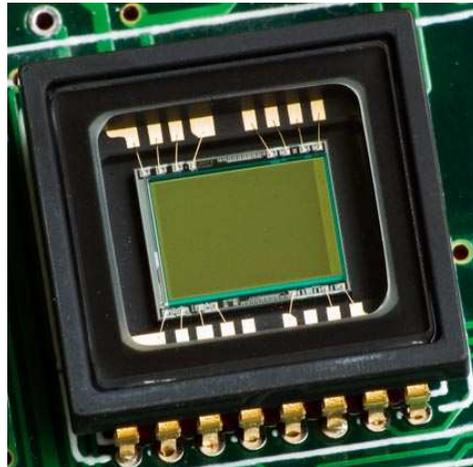
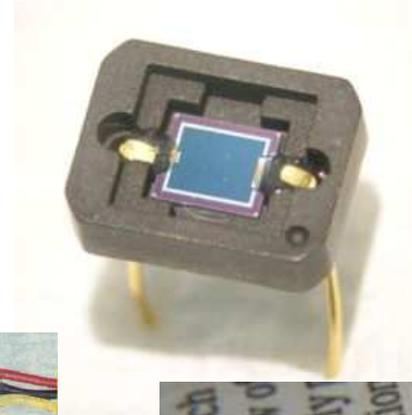
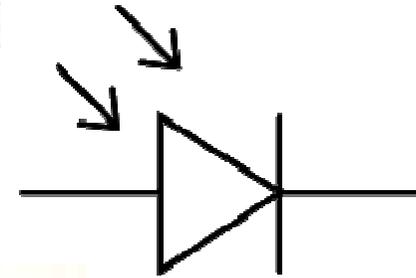
Couleur	Longueur d'onde (nm)	Tension de seuil (V)
IR	$\lambda > 760$	$V_s < 1.63$
Rouge	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < V_s < 2.03$
Orange	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < V_s < 2.10$
Jaune	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < V_s < 2.18$
Vert	$500 < \lambda < 570$	$2.18 < V_s < 2.48$
Bleu	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < V_s < 2.76$
Violet	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < V_s < 3.1$
Ultraviolet	$\lambda < 400$	$V_s > 3.1$
Blanc	xxx	$V_s = 3,5$



3.5 PHOTODIODE

Polarisée en inverse elle produit un courant proportionnel à l'énergie lumineuse reçue (généralement dans l'infrarouge)

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{E_g}{nU_t}} - 1 \right) - I_{ph}$$



Capteur CCD



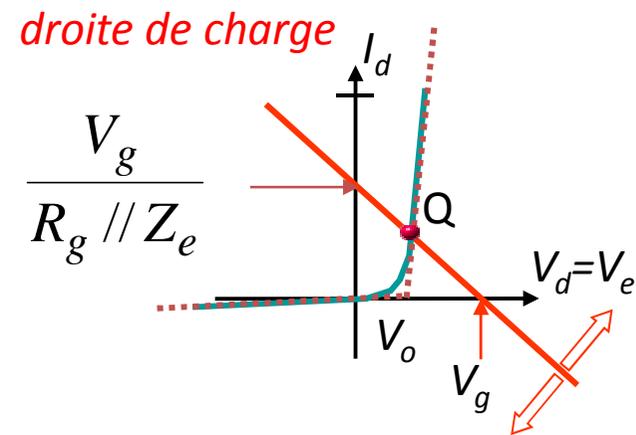
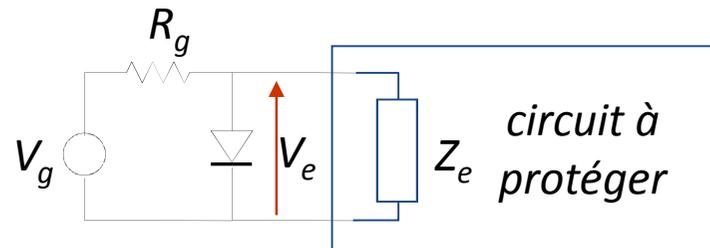
3. Applications des Diodes

3.1 Limiteur de crête (clipping)

■ **Fonction** : Protéger les circuits sensibles (circuits intégrés, amplificateur à grand gain...) contre une tension d'entrée trop élevée ou d'une polarité donnée.

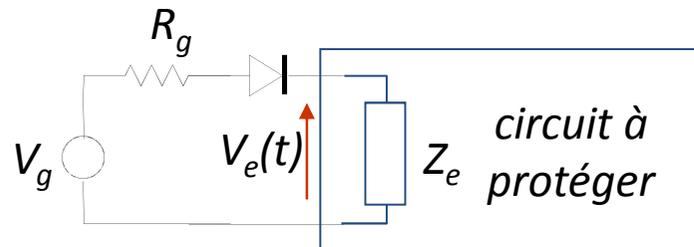
Clipping parallèle

(diode // charge)



Limite d'utilisation : Puissance maximale tolérée par la diode.

Clipping série :



Protection contre une surtension inductive (ex: ouverture/ fermeture d'un relais)



■ ouverture de l'interrupteur

:

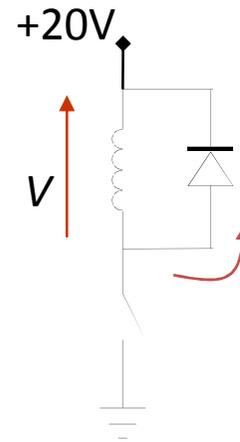
$$V = L \frac{dI}{dt} \rightarrow -\infty$$



⇒ $V_A \rightarrow +\infty$

⇒ risque de décharge électrique à travers l'interrupteur ouvert

☞ *L'interrupteur pourrait être un transistor...*



■ Protection par diode

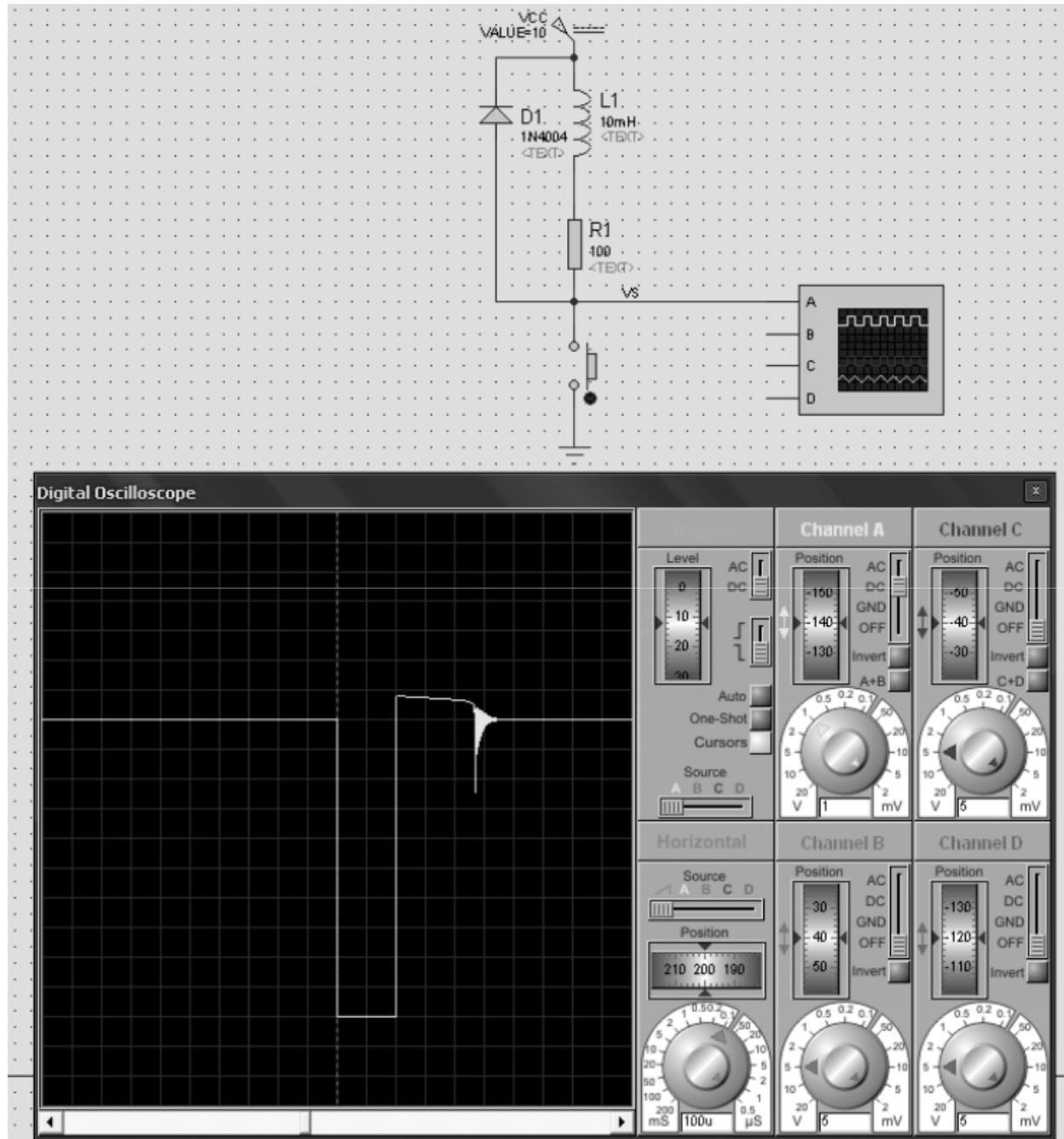
:

⇒ $V_{max < 0} \sim -0.7V$

⇒ $V_A \leq \sim 20,7V$

⇒ la conduction de la diode engendre un courant transitoire et diminue la tension inductive.

Lors de la rupture de courant (relâche du bouton) la diode commence à conduire lorsque V_s atteint $V_{CC}+0,7v$. L'énergie accumulée dans L1 est dissipée dans la résistance interne de la diode durant environ 250uS, il y a ensuite un phénomène oscillatoire due à la capacité de la diode (circuit LC //), ce phénomène apparait lorsque le point de fonctionnement de la diode s'approche du coude (fonctionnement non linéaire).



A suivre

Le transistor à effet de champ

Pour préparer la prochaine séquence :

Bien connaître la loi d'Ohm, les théorèmes de superposition et de Millman

Intégrer les concepts de grandeurs alternatives et continues, le principe de polarisation et de variation d'une grandeur électrique autour d'un point de repos.

Revoir les exercices, être capable d'expliquer les formes et grandeurs des signaux sur les graphes temporels.