

Cours
Electronique analogique

Introduction - Diode

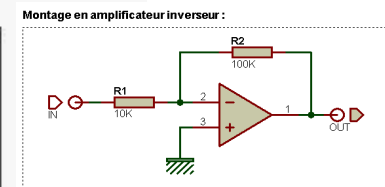
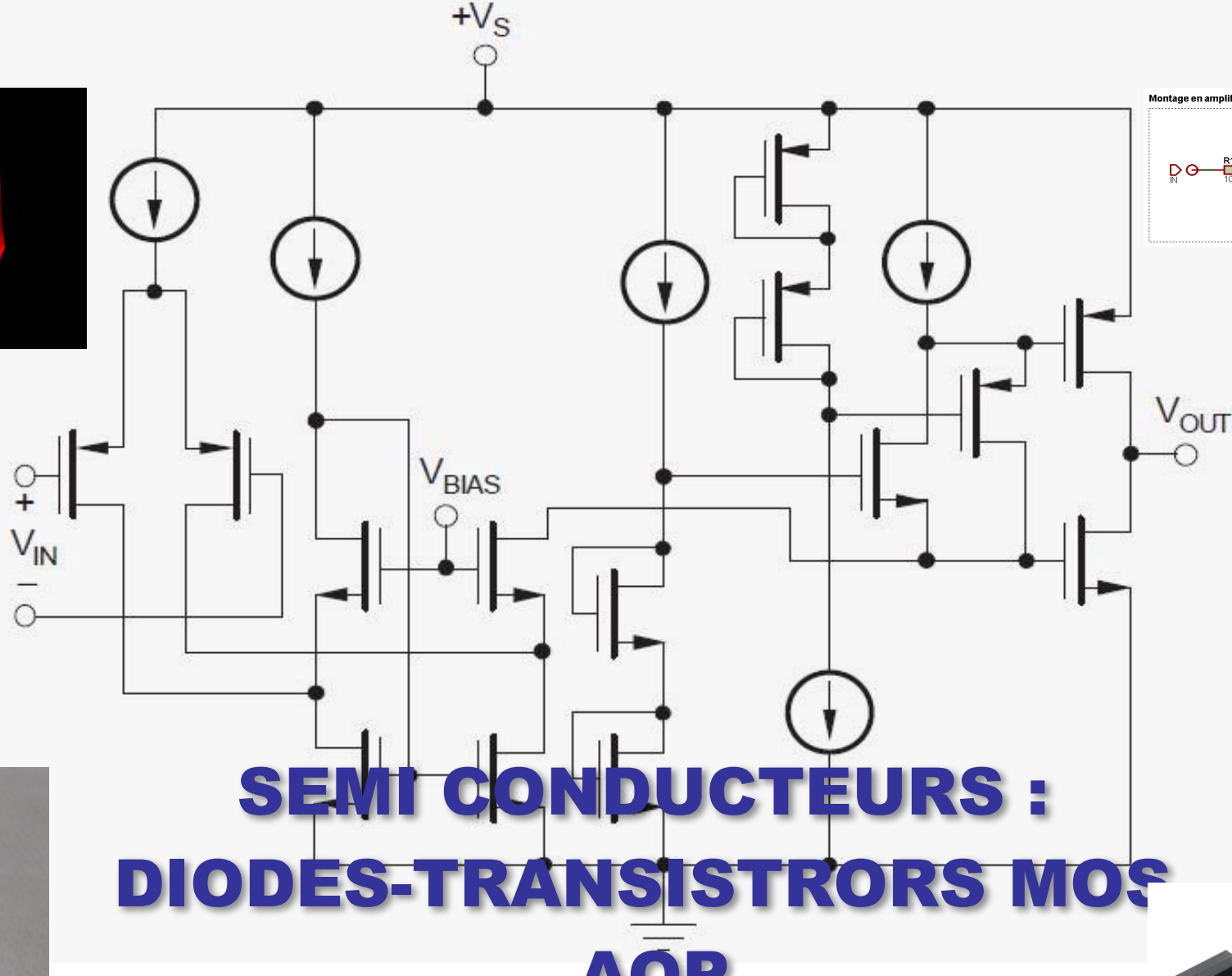
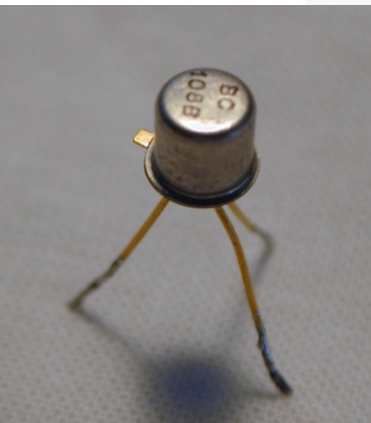
J.-M. Dutertre, B. Dhalluin, C. Dupaty

<https://www.emse.fr/~dutertre/enseignement.html>



Une école de l'IMT



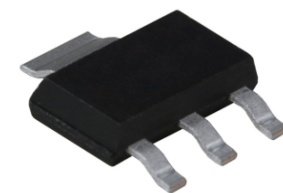


SEMI CONDUCTEURS : DIODES-TRANSISTORS MOS

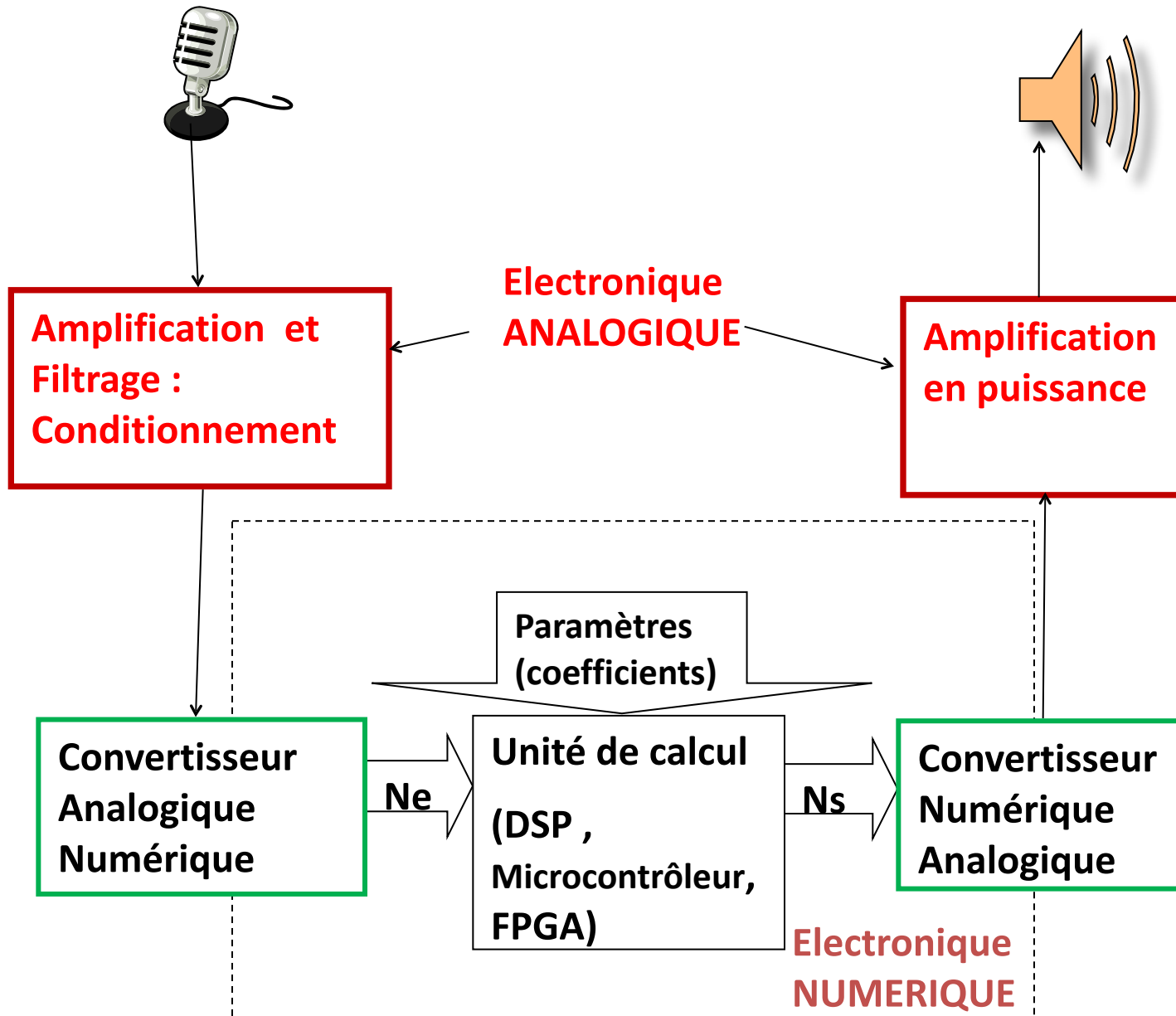
AOP

Christian Dupaty – Jean Max Dutertre
pour l'EMSE

D'après un diaporama original de Thomas Heiser
Institut d'Electronique du Solide et des Systèmes

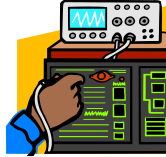


Architecture analogique – numérique – analogique

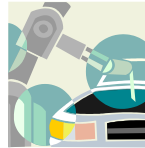


- ***Pourquoi quelles applications ?***

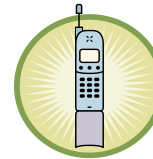
Instrumentation



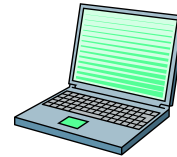
Robotique



Communications



Multimédia



Systèmes informatiques



Cartes mémoires



...

1904 invention de la **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.

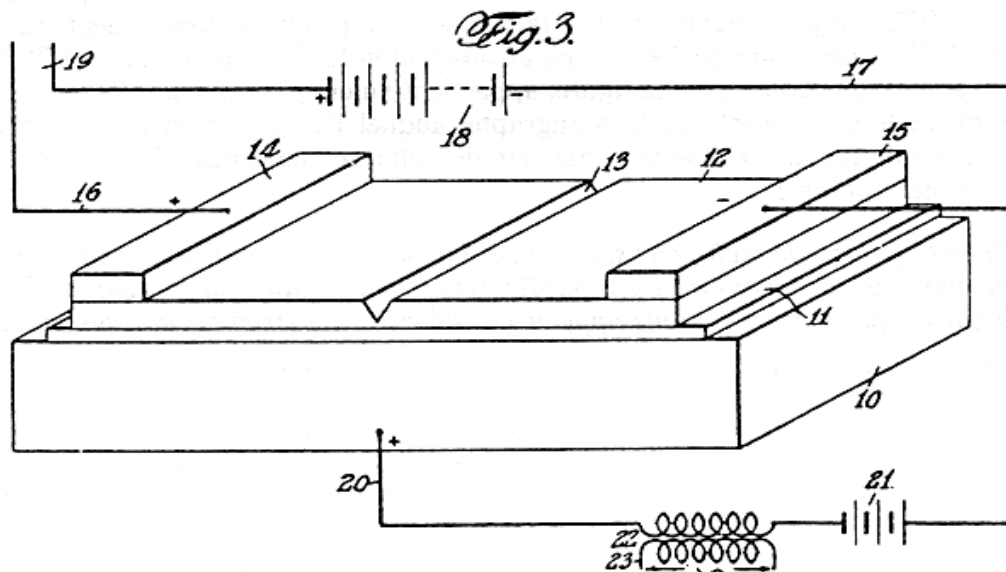
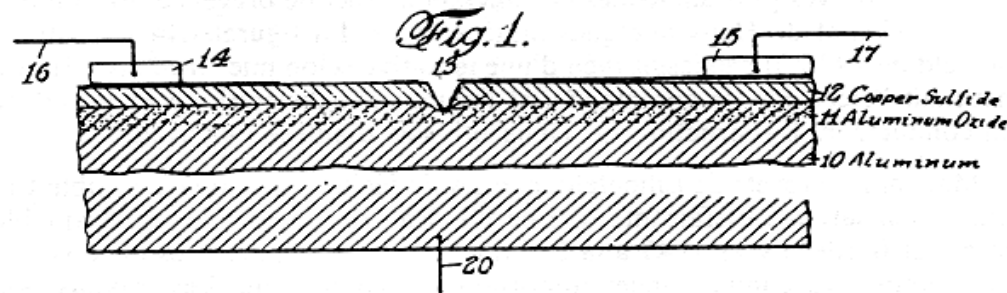
J. E. LILIENFELD

1,900,018

DEVICE FOR CONTROLLING ELECTRIC CURRENT

Filed March 28, 1928

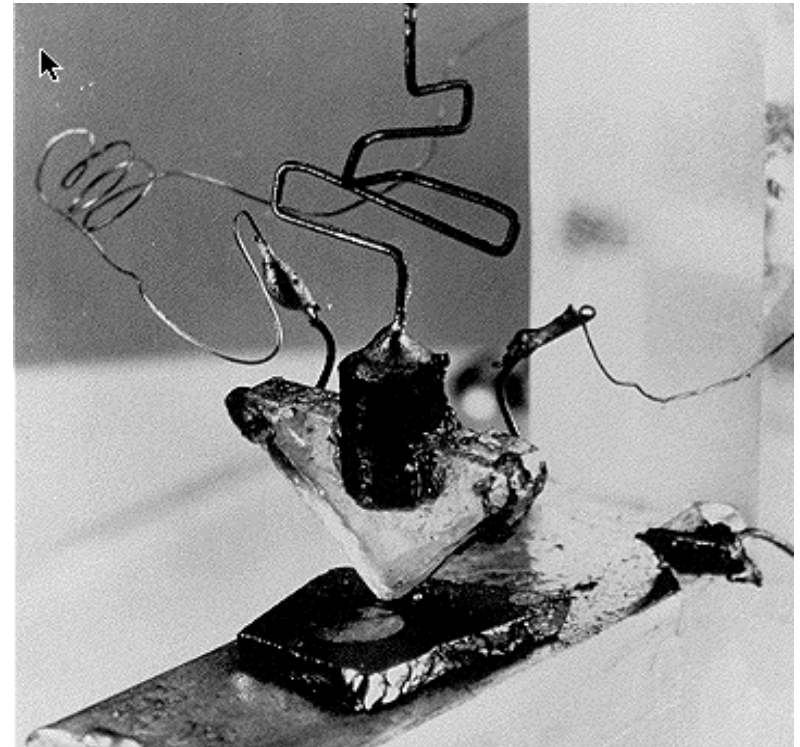
3 Sheets-Sheet 1



1959 : MM. Attala, D. Kahng et E. Labate fabrique 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](#)

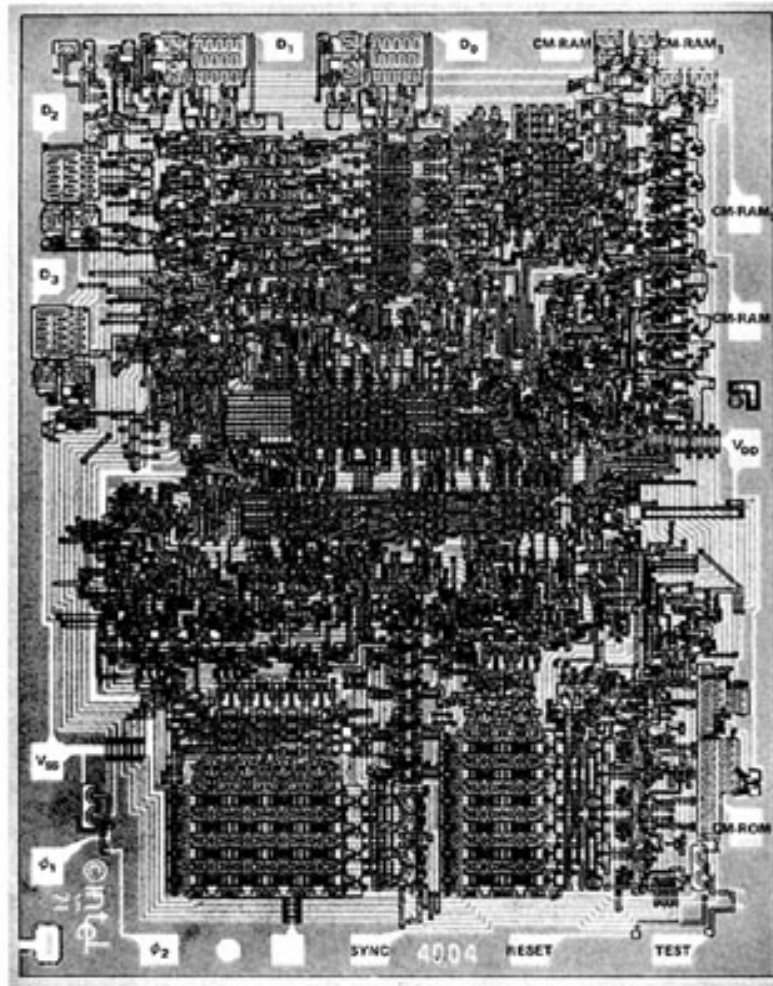


William Shockley (assis), John Bardeen, and Walter Brattain, 1948.



Le premier récepteur radio à transistors bipolaires

En 1971 : le premier Processeur



4004 Photomicrograph With Pin Designations

4004 d'INTEL : 15/11/1971
(2 250 Transistors Bipolaires,
108 KHz, 4bits)

Mais ça ne se fait pas tout seul...

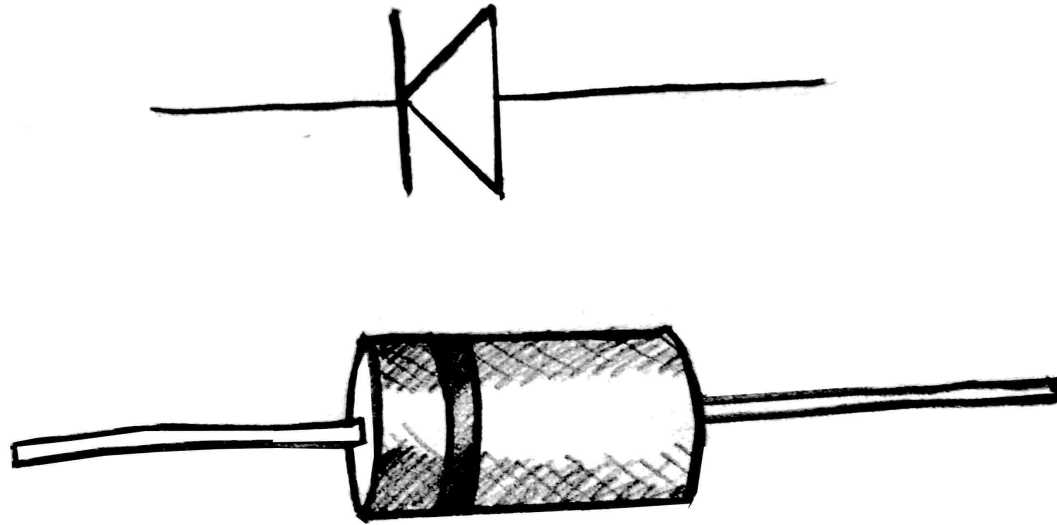


Contenu du cours d'électronique analogique 1

1. Les Diodes
Polarisation
Exemples d'utilisations
2. Les Transistors à effet de champ (MOSFET)
Utilisation en amplificateur
Utilisation en commutation
3. Amplificateur opérationnel
Généralités
Montages élémentaires

Bibliographie

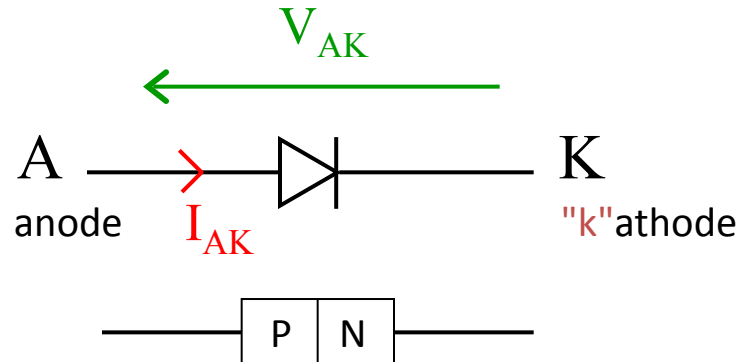
- ✎ *Electronique: composants et systèmes d'application*, Thomas L. Floyd, Dunod, 2000
- ✎ *Microélectronique*, Jacob Millman, Arvin Grabel, Ediscience International, 1994
- ✎ ELECTRONIQUE Fondements et applications DUNOD 2006
- ✎ ELECTRONIQUE ANALOGIQUE VALKOV Educalivre 1994
- ✎ **Comprendre l'électronique 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



Diodes
Mise en œuvre
Aspects technologiques

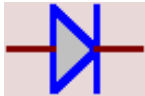
Différentes diodes : Symboles

Diode / jonction PN



Anode « A »

Cathode « K »

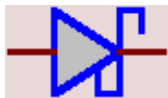


Diode



Diode Zener

En inverse pour la régulation



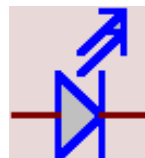
Diode Schottky

Pour les commutations rapide



Diode Varicap

En HF



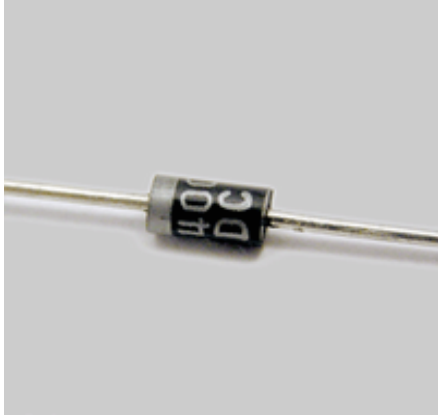
Diode électro luminescente (LED)

Diodes de signal (ex 1N914)

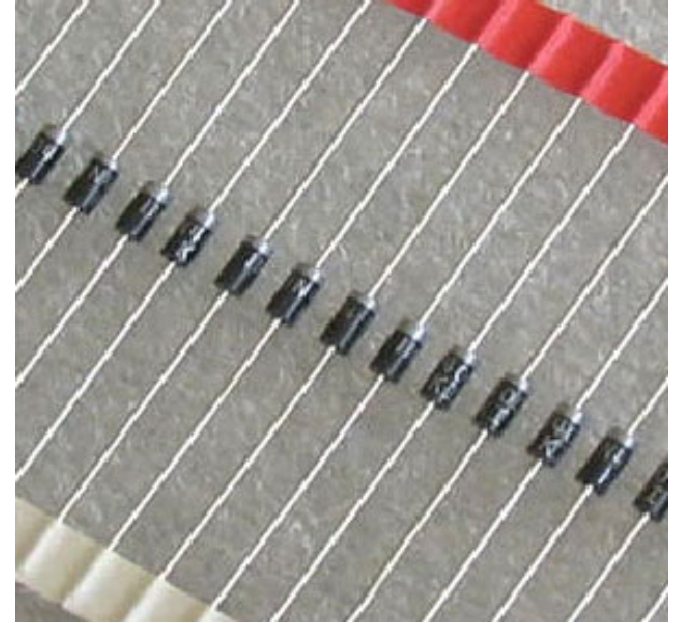
The background image shows three small, cylindrical, reddish-brown diodes mounted on a circuit board. Each diode has a clear plastic ring at one end, which serves as a cathode indicator. The diodes are connected to thin, silver-colored wires that cross each other in a star-like pattern.

- 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



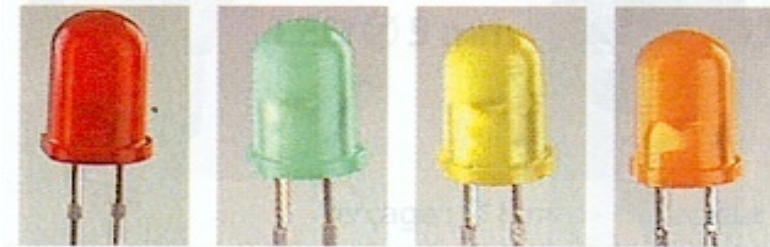
Diodes LEDs

- 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

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

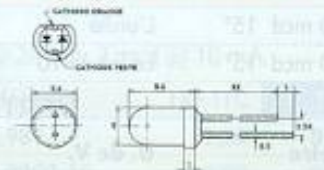
LED À BOÎTIER DIFFUSANT TEINTÉ

LED ROUGE - Eclairement pour $I_f = 10 \text{ mA}$: > à 5 mcd.

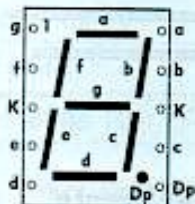


BOÎTIER ROND À 2 PATTES

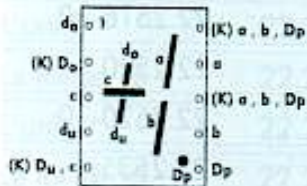
Changement de couleur par inversion de polarité.



D 201 PK

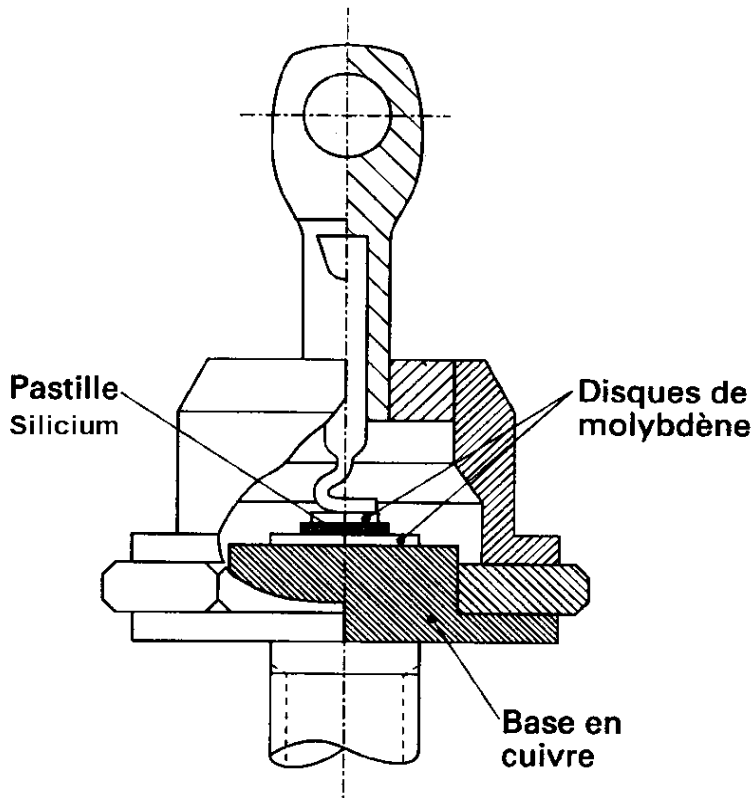


D 291 PK



Diodes de puissance

BOÎTIERS

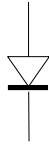


Utilisées généralement pour le redressement de puissance
Dans les onduleurs par exemple
 $I_F > 100A$

Autres diodes

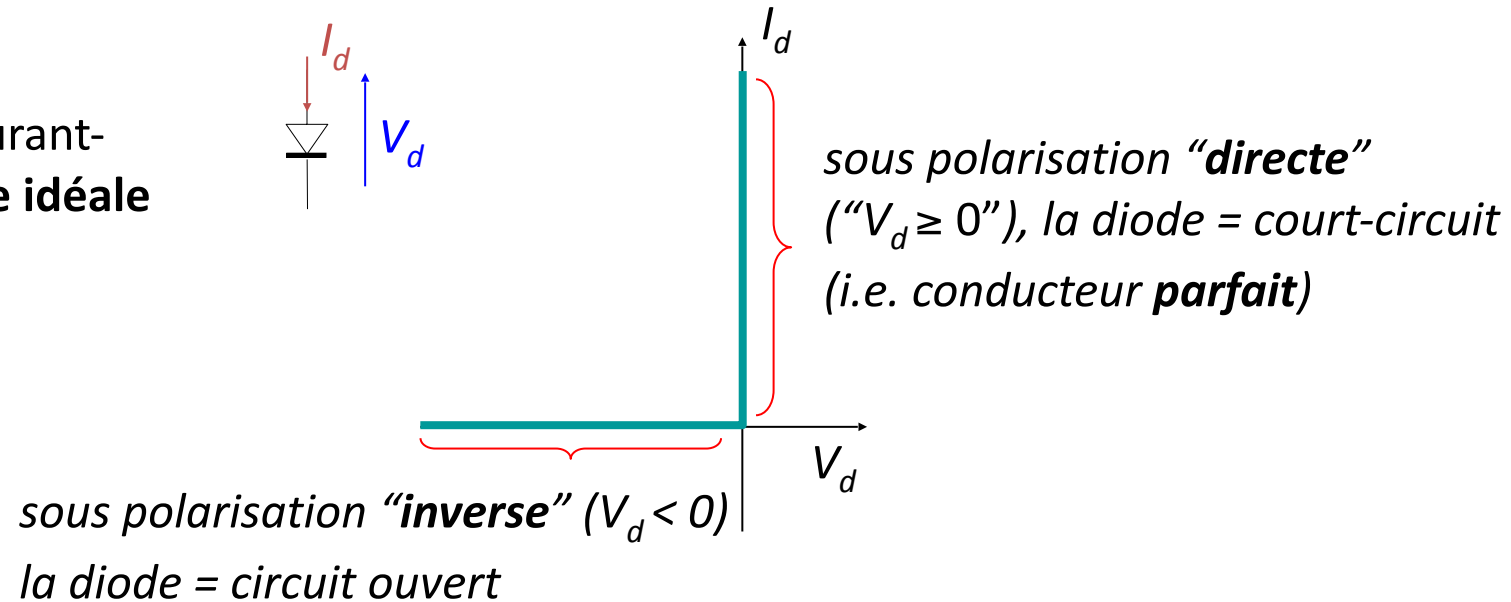
- **SCHOTTKY** pour la commutation rapide en puissance et la faible chute V_f
- **TRANSIL** pour absorber les courants dues aux surtensions (protection aux décharges)
- **PHOTODIODE** polarisée en inverse c'est un convertisseur lumière/courant

2. Les Diodes



2.1 Définition

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



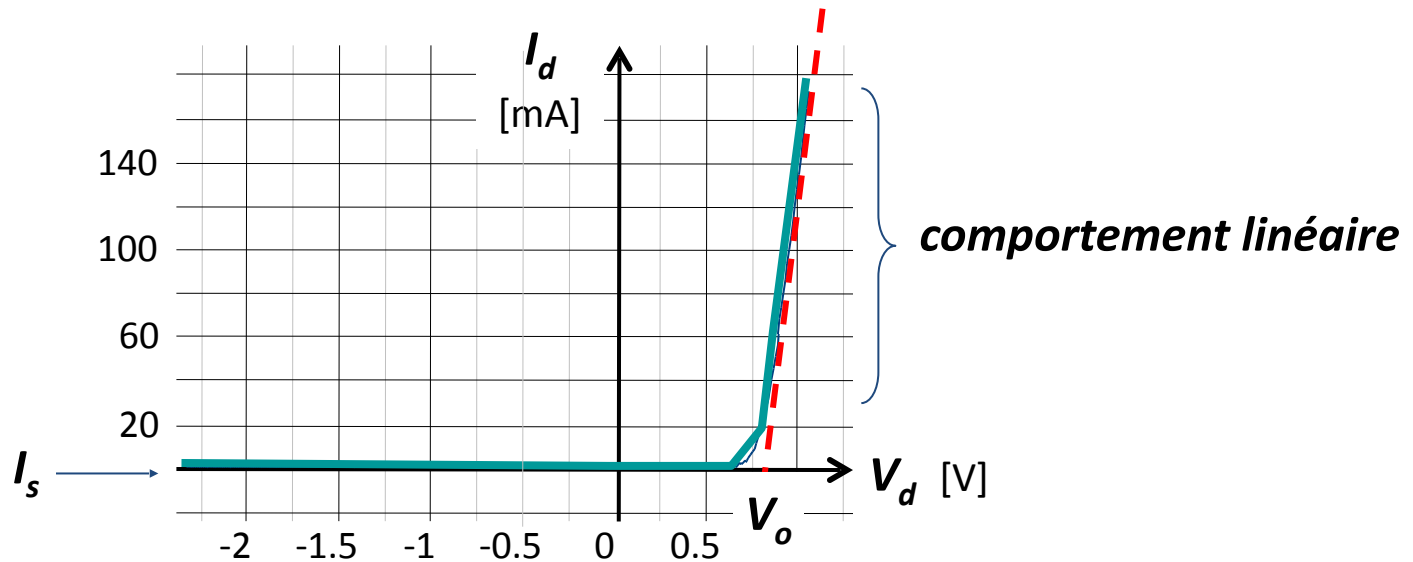
- ☞ Ce type de composant est utile pour réaliser des **fonctions électroniques** telles que le redressement d'une tension, la mise en forme des signaux (écrêtage, ...).
- ☞ La diode (même idéale) est un composant **non-linéaire**
- ☞ ON NE SAIT PAS FABRIQUER UNE DIODE IDEALE !!!!

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**” $\sim V_o$)

■ **Zone « du coude »** : $V_d \in [0, \sim V_o]$: 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")

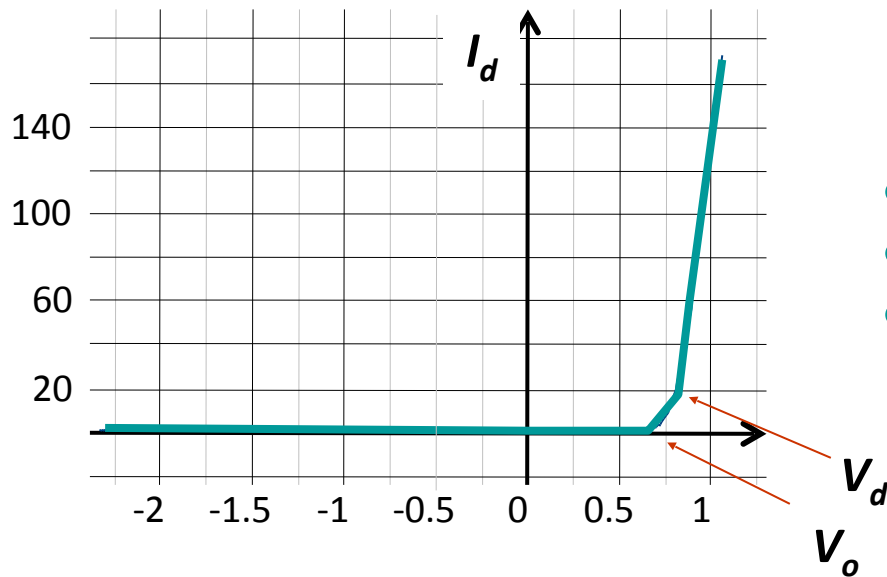
$V_T = k \cdot T/e$ à $T = 300 \text{ K}$ ($26,85^\circ\text{C}$), $V_T = 26 \text{ mV}$

$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$,

T la température en **°Kelvin**

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

I_s = courant inverse



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

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

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

ie déplacement de la caractéristique $I_d - V_d$ vers la gauche

Limites de fonctionnement :

■ Zone de claquage inverse

Ordre de grandeur :

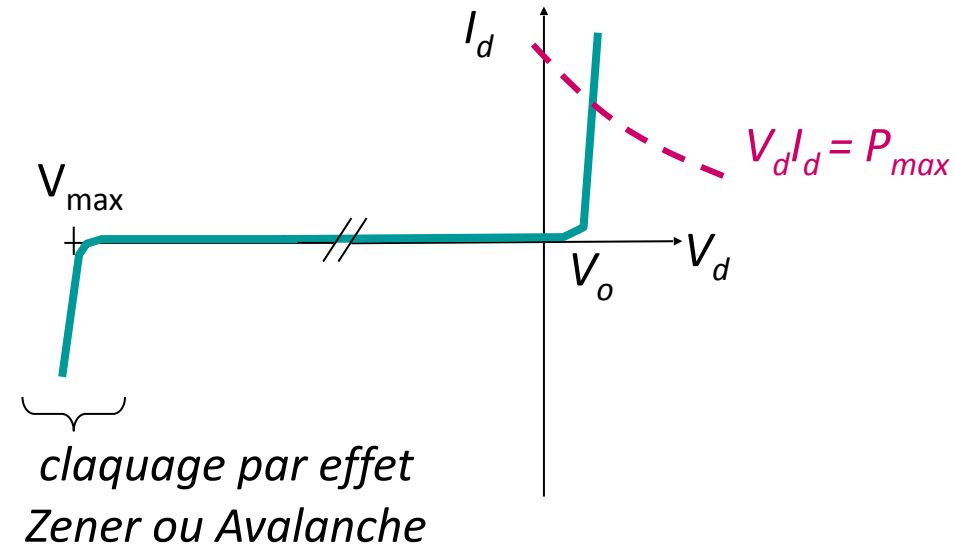
V_{max} = quelques dizaines de Volts à qqs 1000 V

✎ 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)

■ Limitation en puissance

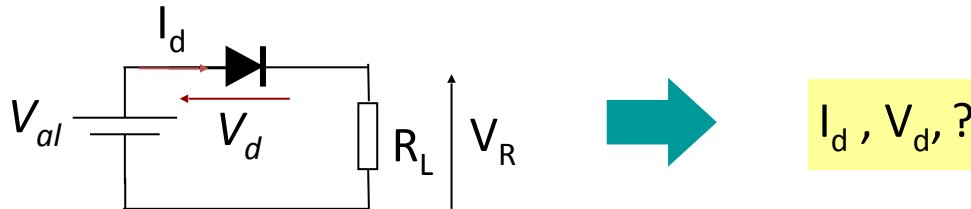
Il faut que $V_d I_d < P_{max}$



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?

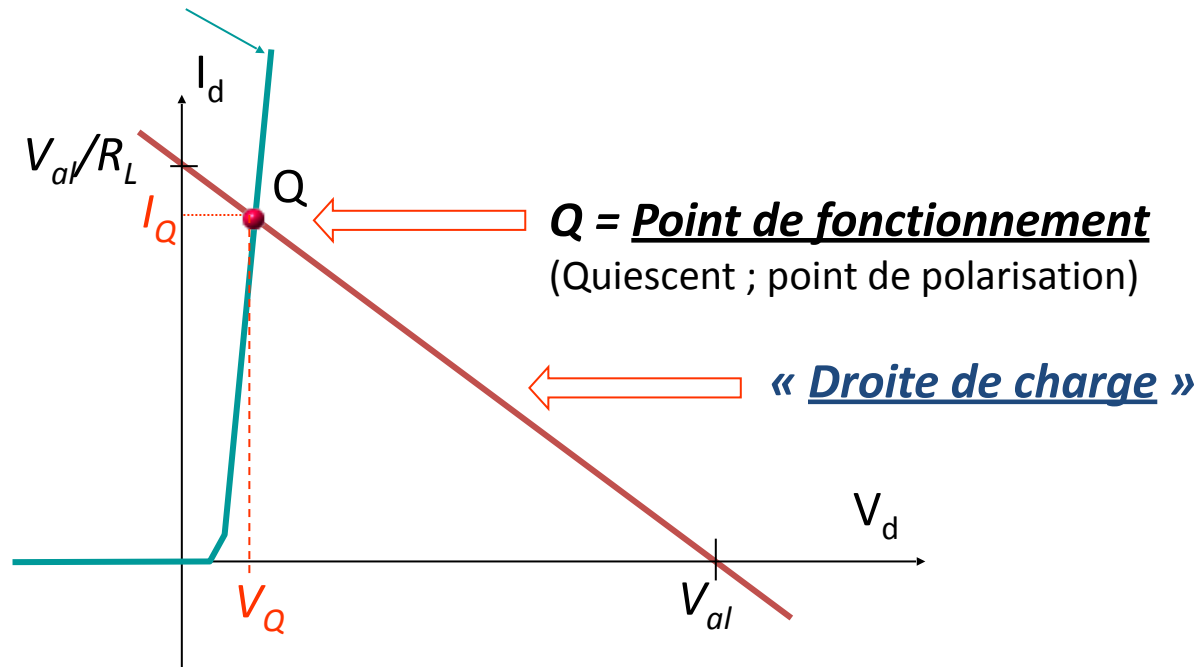


- I_d et V_d respectent les **Lois de Kirchhoff** (conservation d'énergie, loi des nœuds, loi des mailles)
- I_d et V_d sont sur la **caractéristique $I(V)$** du composant
- Au **point de fonctionnement** de la diode, (I_d, V_d) remplissent ces **deux** conditions

2.3.2 Droite de charge

■ Loi de Kirchhoff : $\dots \rightarrow I_d = \frac{V_{al} - V_d}{R_L}$ = **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 aussi “**calculer**” le point de fonctionnement en décrivant la diode par un **modèle simplifié**.

2.4 Modèles Statiques à segments linéaires

$\Leftrightarrow$ *hyp*: I_d, V_d constants

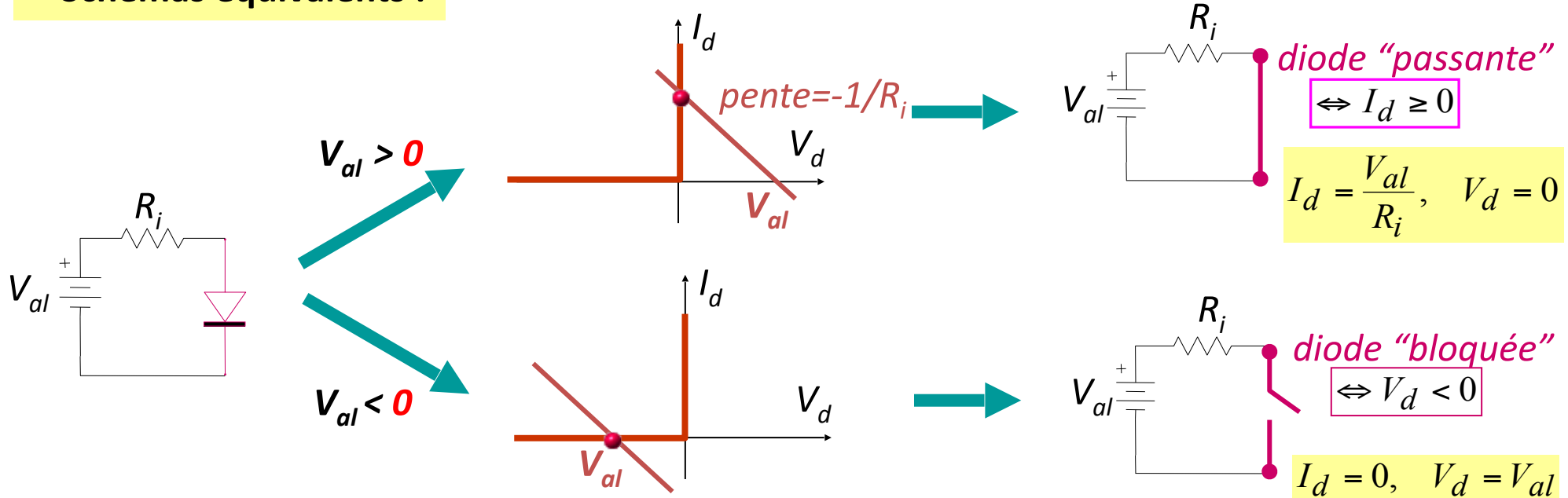
2.4.1. “Première” approximation : la diode « idéale »

- 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

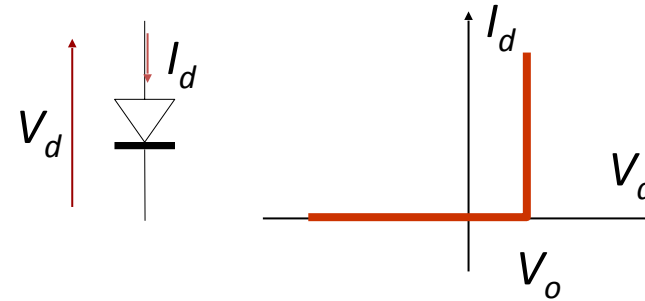


■ Schémas équivalents :



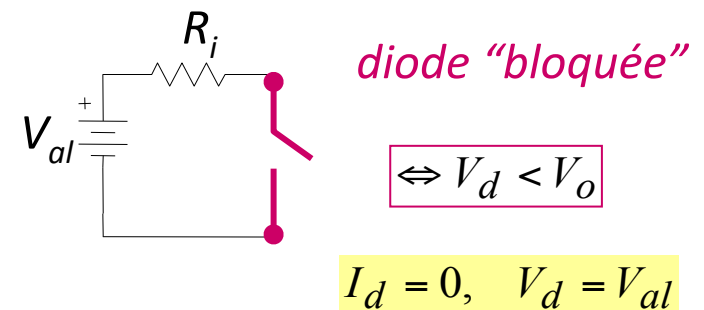
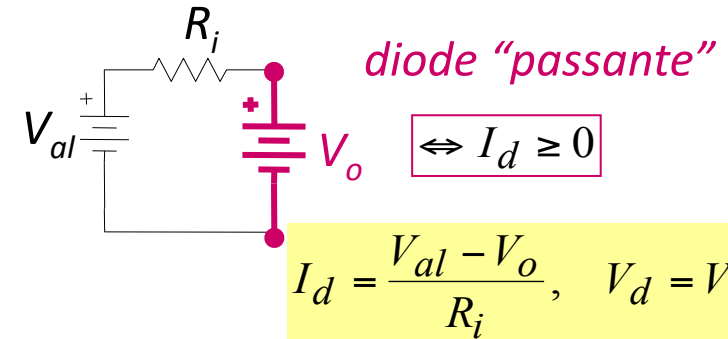
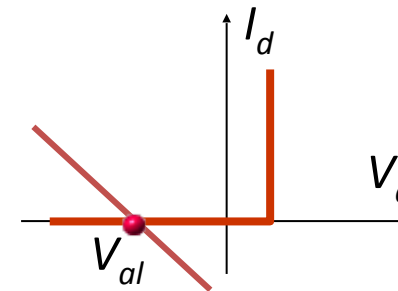
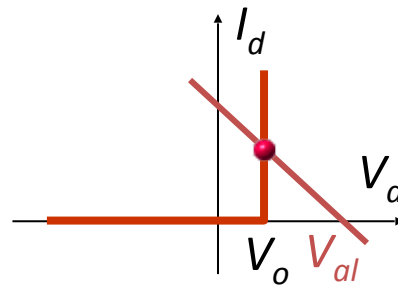
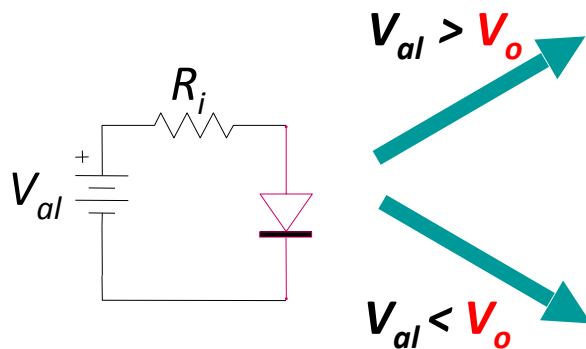
2.4.2 Seconde approximation

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



➡ Pour une diode en *Si* : $V_o \approx 0,6-0,7$ V

Schémas équivalents

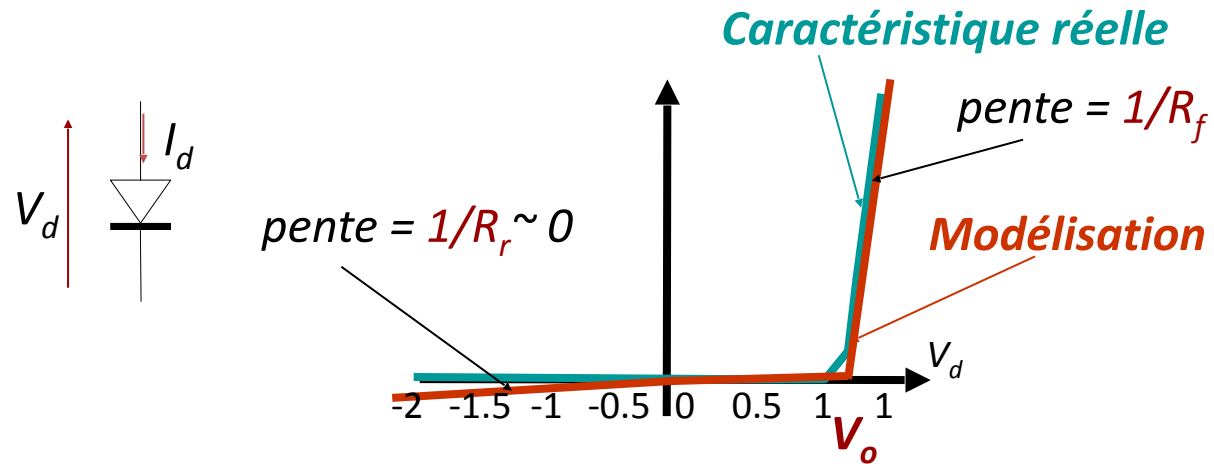


2.4.3 3^{ème} Approximation

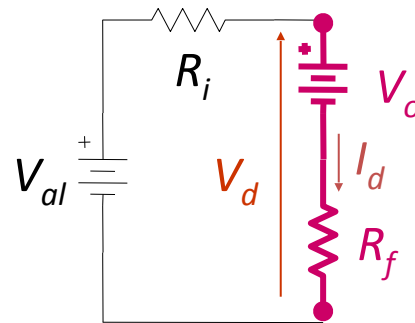
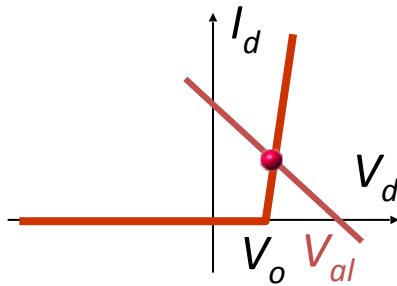
- tension seuil V_o non nulle
- résistance directe R_f non nulle
- $V_d < 0$: résistance R_r **finie**

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

■ Schémas équivalents



$V_{al} > V_o$:



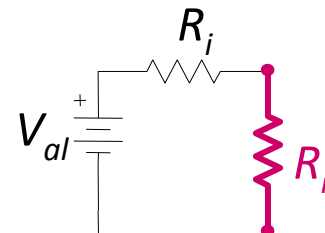
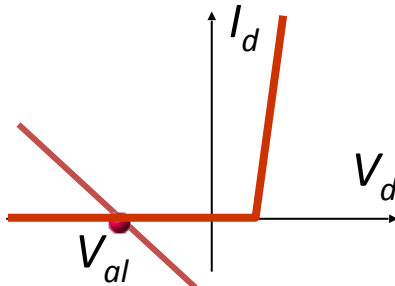
schémas équivalents :

diode passante

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

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

$V_{al} < V_o$:

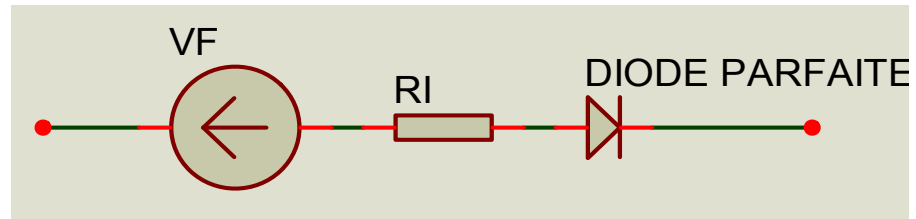


diode bloquée

$$\Leftrightarrow V_d < V_o$$

Remarques :

■ $R_f \neq \frac{V_d}{I_d}$



■ Modèle couramment utilisé

■ Le choix du modèle dépend de la précision requise.

■ Les effets **secondaires** (influence de la température, non-linéarité de la caractéristique inverse, etc.) 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)
```

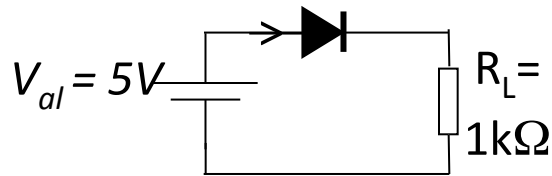
```
* Motorola pid=1N757 case=DO-35
```

```
* 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 du point de fonctionnement du circuit suivant, en utilisant la **3^{ième}** approximation pour la diode.

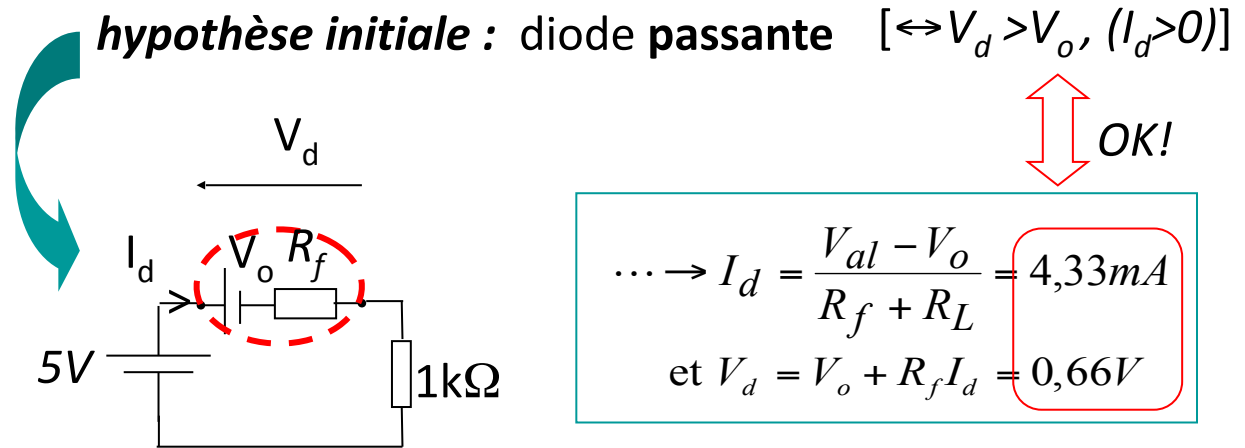


Informations sur la diode:

$$V_o = 0.6 \text{ V } (\Leftrightarrow \text{Si})$$

$$R_f = 15 \text{ } \Omega$$

$$R_r = 1 \text{ M}\Omega$$



$$\dots \rightarrow I_d = \frac{V_{al} - V_o}{R_f + R_L} = 4,33 \text{ mA}$$

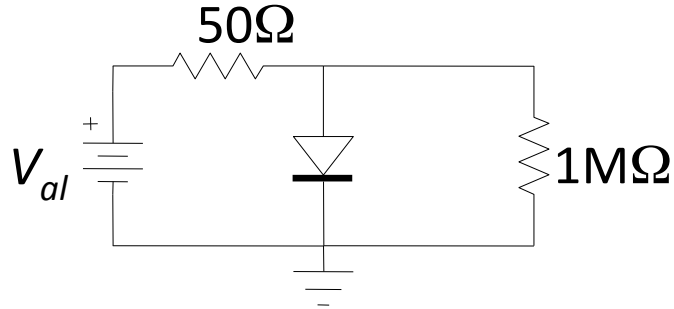
et $V_d = V_o + R_f I_d = 0,66 \text{ V}$

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

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

EXERCICES:

1)



Caractéristiques des diodes :

$R_f = 30 \Omega$, $V_o = 0,6 \text{ V}$, $I_s = 0$ et R_R infinie

Calcul de I_d et V_d

pour :

a) $V_{al} = -5 \text{ V}$

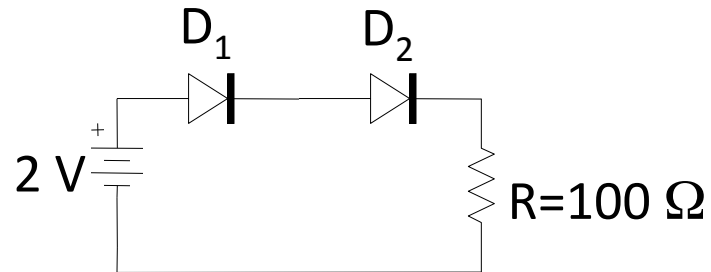
b) $V_{al} = 5 \text{ V}$

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

**$V_{al} = -5 \text{ V}$ diode bloquée $I_d = 0$, $V_d = -5 \text{ V}$
 $V_{al} = +5 \text{ V}$ diode passante $V_d = 0,6 \text{ V} + R_f I_d$
 $I_d = (V_{al} - V_o) / (50 + 30) = 55 \text{ mA}$
 $V_d = 0,99 \text{ V}$**

Diodes au Si ($R_f = 30 \Omega$, $V_o = 0,6 \text{ V}$, $I_s = 0$ et R_R infinie)

3)

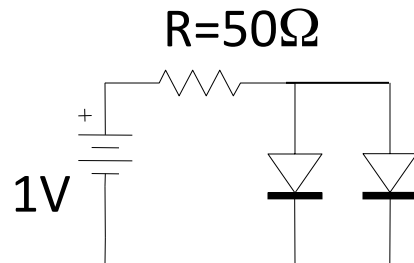


Définir I_f (approximation 3)

$$I_f = (2 - 2 \cdot V_o) / (R + 2R_f) = 5 \text{ mA}$$

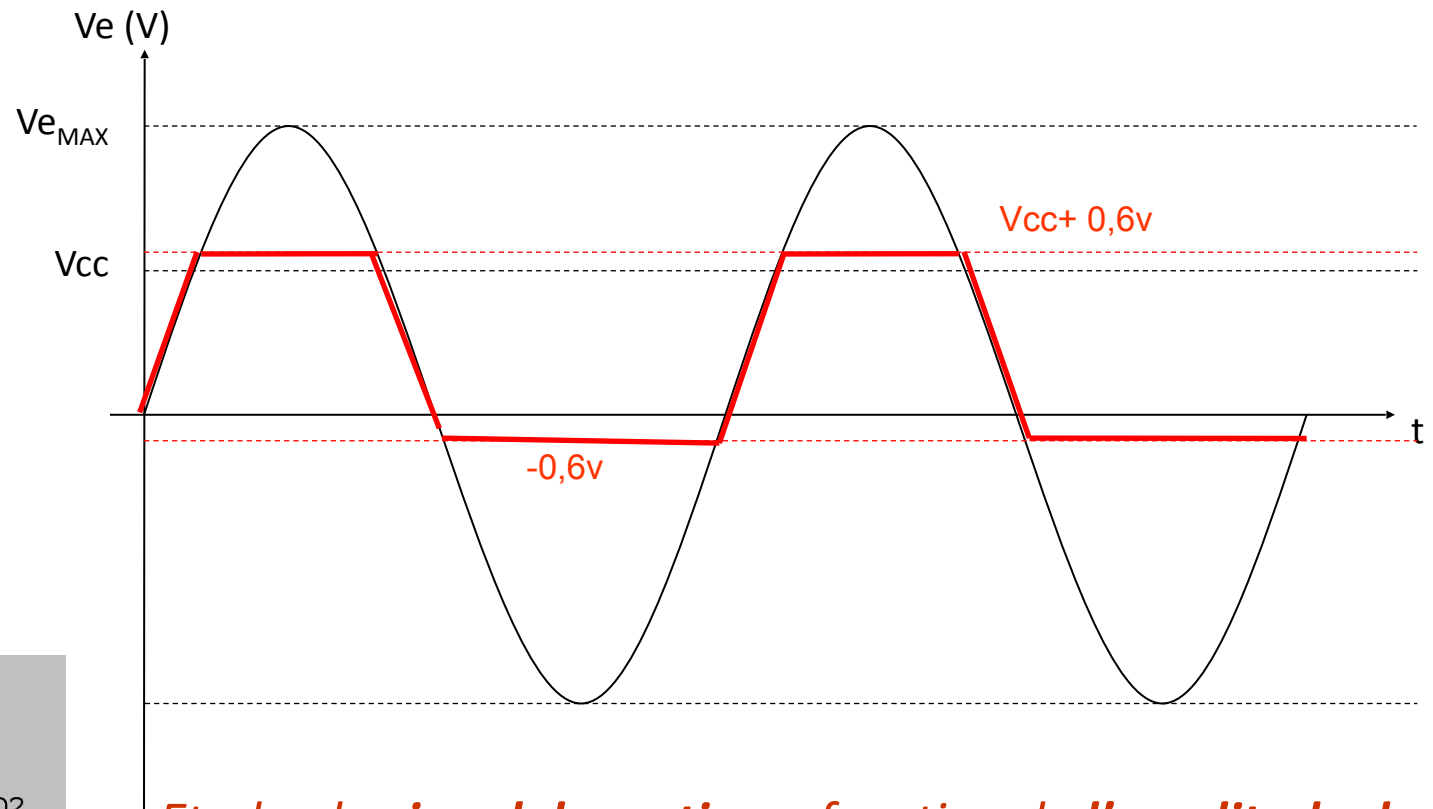
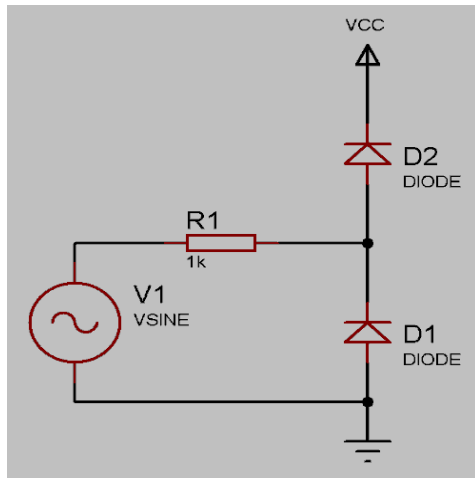
EXERCICES

4)



Définir I_R en appliquant
l'approximation 2 ($R_f = 0$)

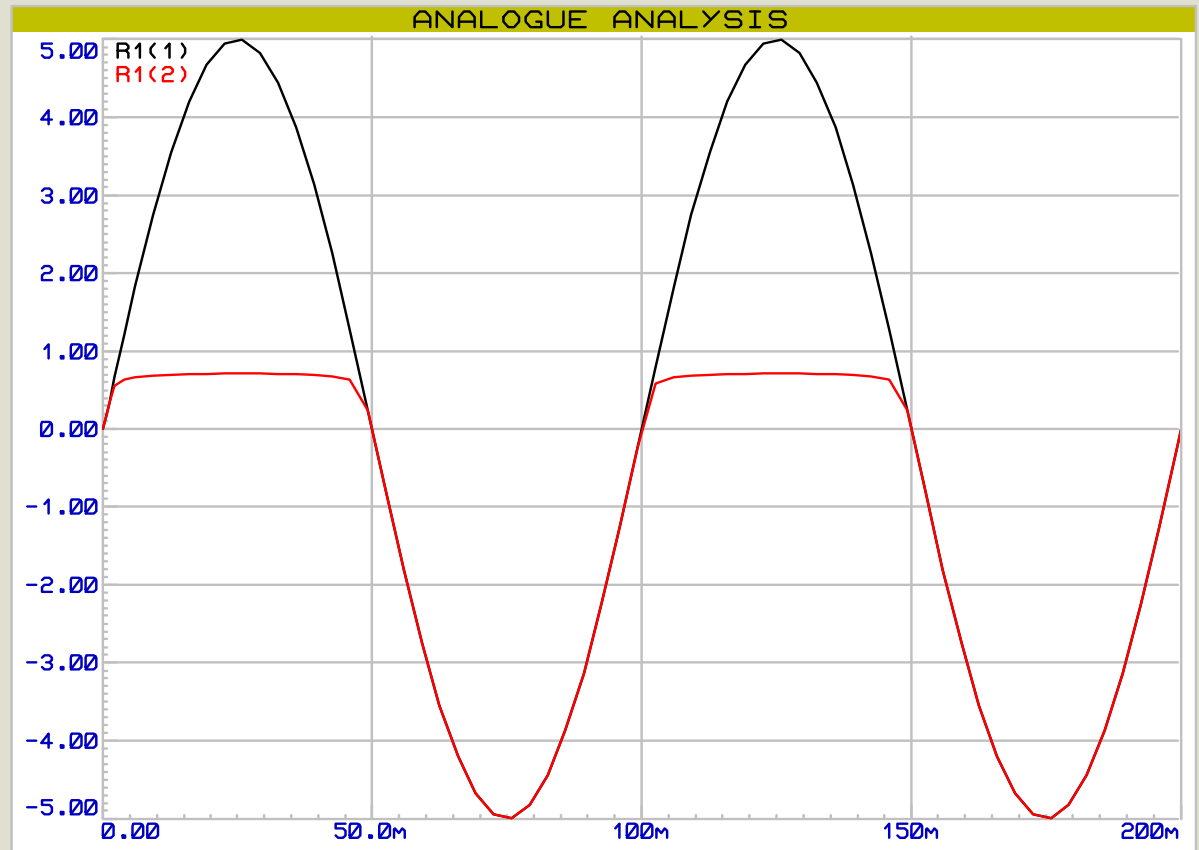
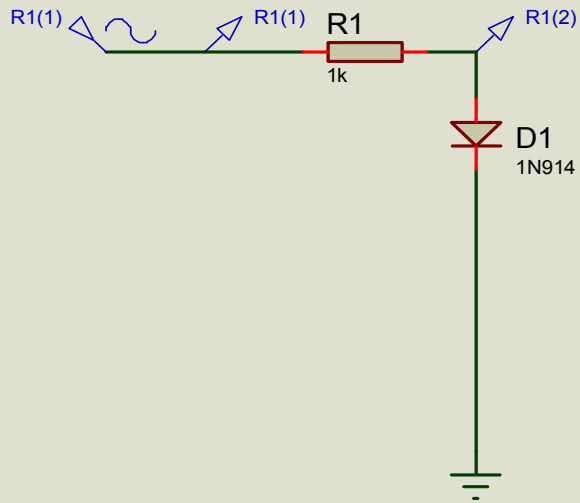
$$I_R = (1 - V_f) / (R) = 0.4 / 50 = 8 \text{ mA}$$



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

- avec $v_{\text{entrée}}$ signal sinusoïdal basse fréquence 10 Hz d'amplitude $V_{\text{e_MAX}} = 10 \text{ V}$ tel que le modèle statique reste valable (période du signal < temps de réponse de la diode $\Leftrightarrow$ pas d'effet "capacitif")

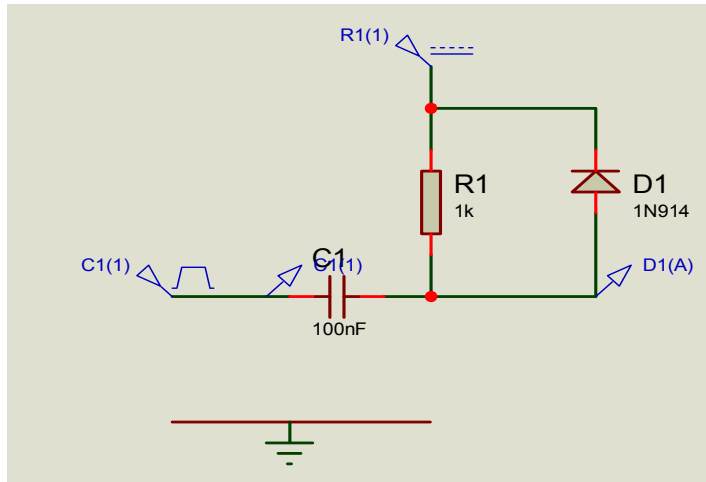
$V_{\text{CC}} = 10 \text{ V}$



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

Production d'une impulsion négative



$$V_{e_{\max}} = 5 \text{ V}, V_{CC} = 5 \text{ V}, V_F = 0,7 \text{ V}$$

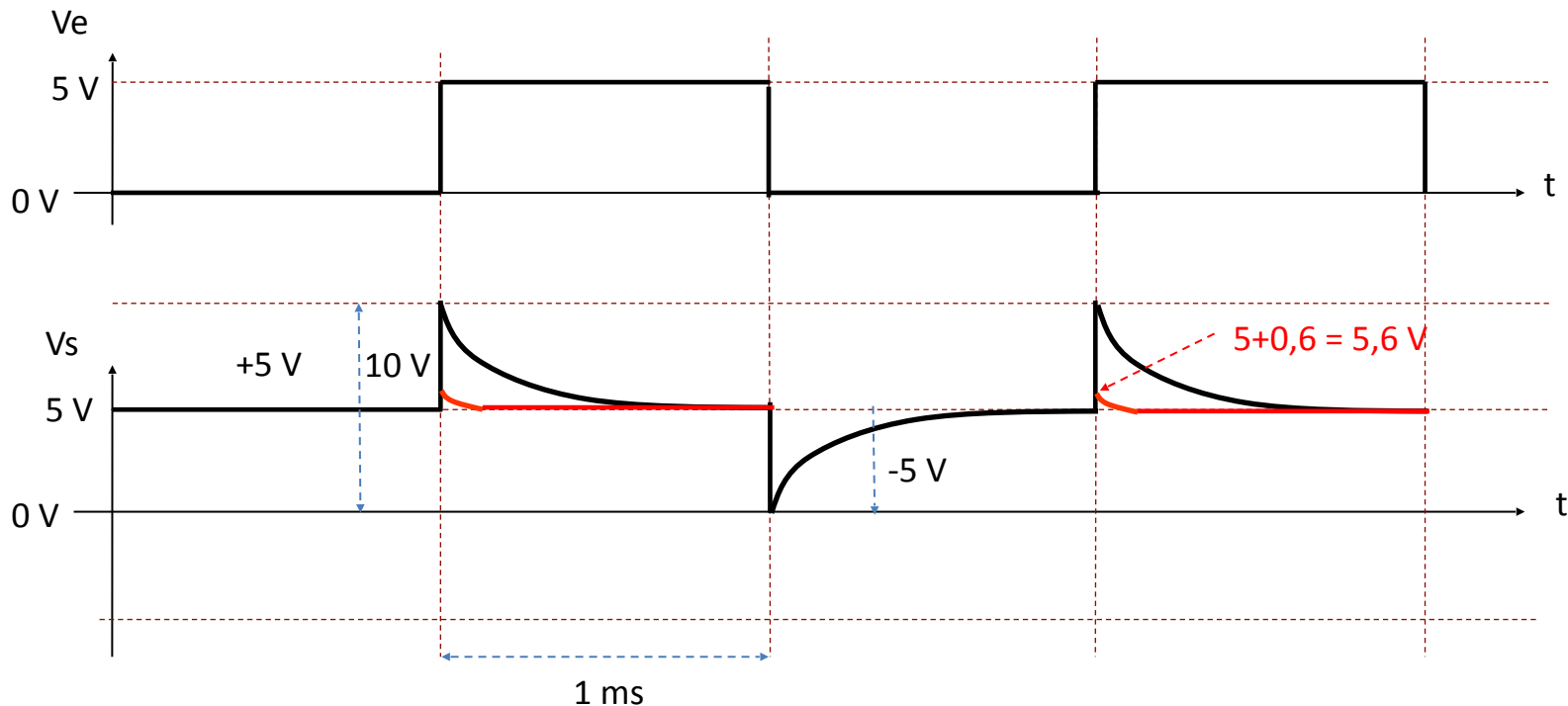
$$f(V_e) = 500 \text{ Hz}$$

Indiquer sur le graphe de V_e les valeurs de T (la période)

Tracer en correspondance V_s en correspondance de V_e (tenir compte du seuil de la diode et des valeurs de $R1$ et $C1$)

Compléter le graphe ci-dessous, sans la diode puis avec la diode.

On considèrera que le condensateur se charge / décharge en $5.RC$



Sans diode
Avec diode

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 trouver 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)**)

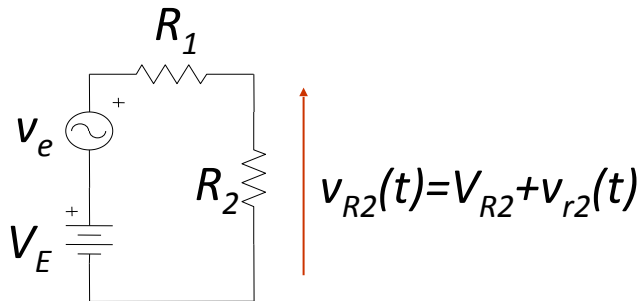
L'analyse dynamique permet de définir la fonction de transfert informationnelle

☞ 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 (DC)

Notations :

$v_{R2}(t)$ = valeur instantanée de la tension aux bornes de R_2

tg V_{R2} composante continue (DC)

v_{r2} composante variable (AC)

Calcul complet

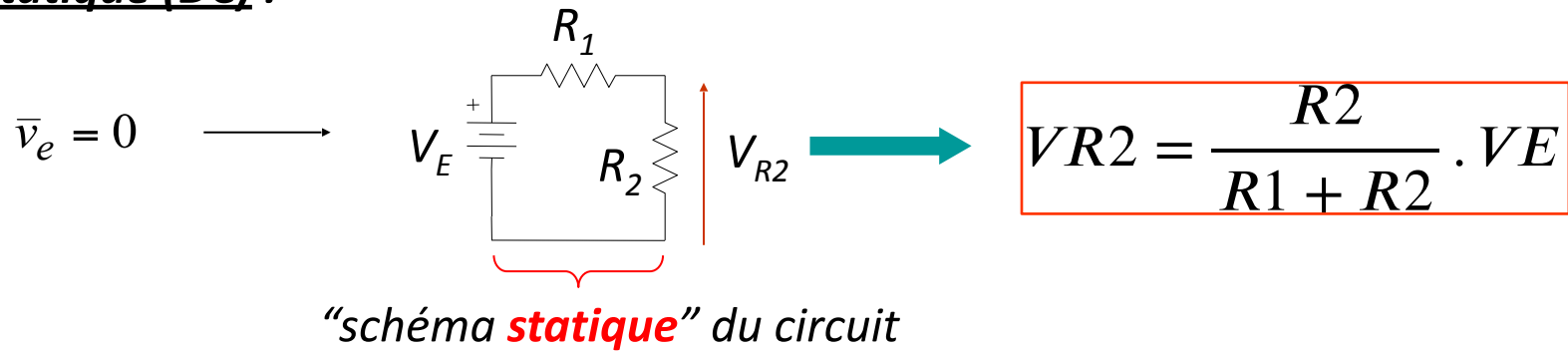
$$\longrightarrow \begin{aligned} v_{R2}(t) &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot [V_E + v_e(t)] = \underbrace{\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_E}_{V_{R2}} + \underbrace{\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_e}_{v_{r2}(t)} \end{aligned}$$

Principe de superposition :

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

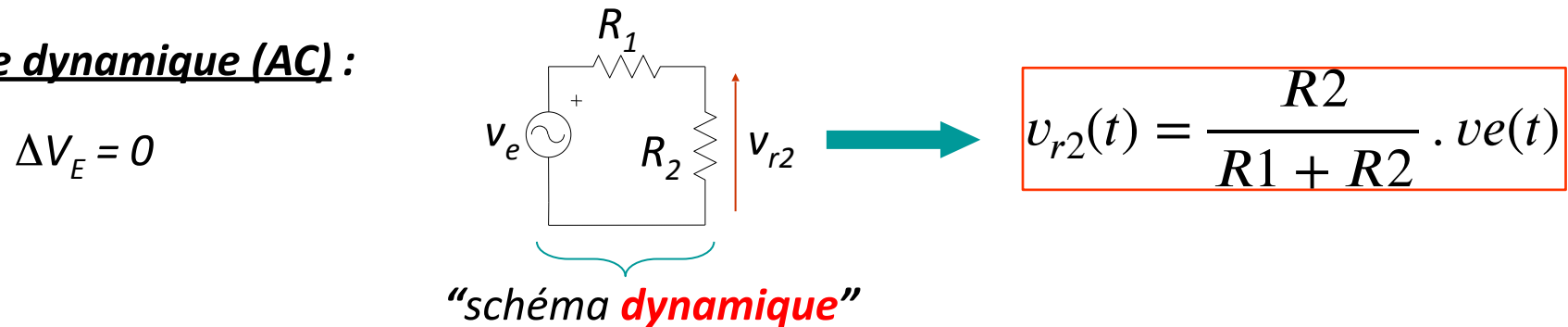
➡ la source statique V_E est à l'origine de V_{R2} , et v_e est à l'origine de v_{r2}

Analyse statique (DC) :



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

Analyse dynamique (AC) :



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

Autres exemples:

1)

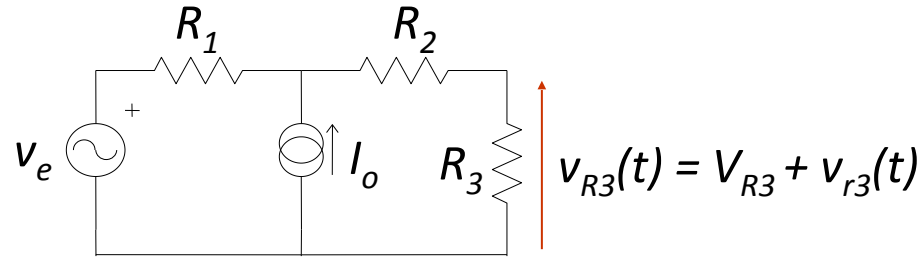


Schéma statique

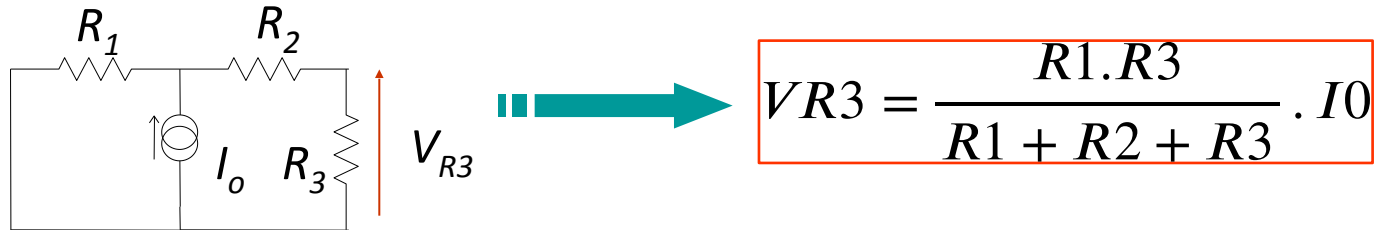
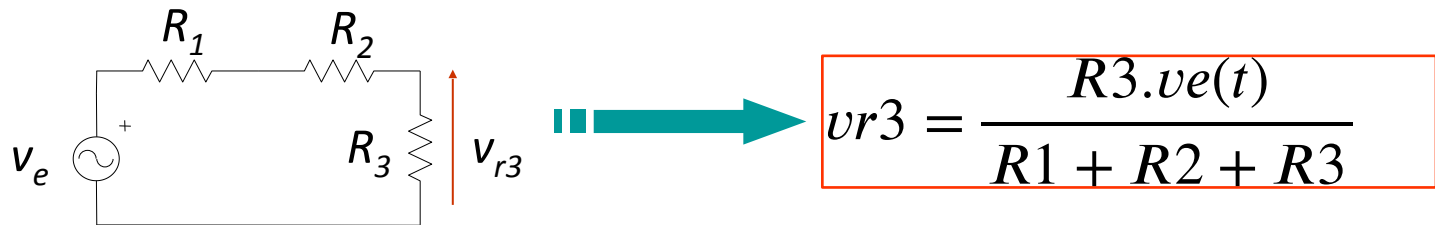
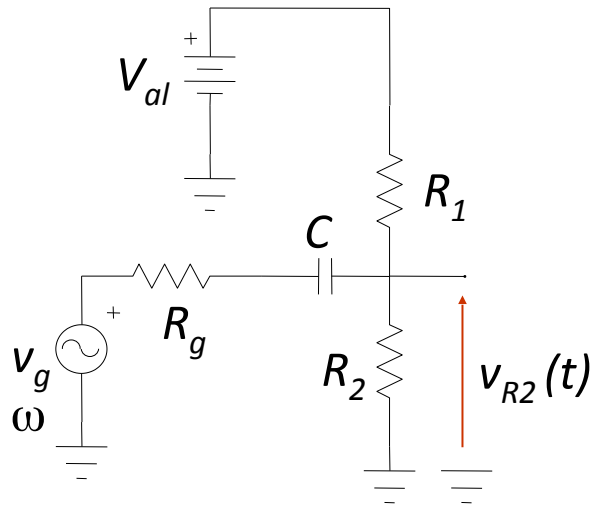


Schéma dynamique



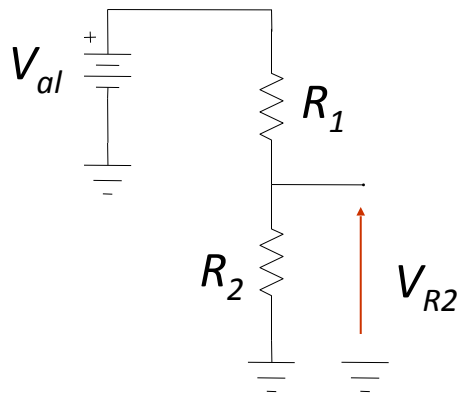
☞ Une **source de courant statique** est équivalent **en régime dynamique** à un **circuit ouvert**.
[puisque $i(t)=0!$]

2)



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

Schéma statique : à fréquence nulle C = circuit ouvert



$$V_{R2} = \frac{R2}{R1 + R2} \cdot Val$$

Schéma dynamique :

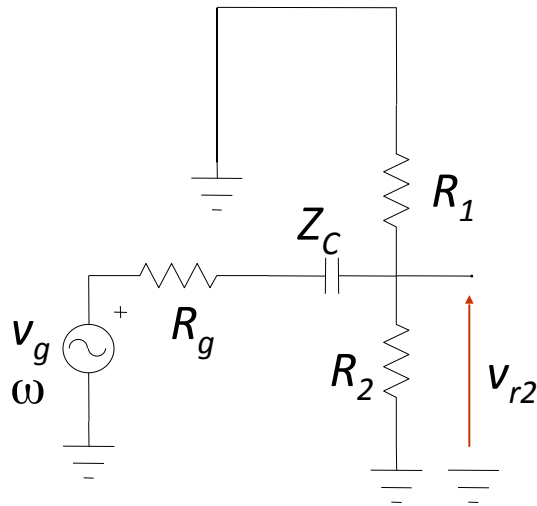


schéma équivalent dynamique

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

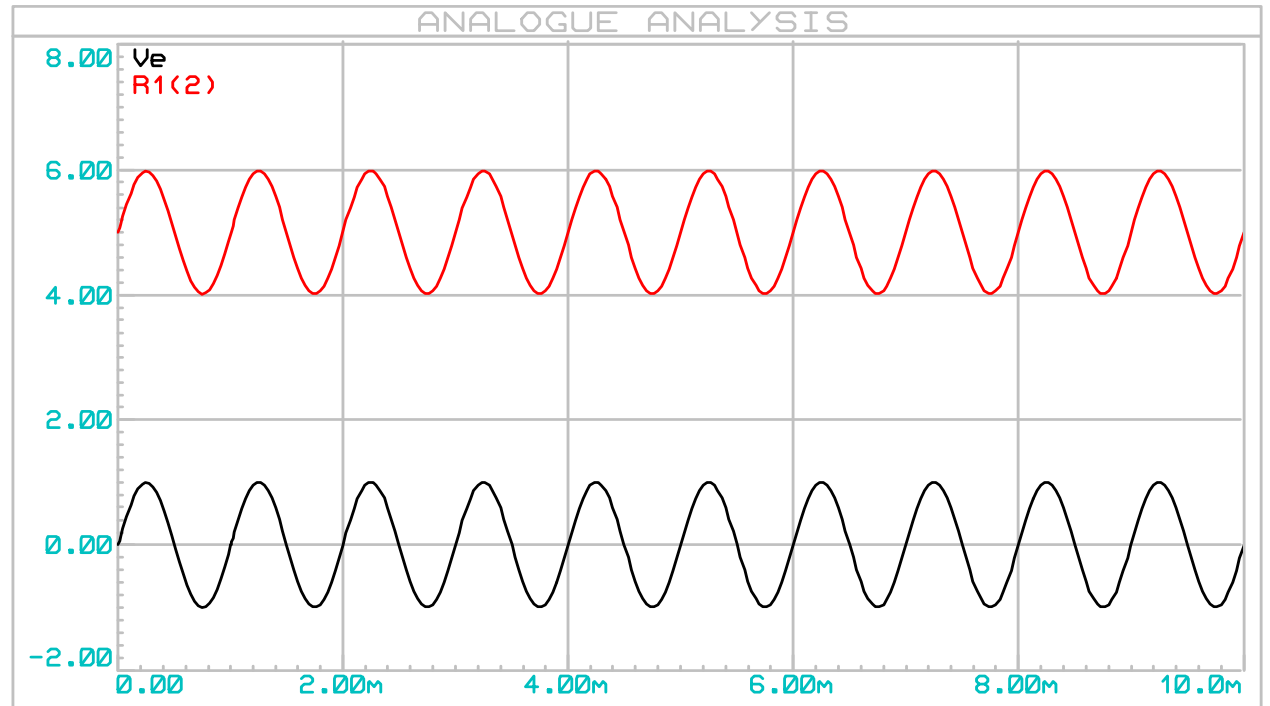
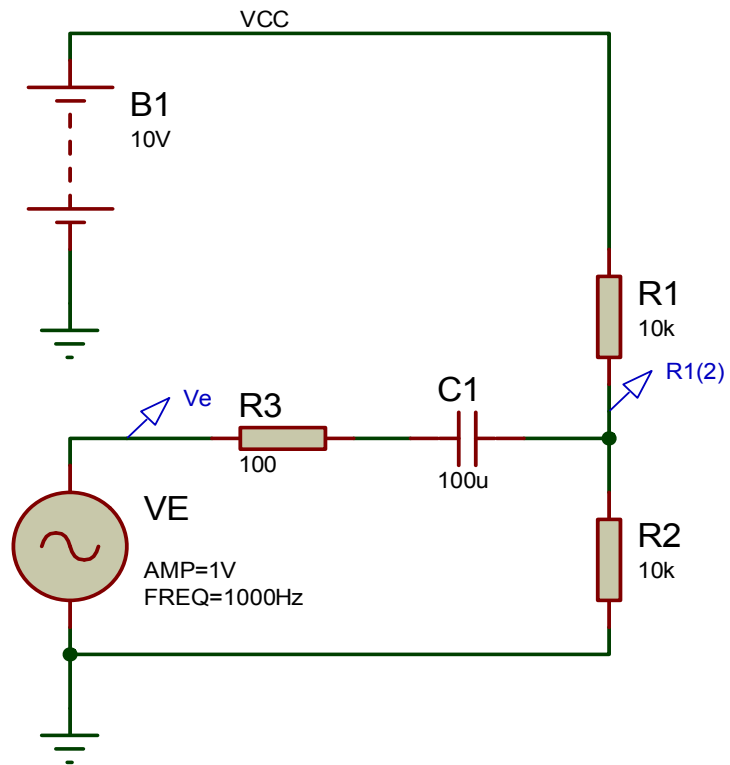
$$\rightarrow v = \frac{R_2 \parallel R_1}{R_2 \parallel R_1 + Z_g} v_g \quad \text{avec } Z_g = R_g + \frac{1}{jC\omega}$$

pour ω suffisamment élevée : $Z_g \approx R_g$ et

$$v_{r2} = \frac{R_1 \parallel R_2}{(R_1 \parallel R_2) + R_g} \cdot v_g$$

👉 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** !

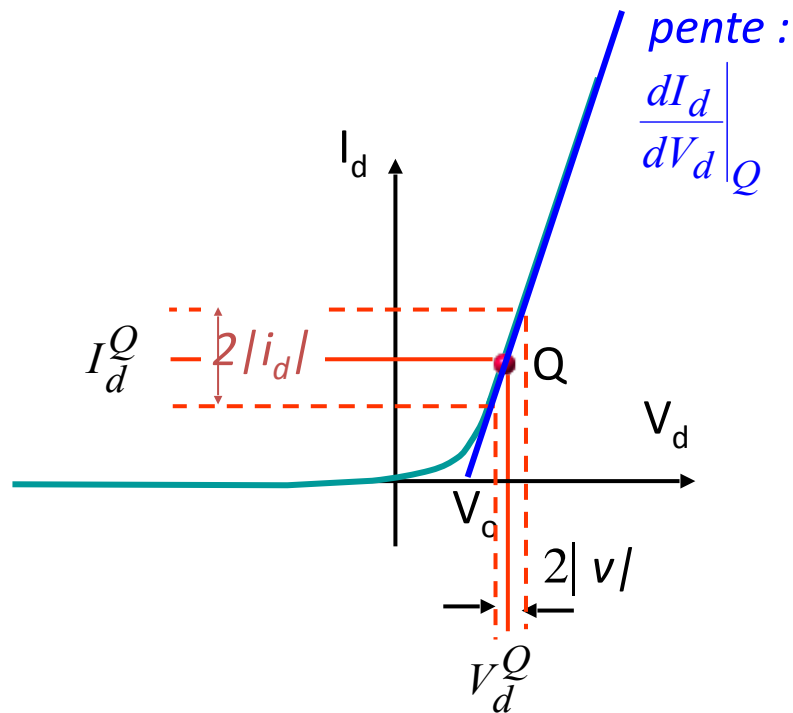
Extrapolations possibles:

- 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**



- $$i_d \approx \left. \frac{dI_d}{dV_d} \right|_Q \cdot v_d$$

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

=

$\frac{dI_d}{dV_d} \Big|_Q^{-1}$

= “résistance dynamique”
de la diode

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

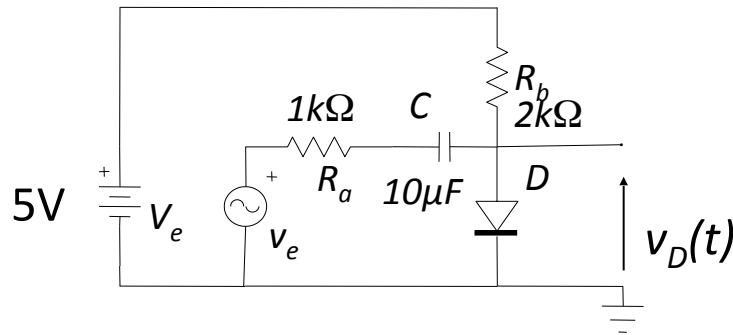
- Pour $V_d < 0$, $r_r \approx R_r$

👉 à température ambiante :

$$r_f \approx \frac{25}{I_d (mA)} \Omega \quad (m=1)$$

- 👉 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 : $R_f = 10 \Omega$, $V_o = 0,6 V$

Température : 300K (26°C)

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

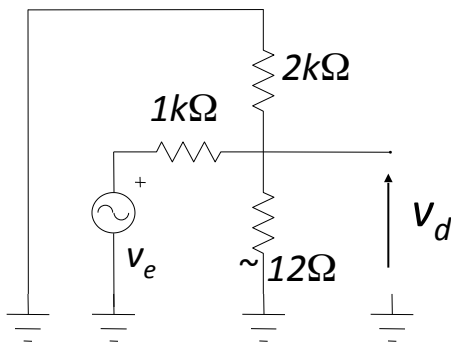
$$|Z_c| = \frac{1}{C \cdot \omega}$$

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

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

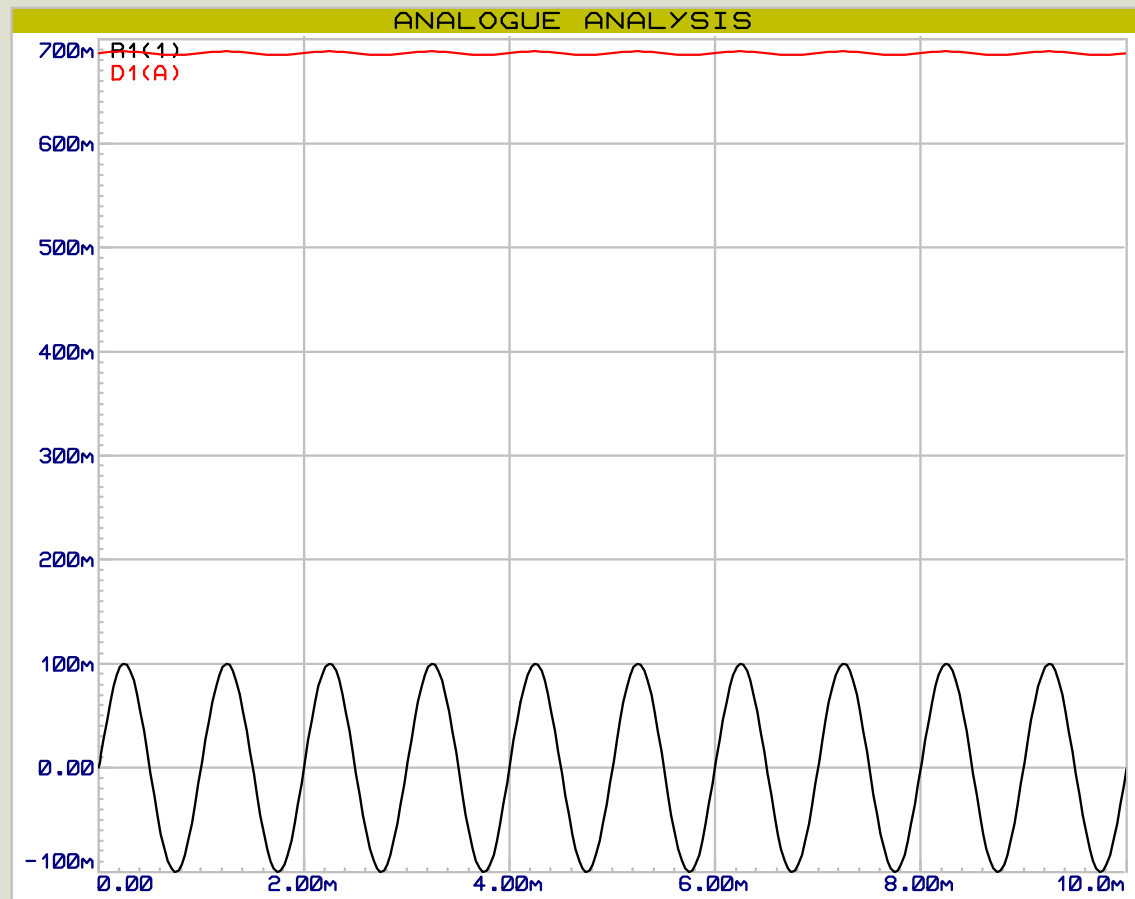
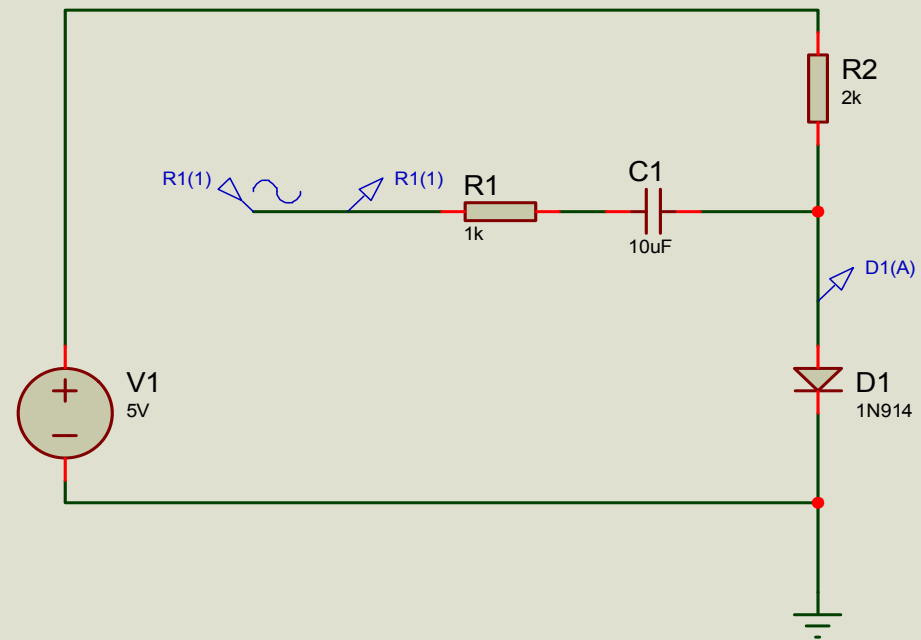
● **Analyse dynamique :** $r_f \approx \frac{26}{2,2} = 12 \Omega, \quad Z_c = 16 \Omega \ll R_a$

Schéma dynamique :



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

➔ Amplitude des ondulations résiduelles : 1,2 mV



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 $\rightarrow$ bloqué, bloqué $\rightarrow$ passant) ($\Leftrightarrow$ signaux de grande amplitude)
- ➡ du **point de fonctionnement** statique (pour des petites variations)

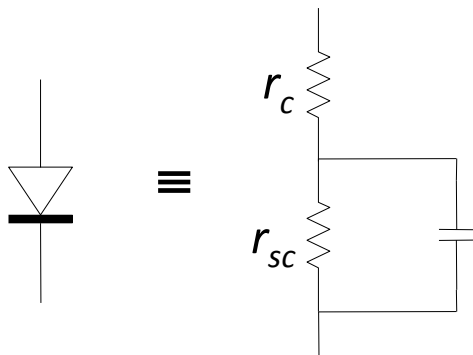
- Variation de V_d de faible amplitude, sous polarisation directe ($V_d^Q > 0$)

☞ 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 ($V_d > 0$) :



$$C_d \propto \frac{I_d^Q}{T}$$

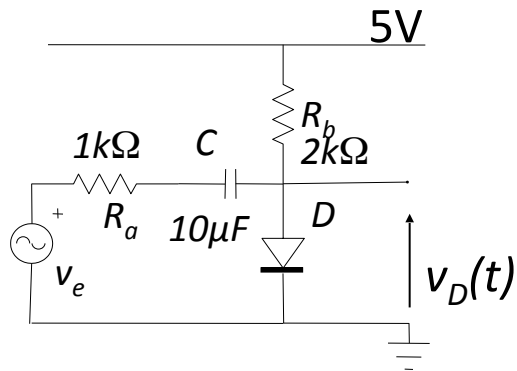
= “capacité de diffusion”

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

☞ à basse fréquence : $r_c + r_{sc} = r_f$

☞ la séparation en deux résistances tient mieux compte des phénomènes physiques en jeu.

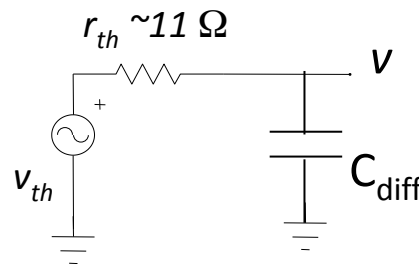
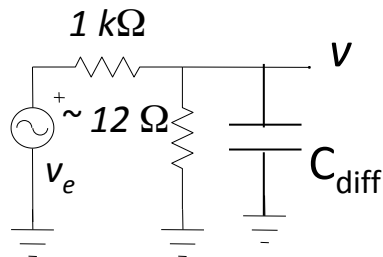
suite de l'exemple précédent...:



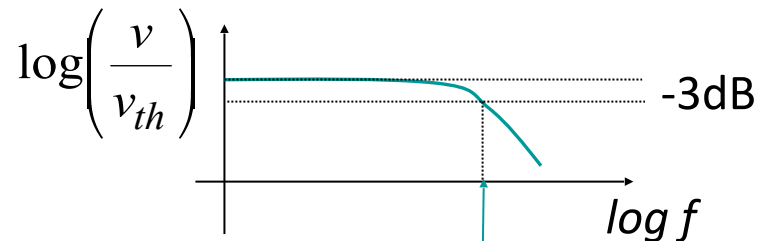
A quelle fréquence la capacité dynamique commence-t-elle à influencer la tension v_d ?

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

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



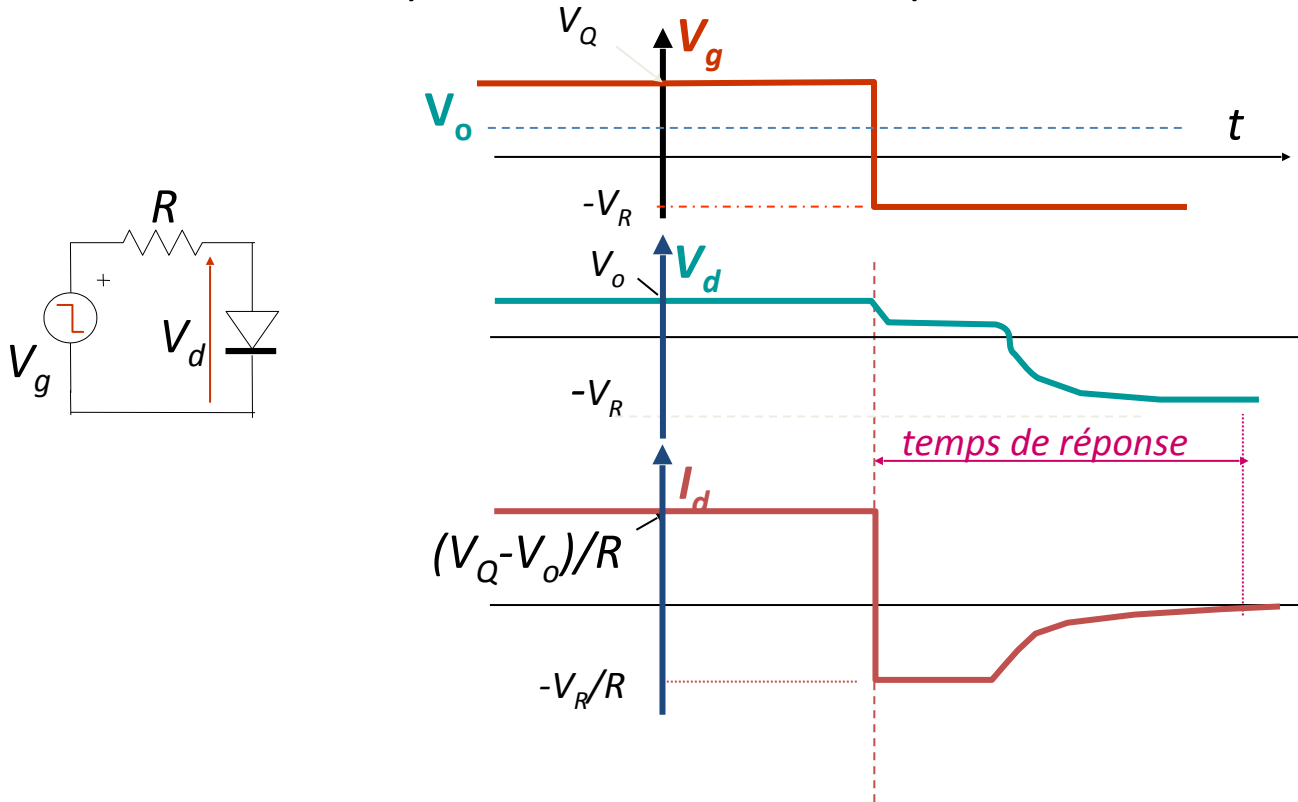
= « filtre » passe-bas



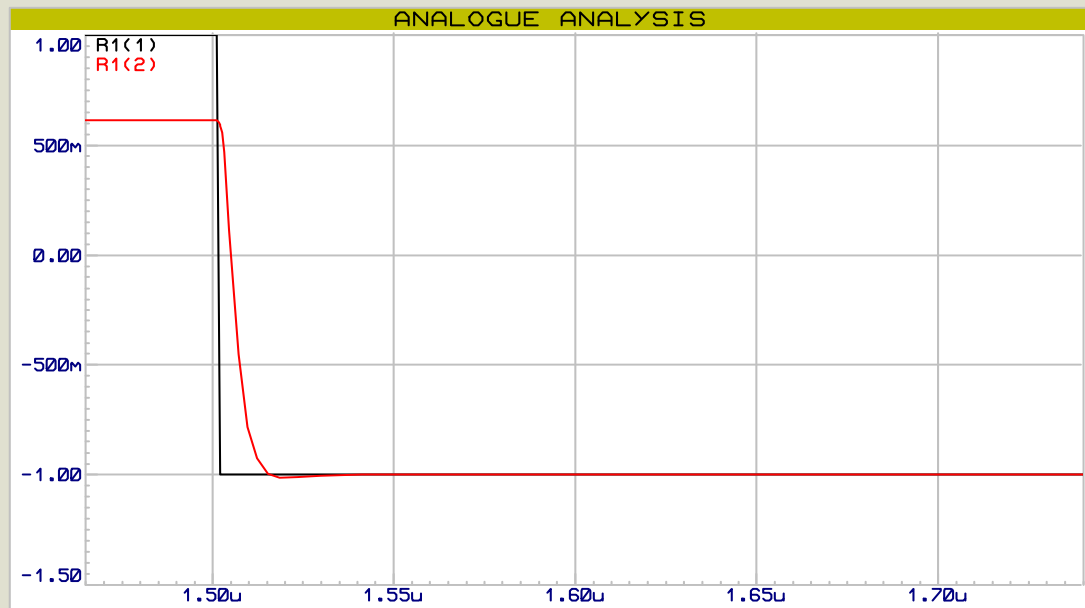
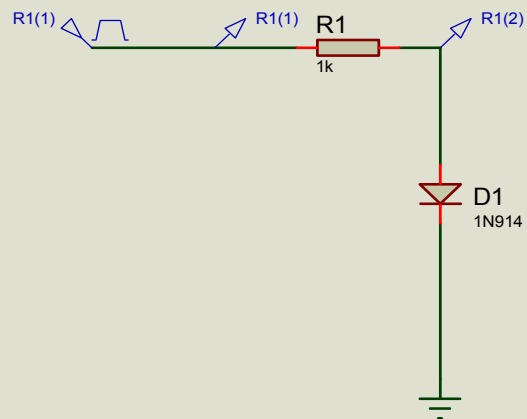
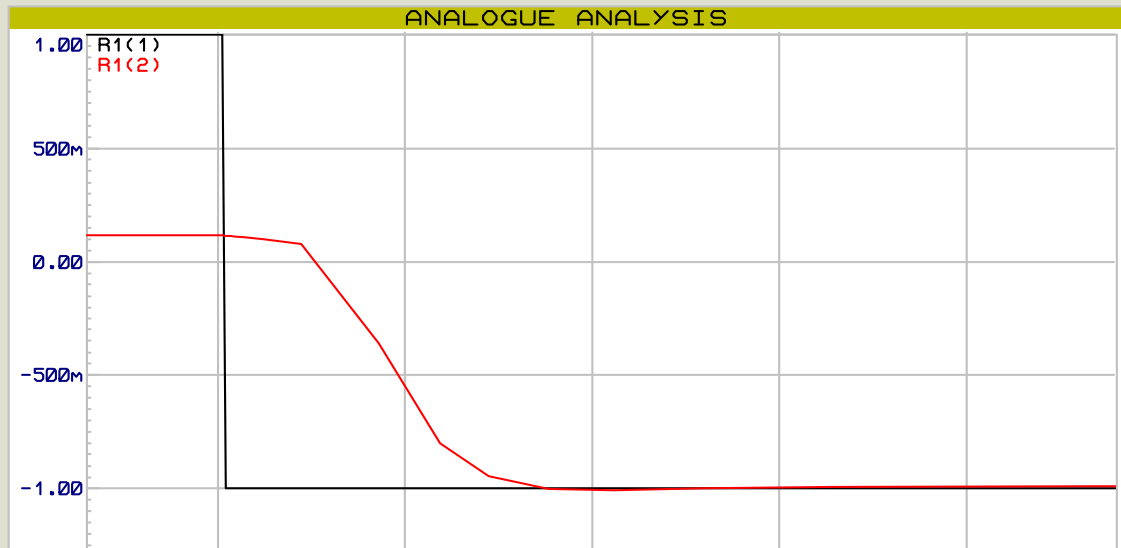
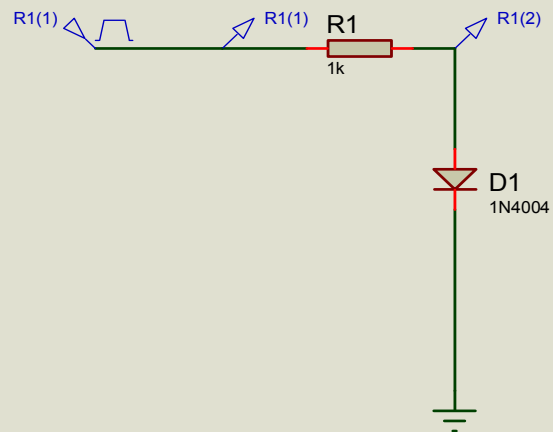
$$f = \frac{1}{2\pi r_{th} C_{diff}} \approx 130 \text{ kHz}$$

- 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 $\rightarrow$ ns

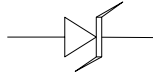


Le simulateur SPICE tient compte du temps de recouvrement des diodes (1N914 vs 1N4004)

DIODE4

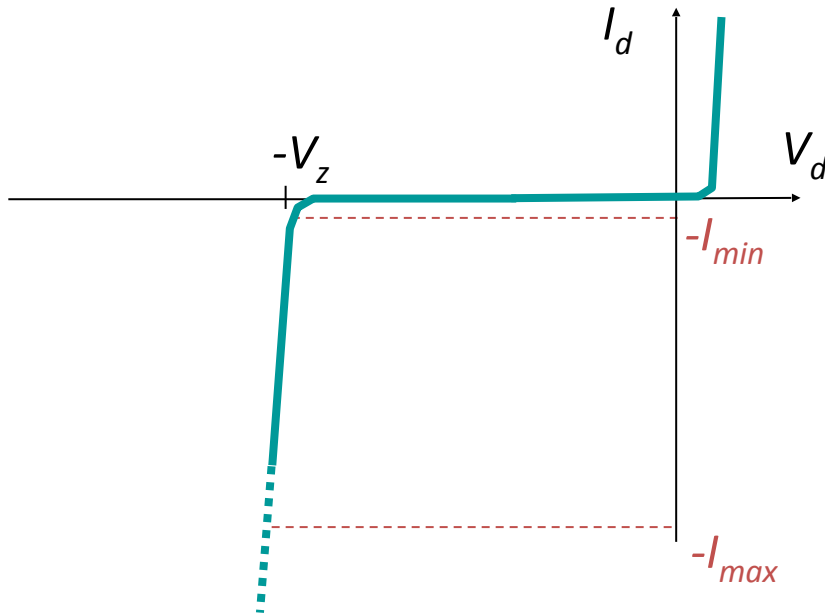
2.6 Quelques diodes spéciales

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: $V_Z > 0$)

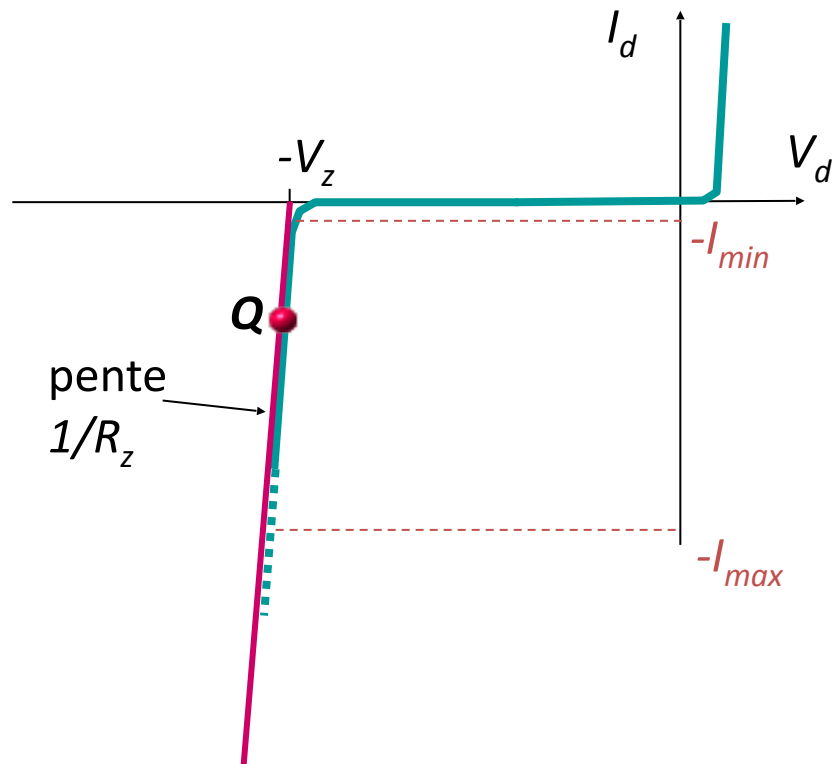
I_{min} : courant minimal (en valeur absolue) au delà duquel commence le domaine linéaire "Zener"

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

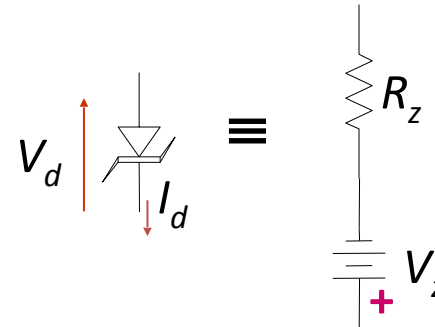
Ordre de grandeur : $V_Z \sim 1-100 \text{ V}$, $I_{min} \sim 0,01-0,1 \text{ mA}$, $P_{max} \leftrightarrow$ régime de fonctionnement

■ schémas équivalents

hyp : $Q \in \text{domaine Zener}$



○ *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

- $V_o \neq 0,7 \text{ V} !$
- V_o dépend de la couleur



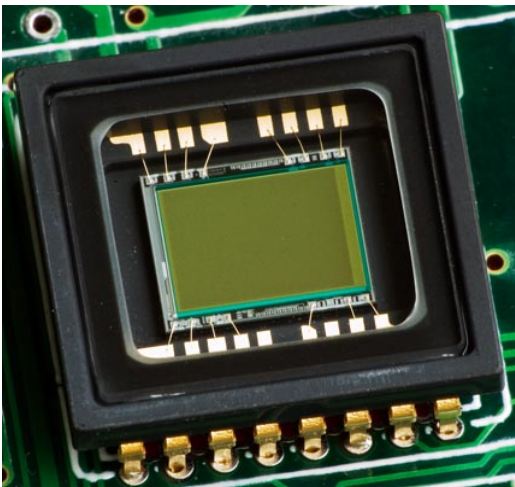
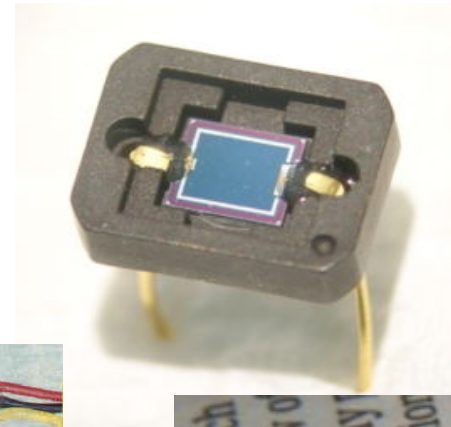
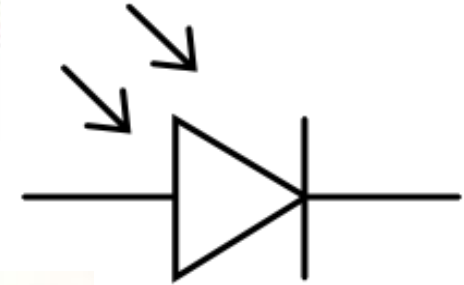
Couleur	Longueur d'onde (nm)	Tension de seuil (V)
IR	$\lambda > 760$	$V_s < 1,63$
Rouge	$610 < \lambda < 760$	$1,63 < V_s < 2,03$
Orange	$590 < \lambda < 610$	$2,03 < V_s < 2,10$
Jaune	$570 < \lambda < 590$	$2,10 < V_s < 2,18$
Vert	$500 < \lambda < 570$	$2,18 < V_s < 2,48$
Bleu	$450 < \lambda < 500$	$2,48 < V_s < 2,76$
Violet	$400 < \lambda < 450$	$2,76 < V_s < 3,1$
Ultraviolet	$\lambda < 400$	$V_s > 3,1$
Blanc	xxx	$V_s = 3,5 \text{ V}$



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



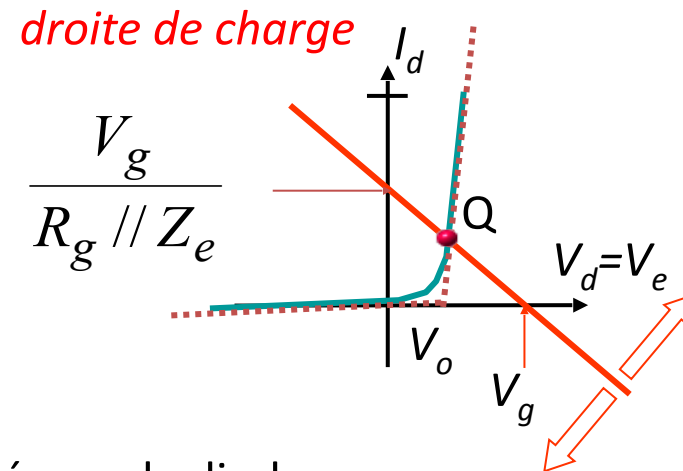
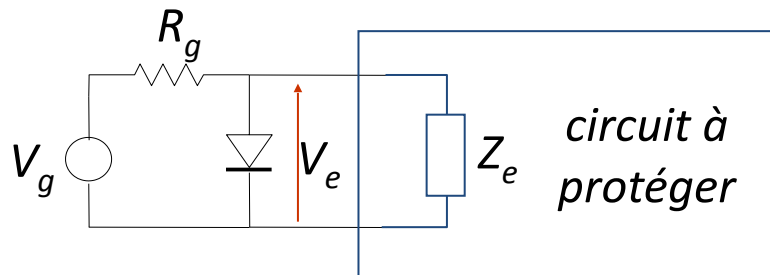
3. Applications des Diodes

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.

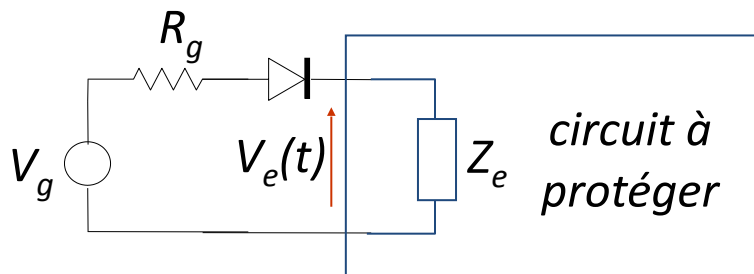
Clipping parallèle

(diode // charge)

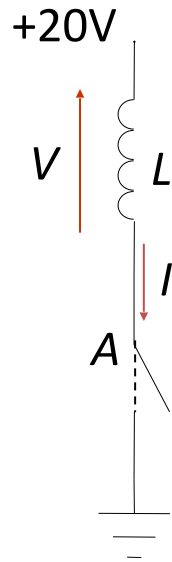


Limite d'utilisation : Puissance maximale tolérée par la diode.

Clipping série :



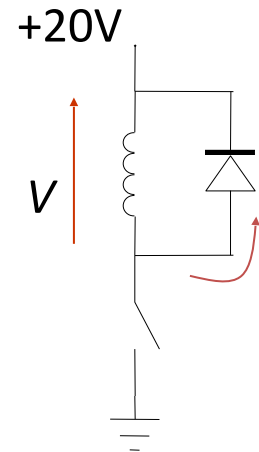
Protection contre une surtension inductive (ex: ouverture/ fermeture d'un relais)



■ ouverture de l'interrupteur :

- $V = L \frac{dI}{dt} \rightarrow -\infty$
- $V_A \rightarrow +\infty$
- risque de décharge électrique à travers l'interrupteur ouvert

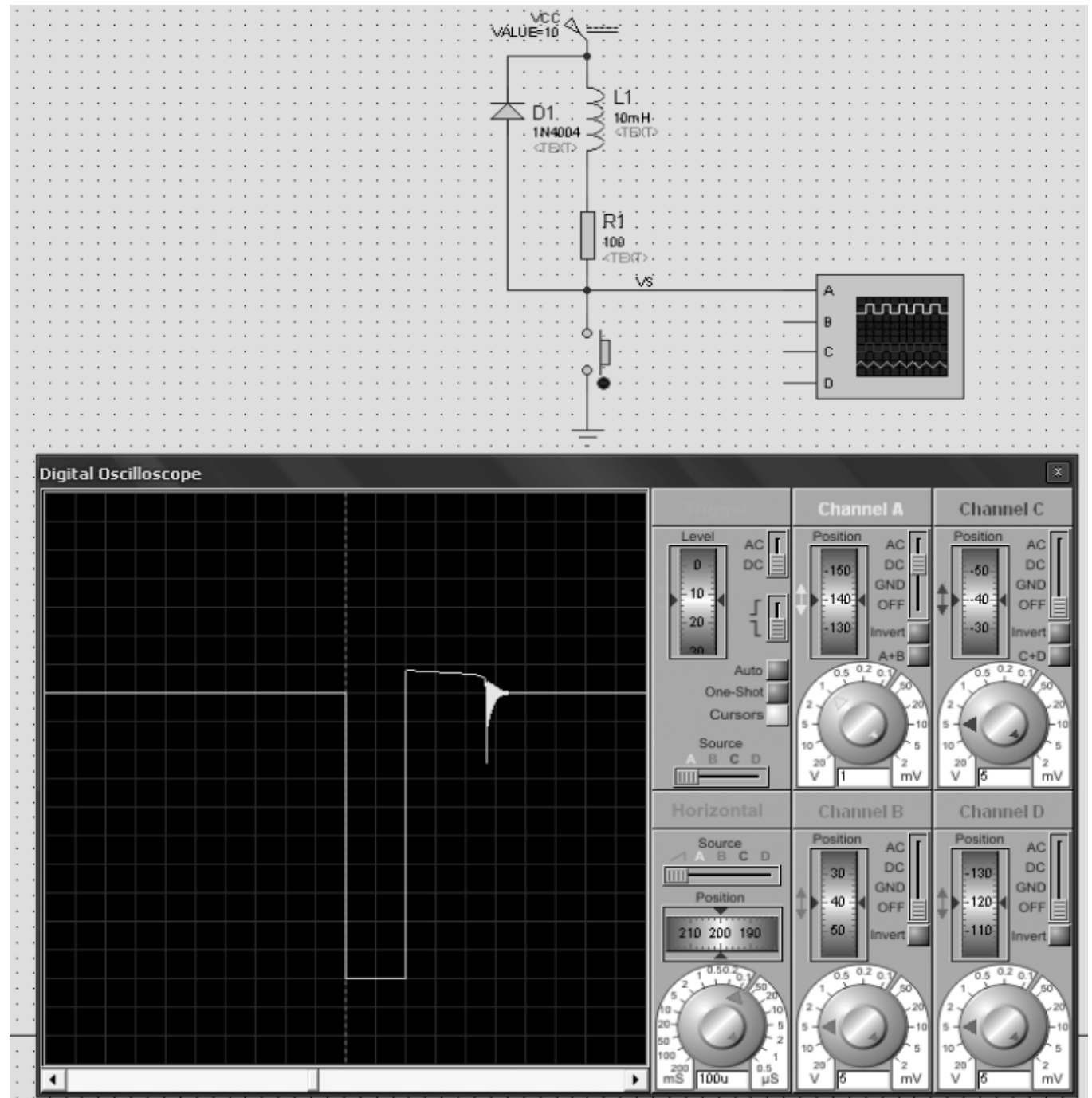
☞ *L'interrupteur pourrait être un transistor...*



■ 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 $V_{CC} + 0,7$ V. L'énergie accumulée dans $L1$ est dissipée dans la résistance interne de la diode durant environ $250 \mu\text{s}$, il y a ensuite un phénomène oscillatoire due à la capacité de la diode (circuit LC //), ce phénomène apparaît 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.