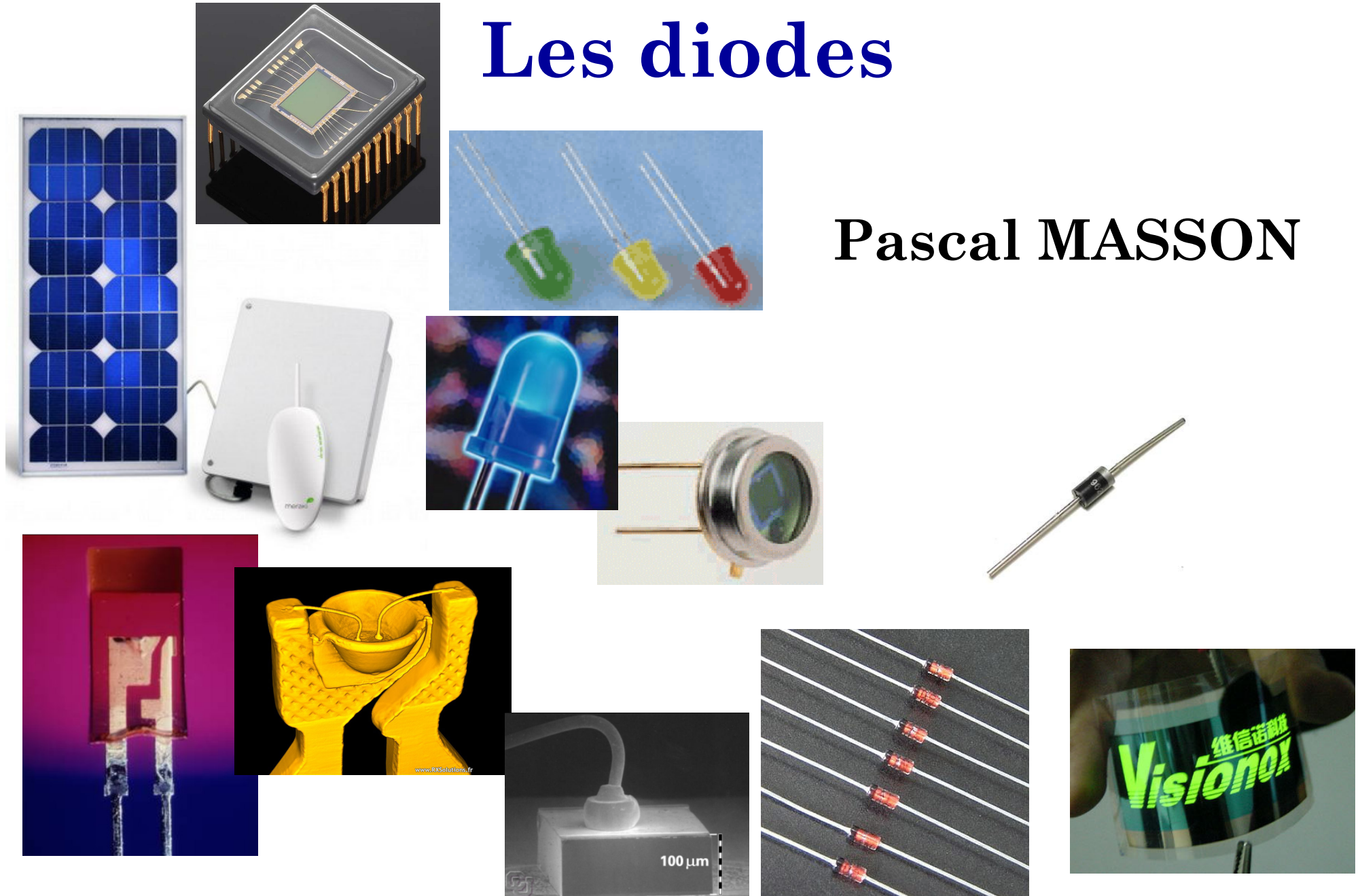


# Les diodes

Pascal MASSON



<b>I.</b>	<b>Historique .....</b>	<b>3</b>
<b>II.</b>	<b>La diode PN : caractéristique .....</b>	<b>7</b>
<b>III.</b>	<b>La diode PN : applications .....</b>	<b>12</b>
<b>IV.</b>	<b>La diode PN : modélisation .....</b>	<b>30</b>
<b>V.</b>	<b>La diode Zener .....</b>	<b>67</b>
<b>VI.</b>	<b>Effet photoélectrique : absorption .....</b>	<b>73</b>
<b>VII.</b>	<b>Effet photoélectrique : émission .....</b>	<b>85</b>

## I.1. Définition

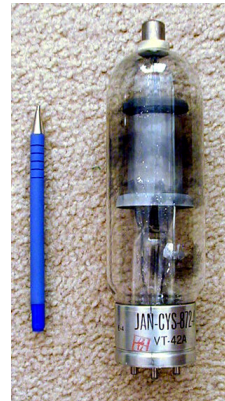
- La diode est un élément qui ne laisse passer le courant que dans un sens



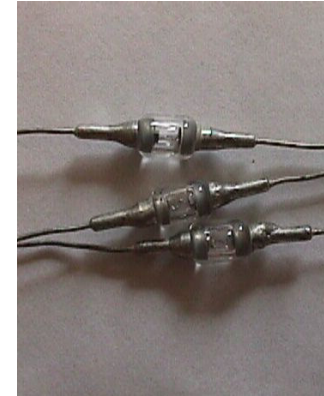
1901



1903



1950

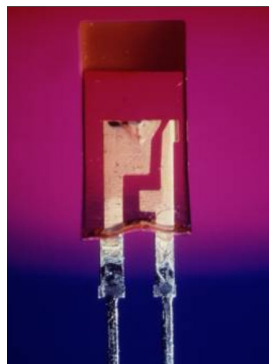


1956

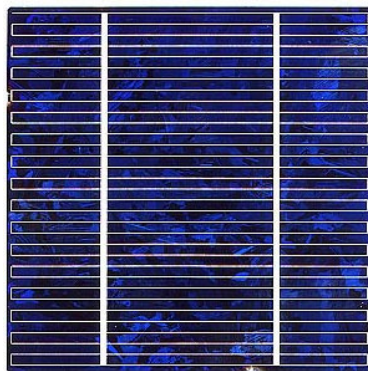


1990

- La diode à semi-conducteur présente aussi des propriétés photoélectriques



LED

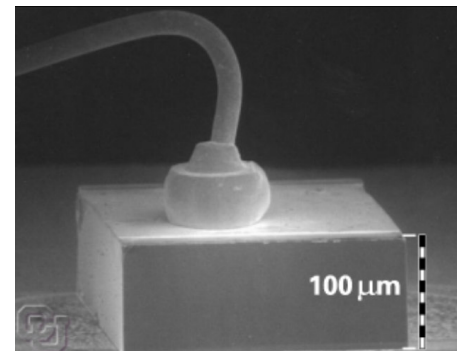


Efficiency 14.6%---Pmax 1.46W

Solaire



Photosensible



Laser



OLED



## I.2. Histoire de la diode à semi-conducteur

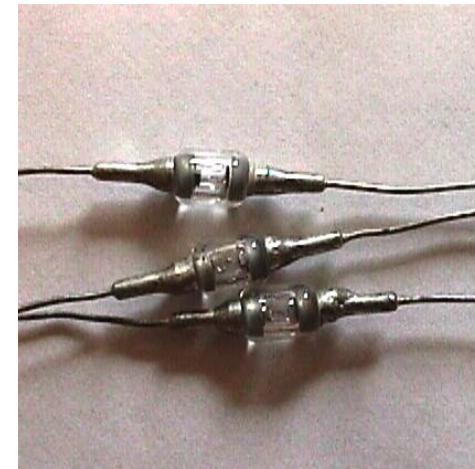
- 1874 : effet découvert sur de la galène par Ferdinand BRAUN (24 ans).



1901

- 1901 : dépôt d'un brevet par Jagadis Chandra BOSE pour l'utilisation de la galène avec contact métallique comme détecteur d'ondes électromagnétiques.

- 1940 : découverte de la diode PN par Russell OHL.
- Remarque : le transistor bipolaire a été découvert en 1948 par William SHOCKLEY.



1956

## I.3. Histoire de la diode à tube

- 1879 : invention de la lampe par thomas EDISON.
- 1873 : découvert de l'effet thermoïonique par Frederick GUTHRIE. Cet effet est redécouvert par Thomas EDISON en 1880 (puis breveté en 1883).



1903



1950

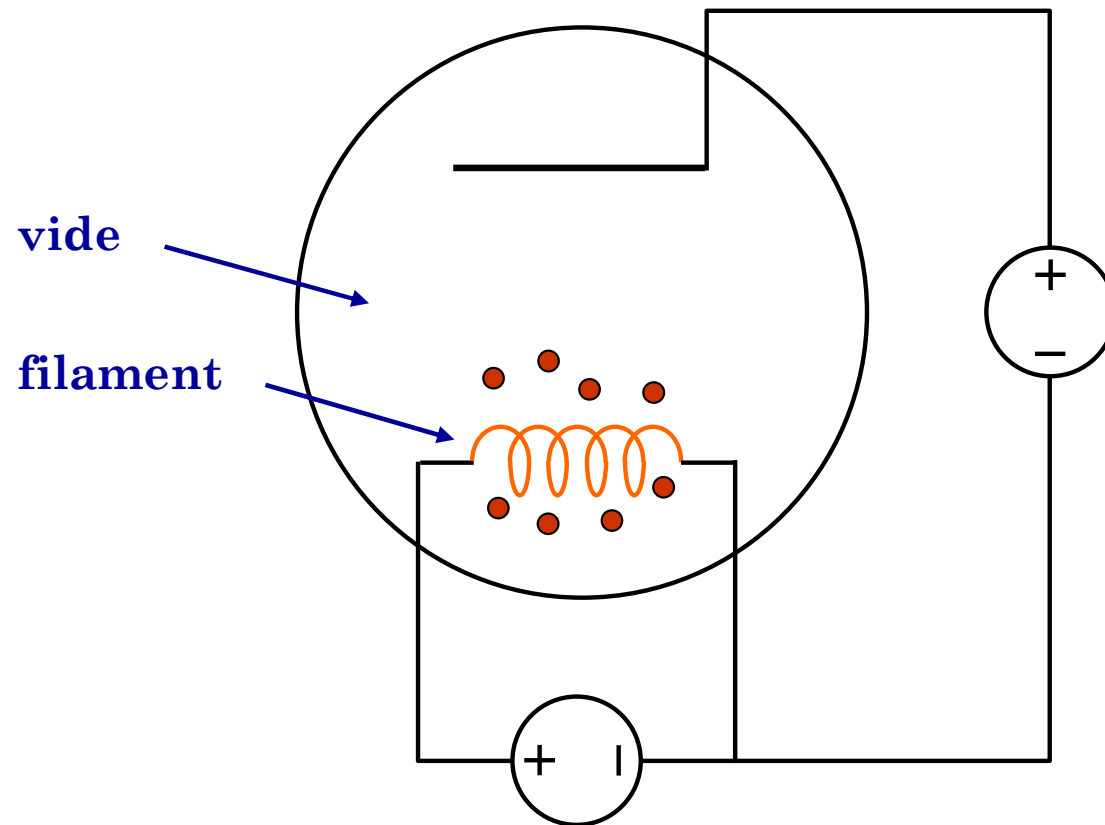


1879

- 1904 : John Ambrose FLEMING brevete la diode à vide.

## I.3. Histoire de la diode à tube

### □ Fonctionnement



### II.1. Définition de la jonction PN

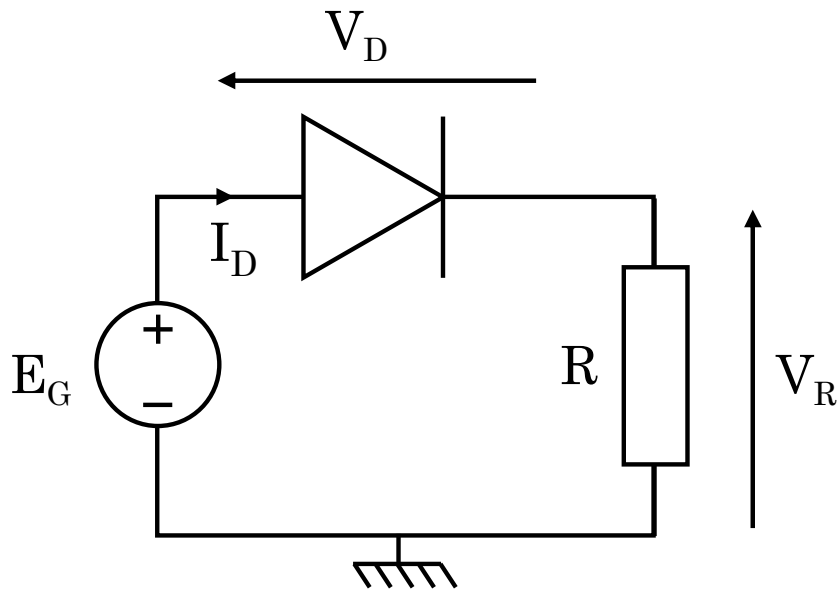
- Une jonction P-N est créée en juxtaposant un semi-conducteur dopé N (les électrons sont majoritaires) avec un semi-conducteur dopé P (les trous sont majoritaires).

### II.2. Représentation

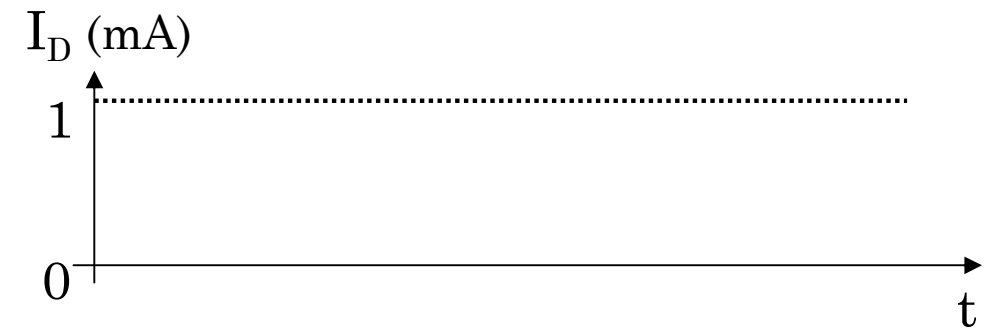
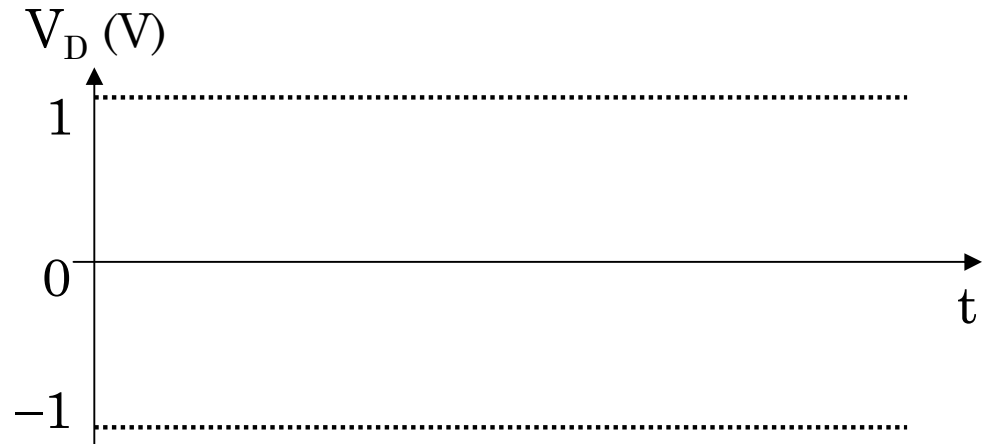
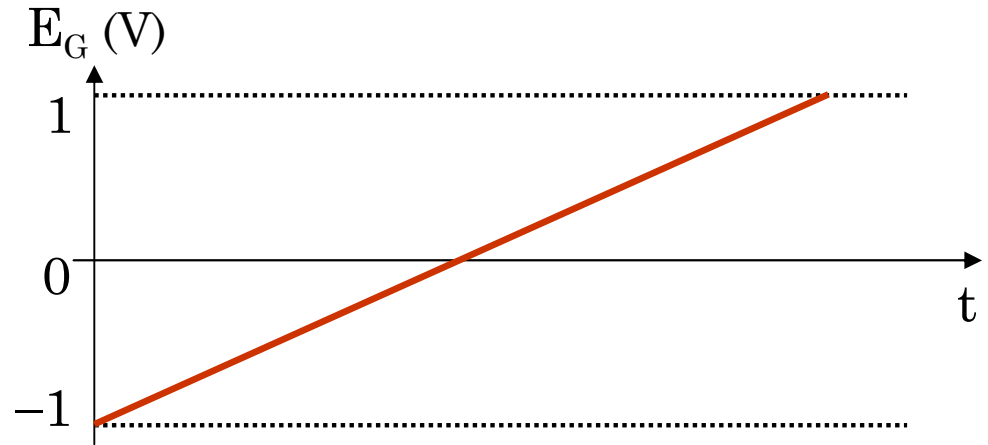


### II.3. Caractéristique idéale

- On applique une rampe de tension au circuit composé d'une diode et d'une résistance ( $R = 100 \Omega$ ).



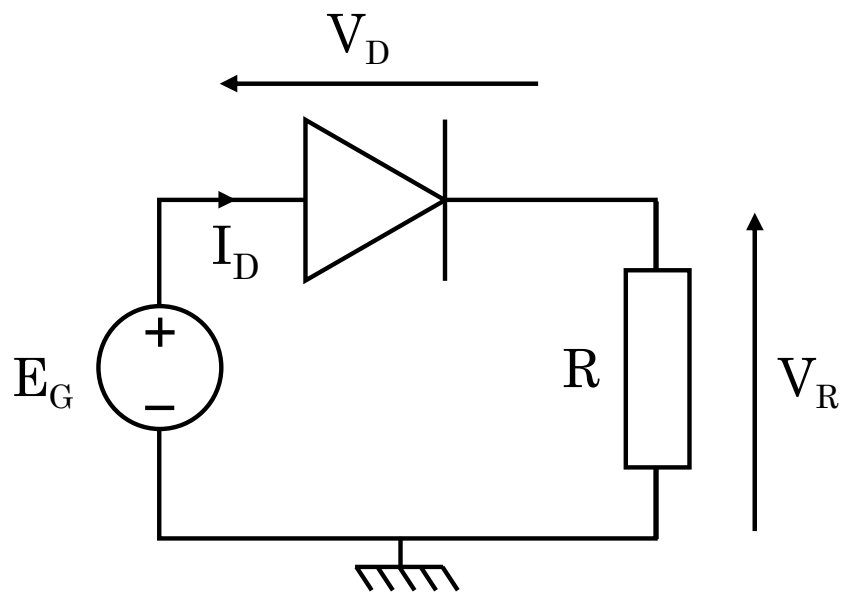
$$E_G = V_D + V_R$$



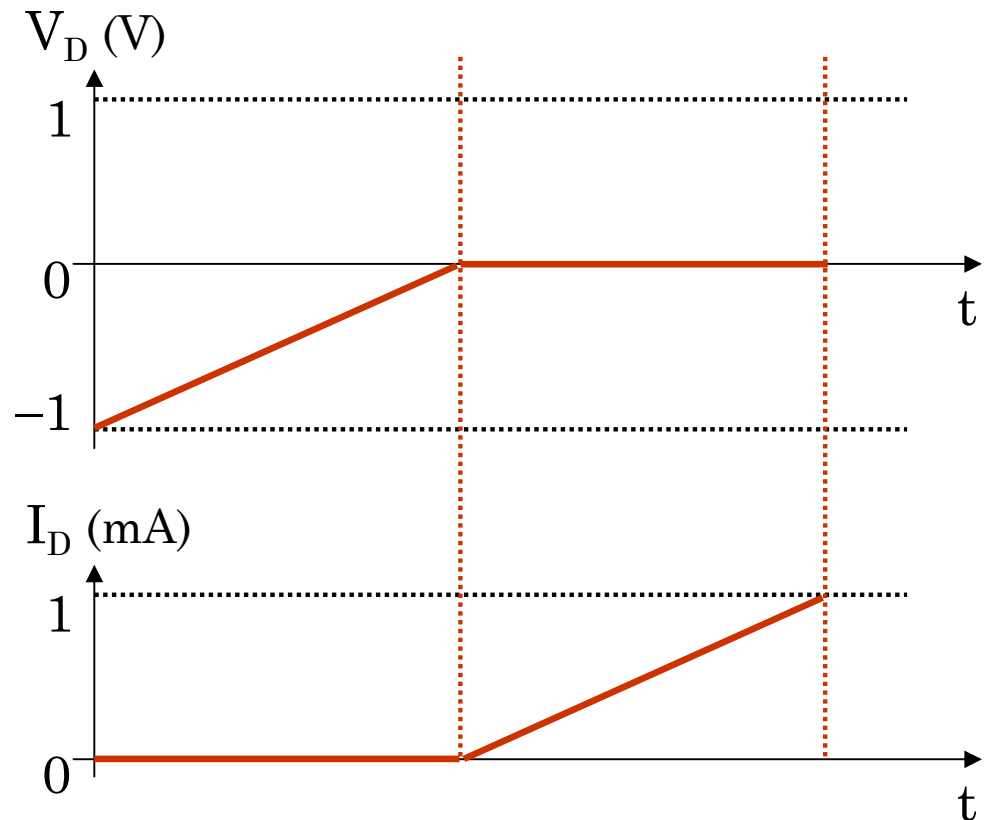
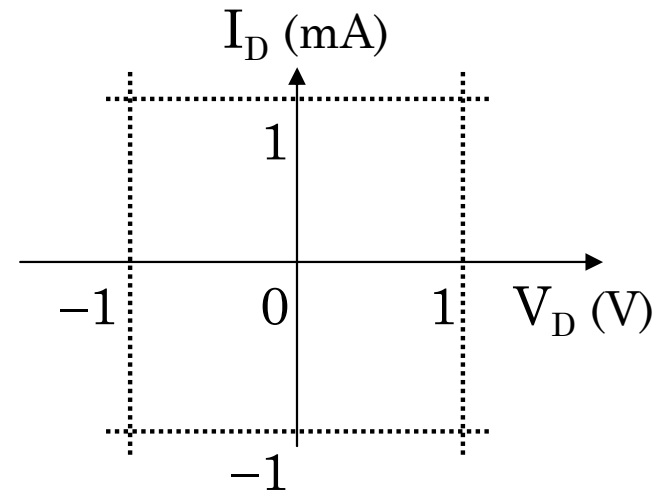


## II.3. Caractéristique idéale

- On applique une rampe de tension au circuit composé d'une diode et d'une résistance ( $R = 100 \Omega$ ).

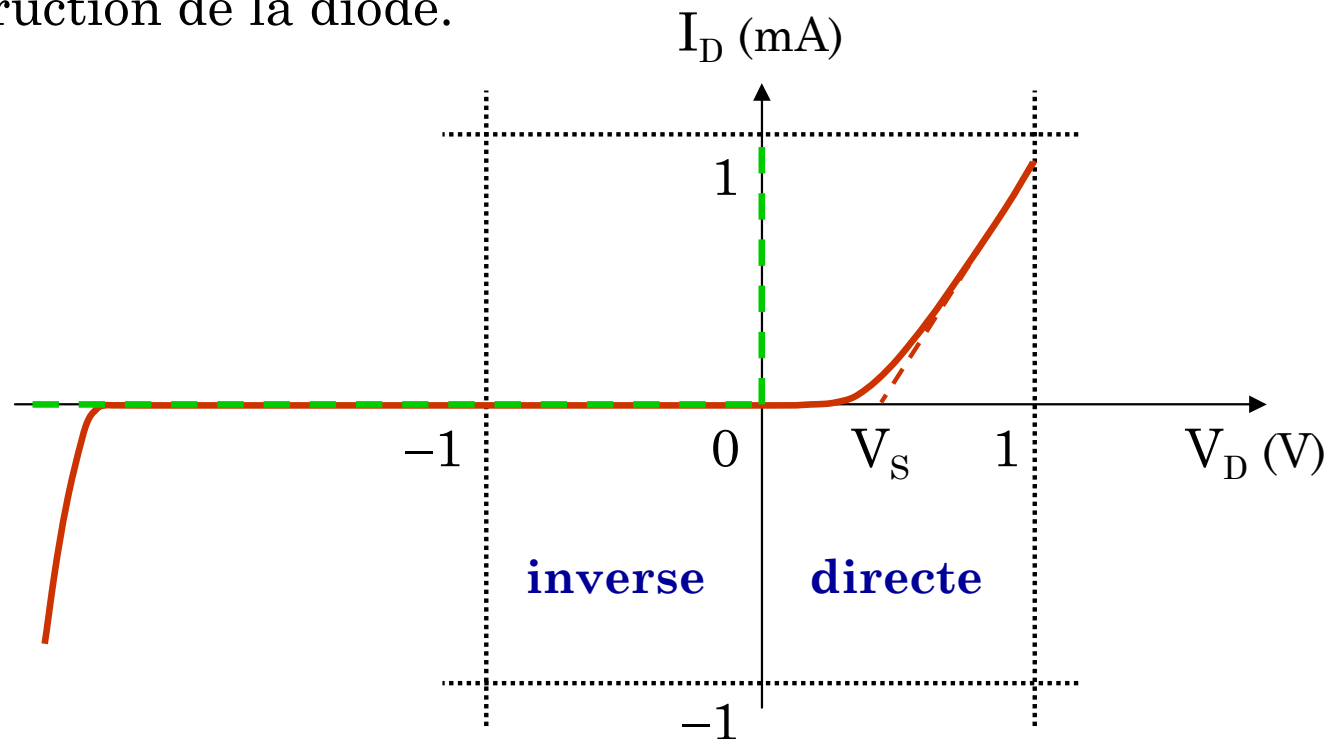


$$E_G = V_D + V_R$$



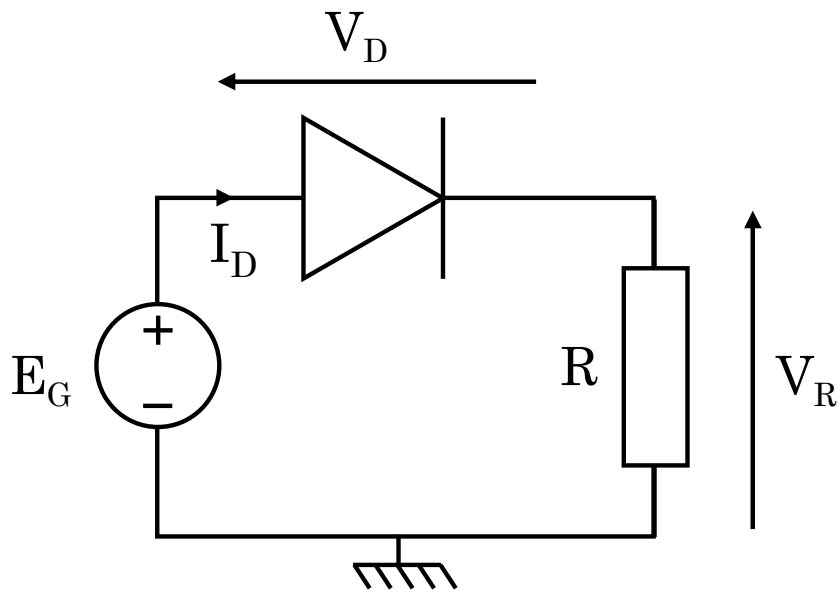
### II.4. Caractéristique réelle

- Existence d'une tension de seuil,  $V_S$ , dont la valeur dépend du semi-conducteur utilisé et de ses dopages.
- Existence d'une résistance interne à la diode,  $R_D$  (en série avec la diode idéale).
- Existence d'un phénomène d'avalanche en inverse qui conduit à la destruction de la diode.

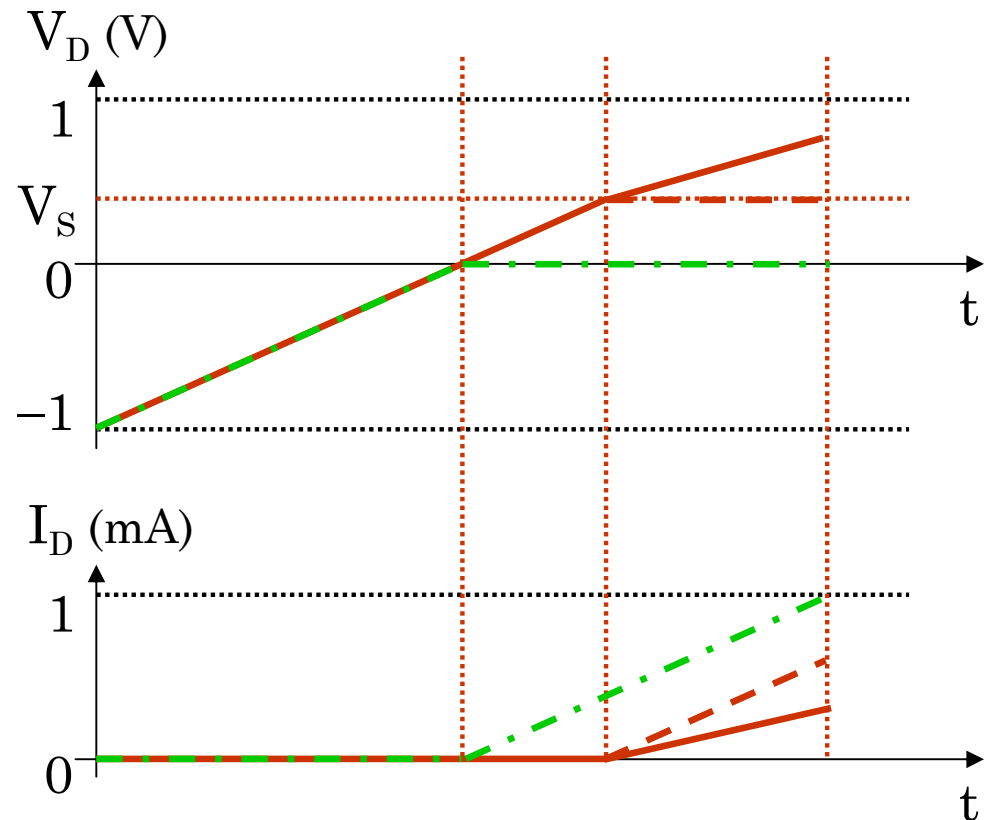
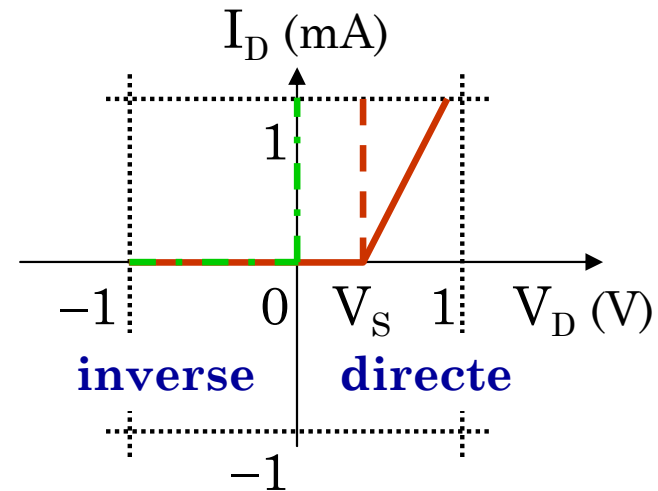


## II.4. Caractéristique réelle

- Tension de seuil.
- Résistance série,  $R_D$ .

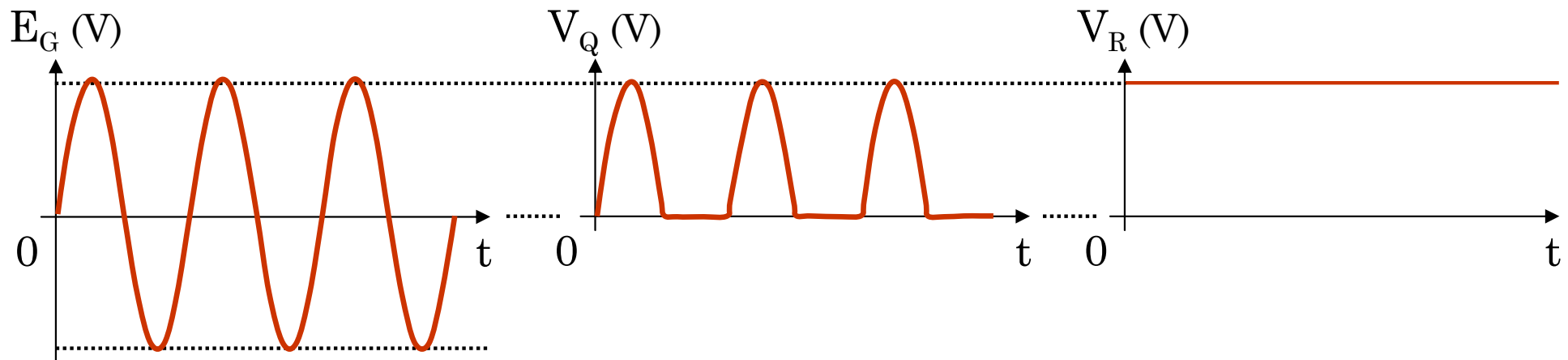
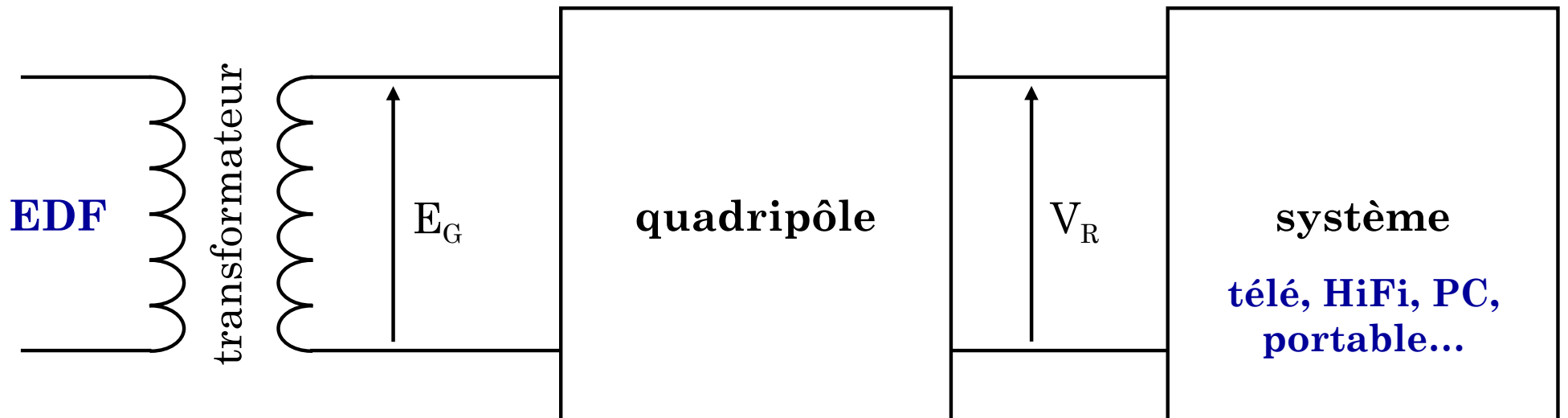


$$E_G = V_D + V_R$$



## III.1. Redressement mono alternance

- Transformation d'une tension alternative en provenance d'EDF (par exemple) en tension continue.

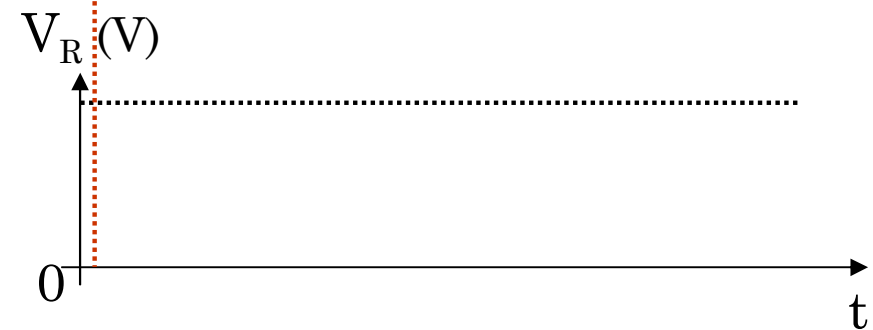
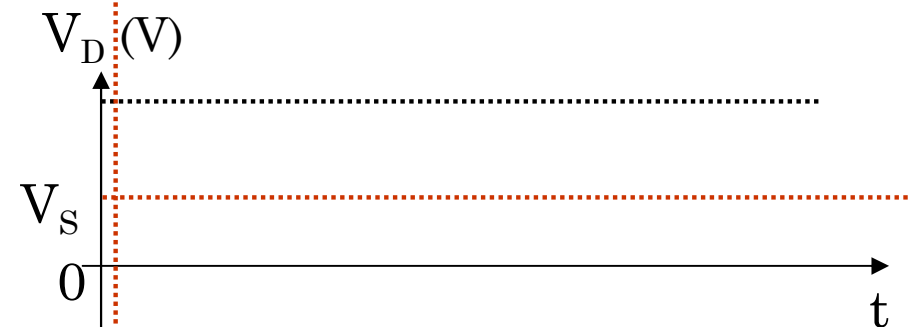
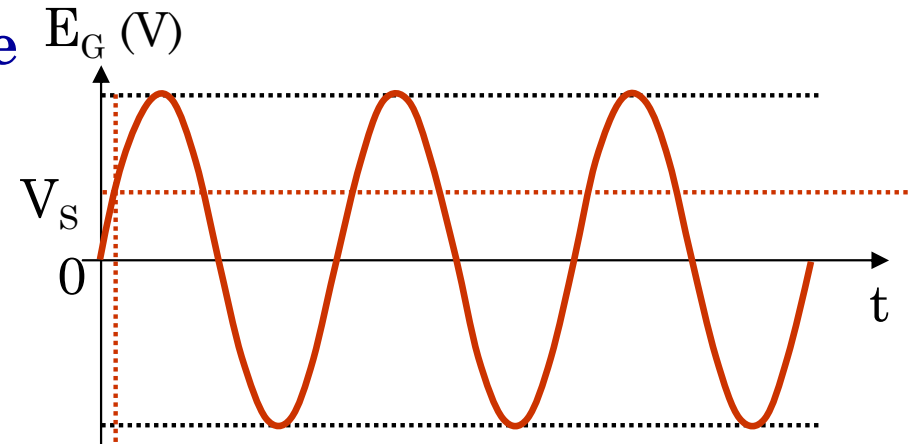
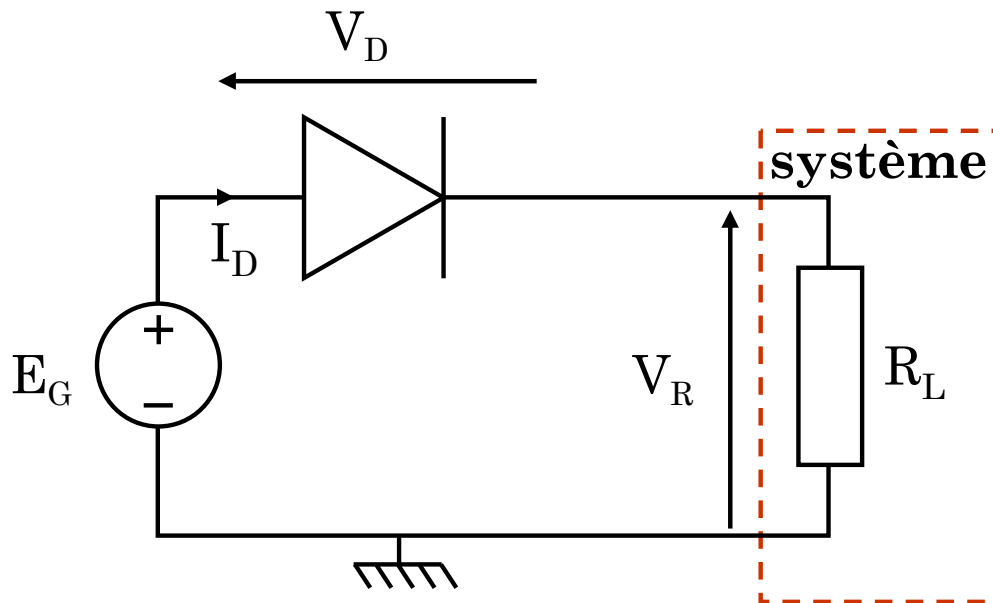




## III.1. Redressement mono alternance

### □ Récupération de l'alternance positive

- $R_L$  représente la résistance d'entrée du système que l'on alimente.



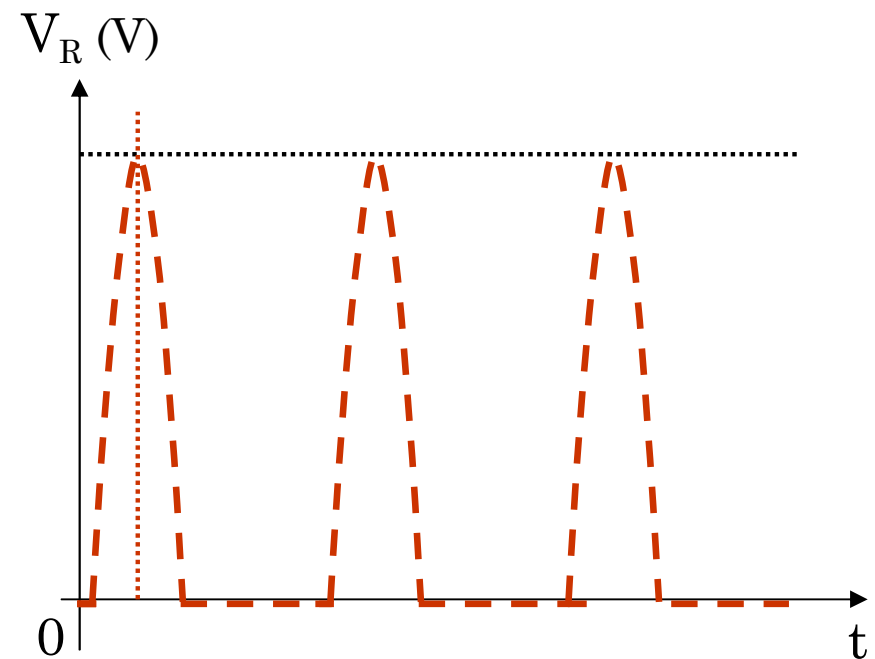
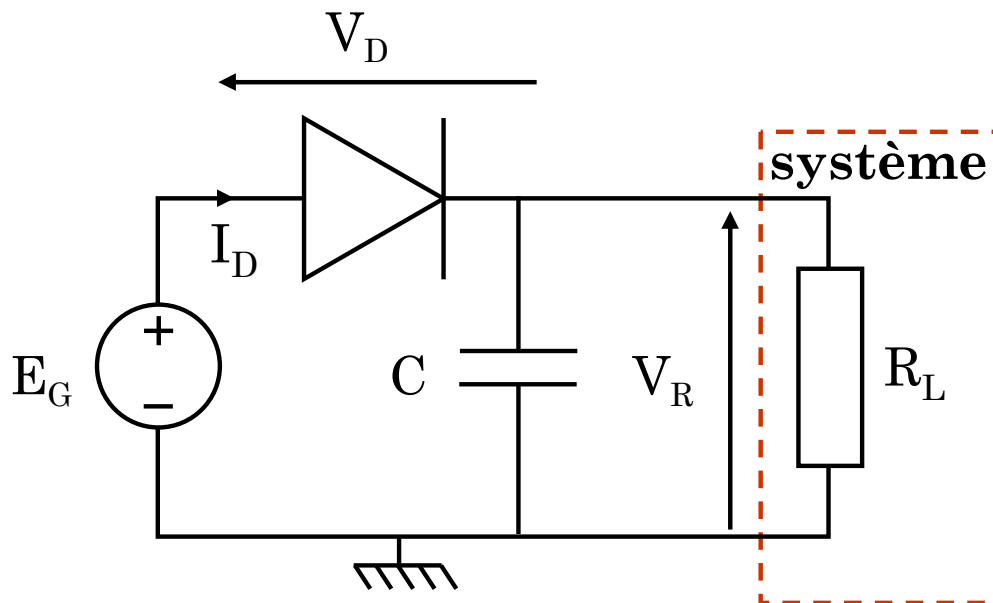
## III.1. Redressement mono alternance

### □ Récupération de l'alternance positive

- $R_L$  représente la résistance d'entrée du système que l'on alimente.

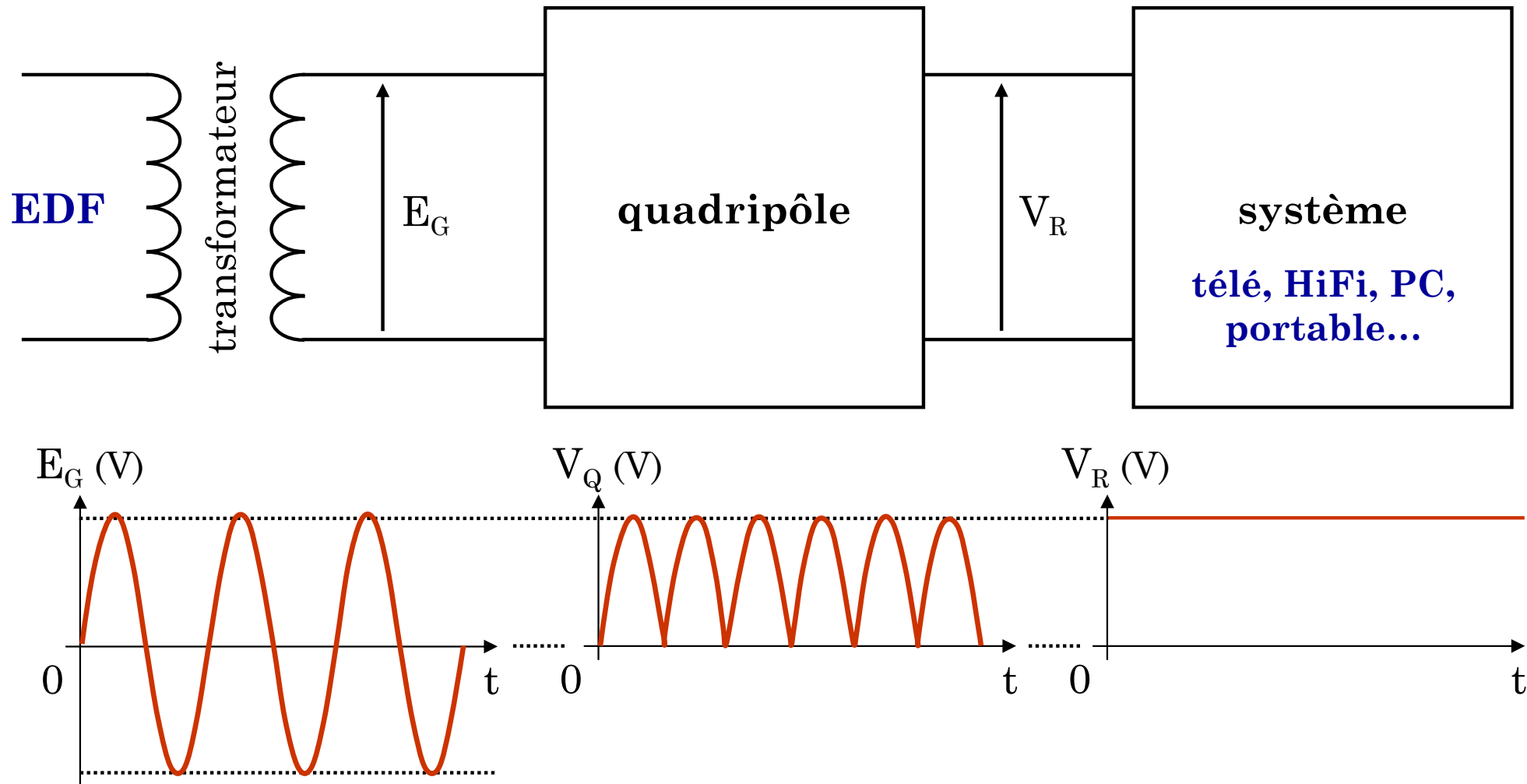
### □ Transformation en tension continue

- Ajout d'une capacité en parallèle avec l'entrée du système.



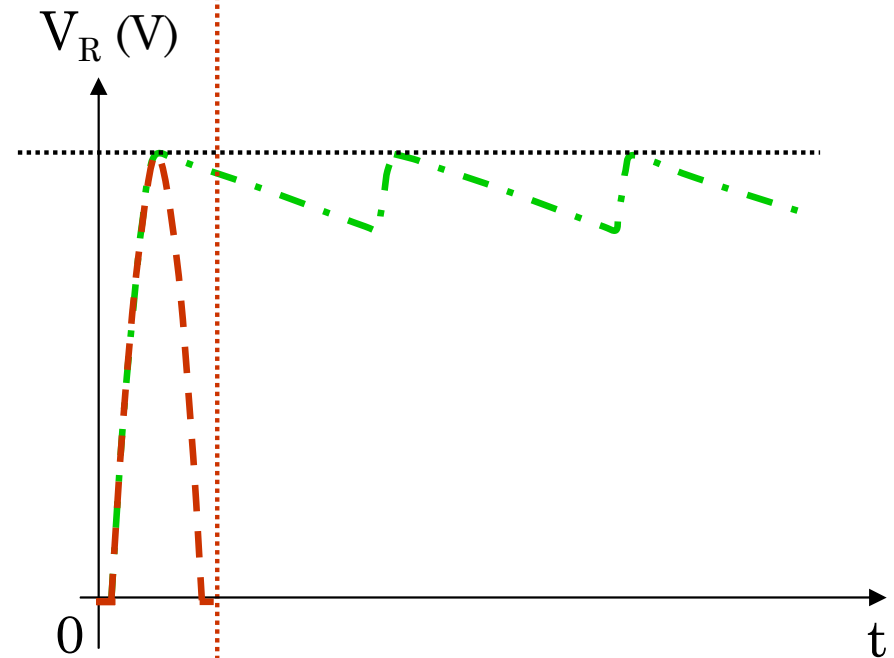
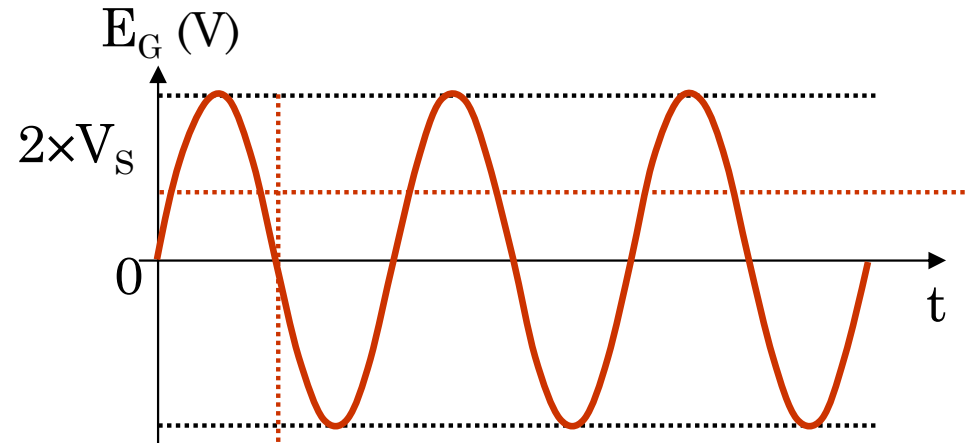
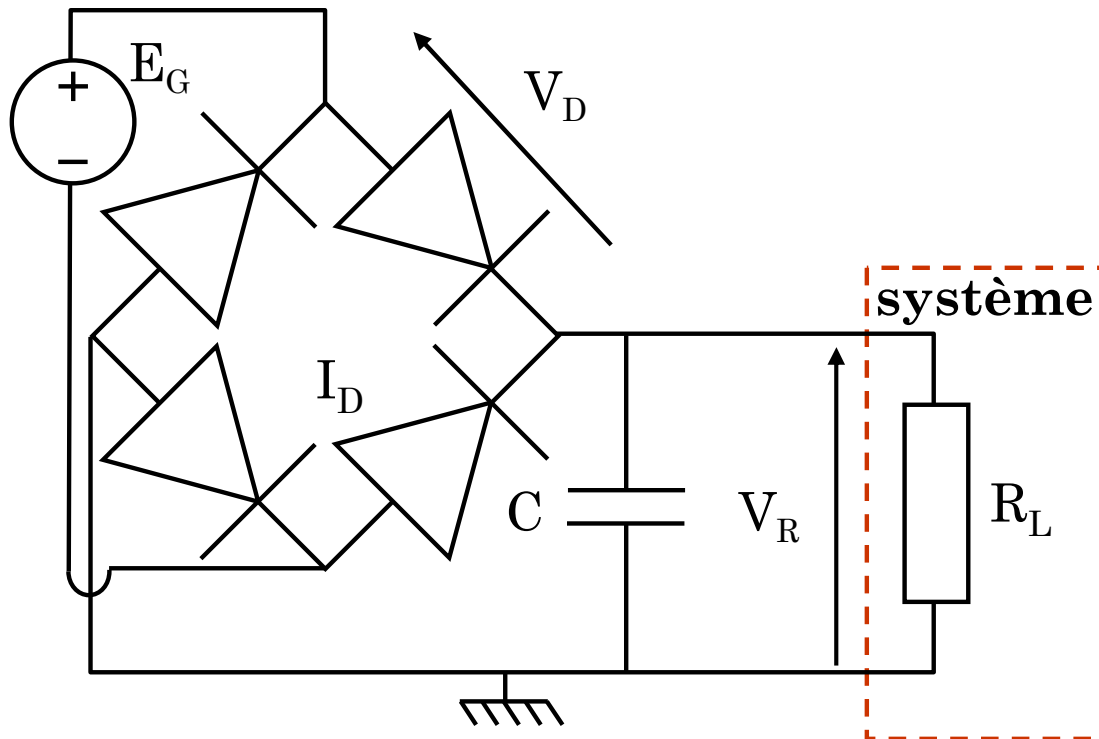
## III.2. Redressement double alternance

- Un récupère l'alternance négative et donc son énergie.



## III.2. Redressement double alternance

### □ Alternance positive



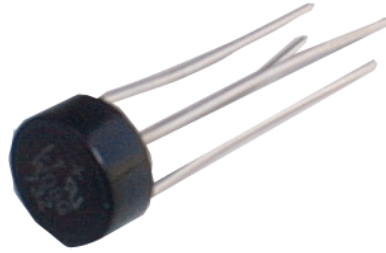


## III.2. Redressement double alternance

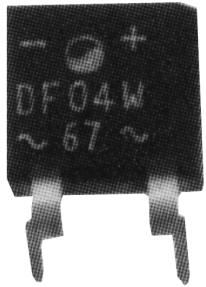
### □ Exemples de pont de diodes



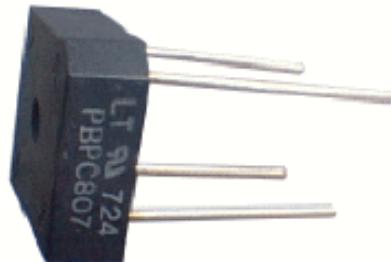
1,5 A - 80 V



1,5 A - 1000 V



1 A - 80 V



5 A - 100 V



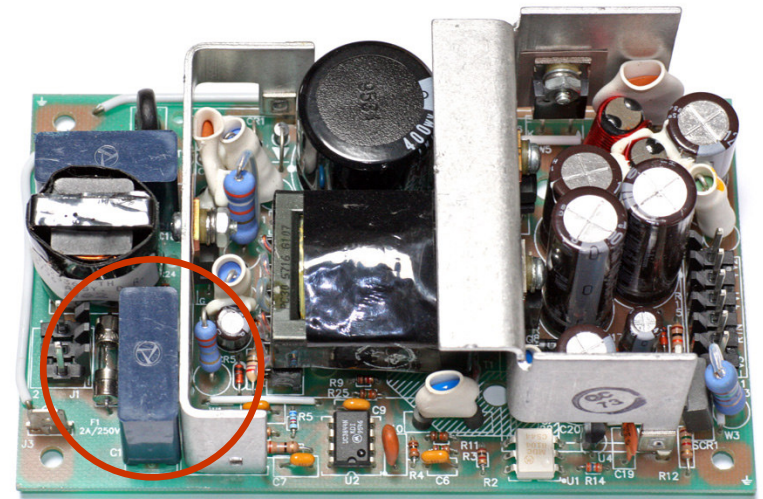
35 A - 200 V



50 A - 600 V



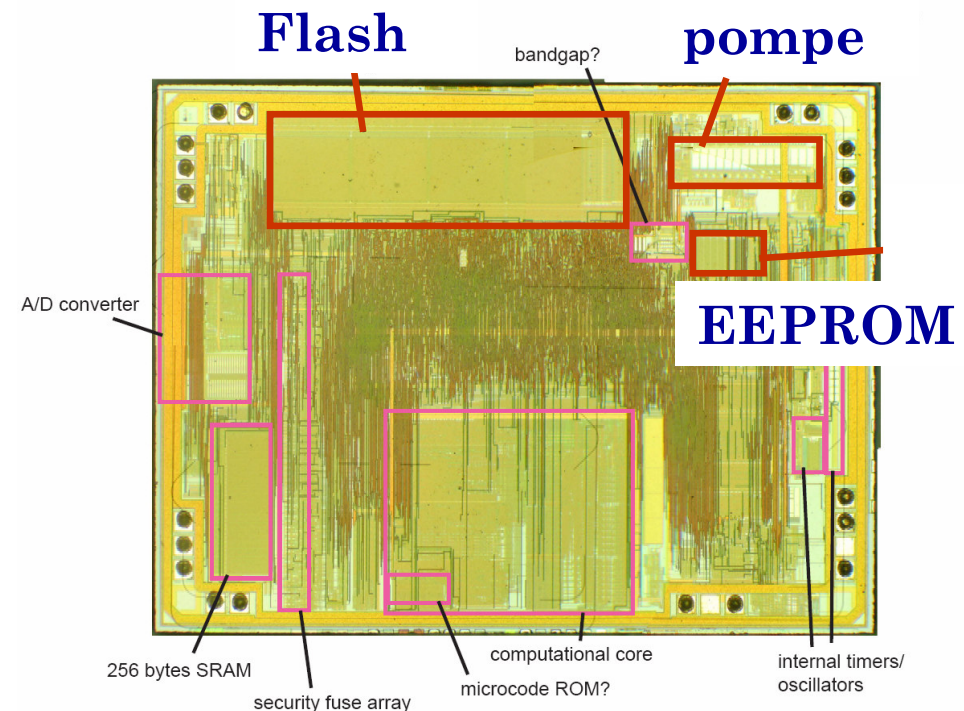
Alimentation train électrique



Alimentation à découpage

## III.3. Pompe de charges

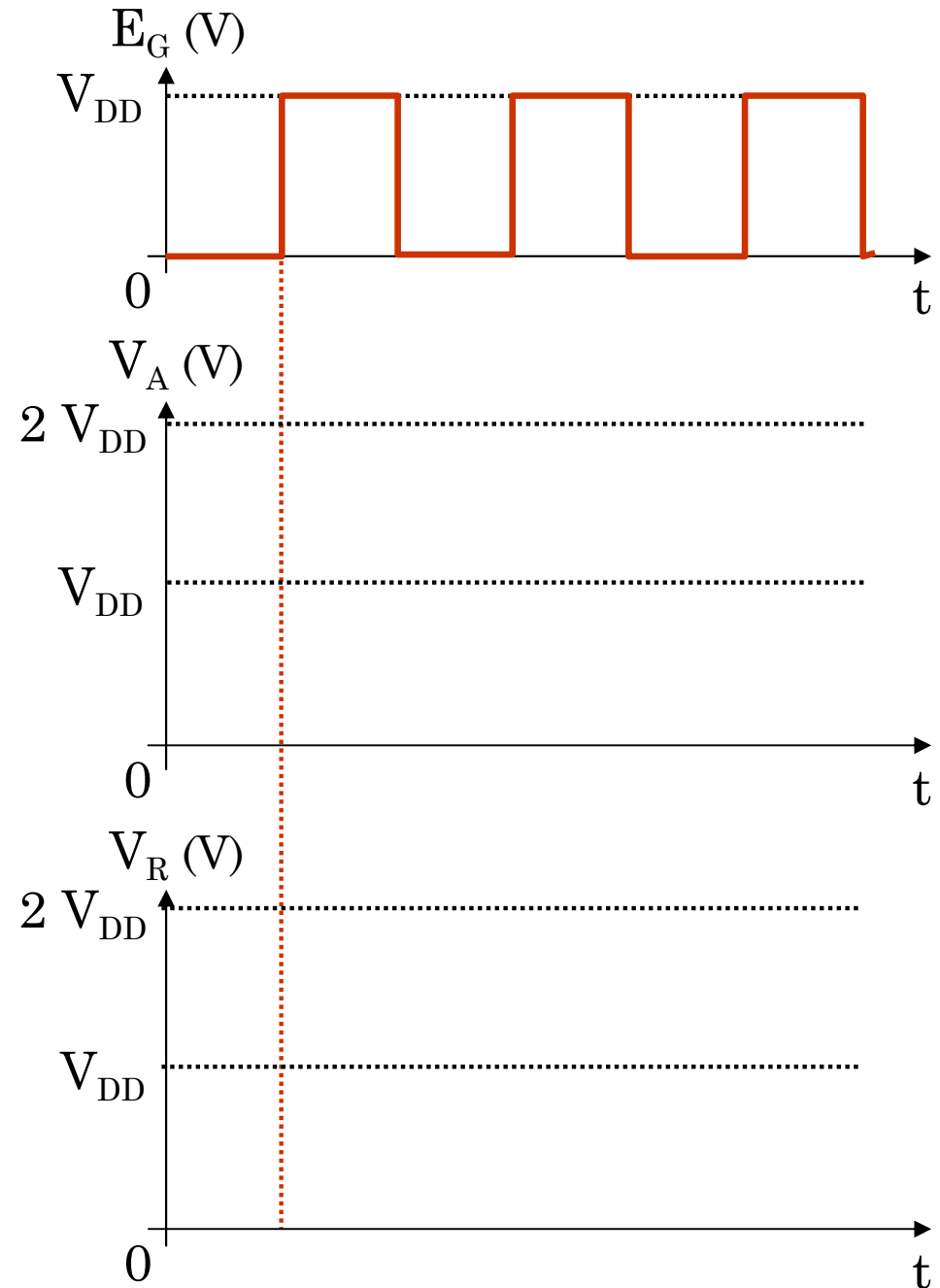
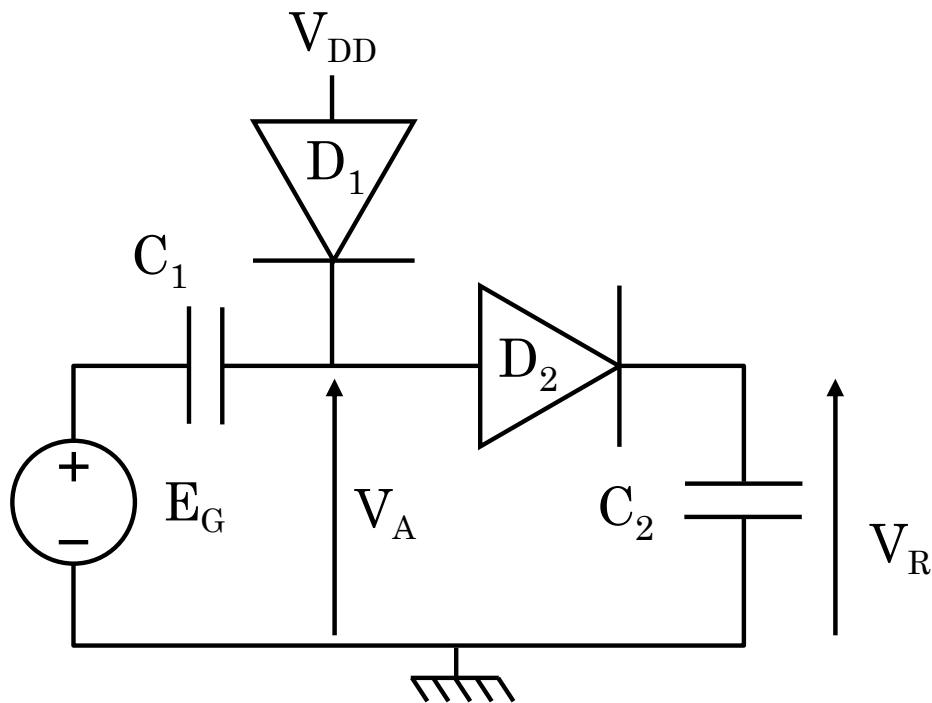
- Les cartes à puces, étiquettes électroniques, des lecteurs MP3, téléphones portables, appareils photos et d'une manière générale les circuits intégrés montés sur des supports portables embarquent des mémoires EEPROM et Flash.
- Ces mémoires permettent de stocker des données (code, photos, mots de passe...) de façon permanente.
- La programmation nécessite des tensions typiquement de l'ordre de 15 à 20 V alors que la tension d'alimentation d'un circuit intégré n'est que de l'ordre de 3 à 5 V.
- Il faut donc intégrer des survolteurs qui dans ce cas seront des pompes de charges.



## III.3. Pompe de charges

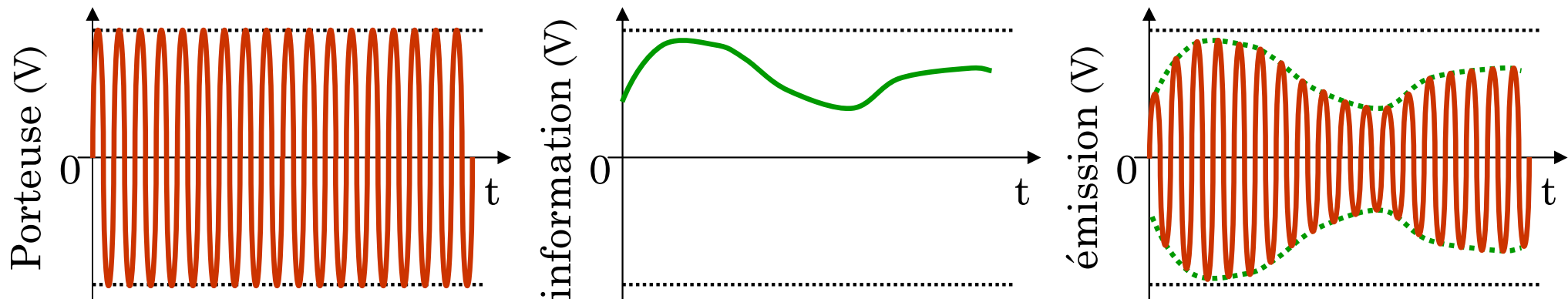
### □ Le doubleur de tension

- On suppose :  $V_S = 0$  et  $C_1 = C_2$
- Etat initial :  $C_1$  et  $C_2$  déchargées

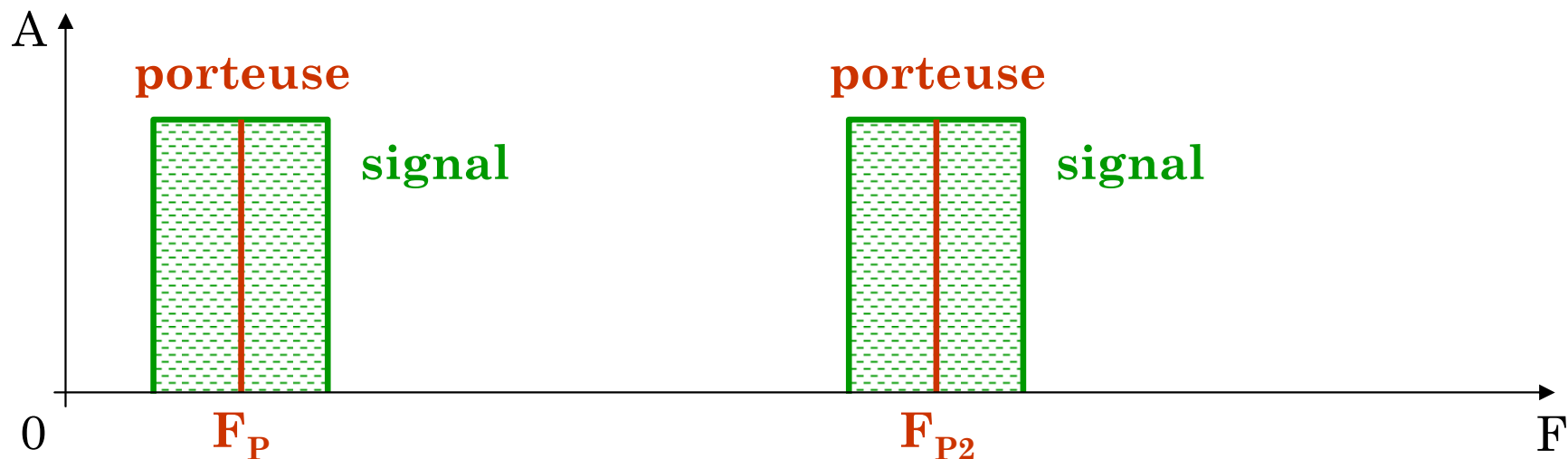


## III.4. Récepteur radio

### □ Modulation d'amplitude



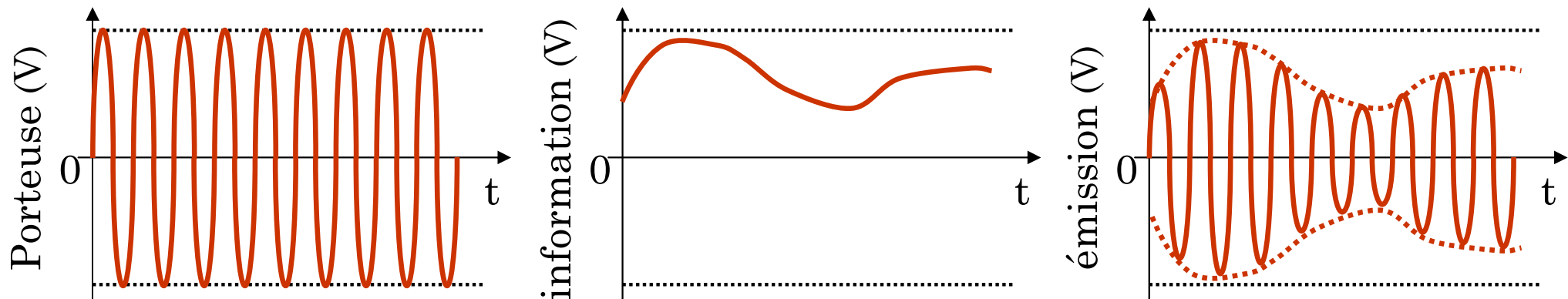
- Une porteuse (sinusoïde à une certaine fréquence) et modulée en amplitude par le signal information (morse, musique...)





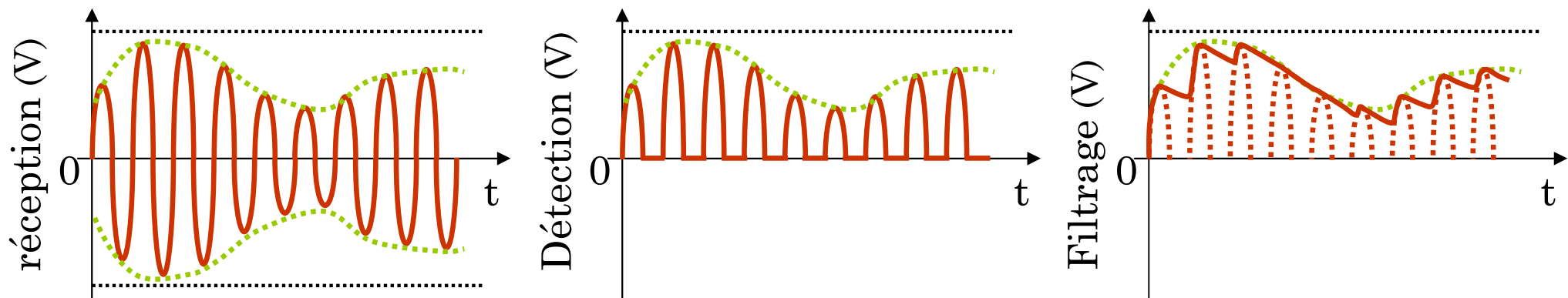
## III.4. Récepteur radio

### □ Modulation d'amplitude (AM)



- Une porteuse (sinusoïde à une certaine fréquence) et modulée en amplitude par le signal information (morse, musique...)

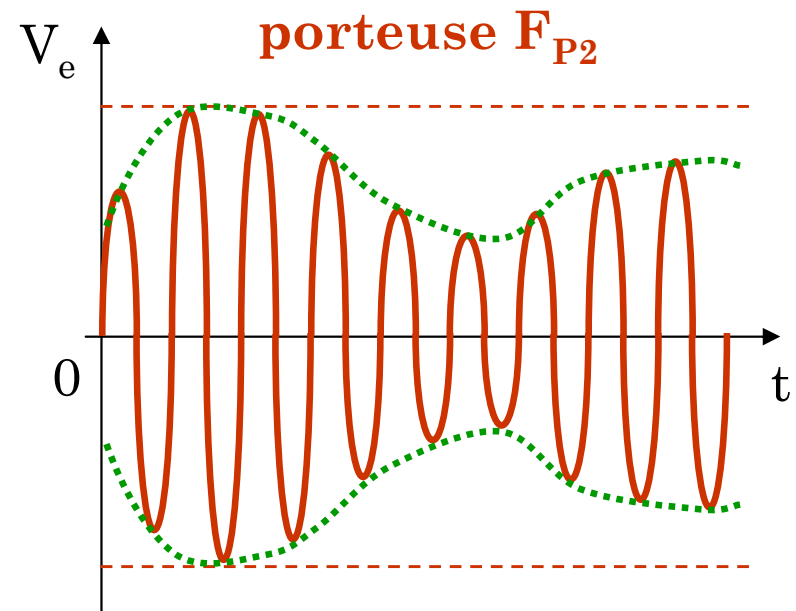
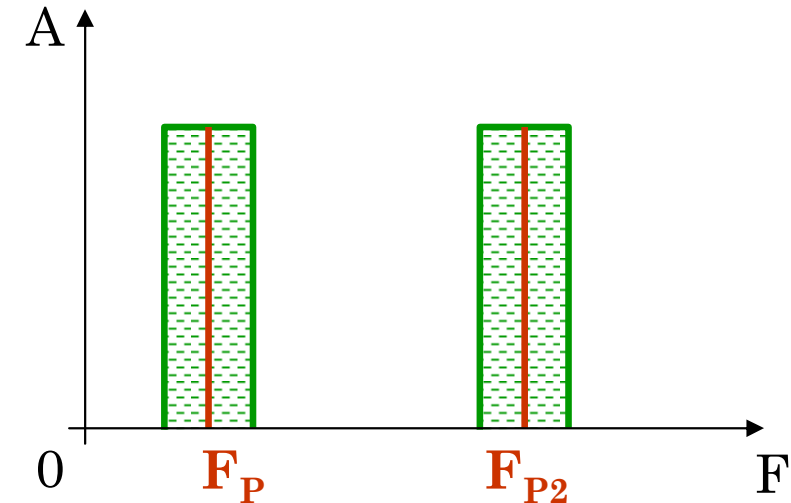
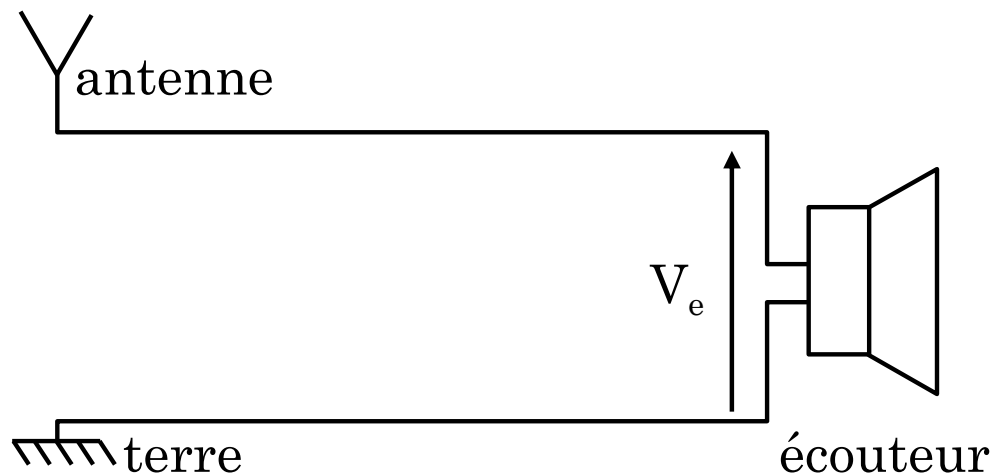
### □ Démodulation d'amplitude



## III.4. Récepteur radio

### □ Le poste à Galène

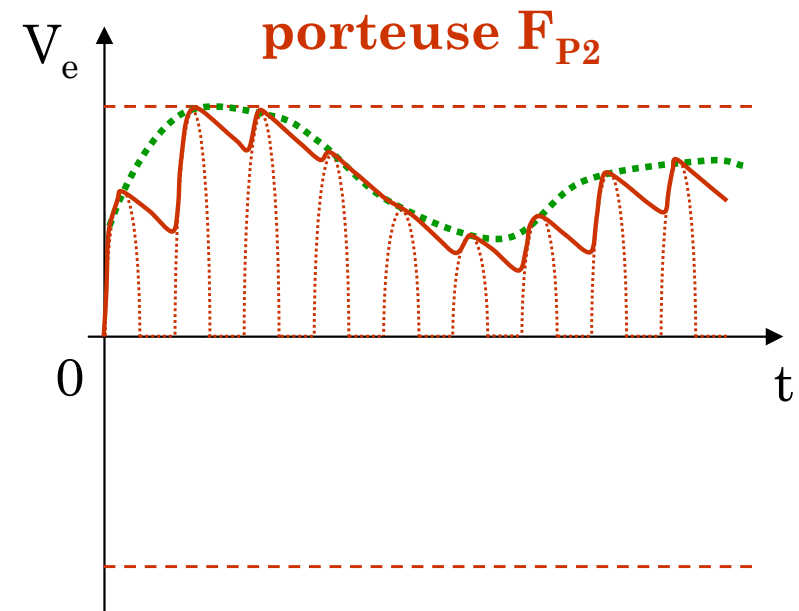
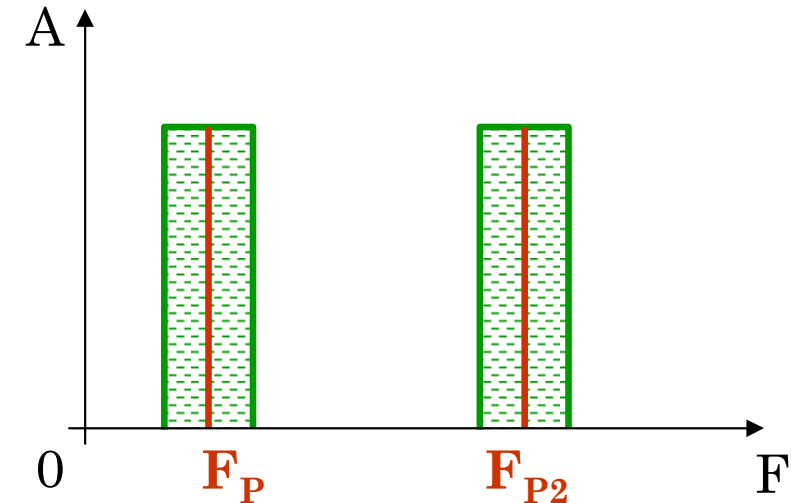
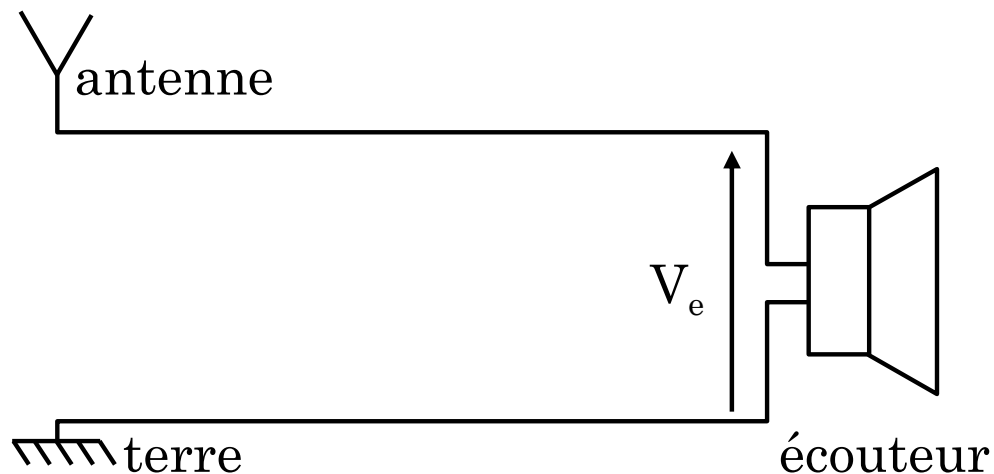
- Récepteur radio qui ne nécessite pas d'alimentation.
- L'antenne reçoit toutes les fréquences.



## III.4. Récepteur radio

### □ Le poste à Galène

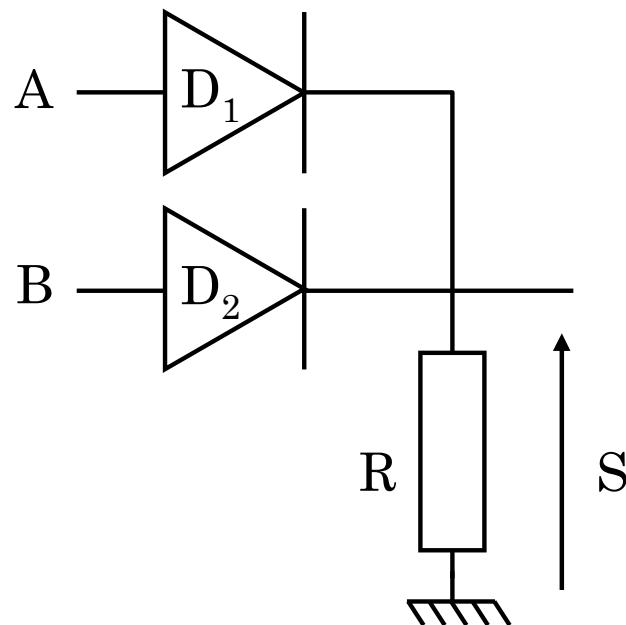
- Récepteur radio qui ne nécessite pas d'alimentation.
- L'antenne reçoit toutes les fréquences.



## III.5. La logique à diode

- Les circuits logiques constituent plus de 90 % des circuits intégrés que nous utilisons au quotidien.
- Bien qu'ils soient réalisés à partir de transistors MOS (Métal – Oxyde – Semi-conducteur), on peut utiliser des diodes pour obtenir les fonctions de base.

### □ Exemple : la porte " OU "

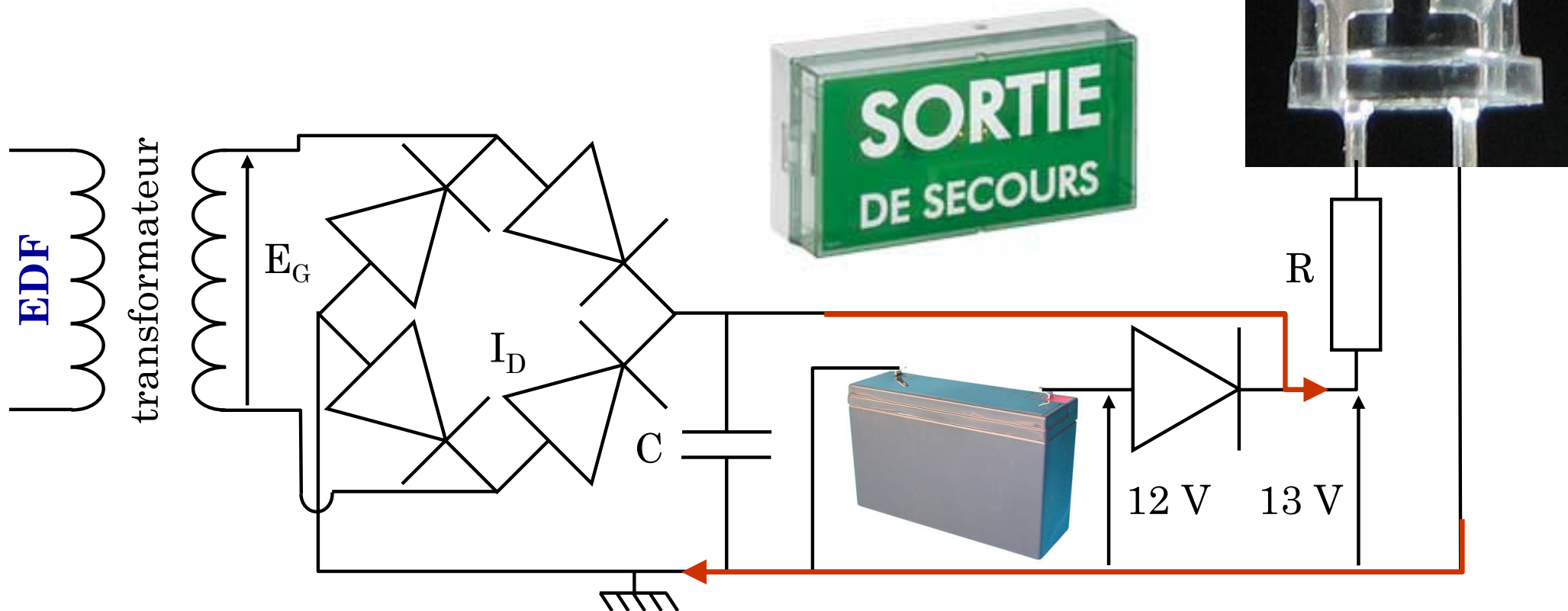


A	B	S
0	0	



## III.6. Double alimentation

- Lorsque l'alimentation est présente, la LED est alimentée par le pont de diodes.



## III.7. Diode de protection

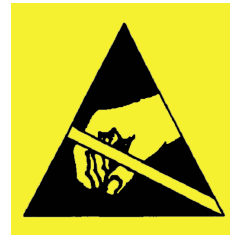
### □ Protection contre une inversion de polarité

- Pour protéger un système contre les inversions de polarité, il suffit de placer une diode entre l'alimentation et le système.
- Si l'alimentation est bien raccordée, le système fonctionne. Attention à la chute de tension due au seuil de la diode.
- Si l'alimentation est mal raccordée, la diode bloque le courant et le système n'est pas détruit.

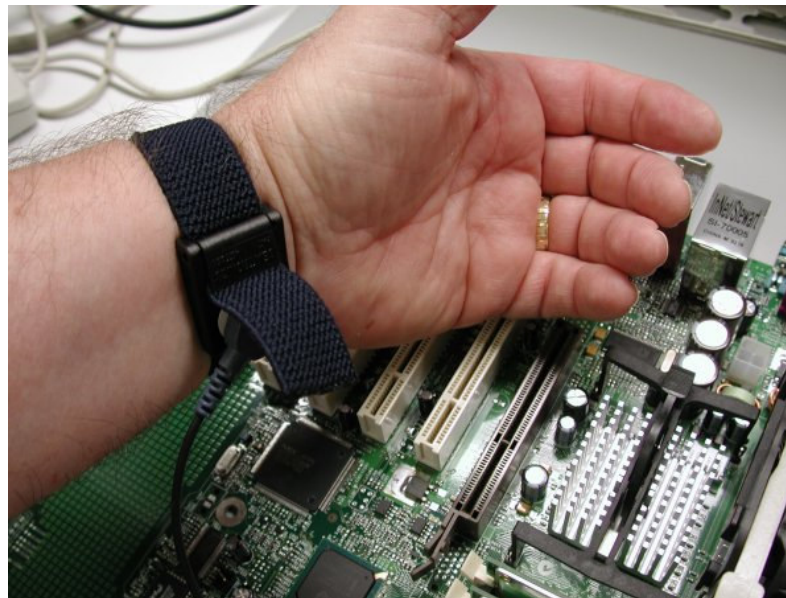
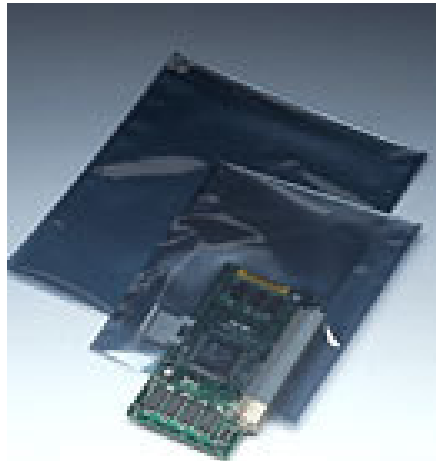
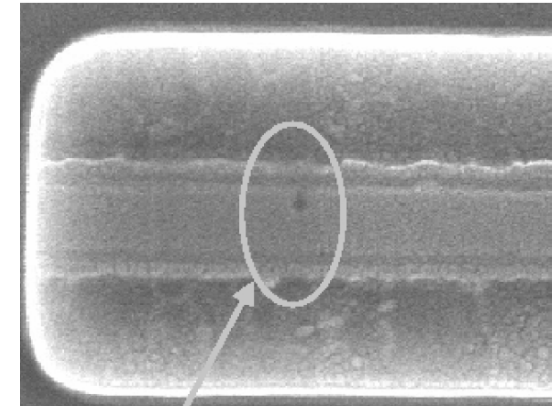


## III.7. Diode de protection

### □ Protection de circuits intégrés



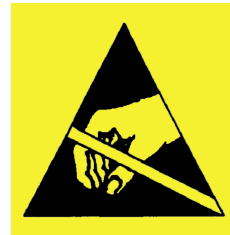
- Il faut prendre certaines précautions pour manipuler des circuits intégrés (CI).
- L'électricité statique détruit des transistors MOS.



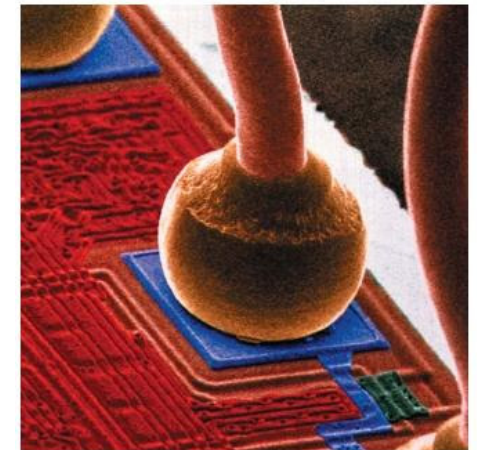
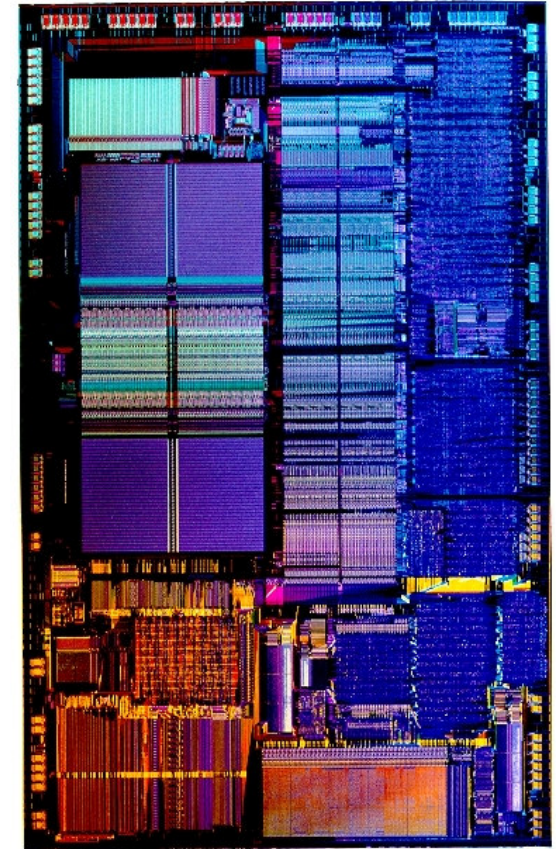
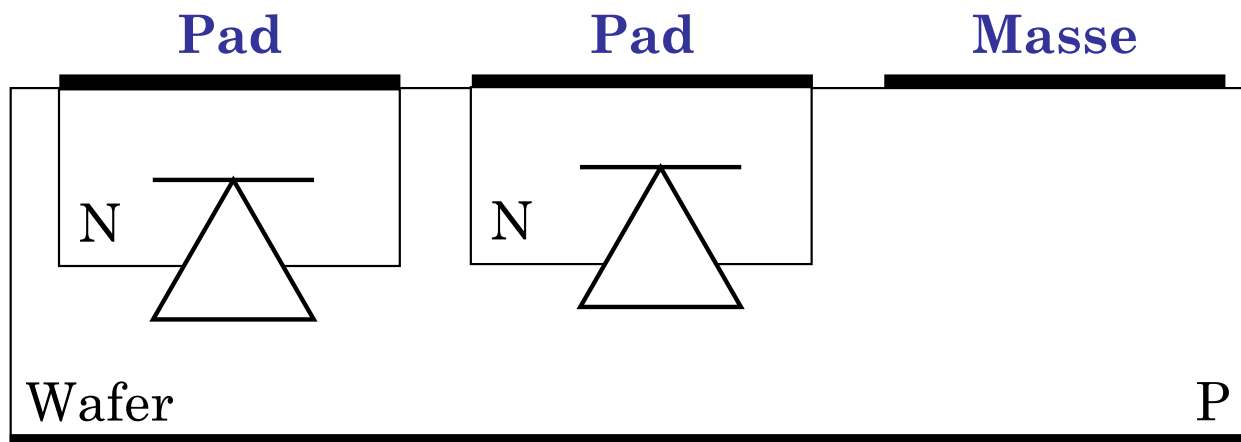


## III.7. Diode de protection

### □ Protection de circuits intégrés

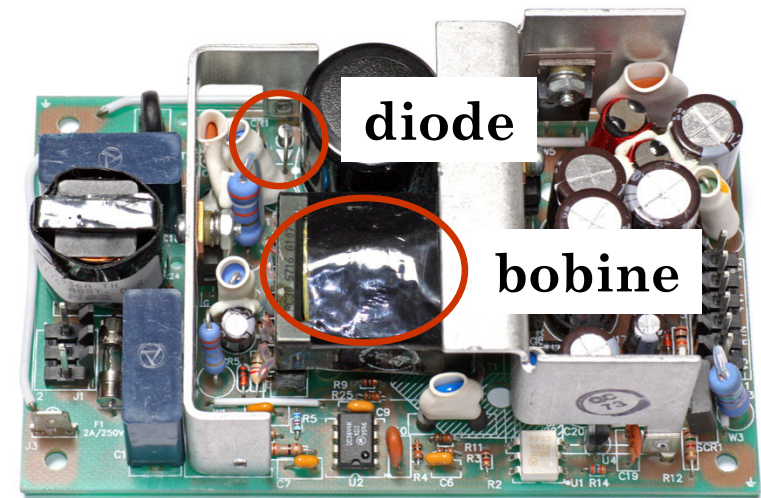
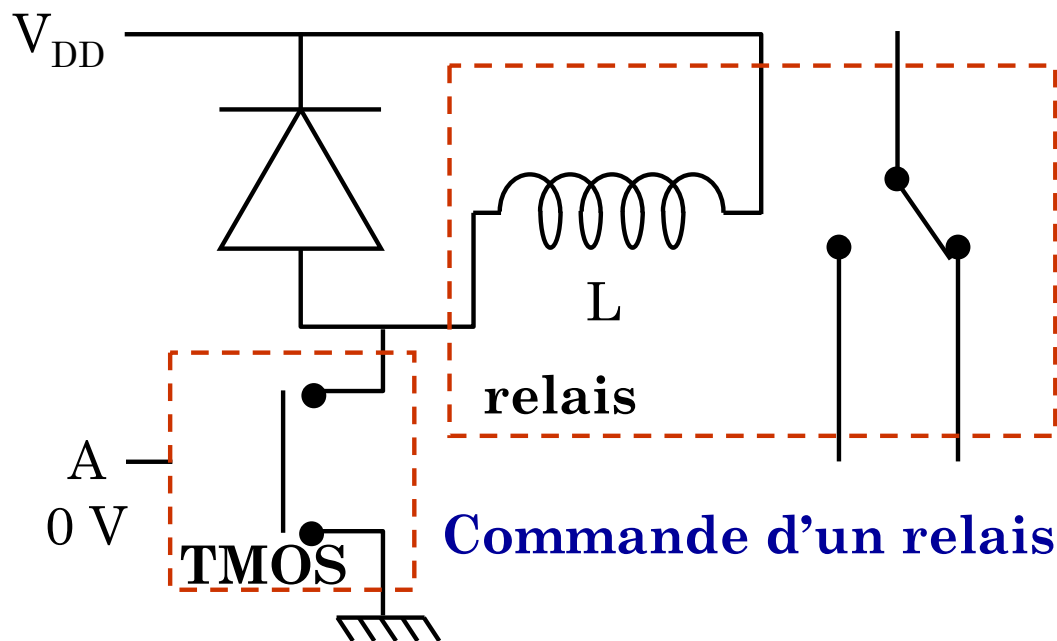


- Il faut prendre certaines précautions pour manipuler des circuits intégrés (CI).
- L'électricité statique détruit des transistors MOS.
- Insertion d'une diode (de grande dimension) sur les plots d'entrée/sortie des CI.



## III.7. Diode de roue libre

- La diode de roue libre sert à évacuer l'énergie emmagasinée par une bobine.
- On prend ici pour exemple la commande d'un relais.
- $A = 0 \text{ V}$ , le TMOS est un circuit ouvert.
- $A = V_{DD} \text{ V}$ , le TMOS est un circuit fermé : un courant circule dans la bobine et basculement du relais. La diode est bloquée.
- $A = 0 \text{ V}$ , la diode devient passante pour évacuer l'énergie de la bobine.



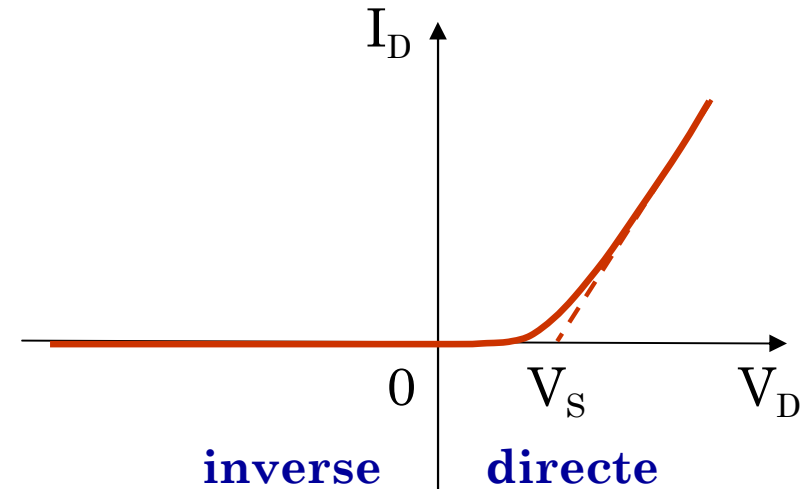
Alimentation à découpage

## IV.1. Approche classique

### □ Expression du courant

- Il est fréquent de modéliser le courant d'une diode par cette équation :

$$I_D = I_S \cdot \left[ \exp \left[ \frac{qV_D}{kT} \right] - 1 \right]$$



- ✓  $I_S$  (A) : dépend des paramètres technologiques de la diode
- ✓  $q$  (C) : valeur absolue de la charge de l'électron ( $1,6 \times 10^{-19}$  C)
- ✓  $k$  (J.K<sup>-1</sup>) : constante de Boltzmann ( $1,381 \times 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>)
- ✓  $T$  (K) : température ( $0^\circ\text{C} = 273,15$  K)

### □ Simplifications

- Si  $V_D \gg q/kT$  :  $I_D =$

## IV.2. Approche résistive

### □ Expression du courant

- L'expression du courant ne fait intervenir que deux paramètres :

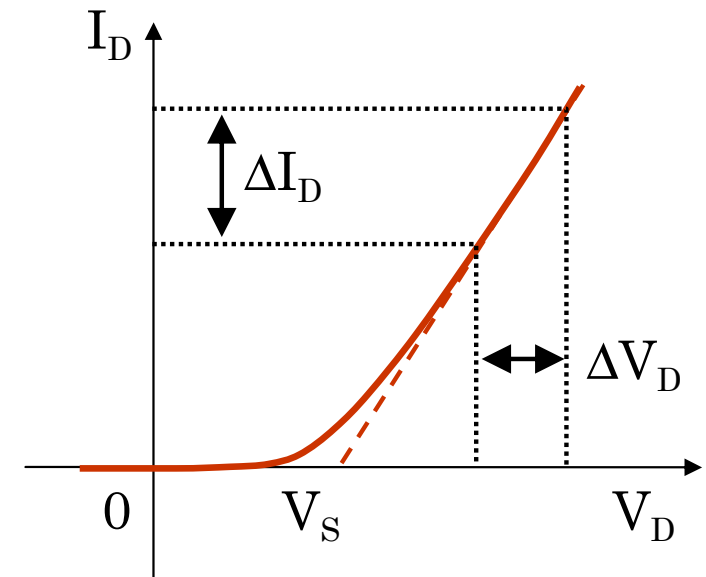
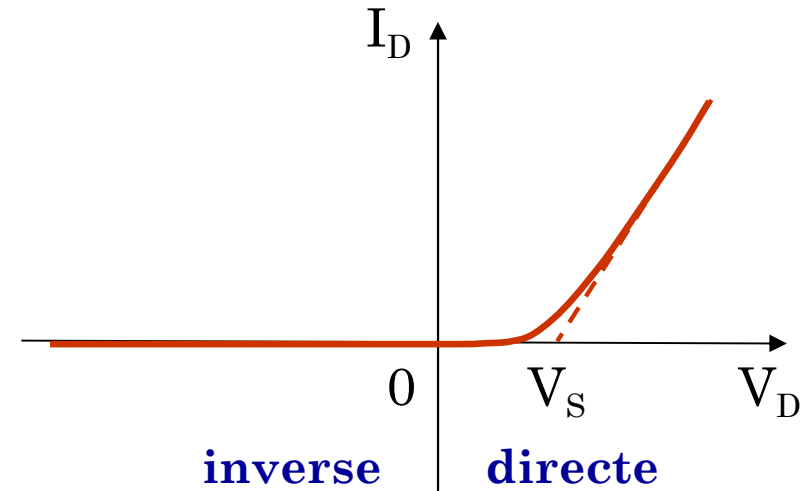
$$\begin{cases} I_D = \frac{1}{R_D} (V_D - V_S) & \text{si } V_D > V_S \\ I_D = 0 & \text{si } V_D \leq V_S \end{cases}$$

✓  $V_S$  (V) : tension de seuil de la diode

✓  $R_D$  ( $\Omega$ ) : résistance série de la diode

### □ Détermination de la résistance série

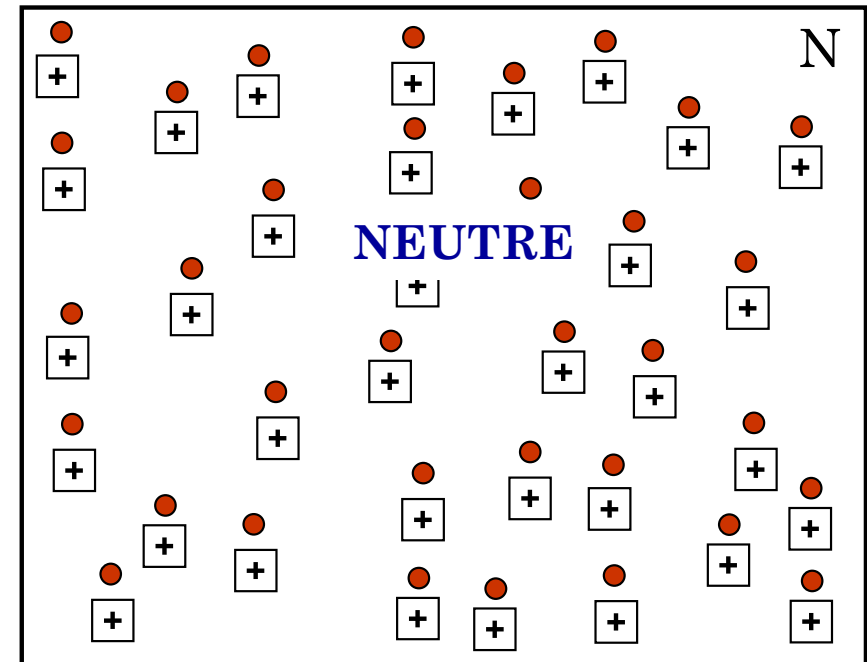
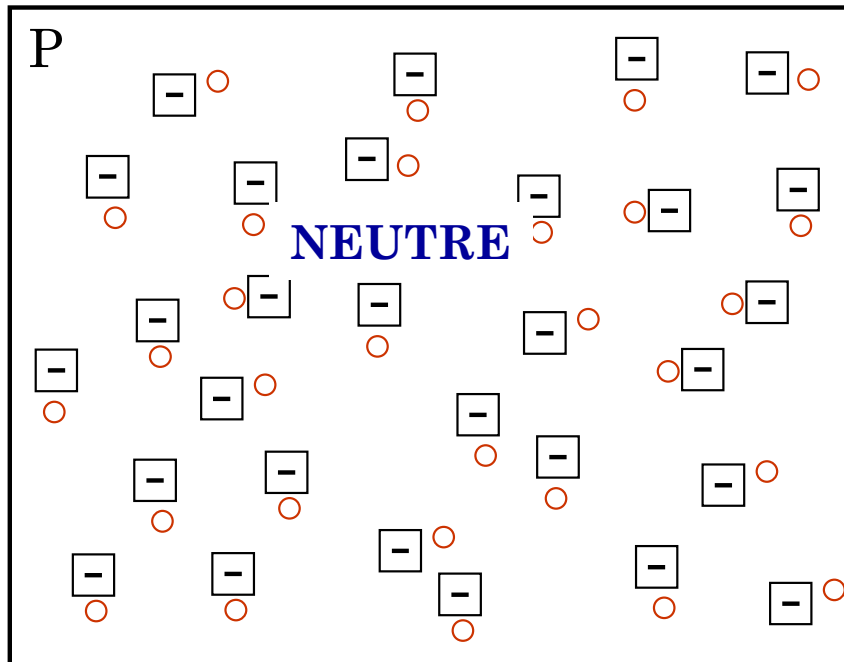
$$R_D = \frac{dV_D}{dI_D} = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D}$$





## IV.3. Modèle physique

### □ Formation de la diode PN



□ charge fixe négative

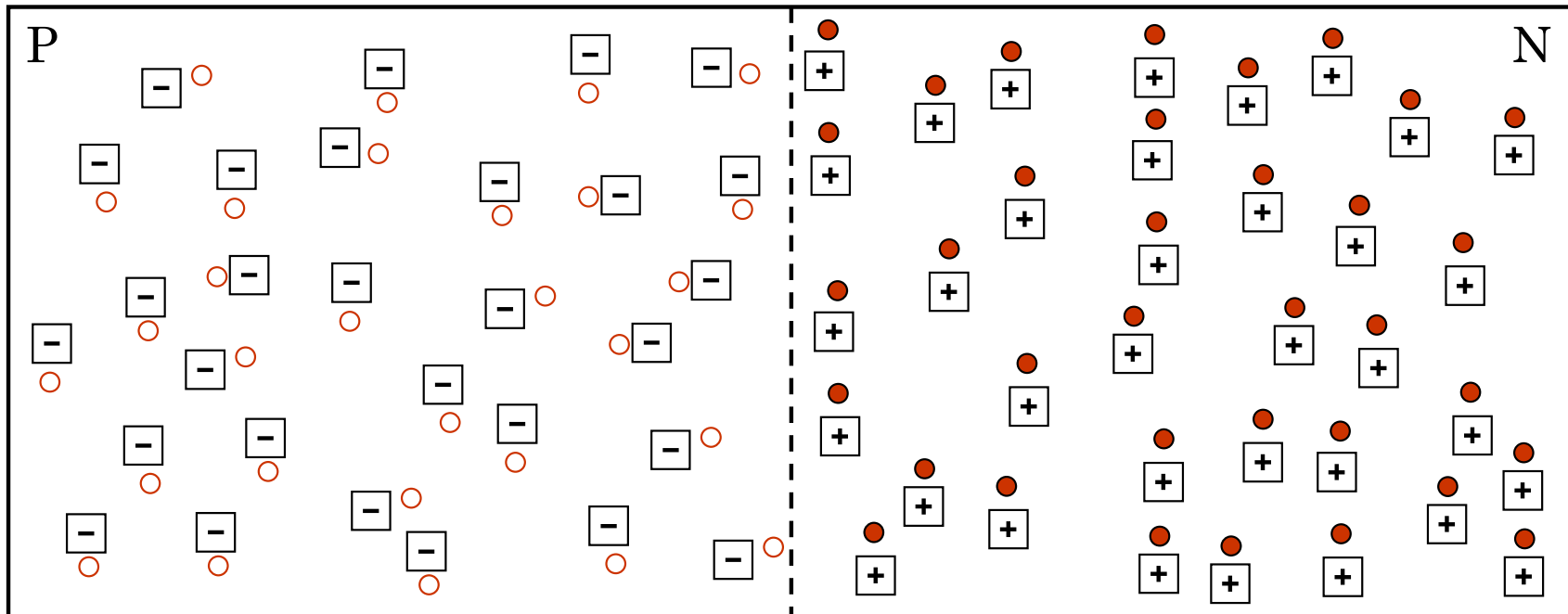
○ trou (charge  $> 0$ )

□ charge fixe positive

● électron (charge  $< 0$ )

## IV.3. Modèle physique

### □ Formation de la diode PN



charge fixe négative



charge fixe positive



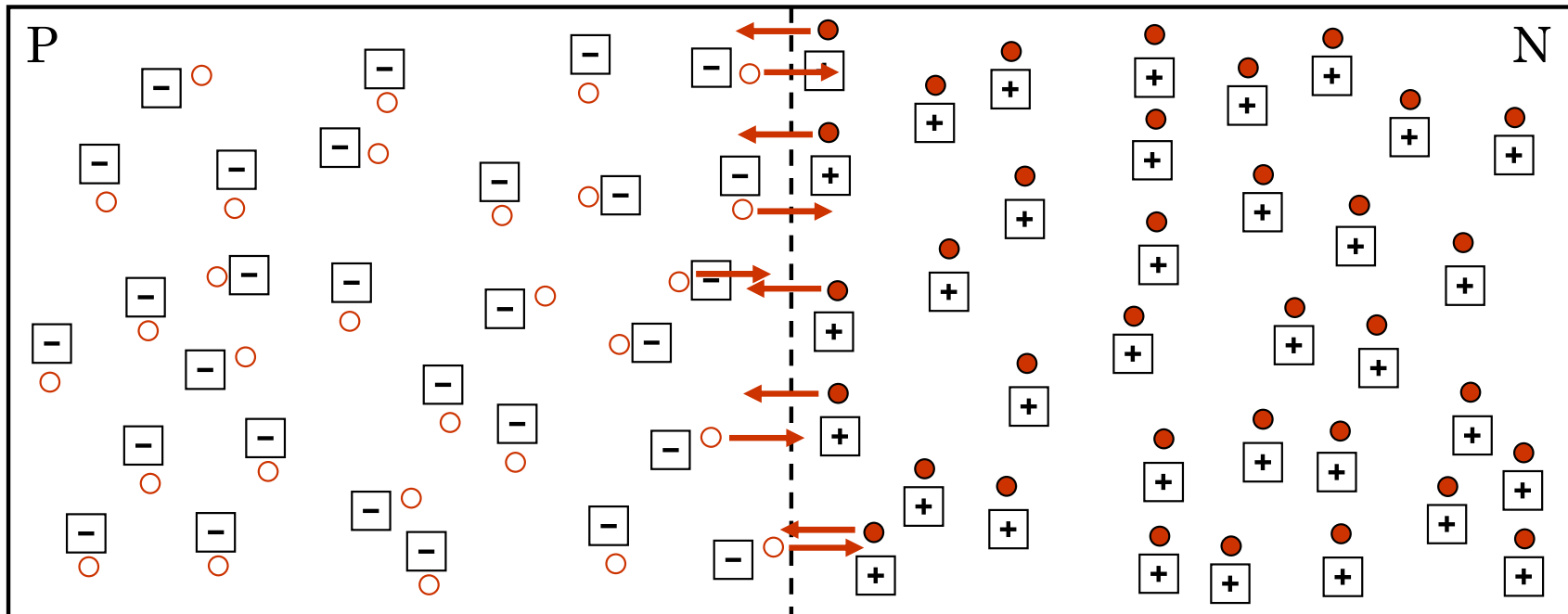
trou (charge  $> 0$ )



électron (charge  $< 0$ )

## IV.3. Modèle physique

### □ Formation de la diode PN



charge fixe négative



charge fixe positive



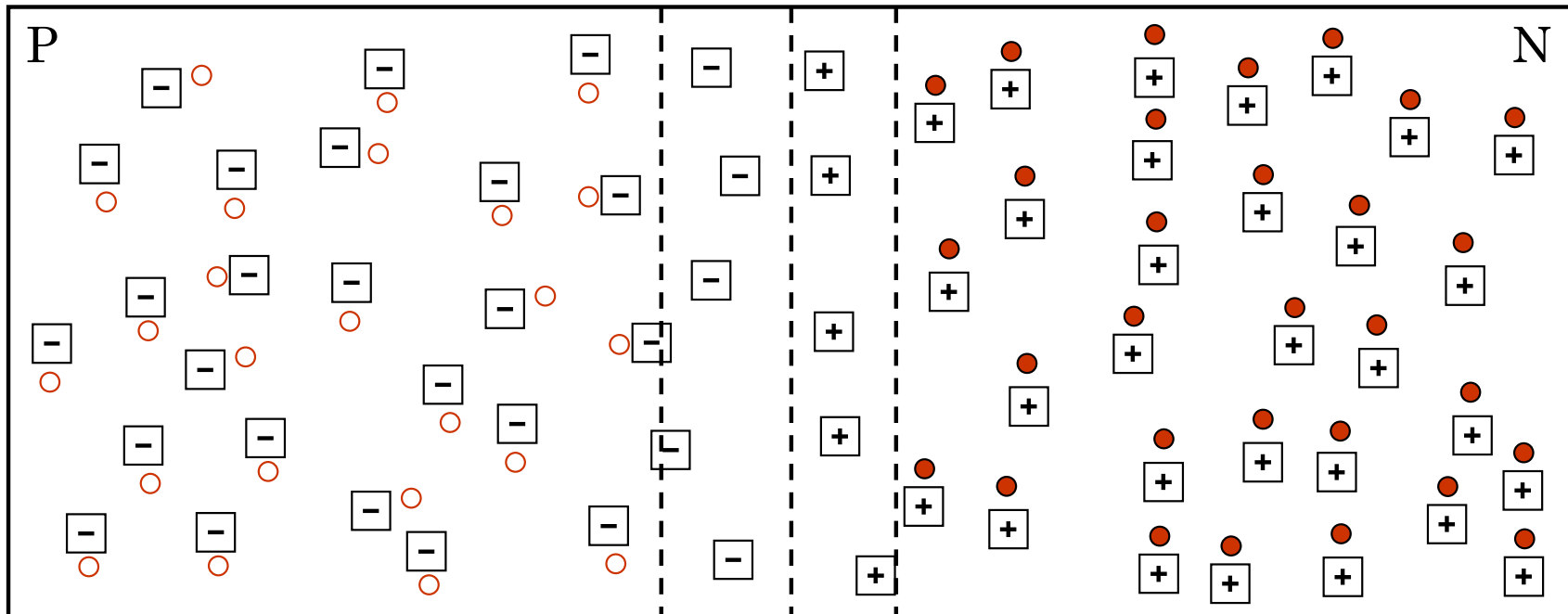
trou (charge  $> 0$ )



électron (charge  $< 0$ )

## IV.3. Modèle physique

### □ Formation de la diode PN



charge fixe négative



charge fixe positive



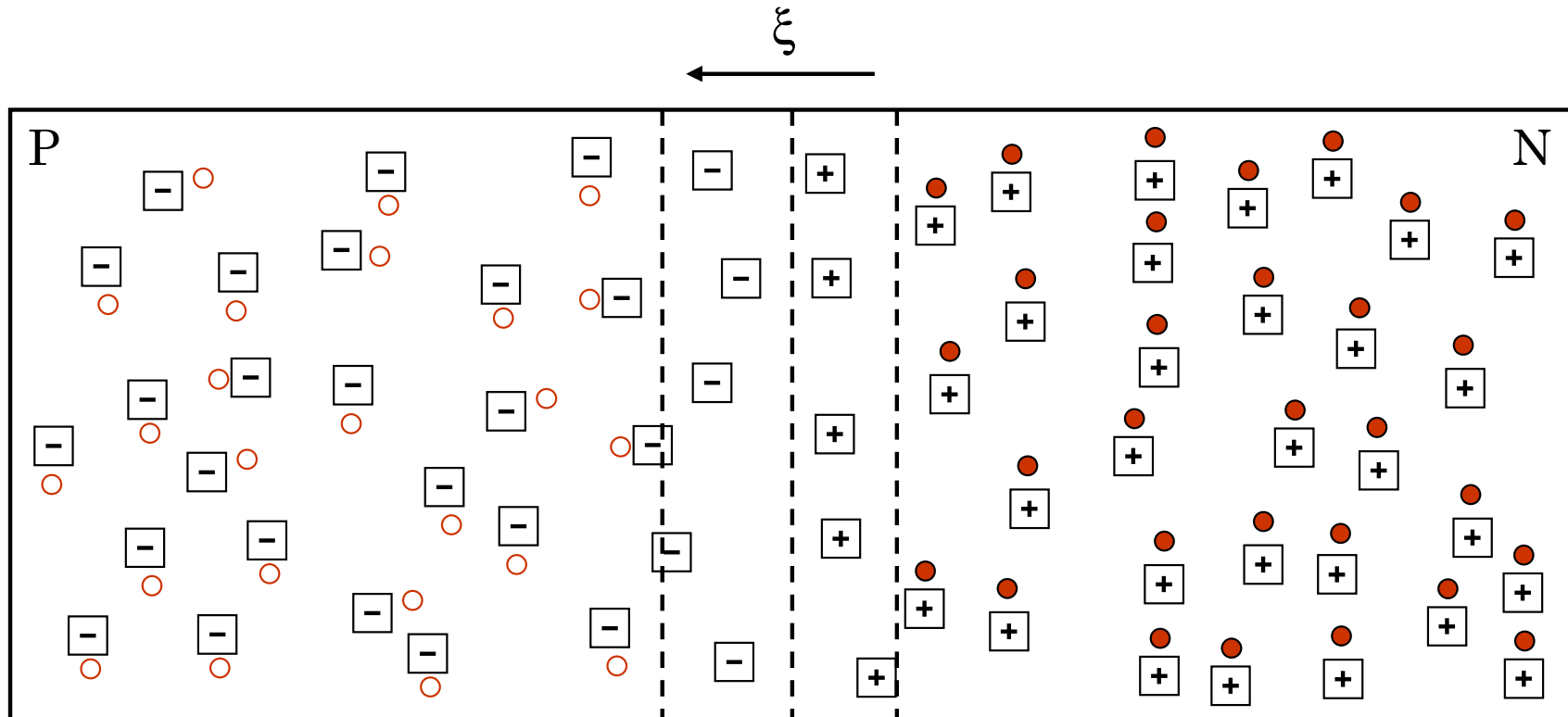
trou (charge  $> 0$ )



électron (charge  $< 0$ )

## IV.3. Modèle physique

### □ Formation de la diode PN



charge fixe négative



charge fixe positive



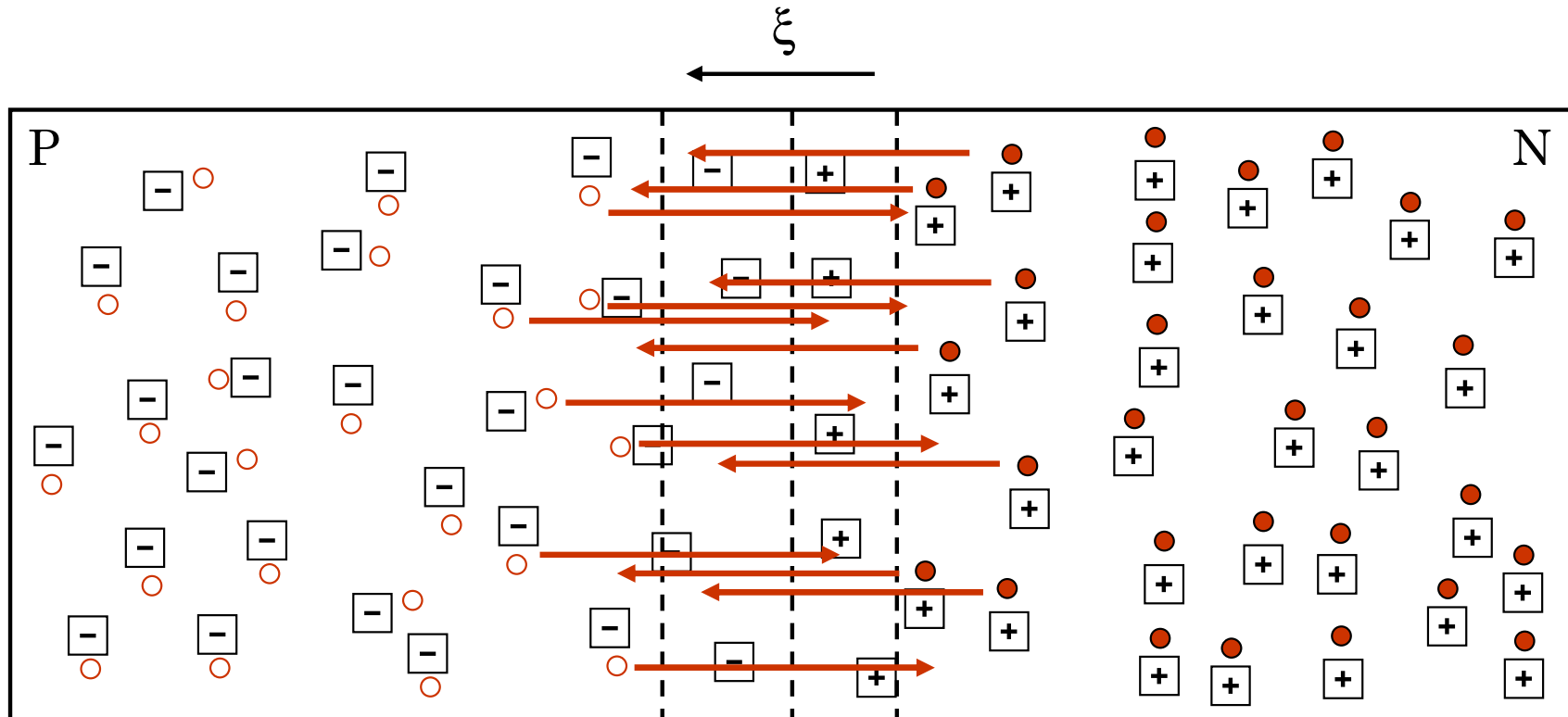
trou (charge  $> 0$ )



électron (charge  $< 0$ )

## IV.3. Modèle physique

### □ Formation de la diode PN



charge fixe négative



charge fixe positive



trou (charge  $> 0$ )

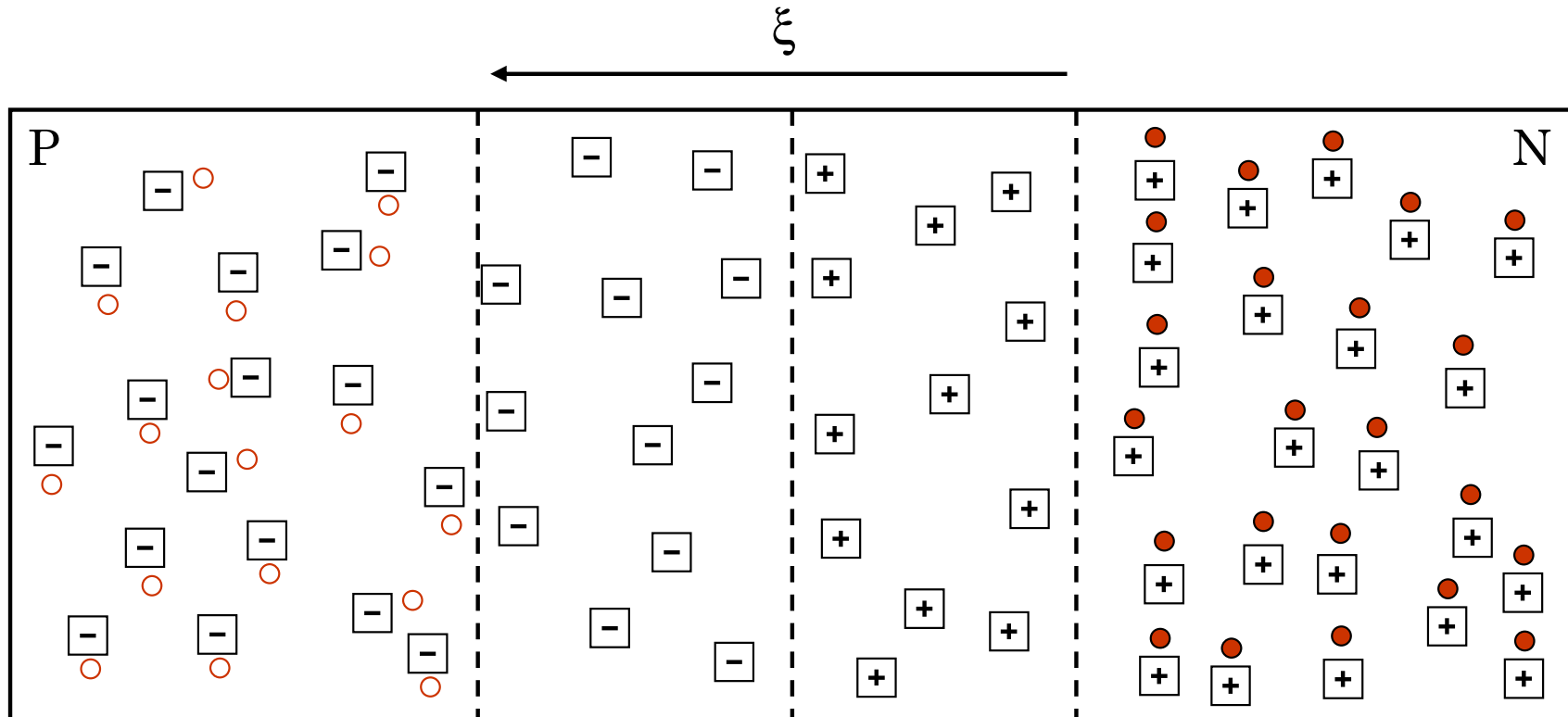


électron (charge  $< 0$ )



## IV.3. Modèle physique

### □ Formation de la diode PN



□ charge fixe négative

□ charge fixe positive

○ trou (charge  $> 0$ )

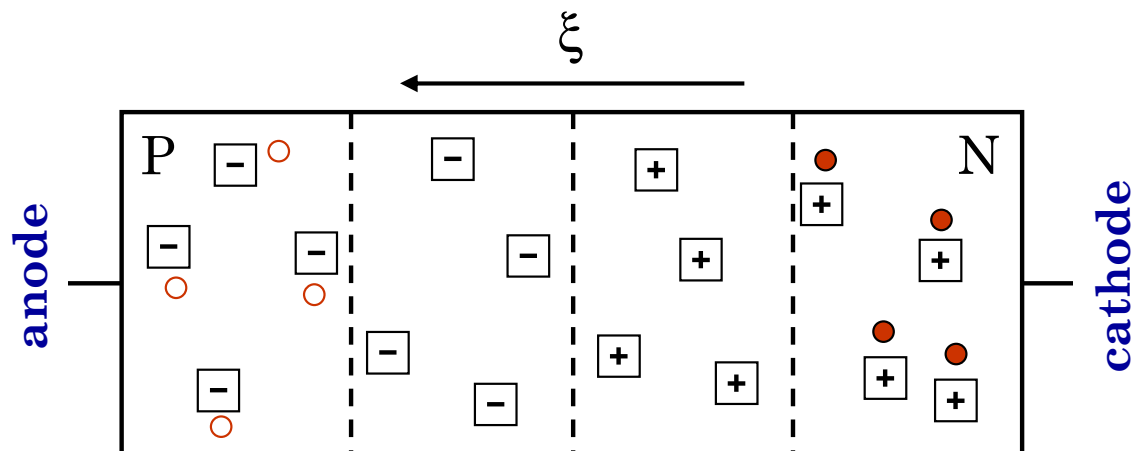
● électron (charge  $< 0$ )

## IV.3. Modèle physique

### □ Fonctionnement idéal de la diode PN

- Existence d'un champ électrique,  $\xi$ , interne à la diode

- Courant : 
$$I_D = I_S \cdot \left[ \exp \left[ \frac{qV_D}{\eta kT} \right] - 1 \right] \quad 1 < \eta < 2$$



## IV.3. Modèle physique

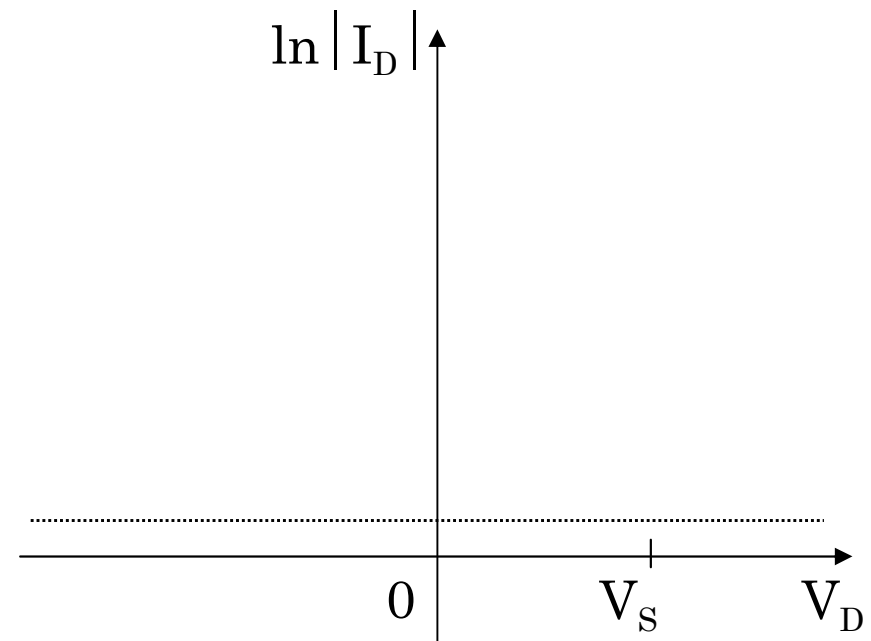
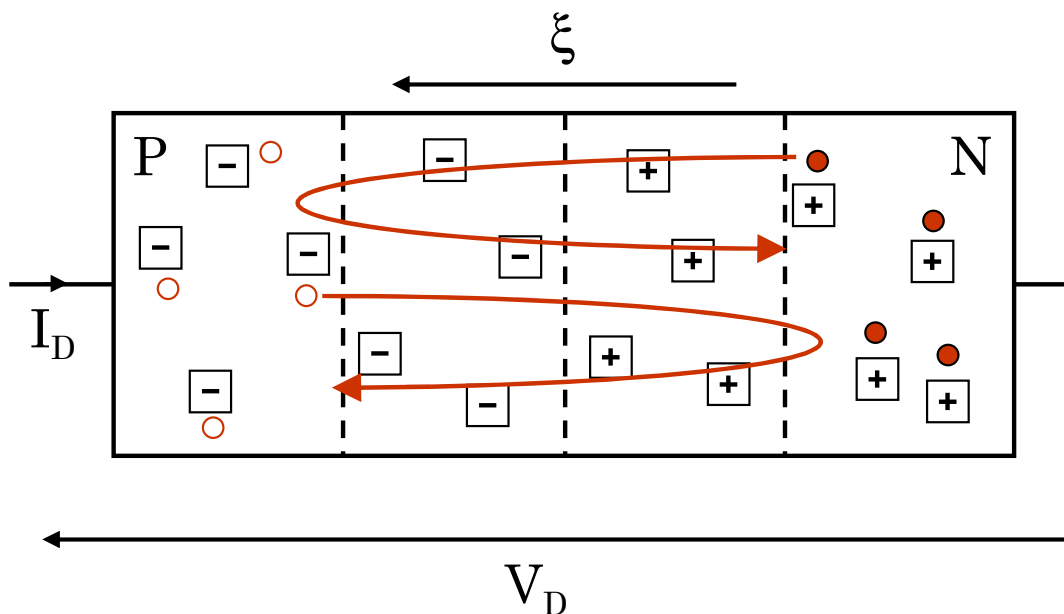
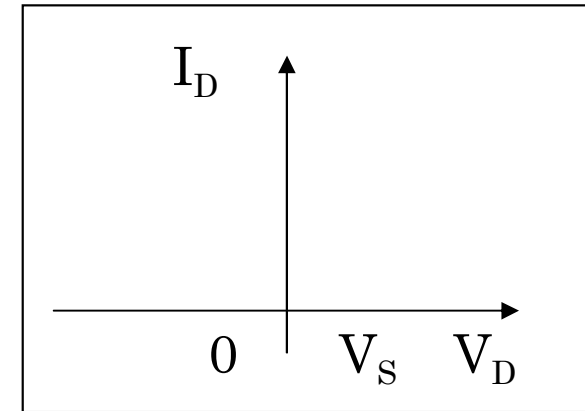
### □ Fonctionnement idéal de la diode PN

- Existence d'un champ électrique,  $\xi$ , interne à la diode

- Courant :

$$I_D = I_S \cdot \left[ \exp \left[ \frac{qV_D}{\eta kT} \right] - 1 \right] \quad 1 < \eta < 2$$

- Si  $V_D = 0$  alors  $I_D = 0$



## IV.3. Modèle physique

### □ Fonctionnement idéal de la diode PN

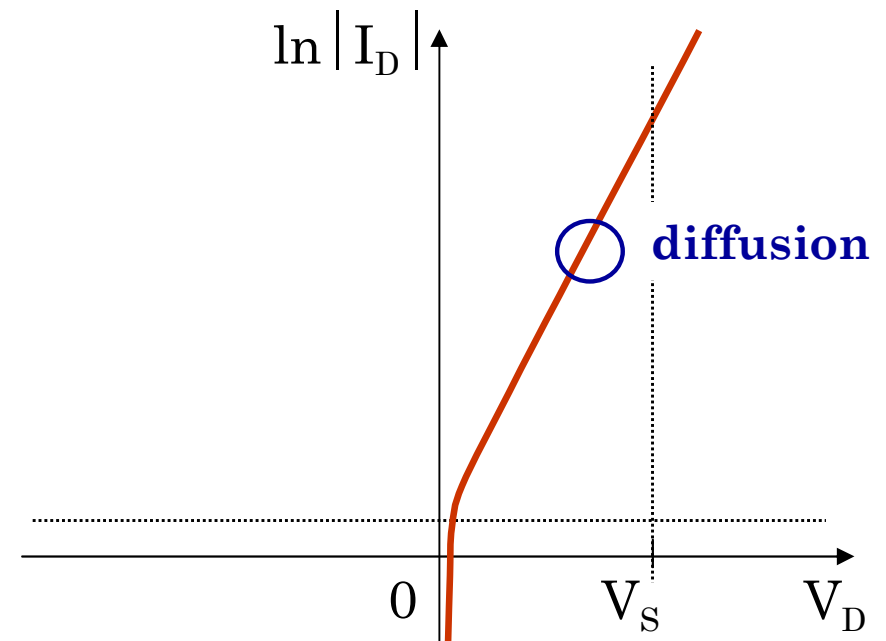
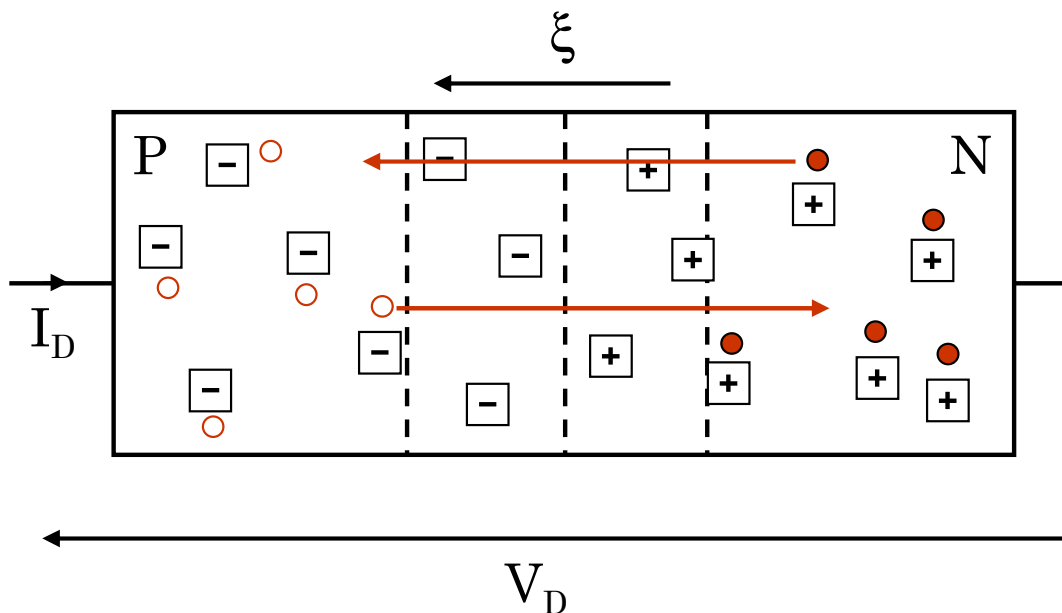
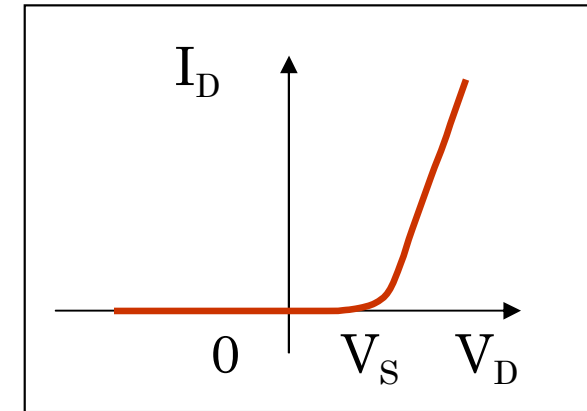
- Existence d'un champ électrique,  $\xi$ , interne à la diode

- Courant :

$$I_D = I_S \cdot \left[ \exp \left[ \frac{qV_D}{\eta kT} \right] - 1 \right] \quad 1 < \eta < 2$$

- Si  $V_D = 0$  alors  $I_D = 0$

- $V_D > 0$  : diminution du  $\xi$



## IV.3. Modèle physique

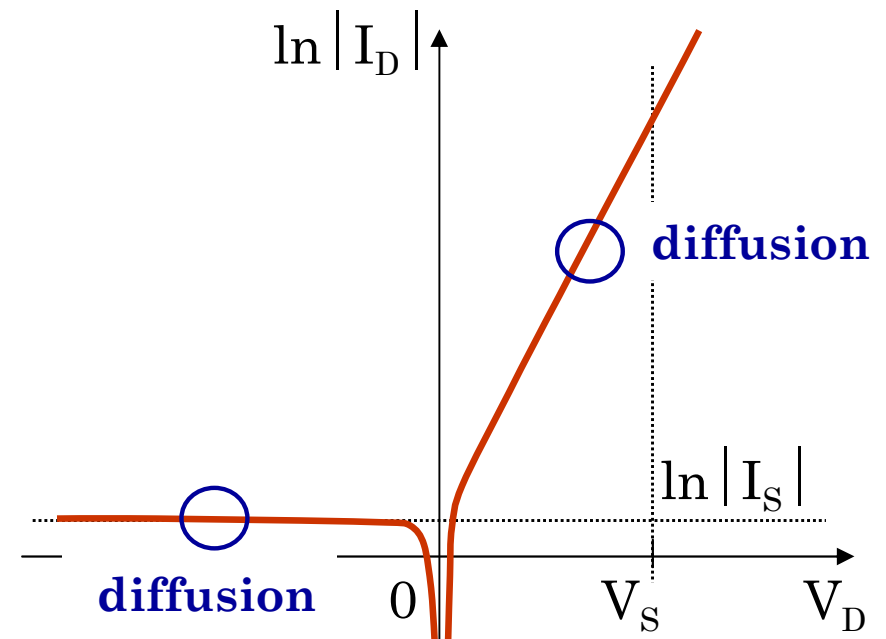
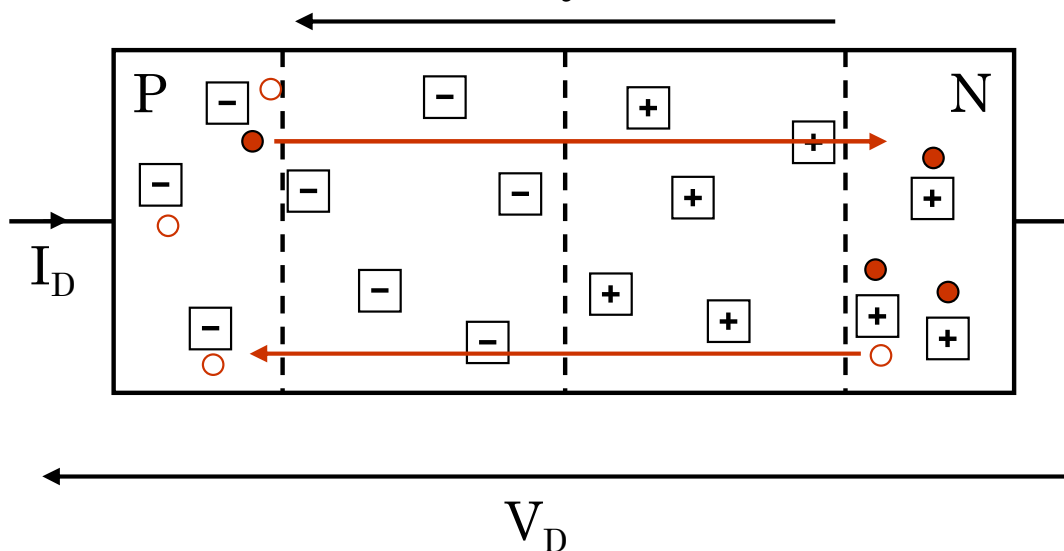
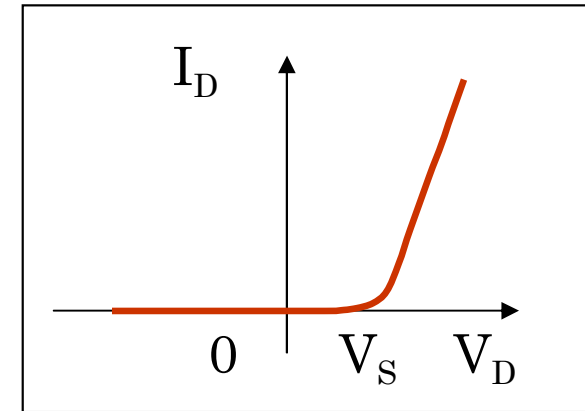
### □ Fonctionnement idéal de la diode PN

- Existence d'un champ électrique,  $\xi$ , interne à la diode

- Courant :

$$I_D = I_S \cdot \left[ \exp \left[ \frac{qV_D}{\eta kT} \right] - 1 \right] \quad 1 < \eta < 2$$

- Si  $V_D = 0$  alors  $I_D = 0$
- $V_D > 0$  : diminution du  $\xi$
- $V_D < 0$  : augmentation du  $\xi$



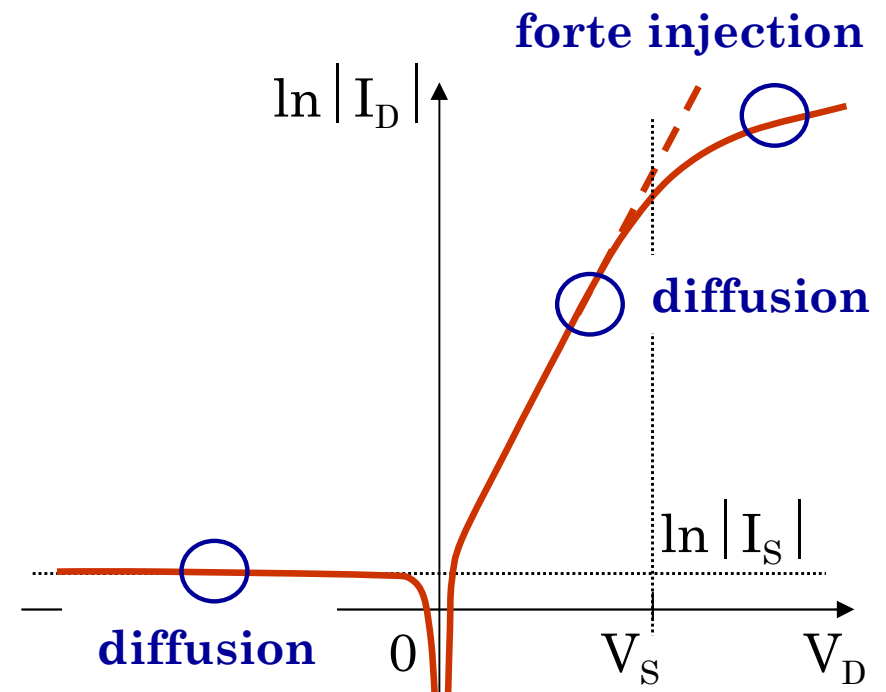
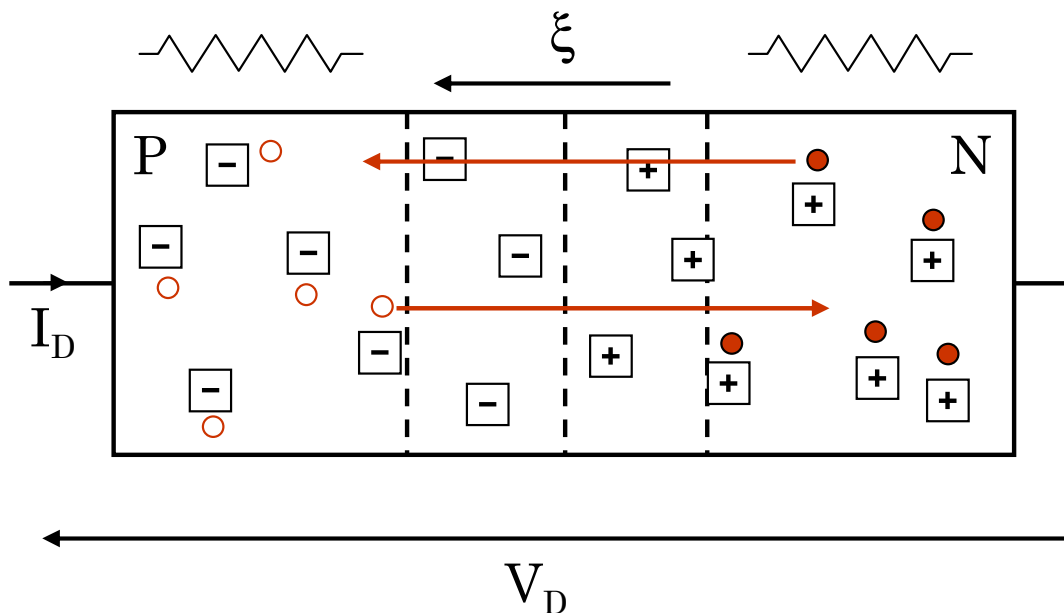
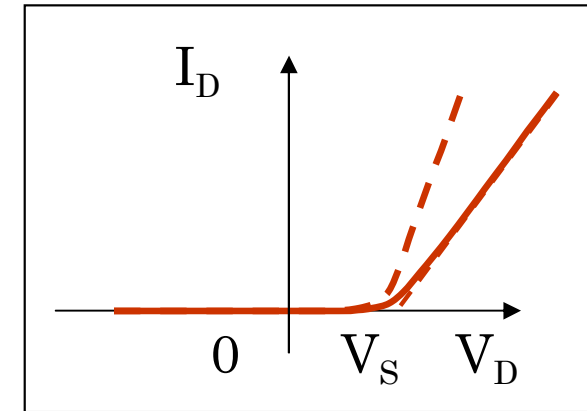
## IV.3. Modèle physique

### □ Fonctionnement réel de la diode PN

- $V_D$  proche de  $V_S$  : prise en compte de  $R_S$

$$I_D = I_S \cdot \left[ \exp \left[ \frac{q(V_D - R_S \cdot I_D)}{\eta kT} \right] - 1 \right]$$

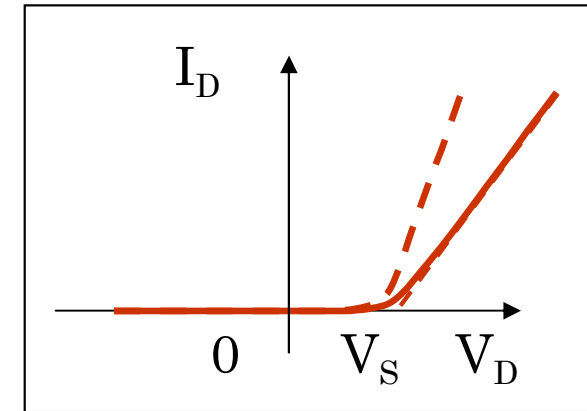
$$1 < \eta < 2$$



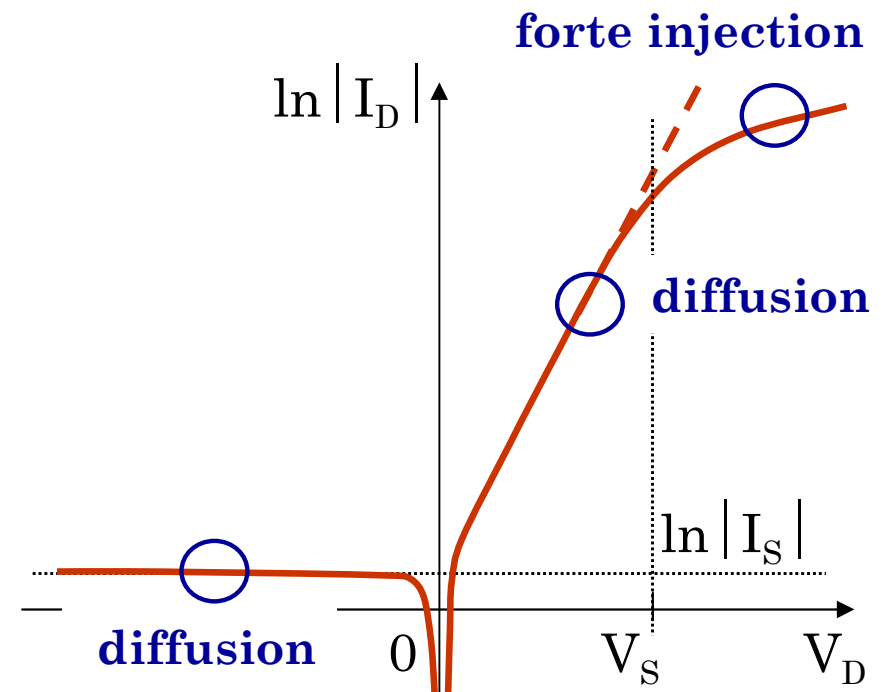
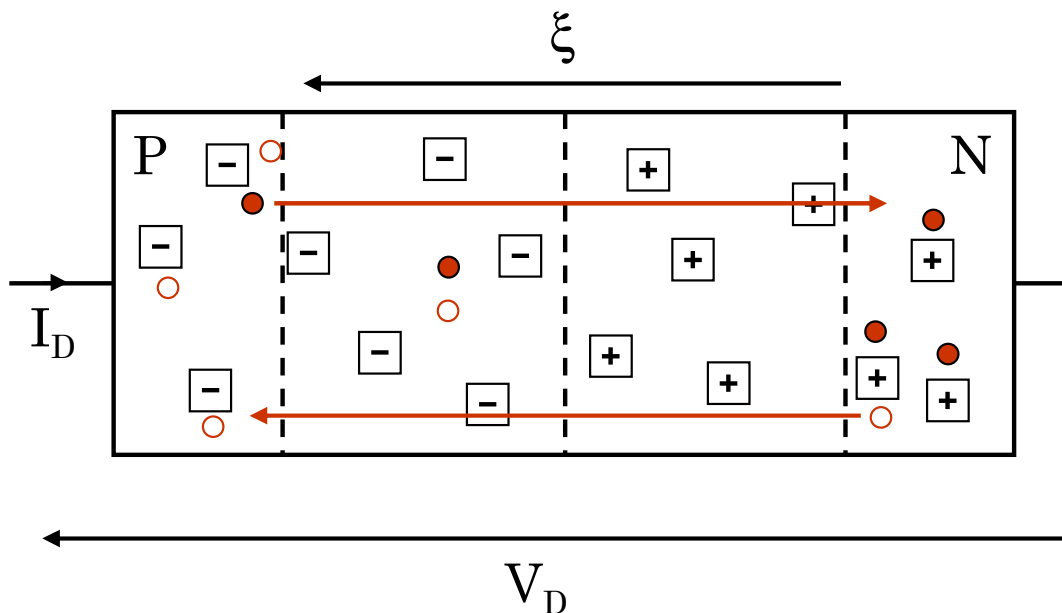
## IV.3. Modèle physique

### □ Fonctionnement réel de la diode PN

- $V_D$  proche de  $V_S$  : prise en compte de  $R_S$
- En inverse : courant de génération (électrons-trous)



$$I_{GR} = f(W, T, V_D)$$

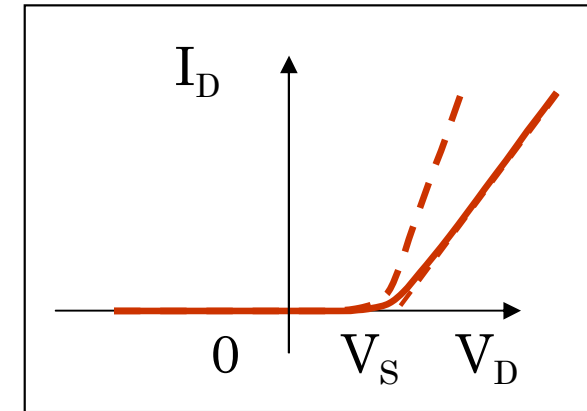




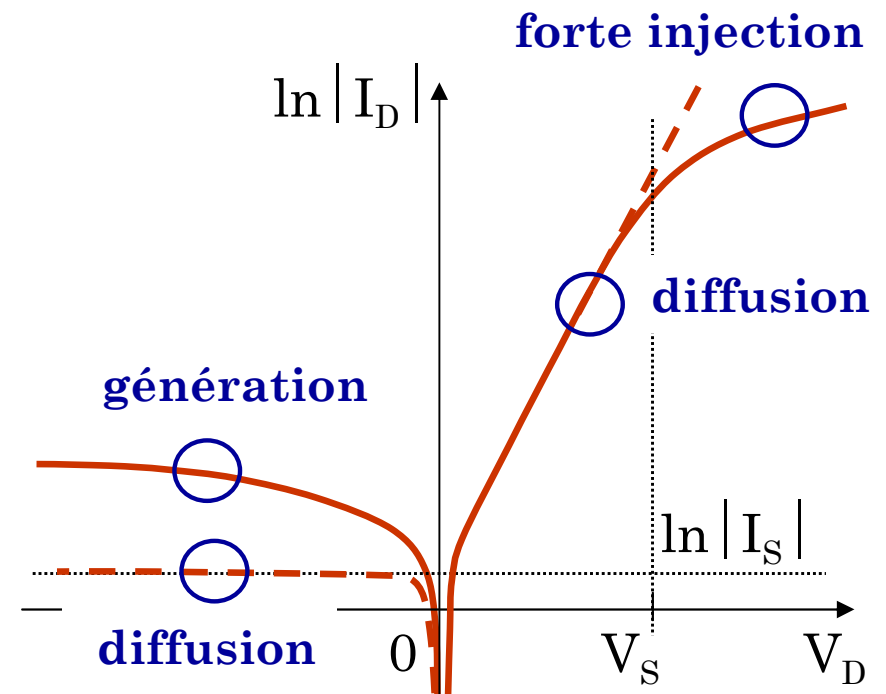
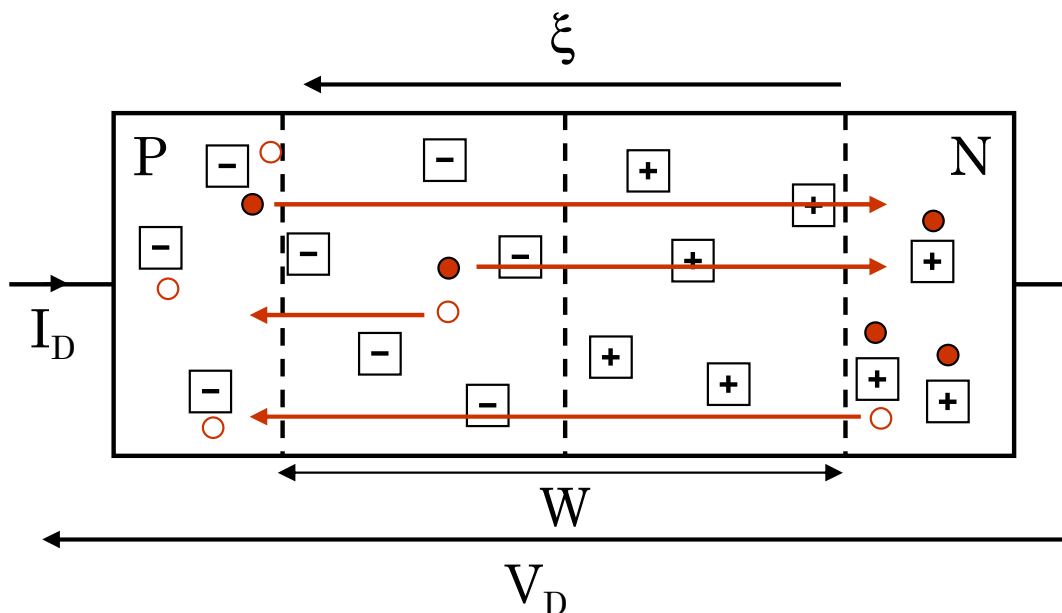
## IV.3. Modèle physique

### □ Fonctionnement réel de la diode PN

- $V_D$  proche de  $V_S$  : prise en compte de  $R_S$
- En inverse : courant de génération (électrons-trous)



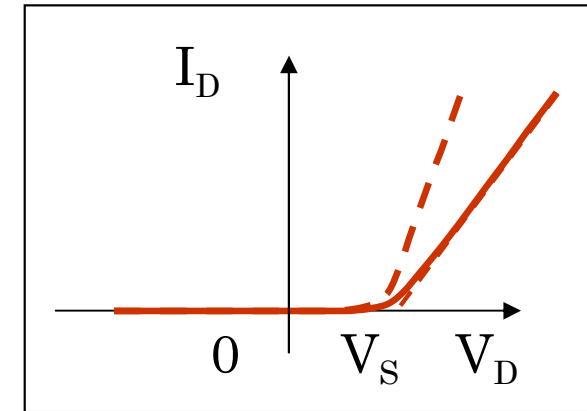
$$I_{GR} = f(W, T, V_D)$$



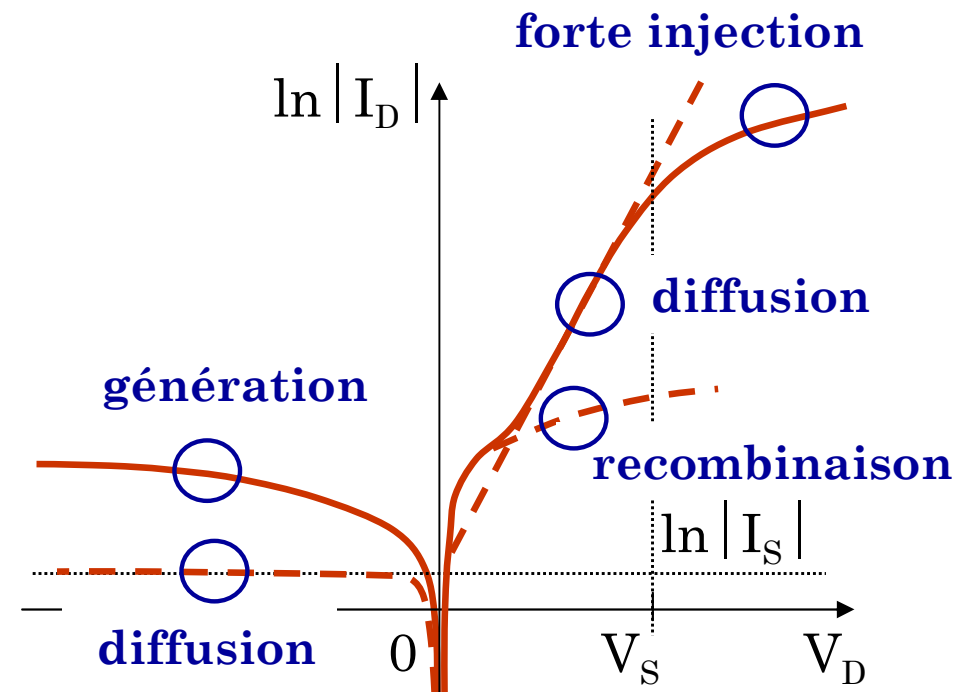
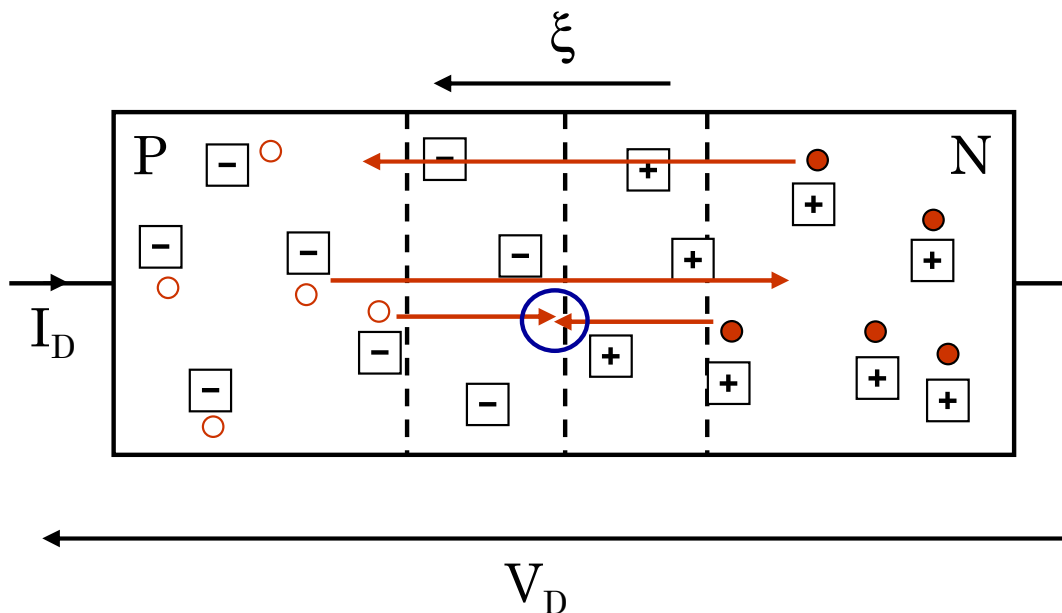
## IV.3. Modèle physique

### □ Fonctionnement réel de la diode PN

- $V_D$  proche de  $V_S$  : prise en compte de  $R_S$
- En inverse : courant de génération (électrons-trous)
- En directe : courant de recombinaison



$$I_{GR} = f(W, T, V_D)$$

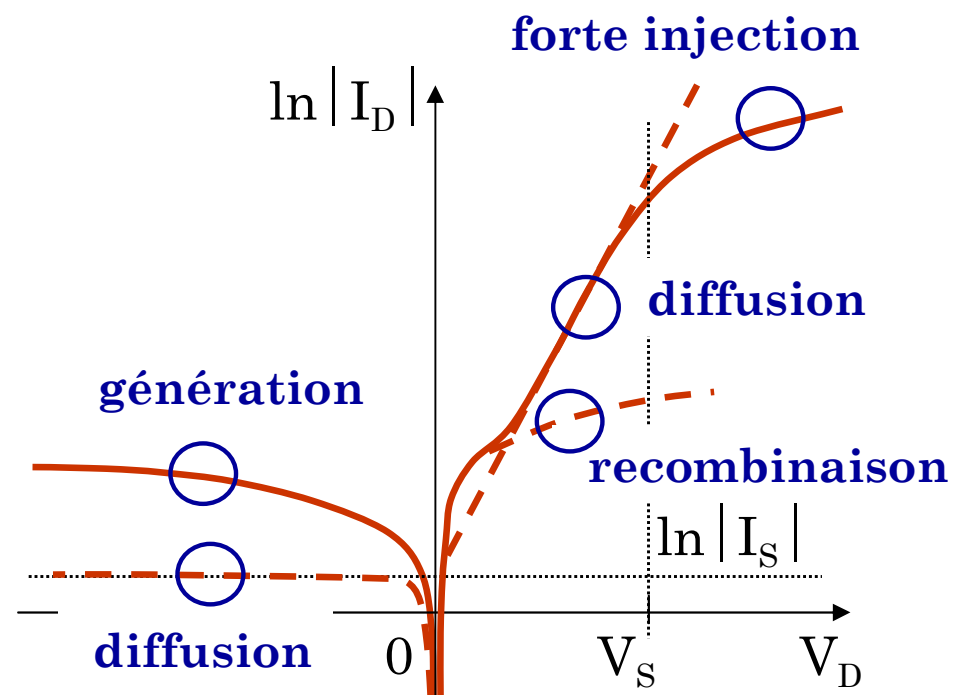
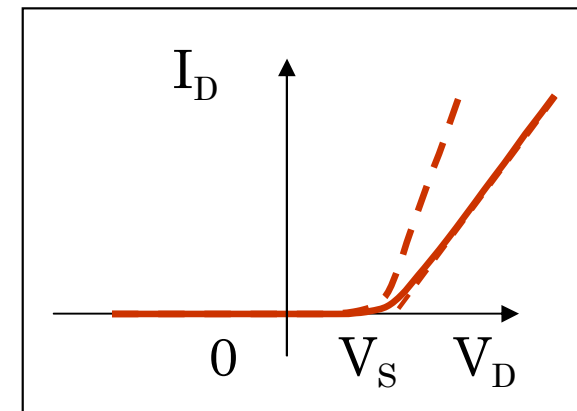
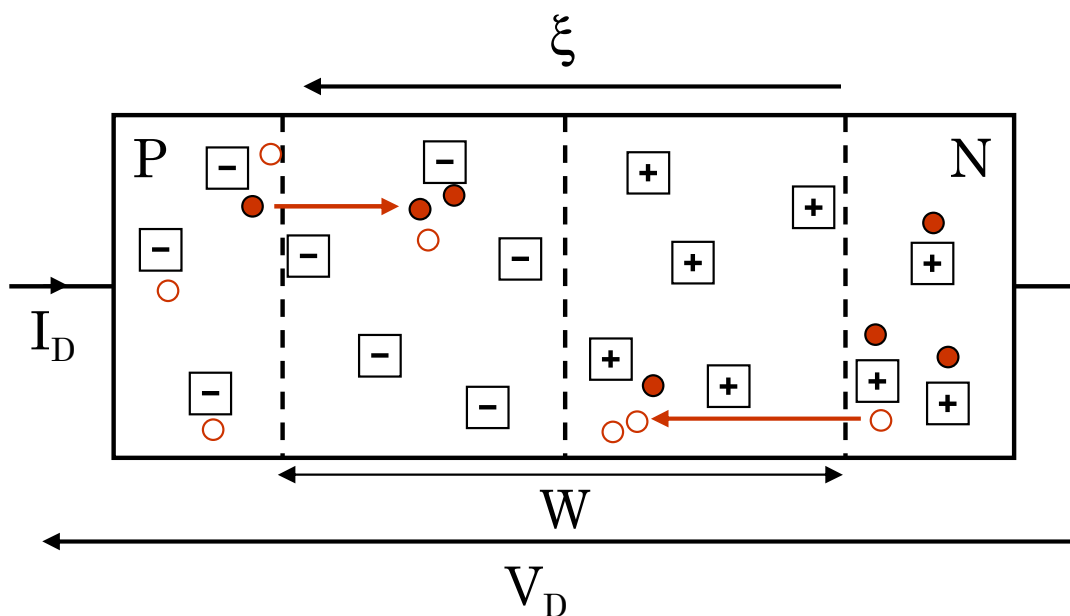


## IV.3. Modèle physique

### □ Fonctionnement réel de la diode PN

- $V_D$  proche de  $V_S$  : prise en compte de  $R_S$
- En inverse : courant de génération (électrons-trous)
- En directe : courant de recombinaison
- En inverse : courant d'avalanche

$$I_{Av} = f(W, T, V_D)$$

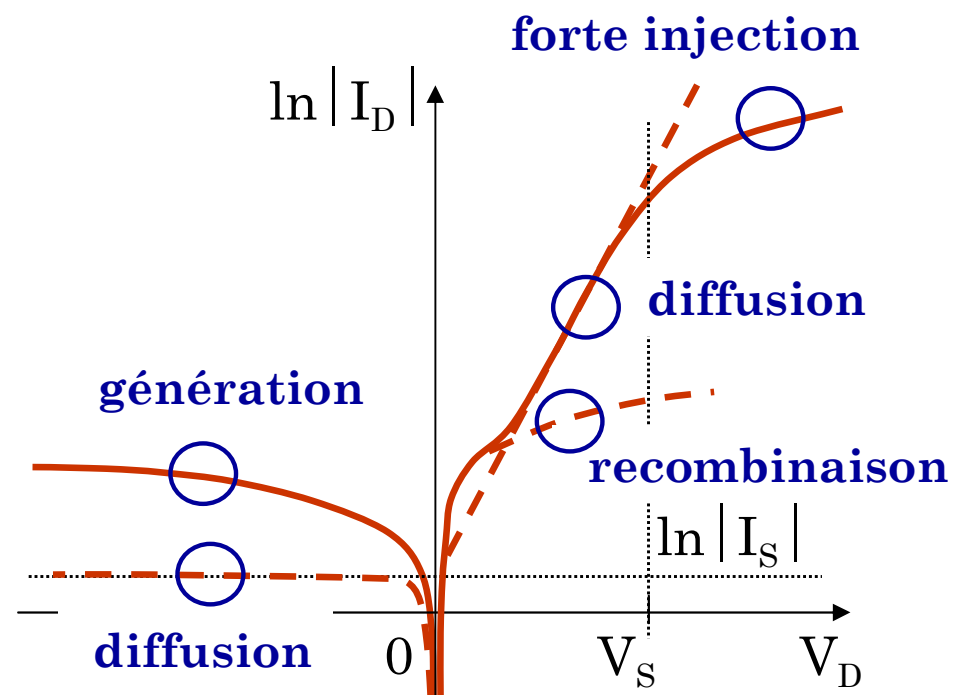
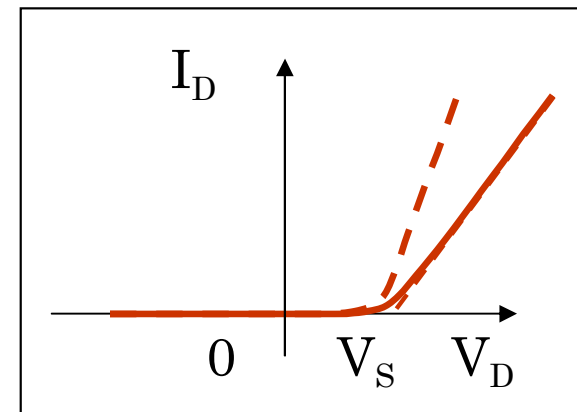
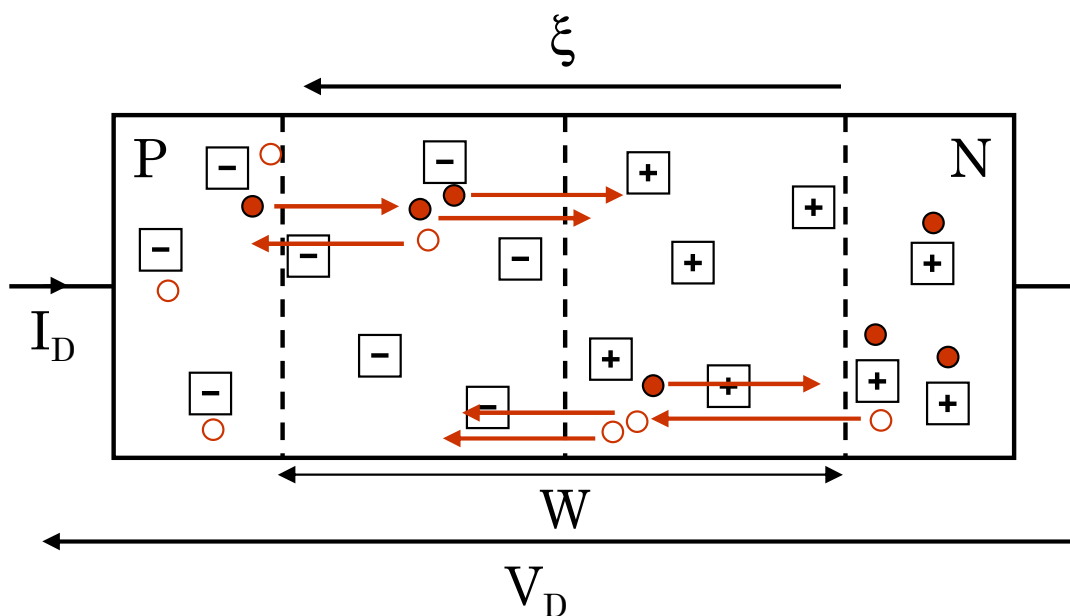


## IV.3. Modèle physique

### □ Fonctionnement réel de la diode PN

- $V_D$  proche de  $V_S$  : prise en compte de  $R_S$
- En inverse : courant de génération (électrons-trous)
- En directe : courant de recombinaison
- En inverse : courant d'avalanche

$$I_{Av} = f(W, T, V_D)$$

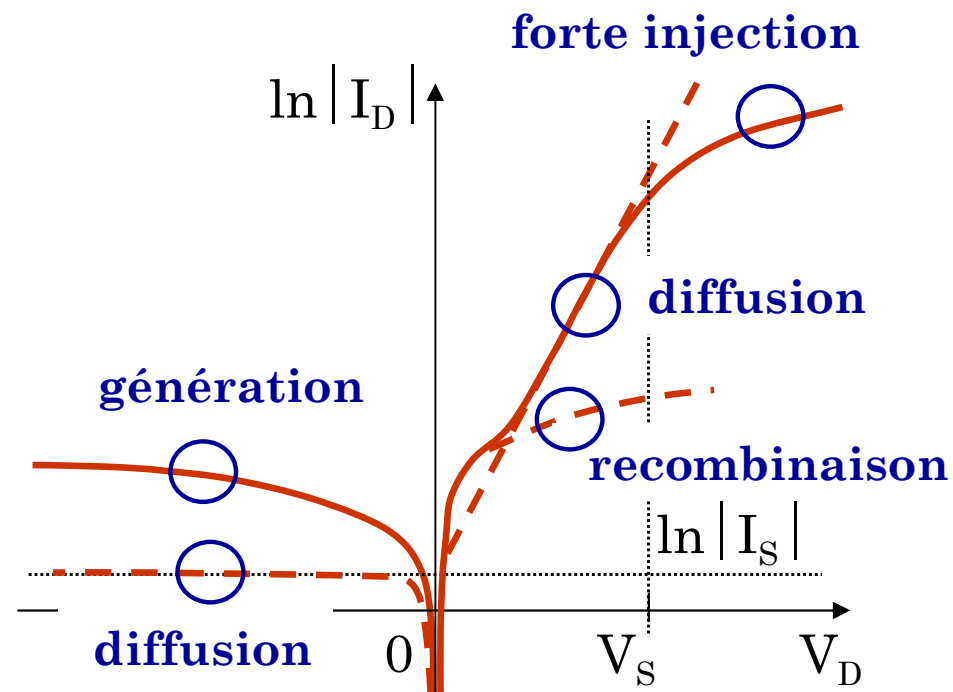
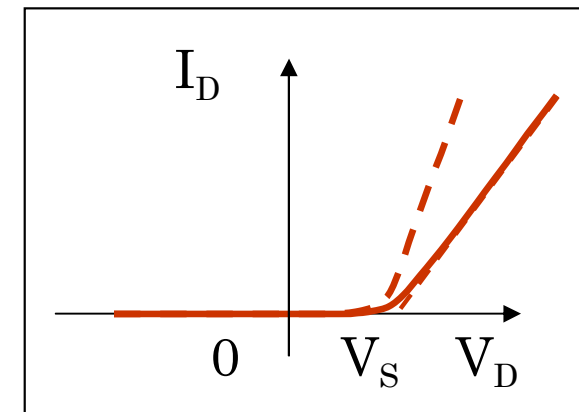
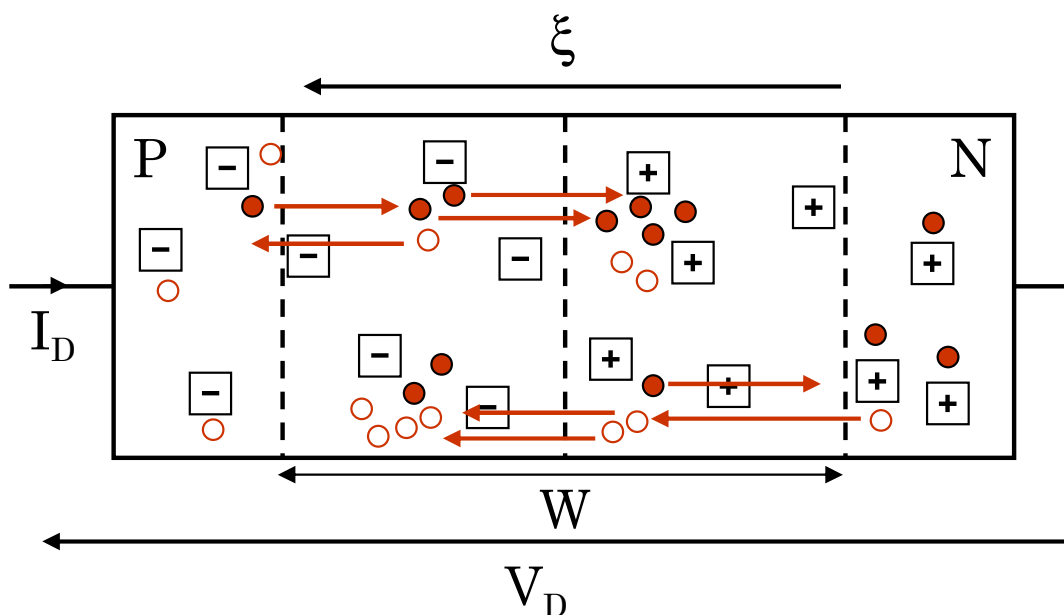


## IV.3. Modèle physique

### □ Fonctionnement réel de la diode PN

- $V_D$  proche de  $V_S$  : prise en compte de  $R_S$
- En inverse : courant de génération (électrons-trous)
- En directe : courant de recombinaison
- En inverse : courant d'avalanche

$$I_{Av} = f(W, T, V_D)$$

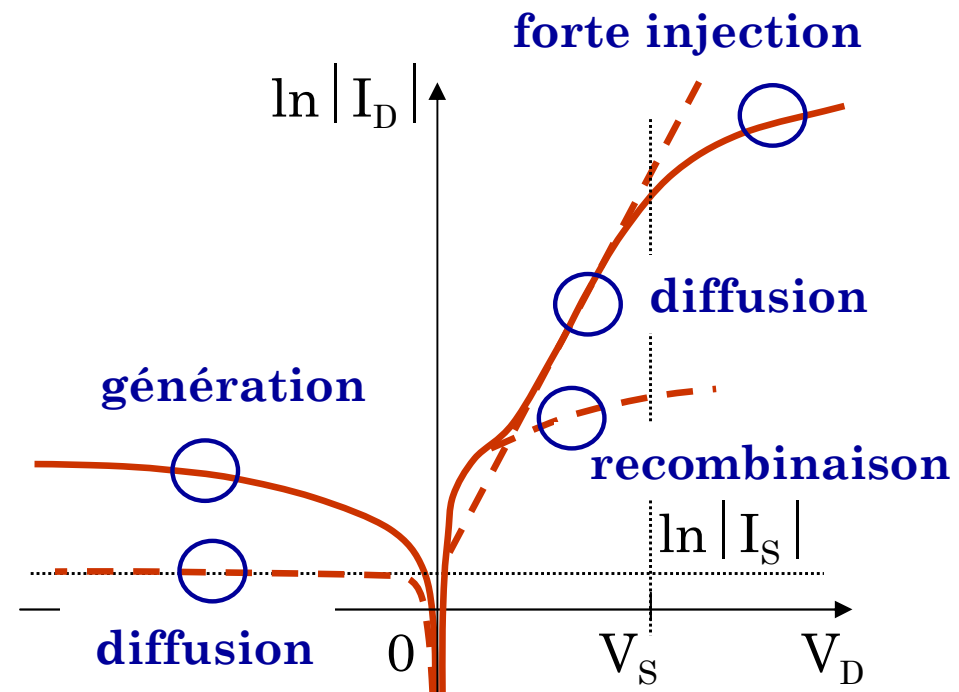
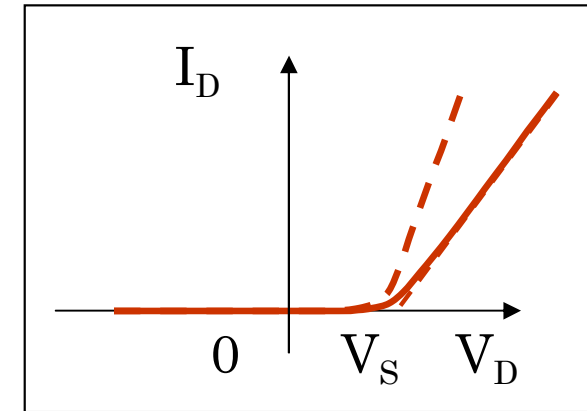
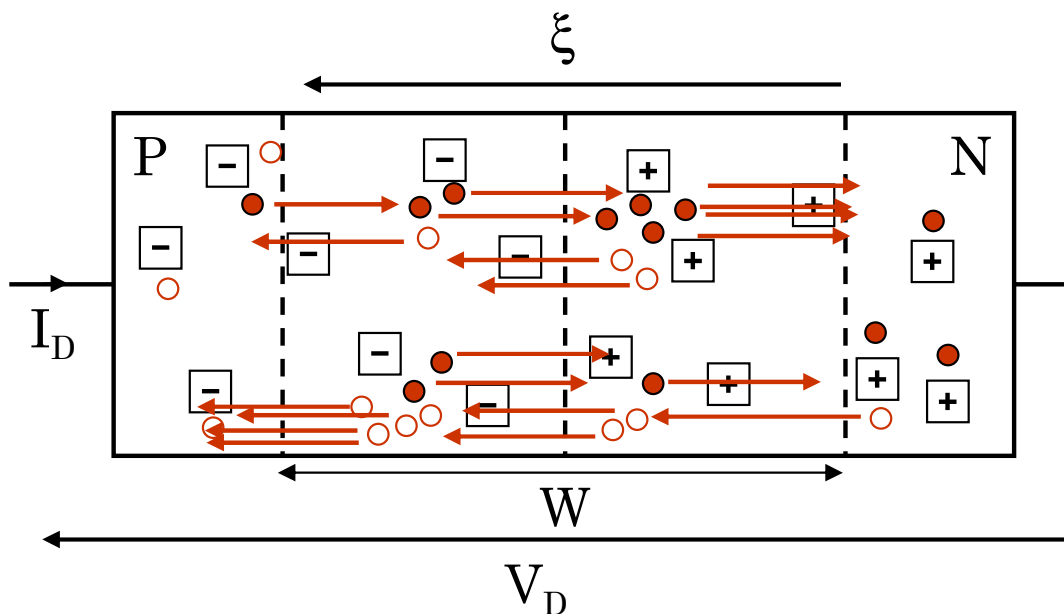


## IV.3. Modèle physique

### □ Fonctionnement réel de la diode PN

- $V_D$  proche de  $V_S$  : prise en compte de  $R_S$
- En inverse : courant de génération (électrons-trous)
- En directe : courant de recombinaison
- En inverse : courant d'avalanche

$$I_{Av} = f(W, T, V_D)$$

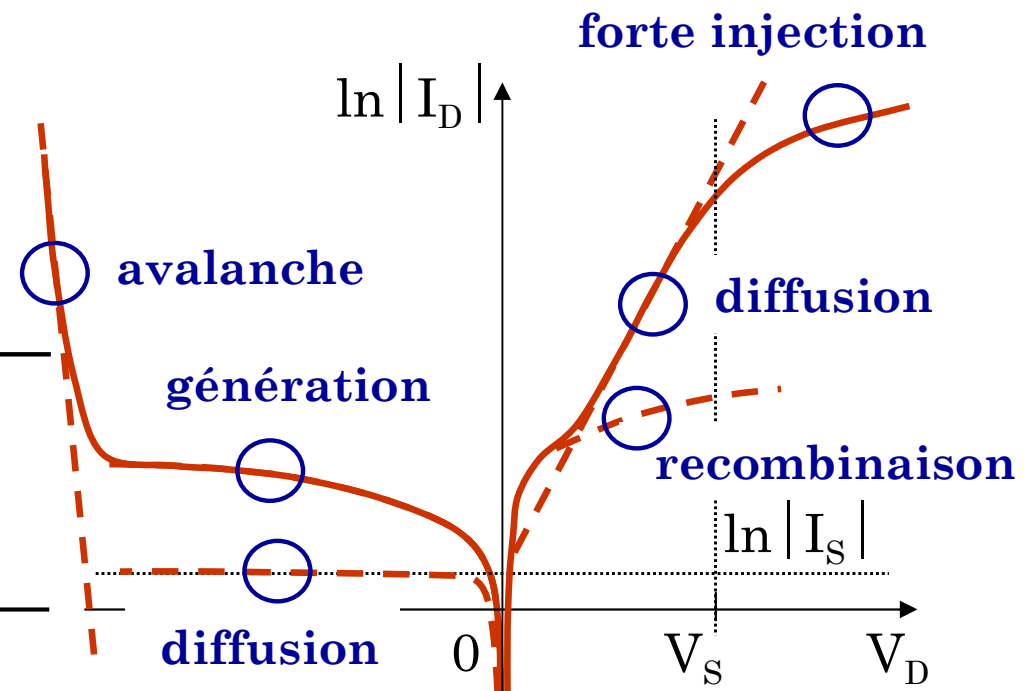
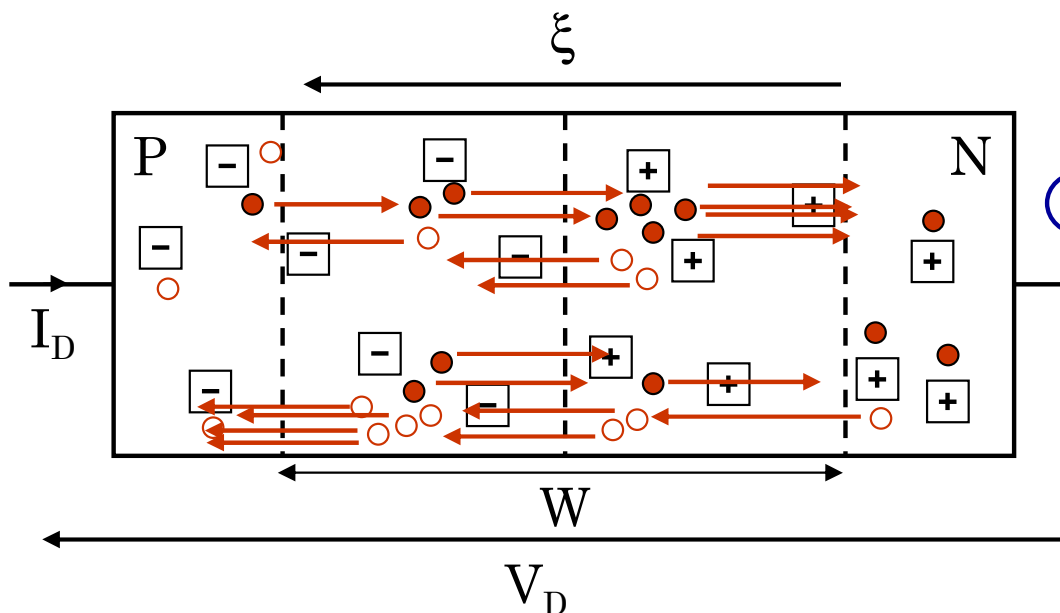
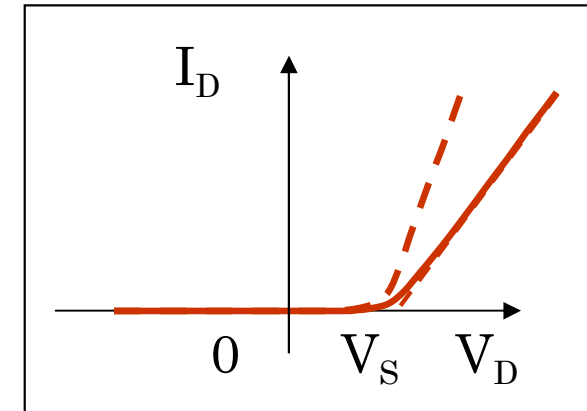


## IV.3. Modèle physique

### □ Fonctionnement réel de la diode PN

- $V_D$  proche de  $V_S$  : prise en compte de  $R_S$
- En inverse : courant de génération (électrons-trous)
- En directe : courant de recombinaison
- En inverse : courant d'avalanche

$$I_{Av} = f(W, T, V_D)$$





## IV.3. Modèle physique

### □ Fonctionnement réel de la diode PN

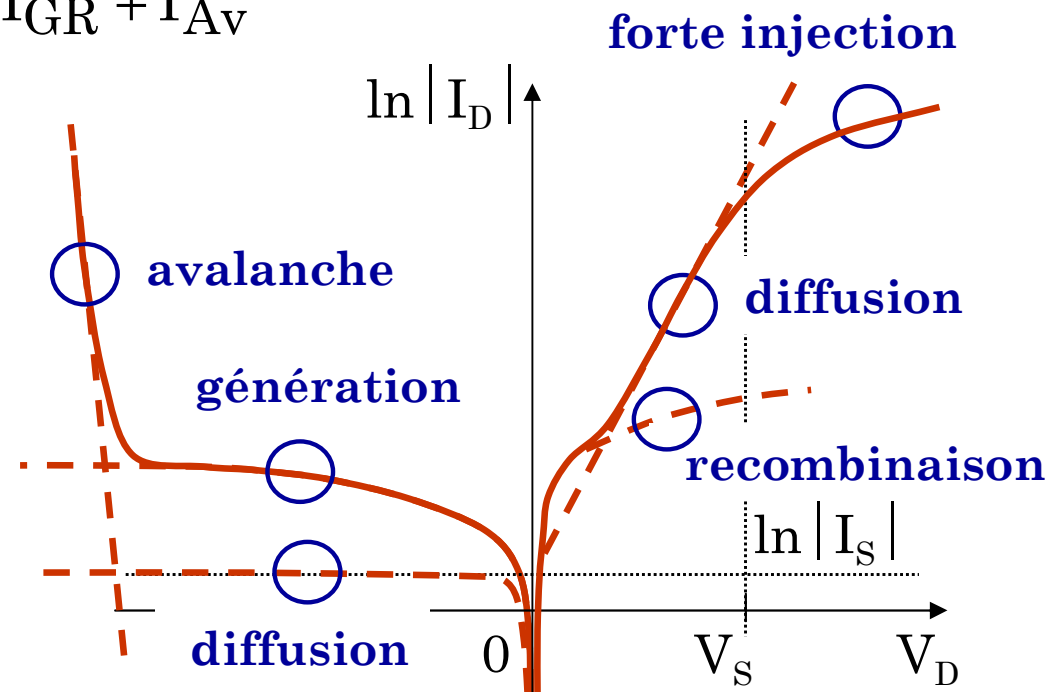
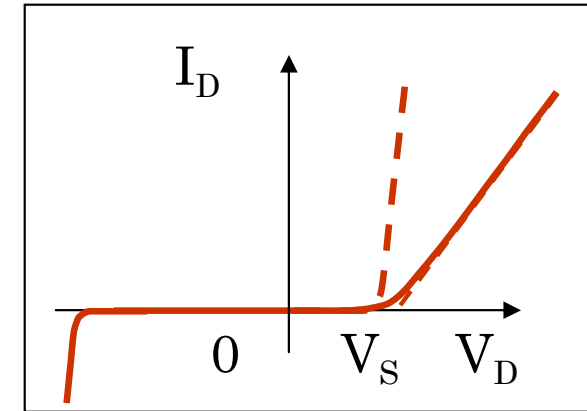
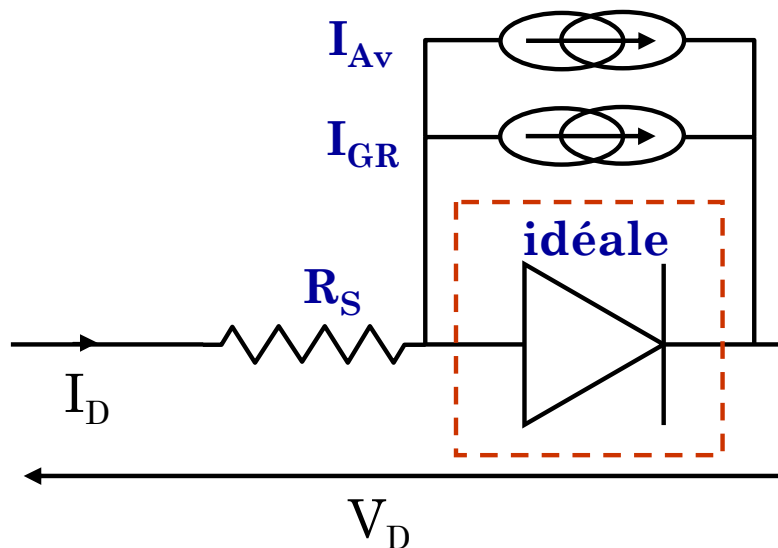
diode idéale

+  $R_S$

+ génération / recombinaison

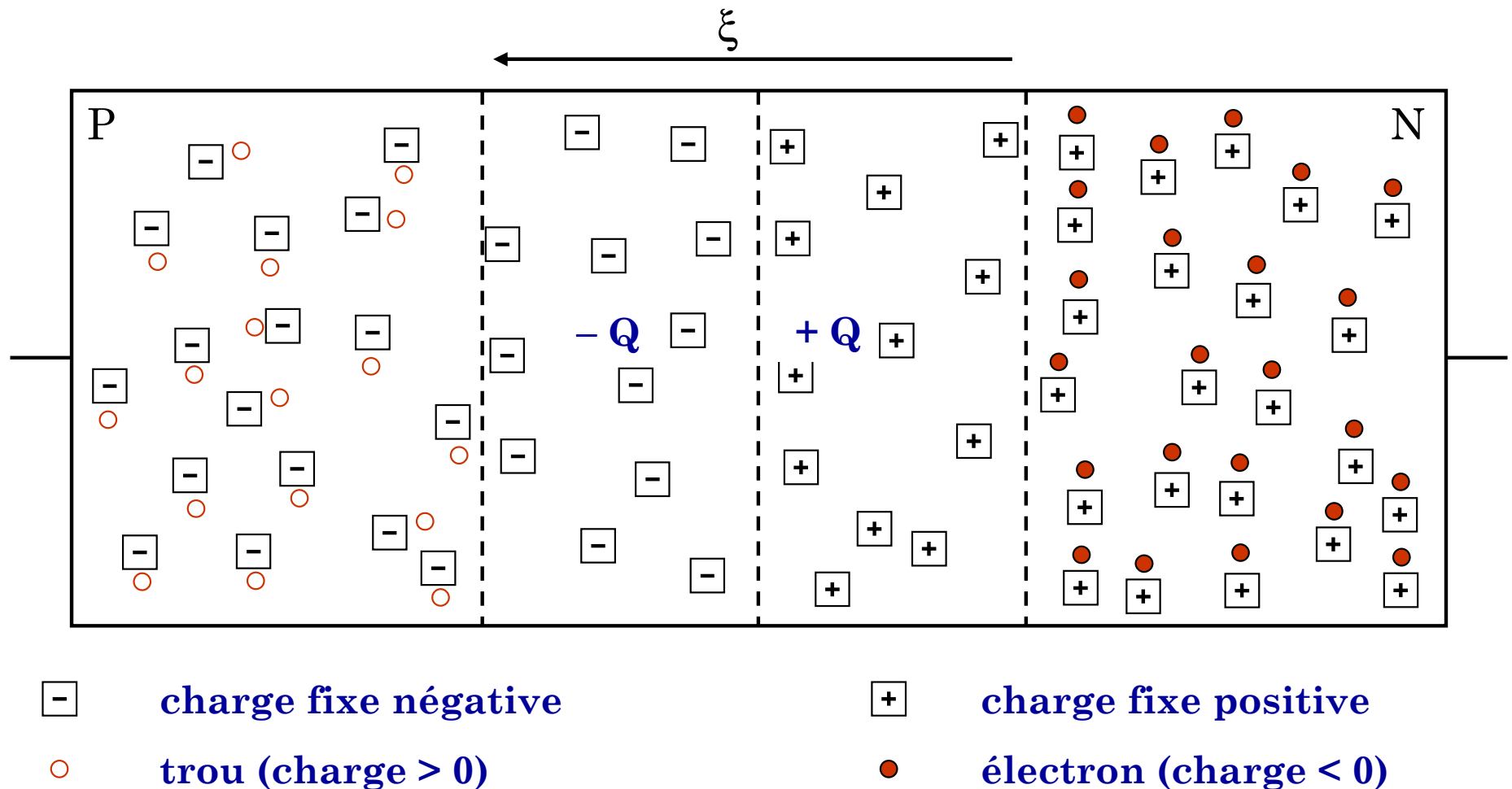
+ avalanche

$$I_D = I_S \cdot \left[ \exp \left[ \frac{q(V_D - R_S \cdot I_D)}{\eta kT} \right] - 1 \right] + I_{GR} + I_{Av}$$



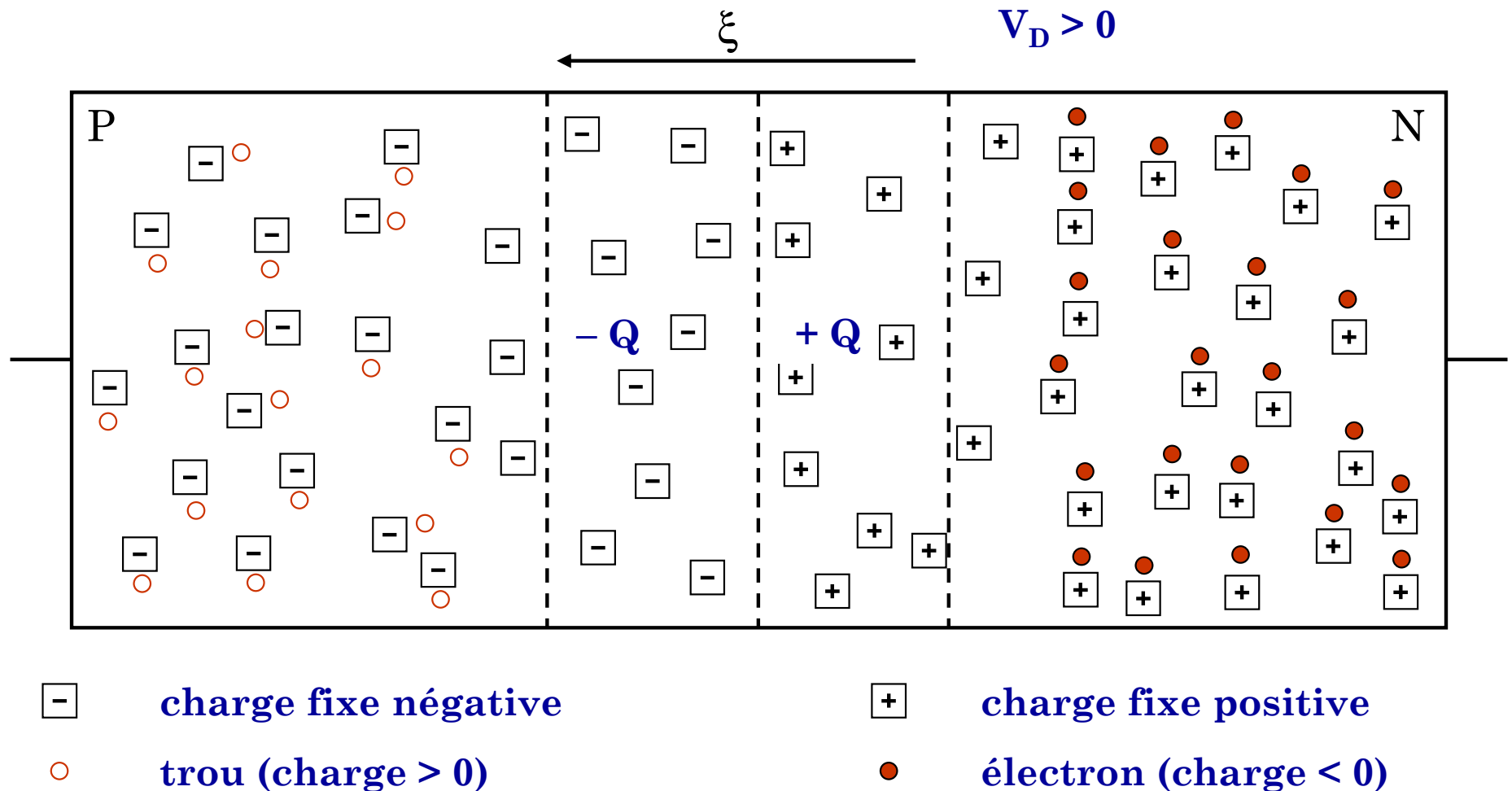
## IV.4. Comportement capacitif

- Une variation  $\Delta V_D$  implique une variation  $\Delta Q$



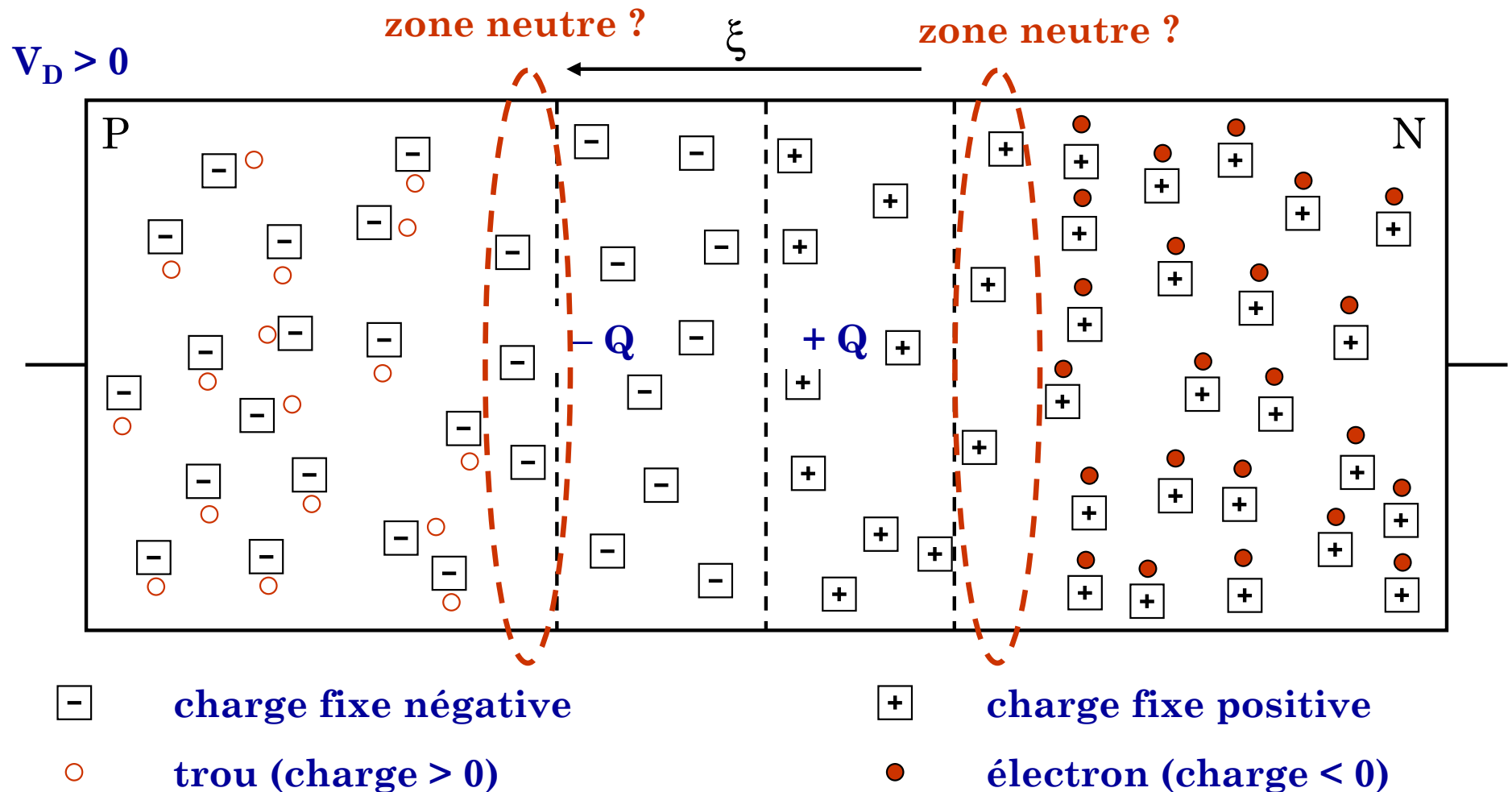
## IV.4. Comportement capacitif

- Une variation  $\Delta V_D$  implique une variation  $\Delta Q$



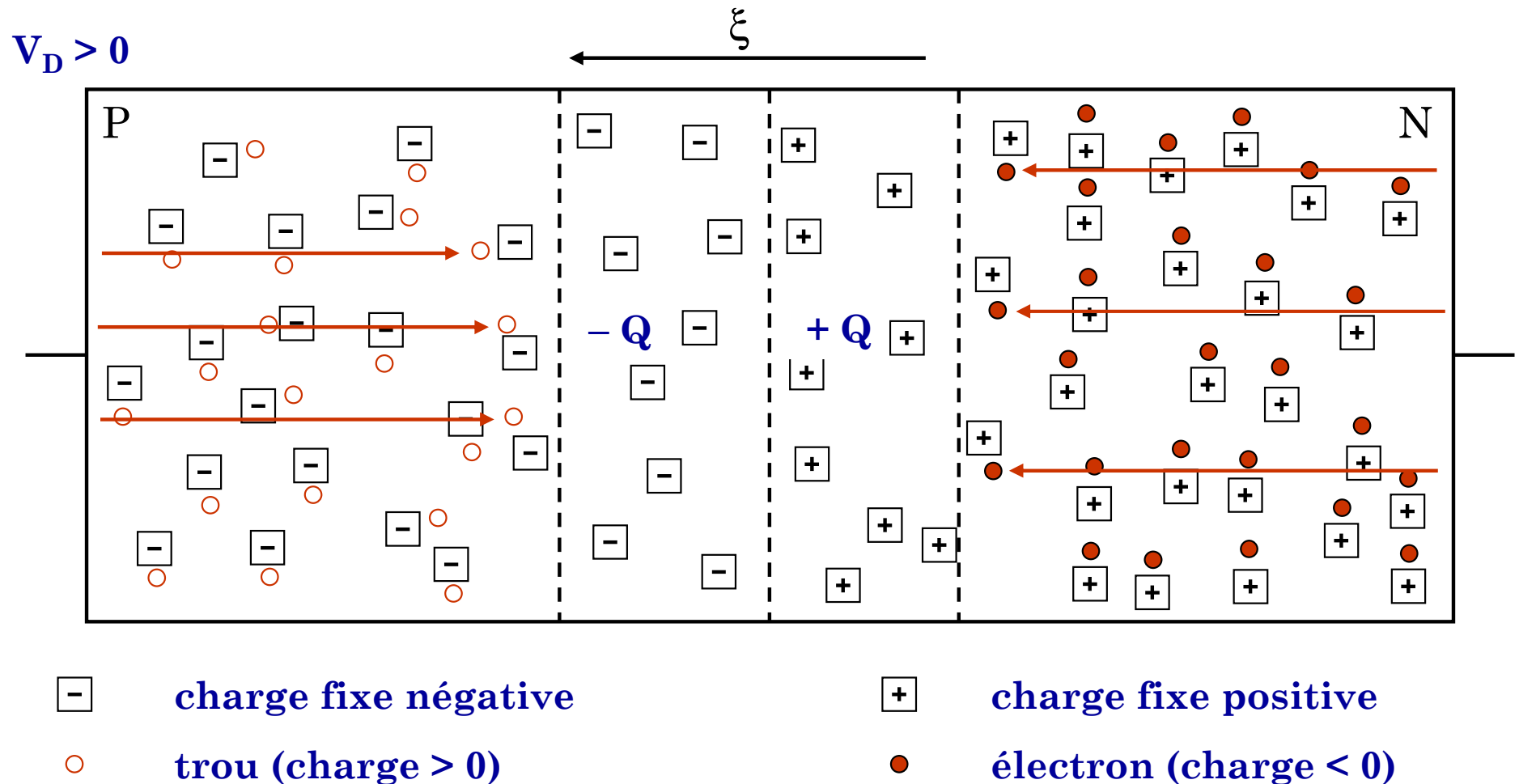
## IV.4. Comportement capacitif

- Une variation  $\Delta V_D$  implique une variation  $\Delta Q$



## IV.4. Comportement capacitif

- Une variation  $\Delta V_D$  implique une variation  $\Delta Q$  : courant transitoire

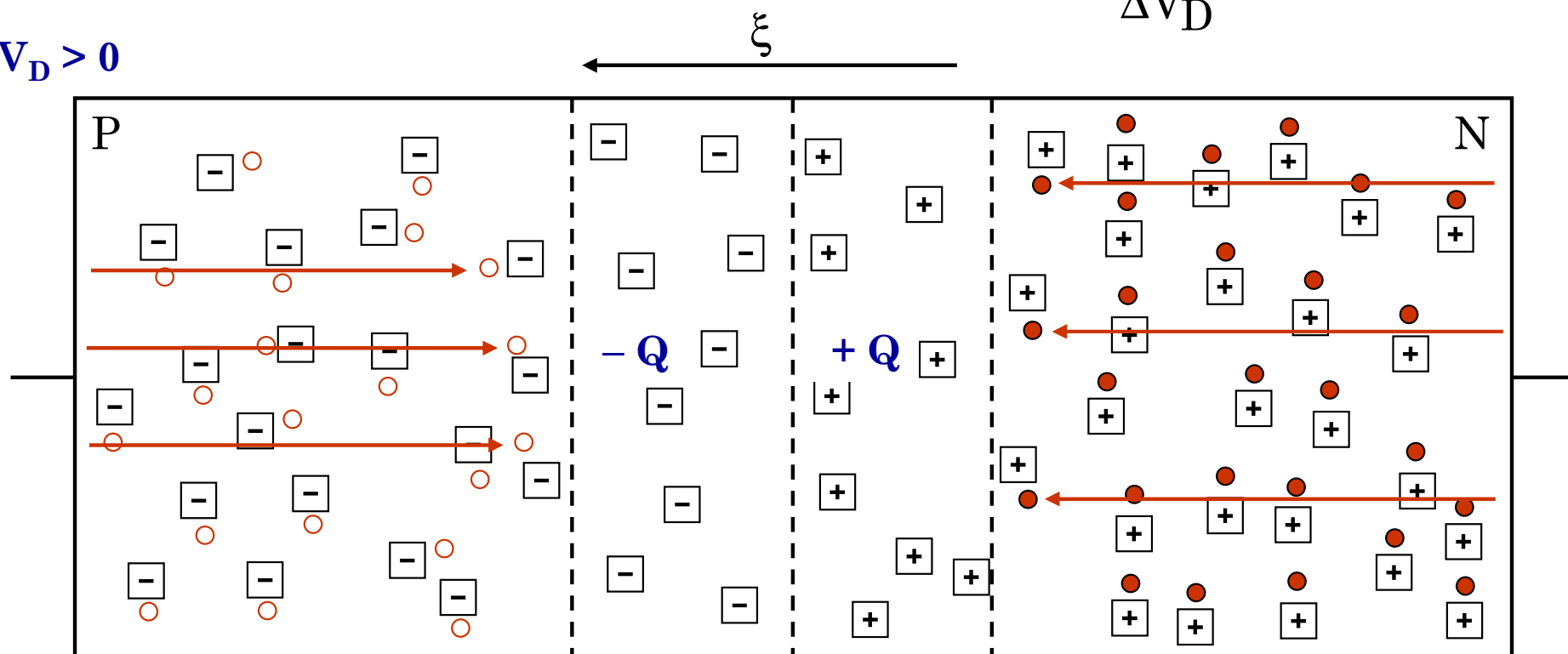


## IV.4. Comportement capacitif

- Une variation  $\Delta V_D$  implique une variation  $\Delta Q$  : courant transitoire
- La diode a aussi un comportement capacitif :

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V_D}$$

$V_D > 0$



[-] charge fixe négative

o trou (charge > 0)

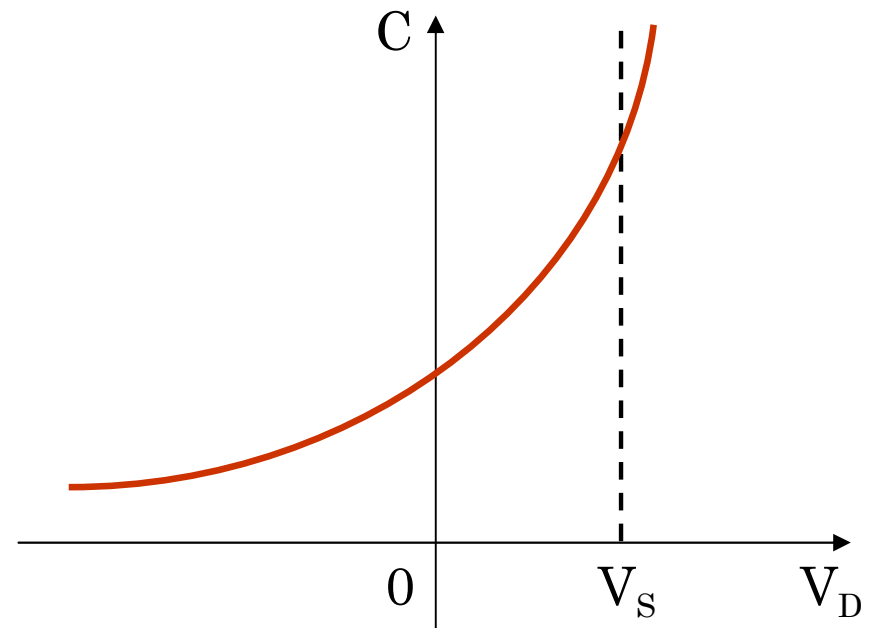
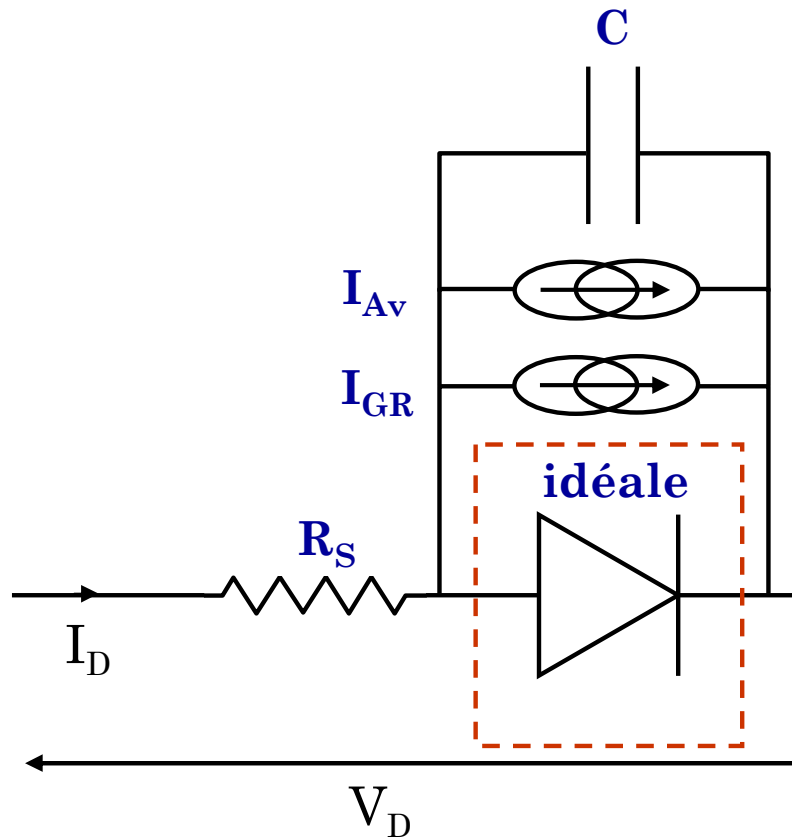
[+] charge fixe positive

• électron (charge < 0)

## IV.4. Comportement capacitif

- Une variation  $\Delta V_D$  implique une variation  $\Delta Q$  : courant transitoire

- La diode a aussi un comportement capacitif : 
$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V_D}$$

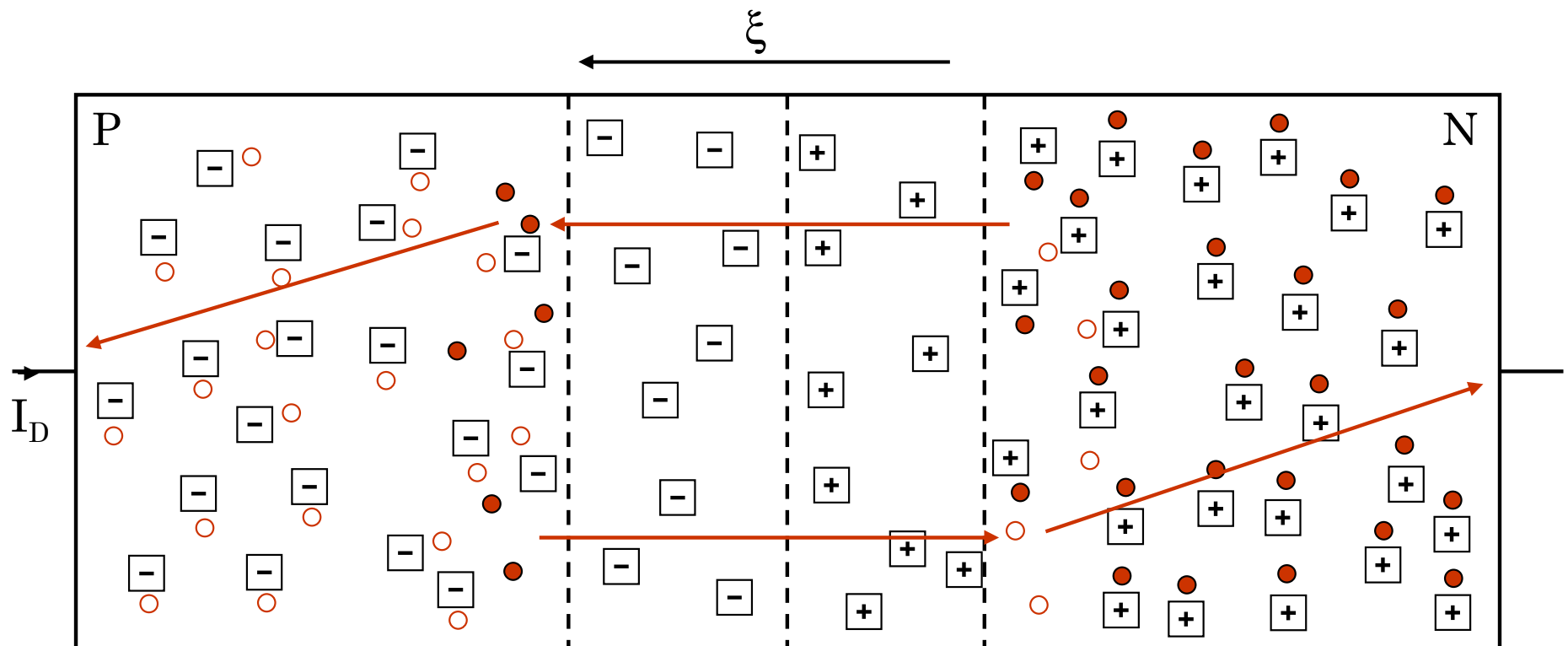


- Cette effet capacitif est avantageusement utilisée avec les diodes "varicap" dans les circuits d'accord des récepteurs radios et des téléviseurs.

## IV.5. La diode en commutation

### □ Mouvement des électrons et des trous

- Initialement la diode est polarisée en direct :  $V_D > 0$ ,  $I_D > 0$

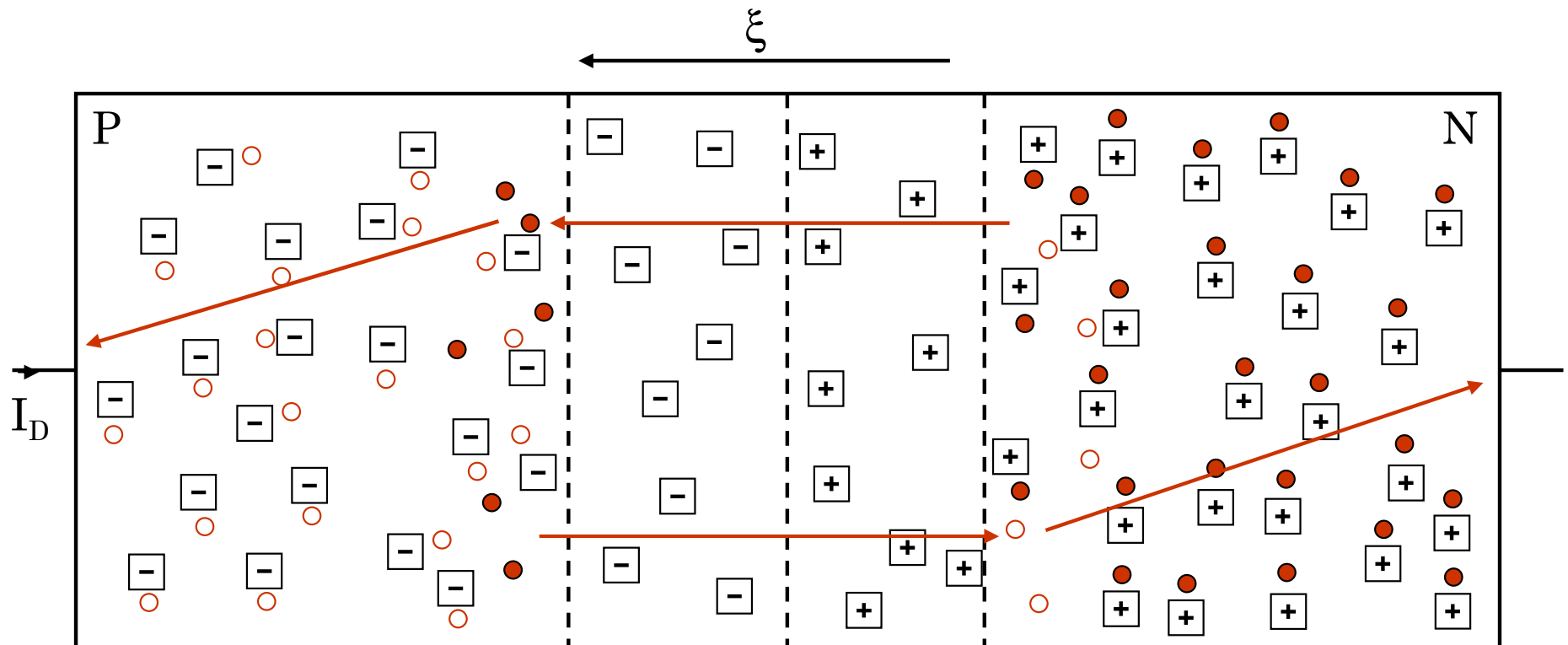




## IV.5. La diode en commutation

### □ Mouvement des électrons et des trous

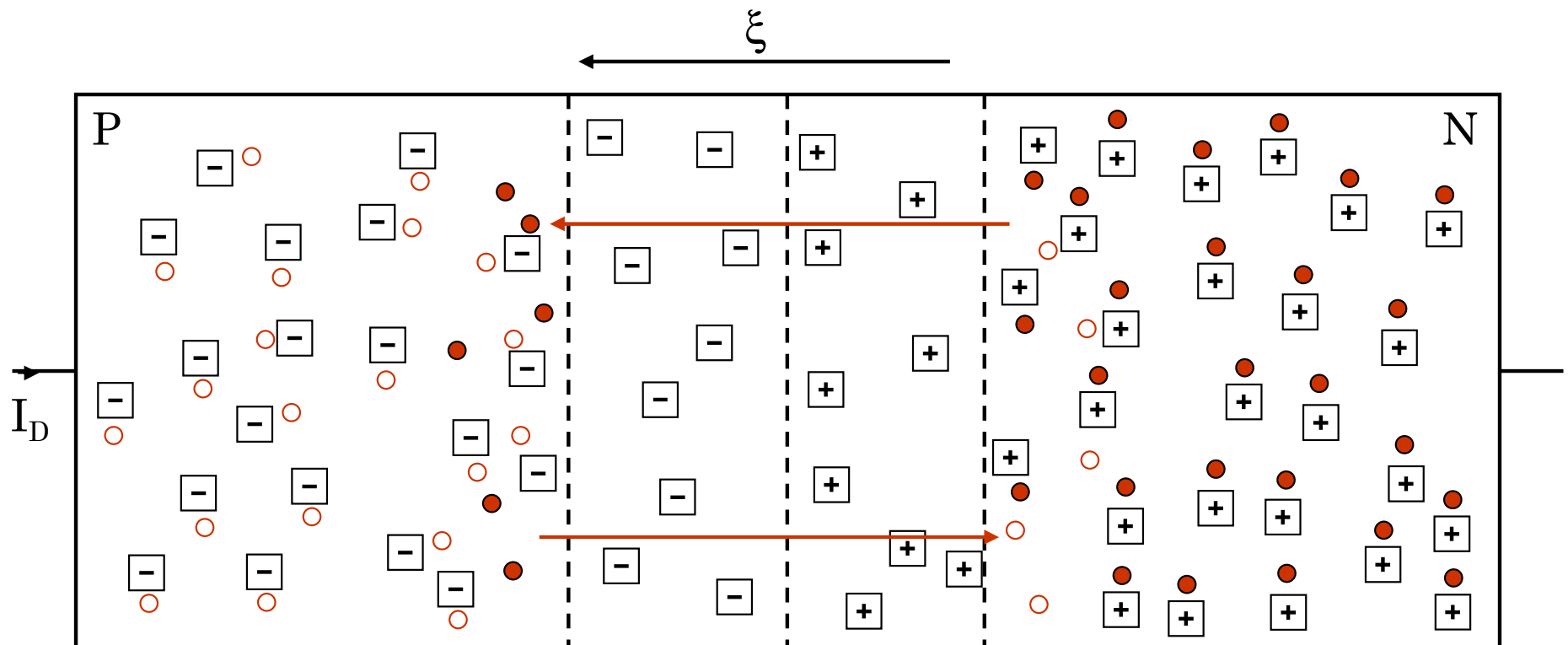
- Initialement la diode est polarisée en direct :  $V_D > 0$ ,  $I_D > 0$
- On polarise brusquement la diode en inverse :  $V_D < 0$ ,  $I_D < 0$



## IV.5. La diode en commutation

### □ Mouvement des électrons et des trous

- Initialement la diode est polarisée en direct :  $V_D > 0$ ,  $I_D > 0$
- On polarise brusquement la diode en inverse :  $V_D < 0$ ,  $I_D < 0$

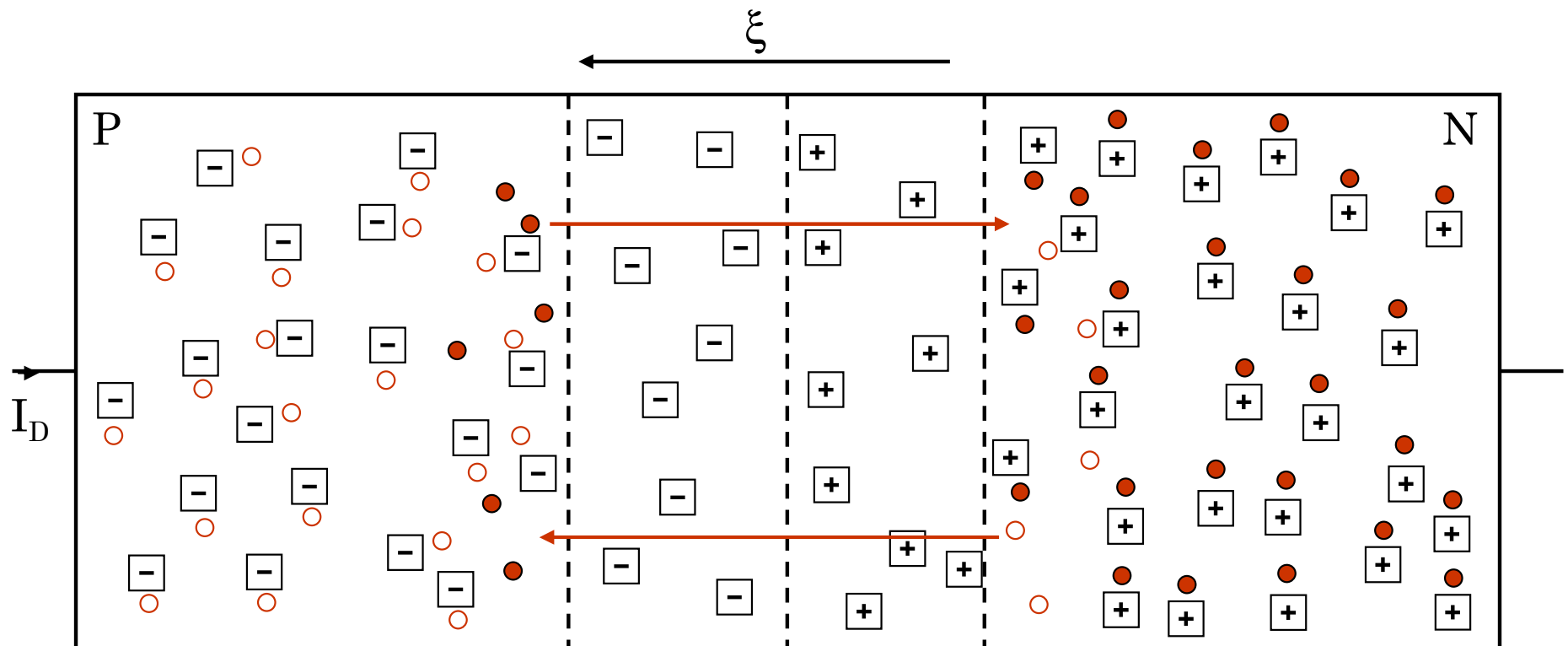


## IV.5. La diode en commutation

### □ Mouvement des électrons et des trous

- Initialement la diode est polarisée en direct :  $V_D > 0$ ,  $I_D > 0$
- On polarise brusquement la diode en inverse :  $V_D < 0$ ,  $I_D < 0$

**Phase 1** : évacuation des électrons (zone P) et des trous (zone N)

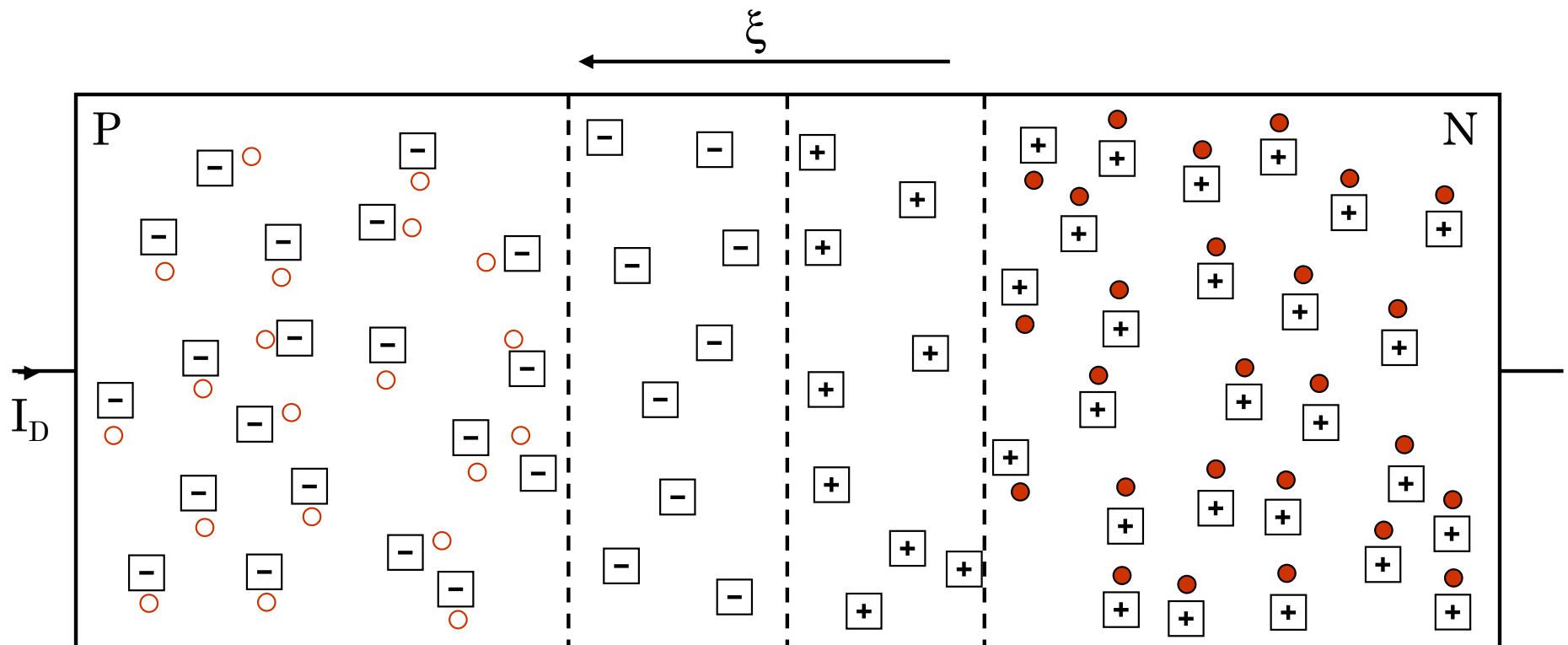


## IV.5. La diode en commutation

### □ Mouvement des électrons et des trous

- Initialement la diode est polarisée en direct :  $V_D > 0$ ,  $I_D > 0$
- On polarise brusquement la diode en inverse :  $V_D < 0$ ,  $I_D < 0$

**Phase 1** : évacuation des électrons (zone P) et des trous (zone N)



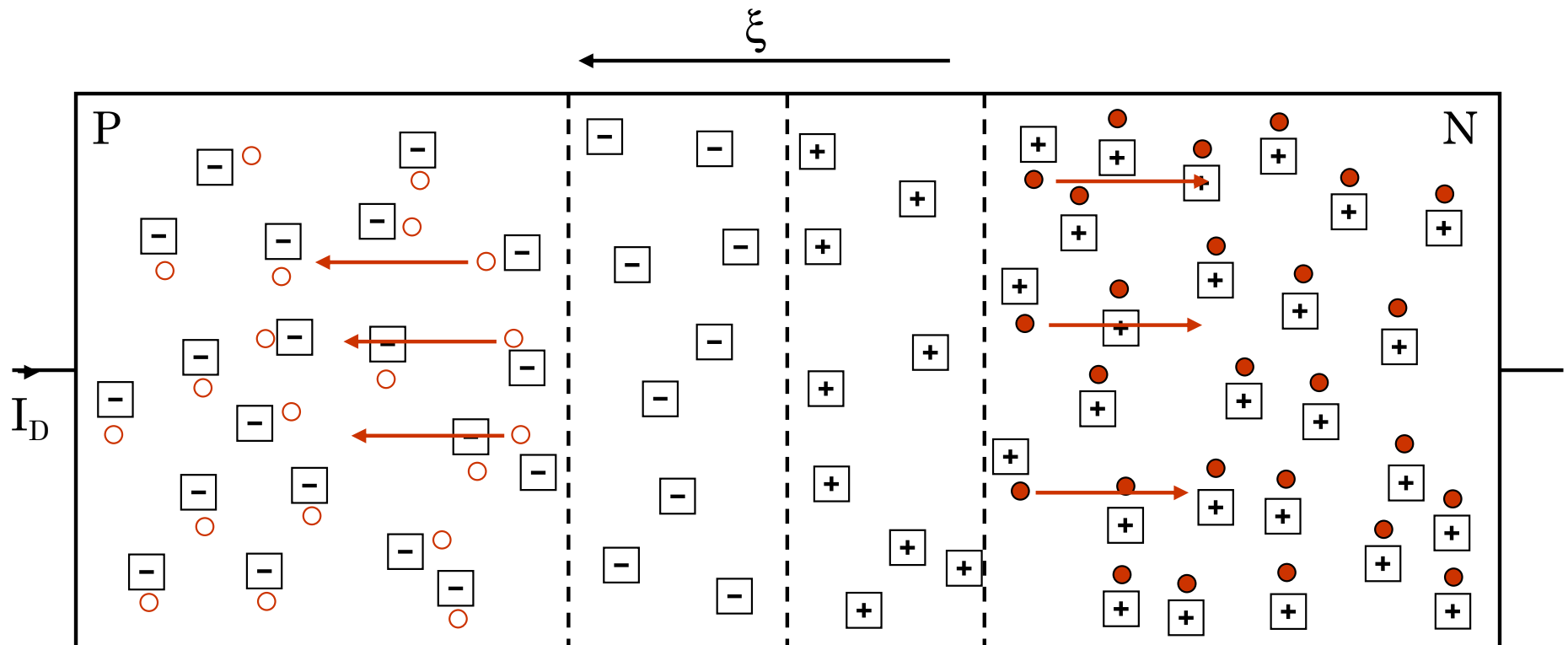
## IV.5. La diode en commutation

### □ Mouvement des électrons et des trous

- Initialement la diode est polarisée en direct :  $V_D > 0$ ,  $I_D > 0$
- On polarise brusquement la diode en inverse :  $V_D < 0$ ,  $I_D < 0$

**Phase 1** : évacuation des électrons (zone P) et des trous (zone N)

**Phase 2** : élargissement de la zone désertée



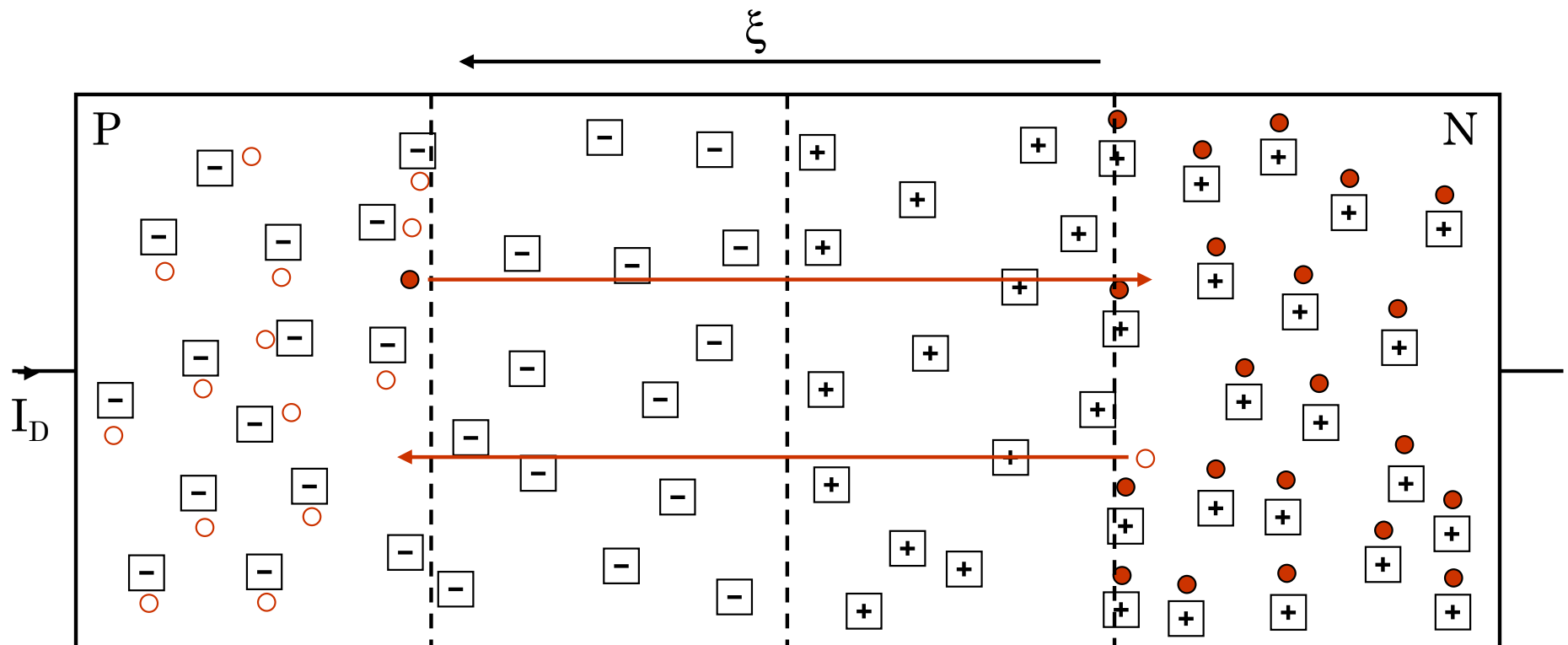
## IV.5. La diode en commutation

### □ Mouvement des électrons et des trous

- Initialement la diode est polarisée en direct :  $V_D > 0$ ,  $I_D > 0$
- On polarise brusquement la diode en inverse :  $V_D < 0$ ,  $I_D < 0$

**Phase 1** : évacuation des électrons (zone P) et des trous (zone N)

**Phase 2** : élargissement de la zone désertée



### IV.5. La diode en commutation

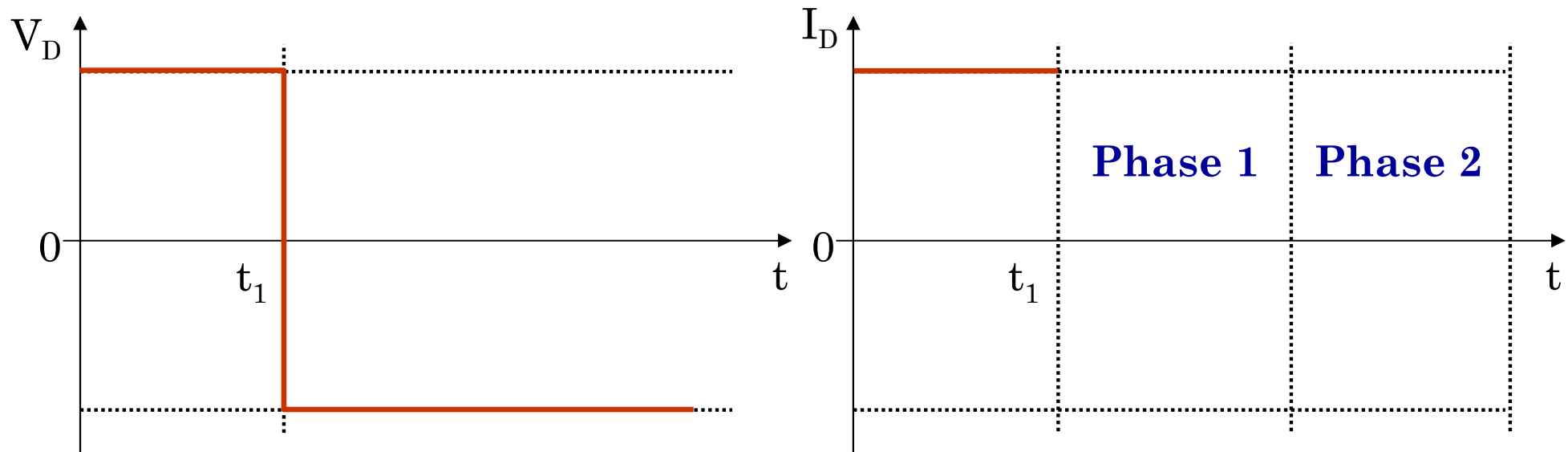
#### □ Mouvement des électrons et des trous

- Initialement la diode est polarisée en direct :  $V_D > 0$ ,  $I_D > 0$
- On polarise brusquement la diode en inverse :  $V_D < 0$ ,  $I_D < 0$

**Phase 1** : évacuation des électrons (zone P) et des trous (zone N)

**Phase 2** : élargissement de la zone désertée

**Si la fréquence de commutation de  $V_D$  est trop élevée alors  
la diode est toujours passante !!!!!**



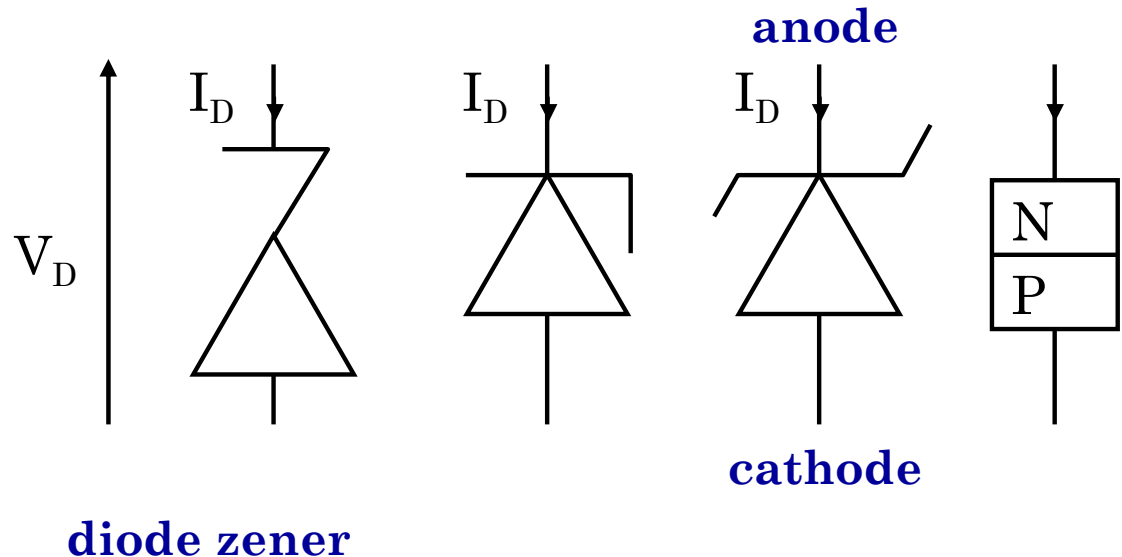
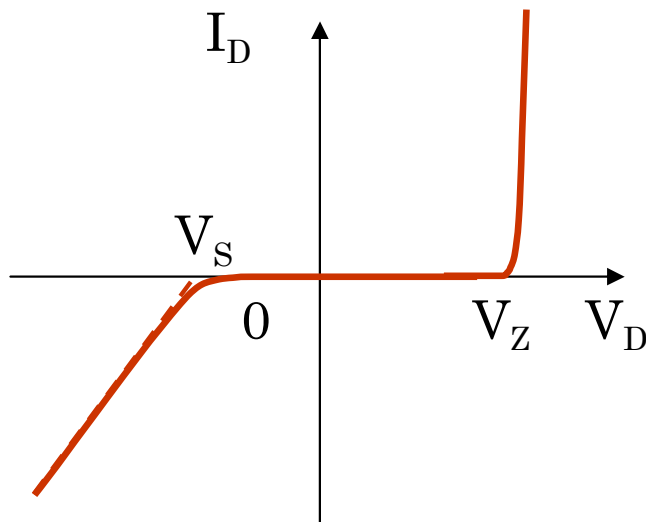
## V.1. Définition de la zener

- Une diode zener est une jonction P-N dont la fabrication permet son utilisation en régime d'avalanche ou tunnel :

Très forte variation de courant pour une très faible variation de tension

- L'effet Zener a été découvert par Clarence ZENER (1905-1993)

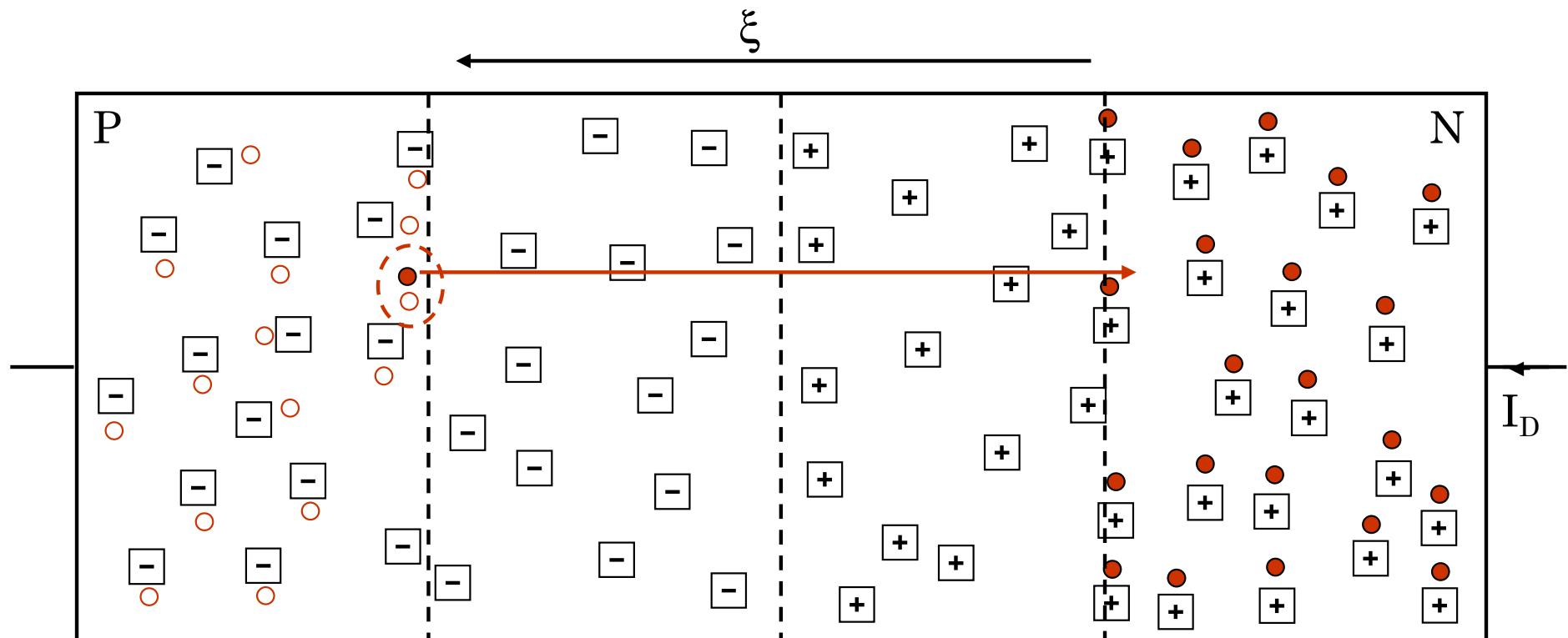
## V.2. Représentation(s)





## V.3. Effet zener

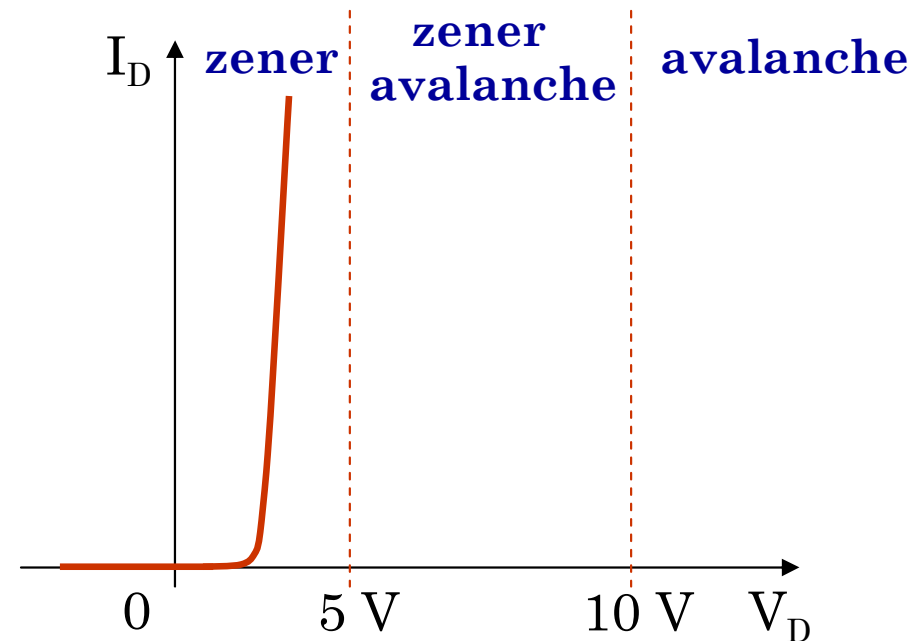
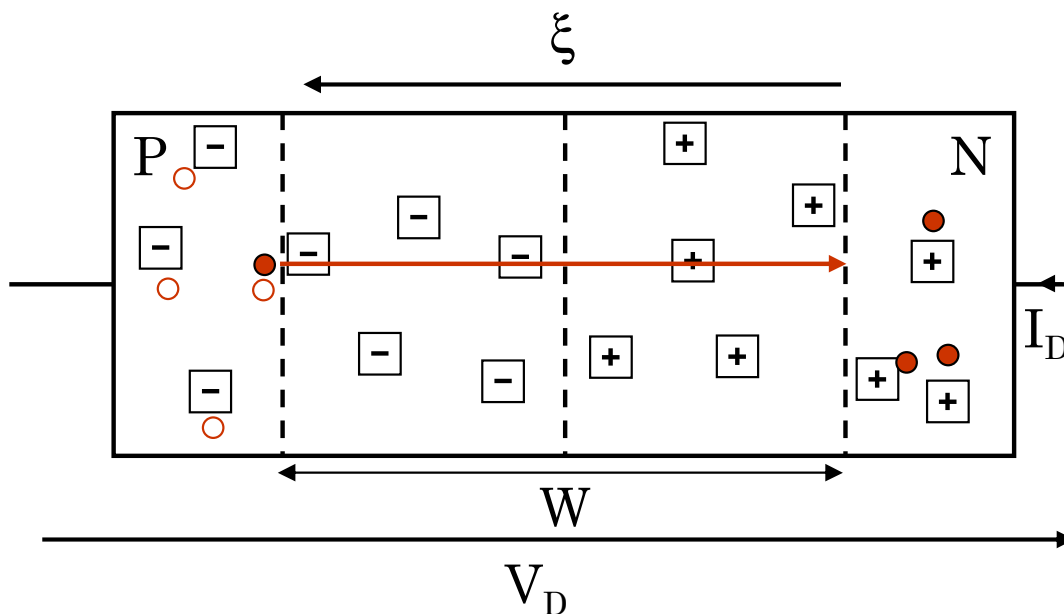
- Lorsque le champ électrique est très fort et que la largeur de la ZCE est très faible :
  - ✓ Des électrons de la zone P en frontière de la ZCE peuvent être arrachés au réseau cristallin
  - ✓ On obtient des tensions de ruptures qui vont de 2 à 200 V



## V.4. Caractéristique en courant

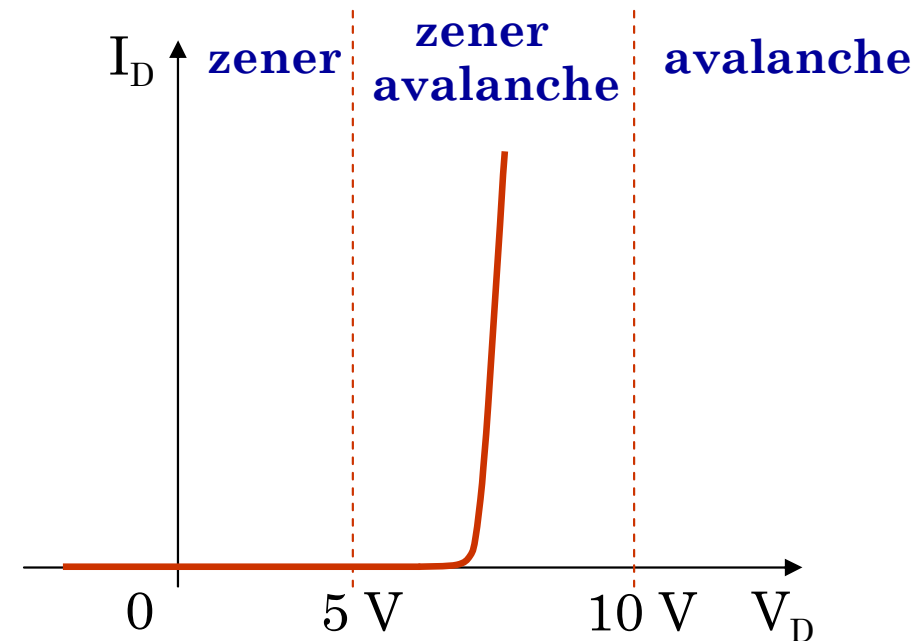
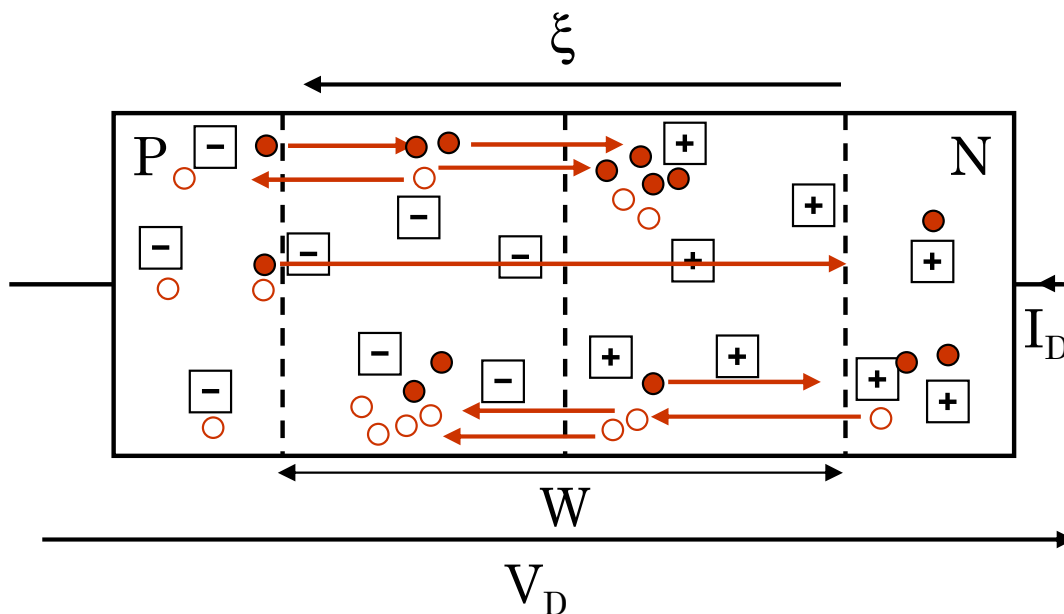
- La caractéristique  $I_D(V_D)$  résulte de l'effet d'avalanche et/ou de l'effet zener

✓  $V_Z < 5 \text{ V}$  : effet zener



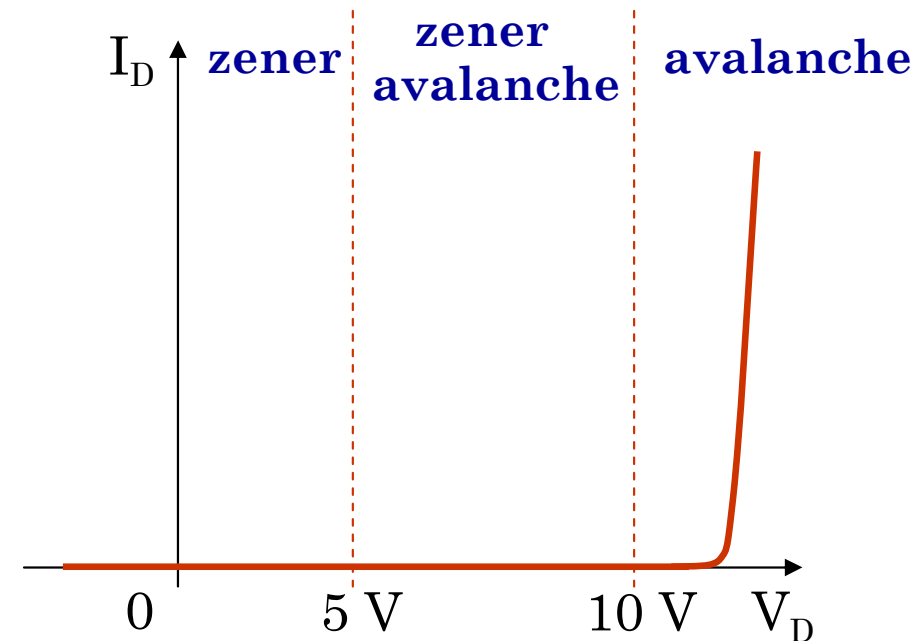
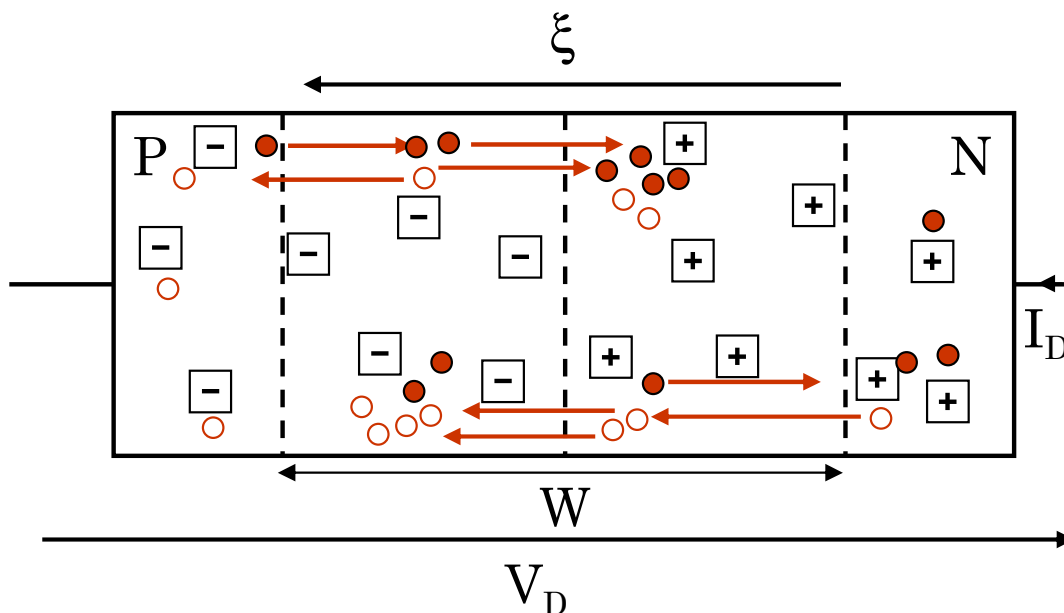
## V.4. Caractéristique en courant

- La caractéristique  $I_D(V_D)$  résulte de l'effet d'avalanche et/ou de l'effet zener
  - ✓  $V_Z < 5 \text{ V}$  : effet zener
  - ✓  $5 \text{ V} < V_Z < 10 \text{ V}$  : effet zener + effet d'avalanche



## V.4. Caractéristique en courant

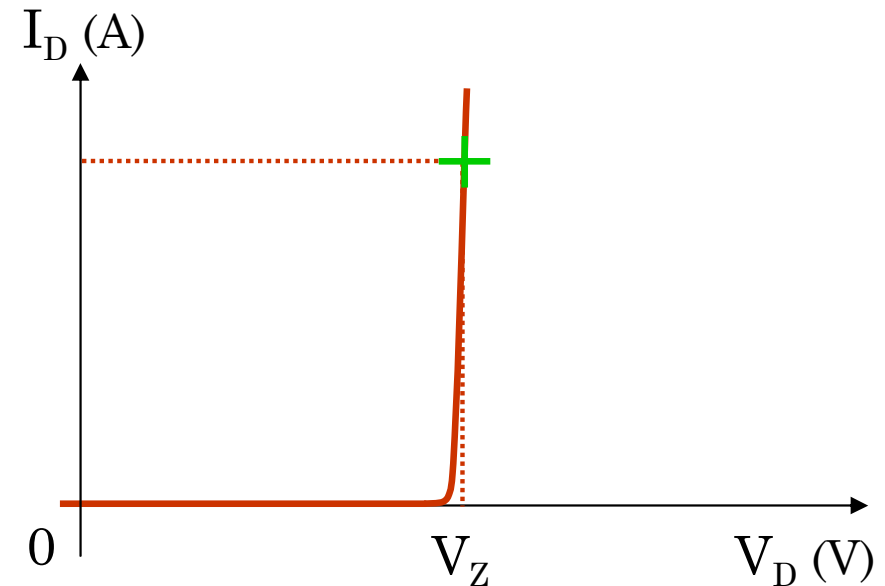
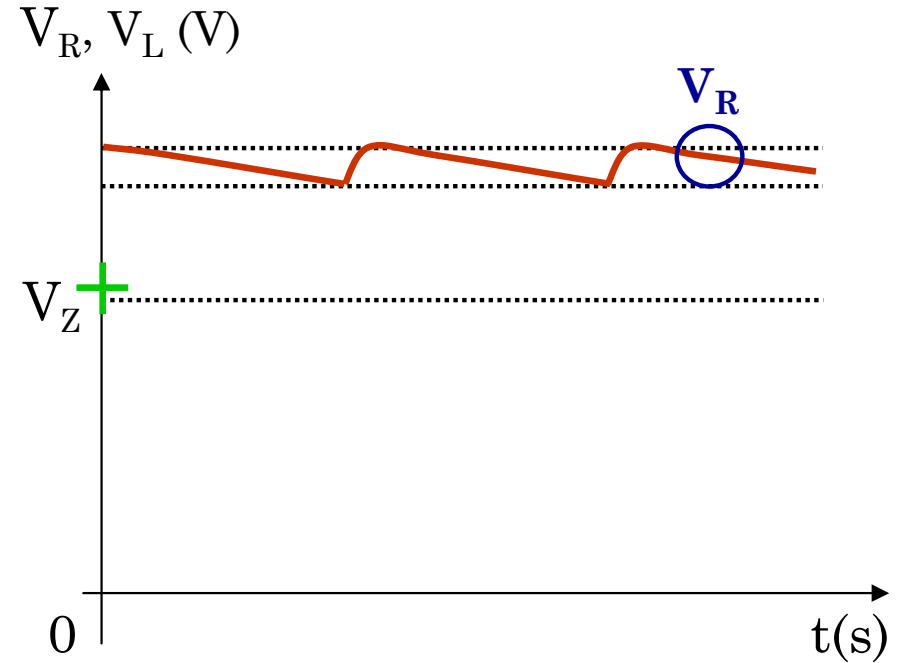
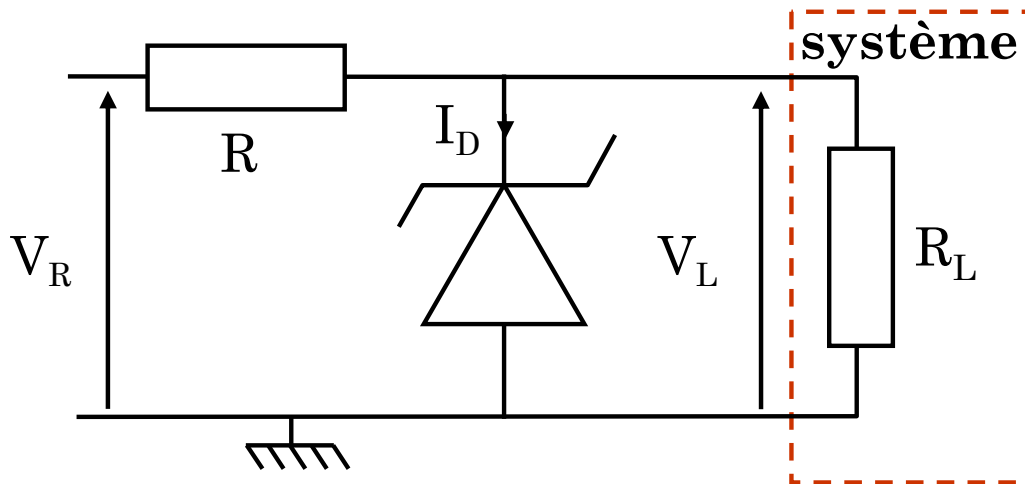
- La caractéristique  $I_D(V_D)$  résulte de l'effet d'avalanche et/ou de l'effet zener
  - ✓  $V_Z < 5 \text{ V}$  : effet zener
  - ✓  $5 \text{ V} < V_Z < 10 \text{ V}$  : effet zener + effet d'avalanche
  - ✓  $V_Z > 10 \text{ V}$  : effet d'avalanche



## V.5. Application

### □ Stabilisateur de tension

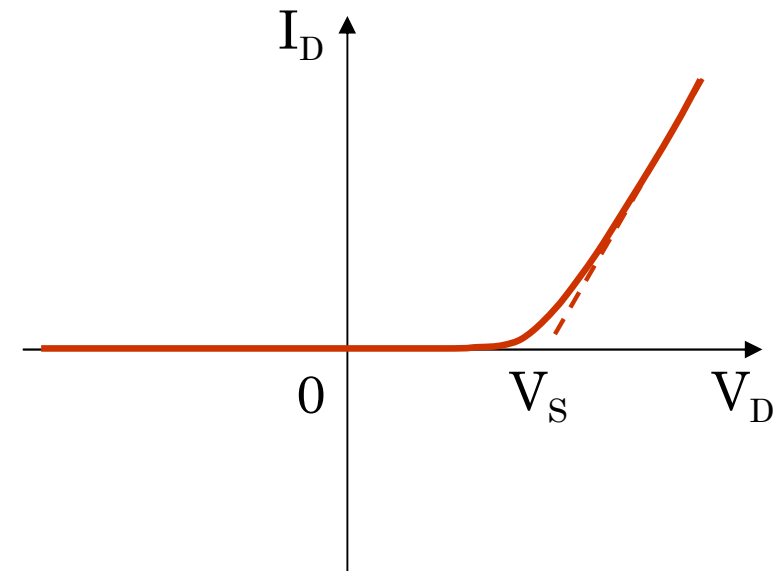
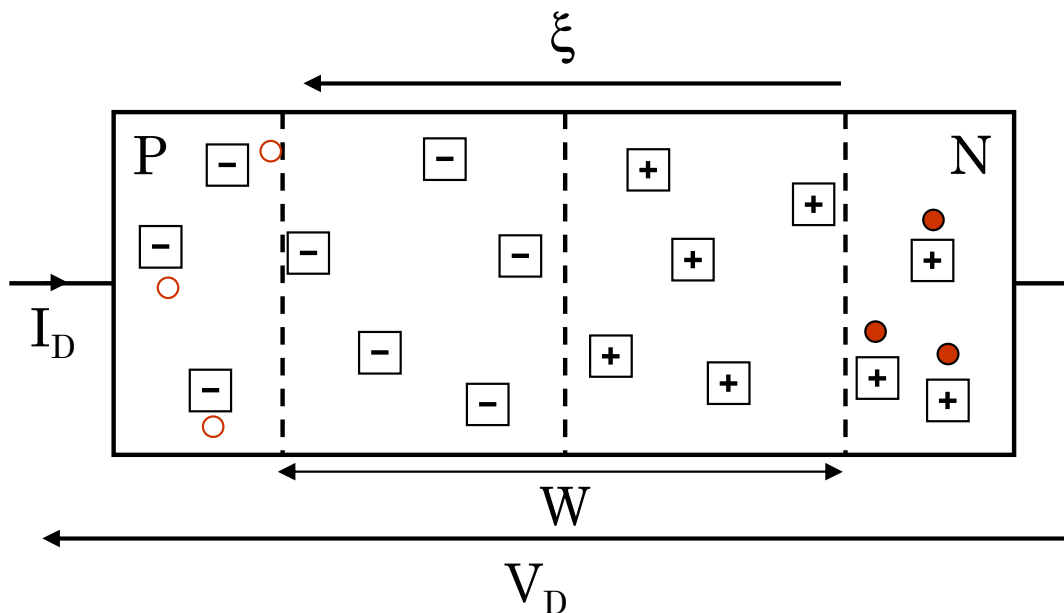
- Le but ici est de supprimer l'ondulation résiduelle après le filtrage capacitif.
- La tension de rupture ( $V_Z$ ) est la tension que l'on souhaite avoir sur la charge.



## VI.1. Phénomène physique

### □ Modification de la caractéristique courant-tension

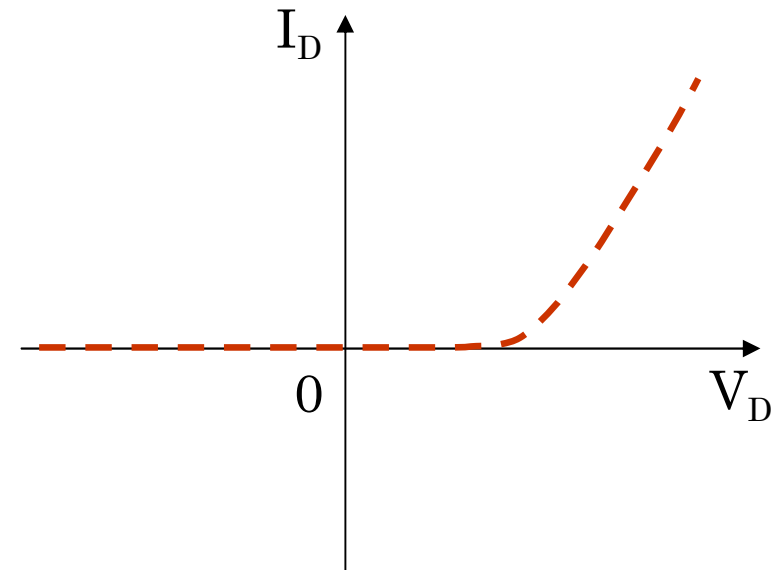
- Des photons ayant une énergie suffisante ( $h\nu$ ) peuvent générer des paires électron-trou.



## VI.1. Phénomène physique

### □ Modification de la caractéristique courant-tension

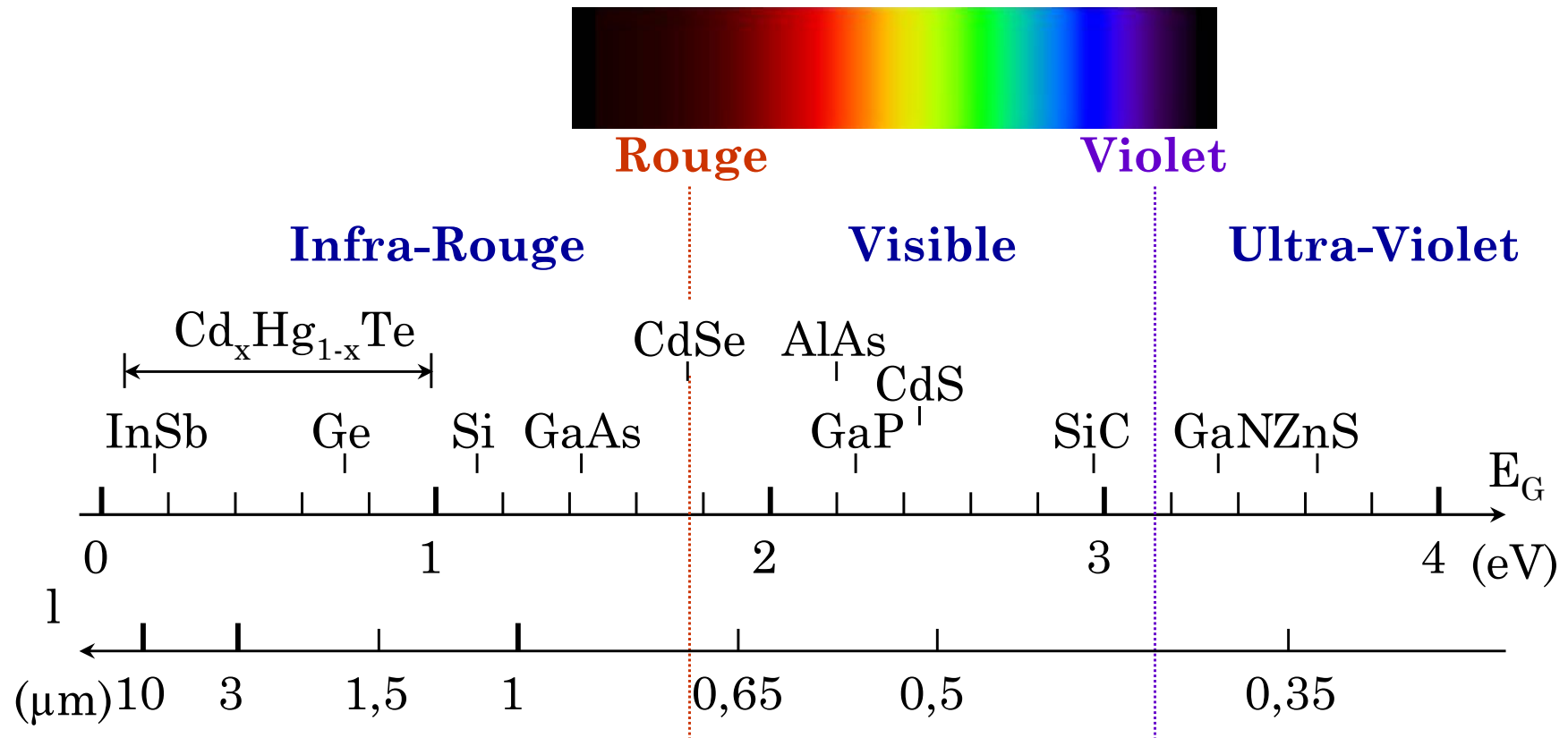
- Des photons ayant une énergie suffisante ( $h\nu$ ) peuvent générer des paires électron-trou.
- Si génération dans la ZCE : augmentation du courant inverse.
- La diode se comporte comme un générateur :  $V_D$  positif et  $I_D$  négatif.
- Existence d'un couple ( $V_D$ ,  $I_D$ ) qui donne une puissance maximale.



## VI.1. Phénomène physique

### □ Absorption dans le silicium

- L'énergie minimale des photons pour créer des paires électron-trou dépend du type de semi-conducteur.

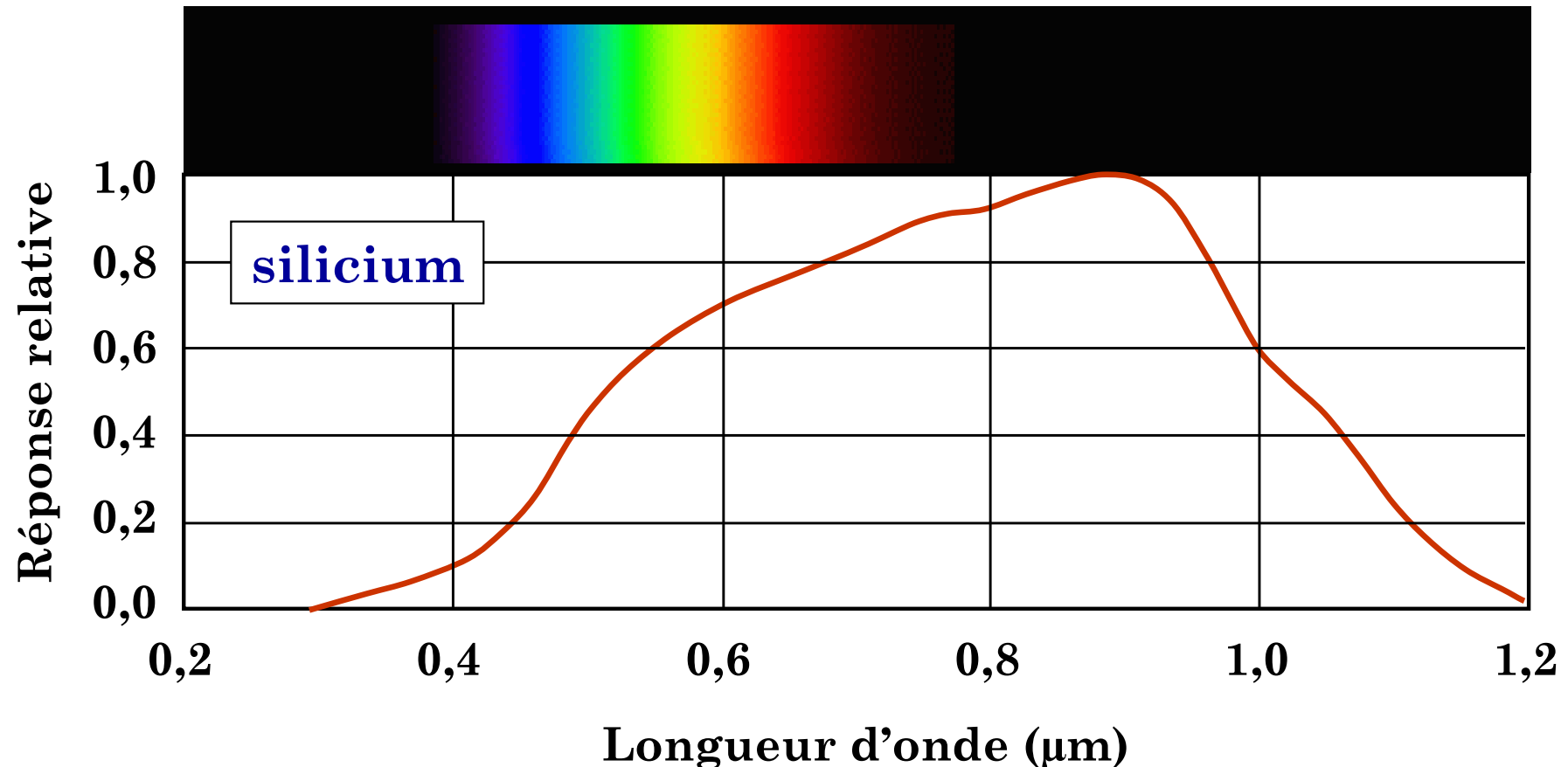




## VI.1. Phénomène physique

### □ Absorption dans le silicium

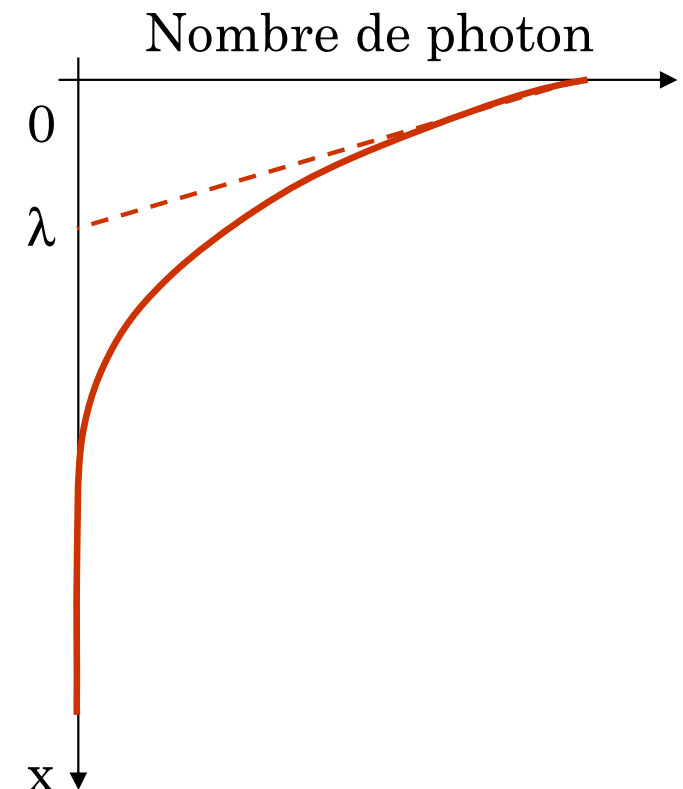
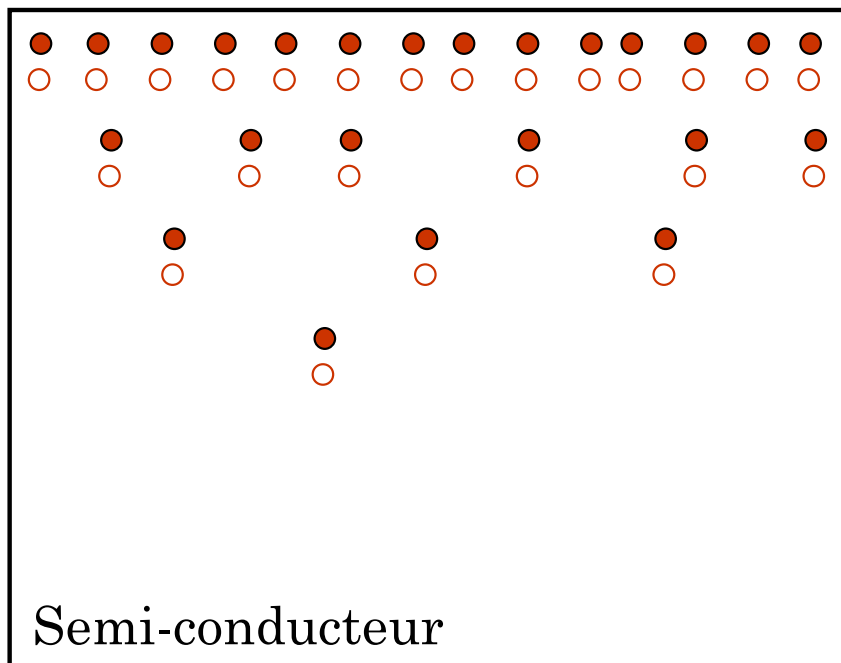
- L'énergie minimale des photons pour créer des paires électron-trou dépend du type de semi-conducteur.



## VI.1. Phénomène physique

### □ Absorption dans le silicium

- Les photons ont une certaine distance de pénétration dans le semi-conducteur.



## VI.2. Applications : cellules photovoltaïques (panneau solaire)

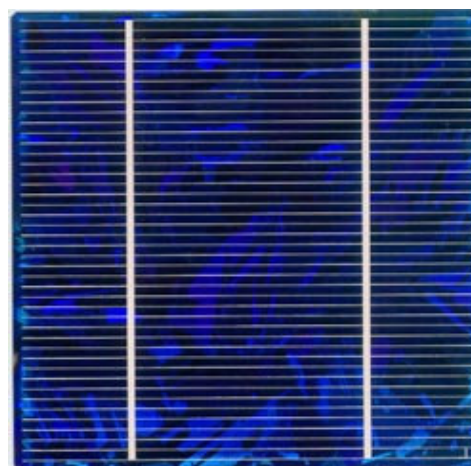
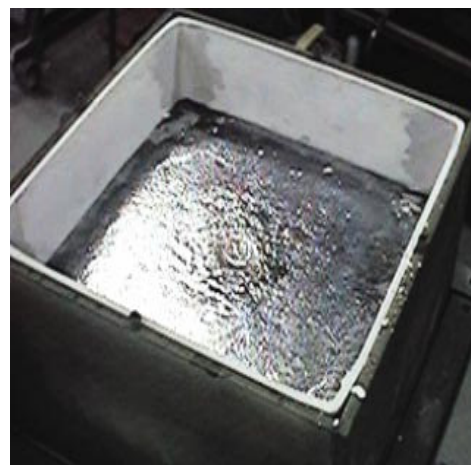
### □ Présentation

- Elles permettent d'amener de l'électricité dans des endroits reculés
- Elles commencent à être rentable pour de la production de masse



## VI.2. Applications : cellules photovoltaïques (panneau solaire)

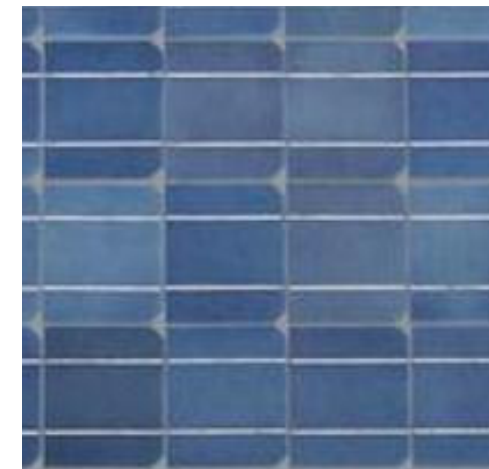
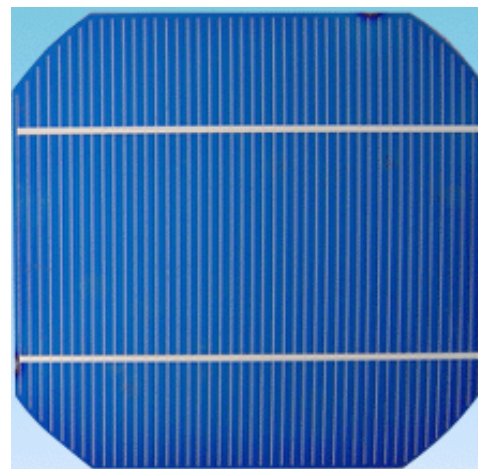
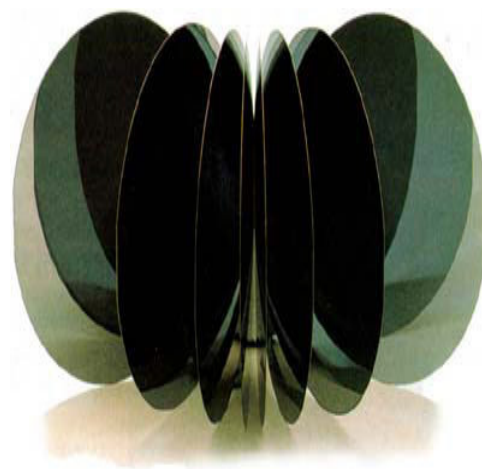
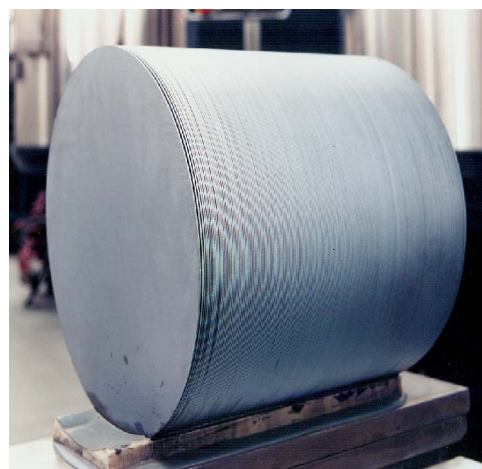
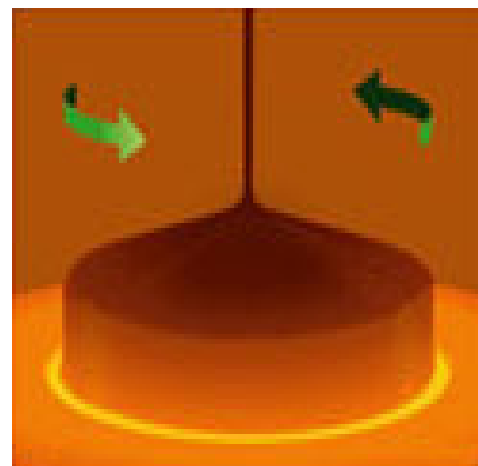
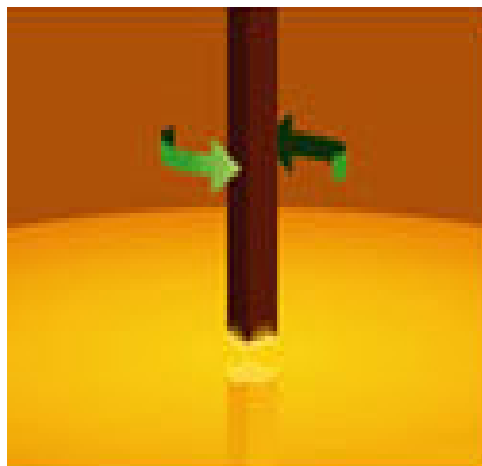
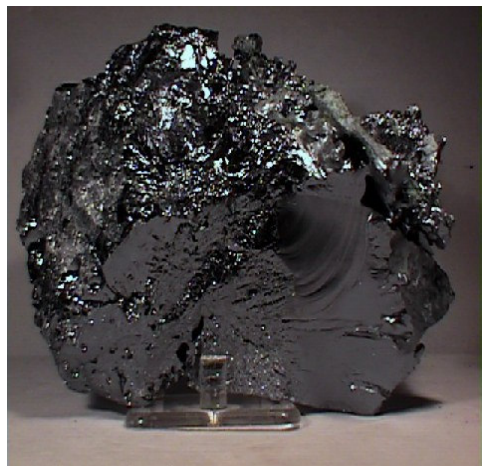
- ❑ Fabrication du silicium poly-cristallin (source : [www.photowatt.com](http://www.photowatt.com))





## VI.2. Applications : cellules photovoltaïques (panneau solaire)

### ❑ Fabrication du silicium mono-cristallin



## VI.2. Applications : cellules photovoltaïques (panneau solaire)

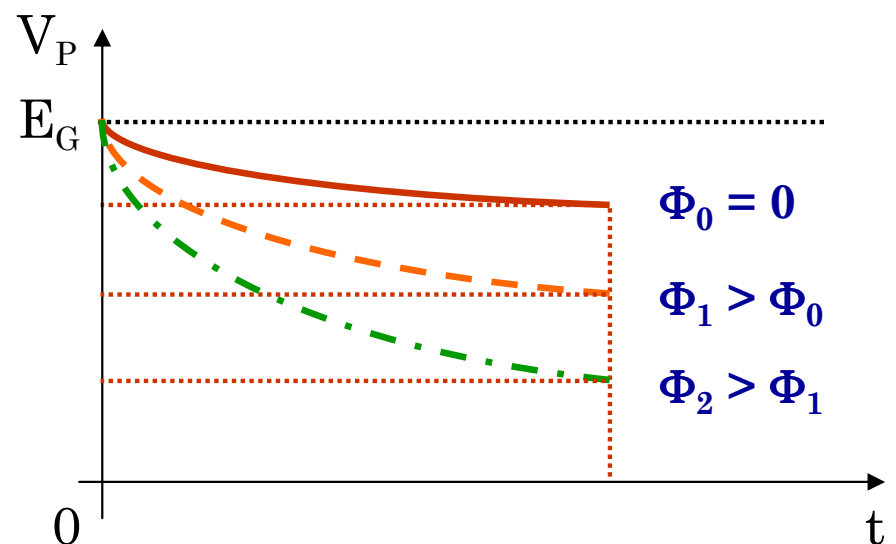
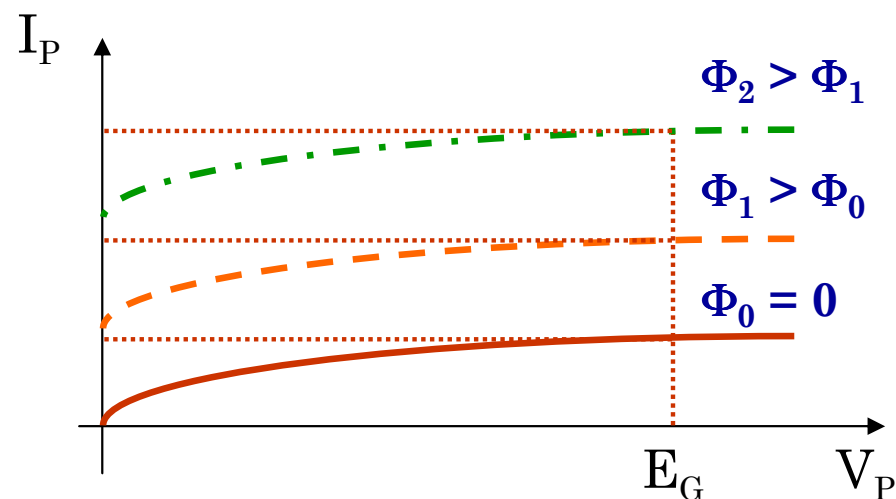
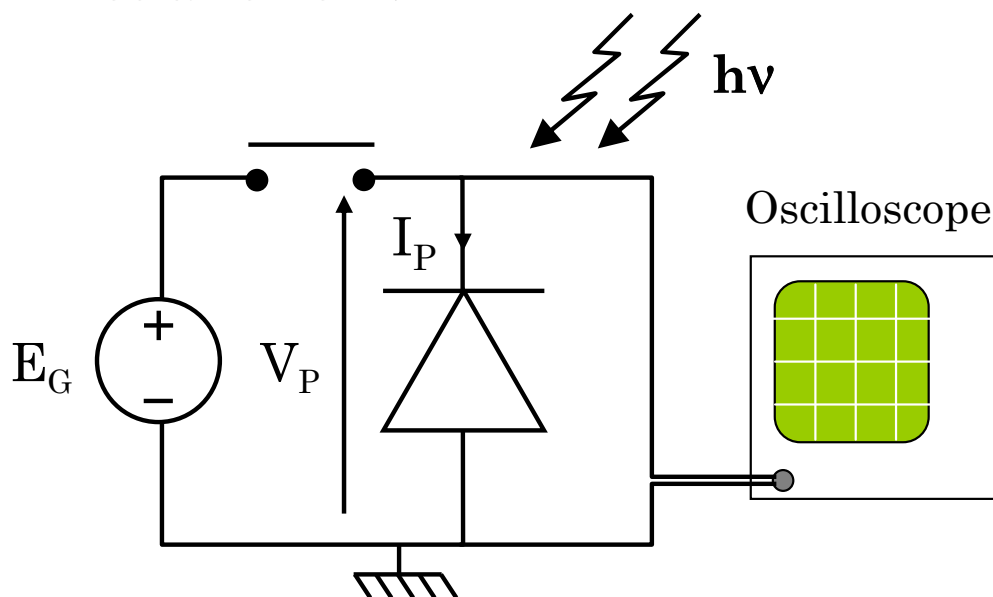
□ Rendement des cellules (source : Systèmes Solaires, juillet 2006)

	Type	Rendement			Niveau de développement
		Cellule (en labo)	Module (en labo)	Module (commerciale)	
1 <sup>ère</sup> génération	Si monocristallin	24,70 %	22,70 %	12-20 %	Production industrielle
	Si polycristallin	20,30 %	16,20 %	11-15 %	Production industrielle
	Si amorphe	13,40 %	10,40 %	5-9 %	Production industrielle
2 <sup>ème</sup> génération	Si cristallin en couche mince		9,40 %	7 %	Production industrielle
	CIS	19,30 %	13,50 %	9-11 %	Production industrielle
	CdTe	16,70 %		6-9 %	Prêt pour la production
3 <sup>ème</sup> génération	Cellule organique	5,70 %			Recherche
	Cellule organique	11 %	8,40 %		Recherche
	Cellule multi-jonctions	39 %	25-30 %		Recherche (spatiales)

## VI.2. Applications : pixel

### □ Principe de fonctionnement

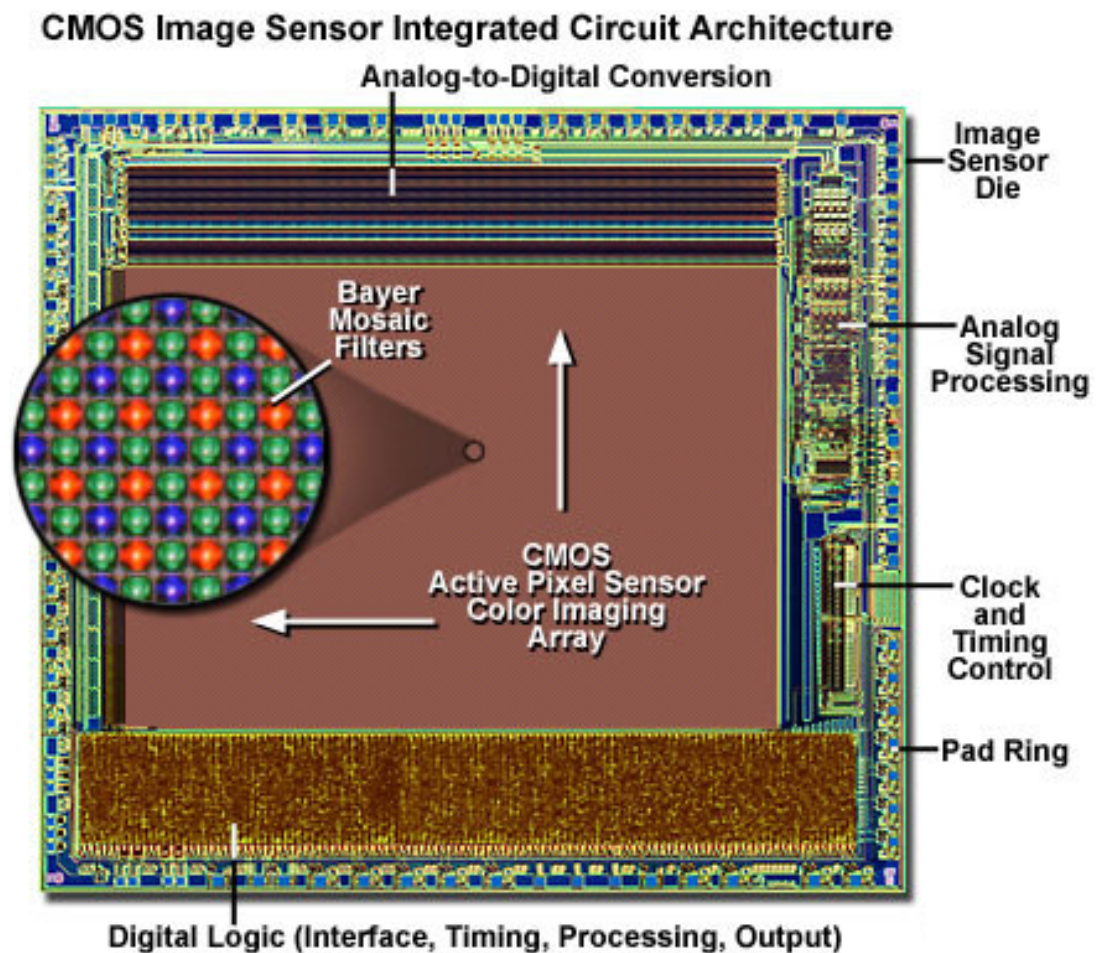
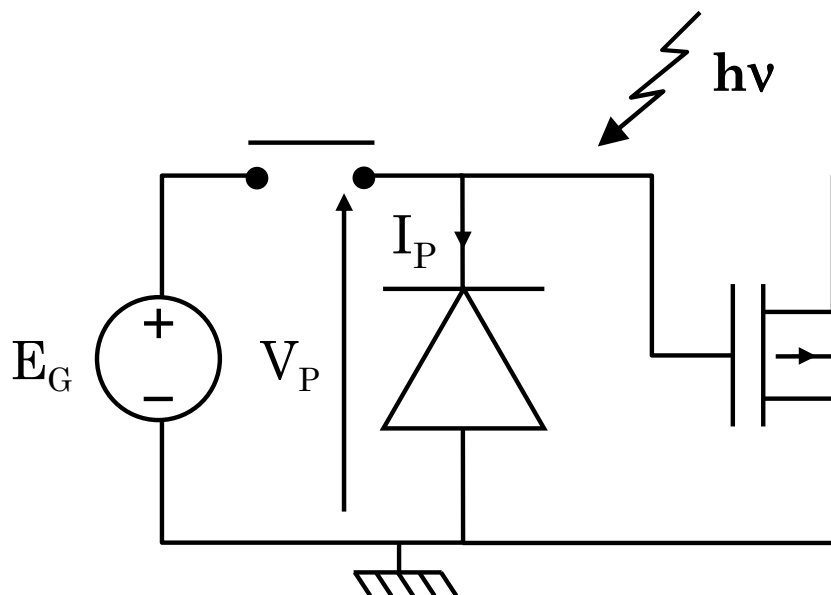
- On polarise la diode en inverse à  $E_G$  et on déconnecte le générateur.
- La capacité "parasite" de la diode se décharge avec le courant inverse.
- Le courant inverse augmente avec l'éclairement.



## VI.2. Applications : pixel

### □ Détection de la couleur

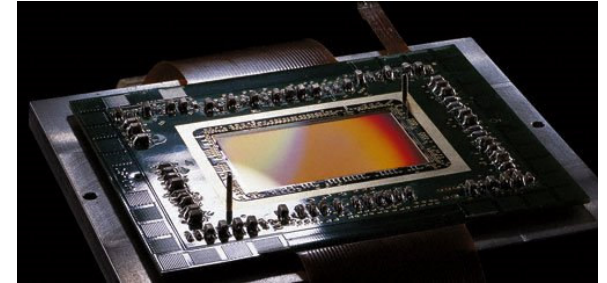
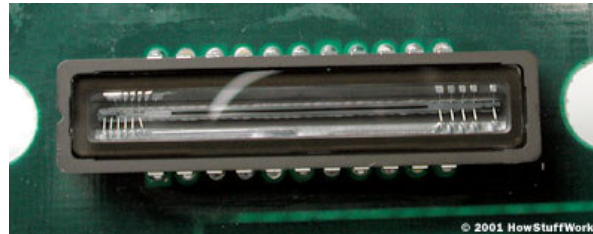
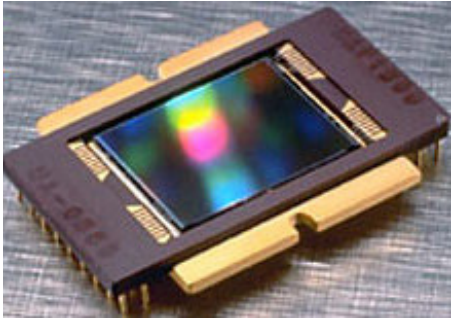
- Chaque diode est couverte d'un filtre bleu, rouge ou vert





## VI.2. Applications : pixel

### □ Exemples de matrice

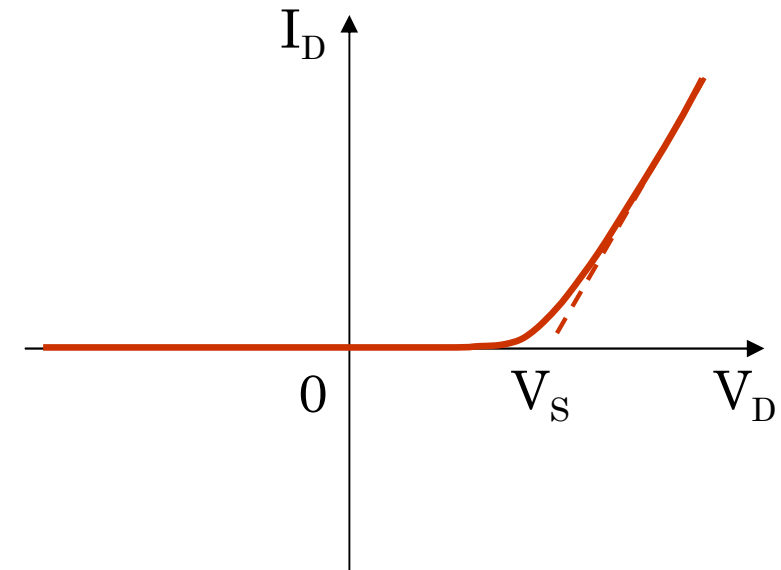
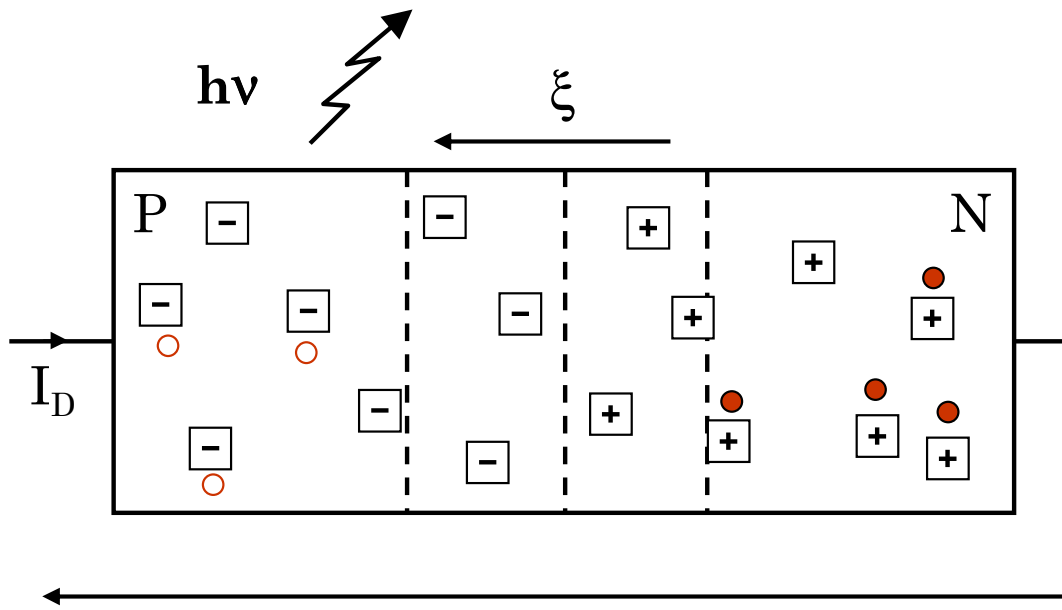


### □ Exemples d'utilisation



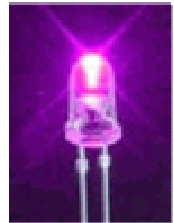
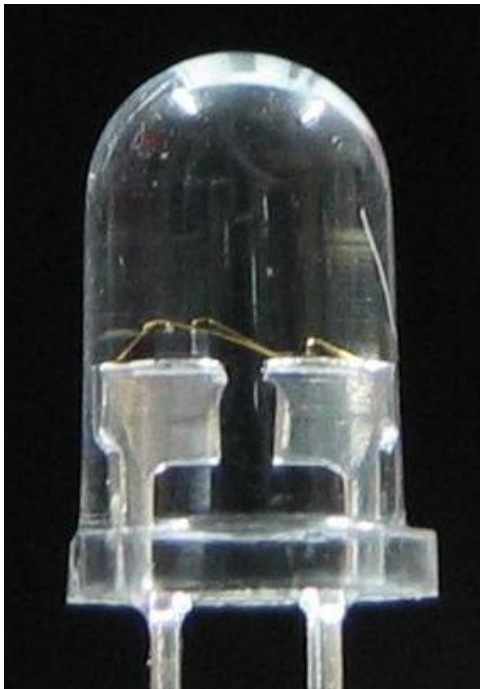
## VII.1. Phénomène physique

- La diode est polarisée en direct : les porteurs majoritaires traversent la ZCE, et deviennent minoritaires
- Un trou peut se recombinier avec un électron : émission d'un photon.
- L'énergie du photon dépend du semi-conducteur.
- Tous les semi-conducteurs n'émettent pas de photons.
- Ajout d'atomes "parasites" : recombinaison intermédiaire



## VII.2. Application : diode électroluminescente (LED)

### □ Les types de LED et utilisations

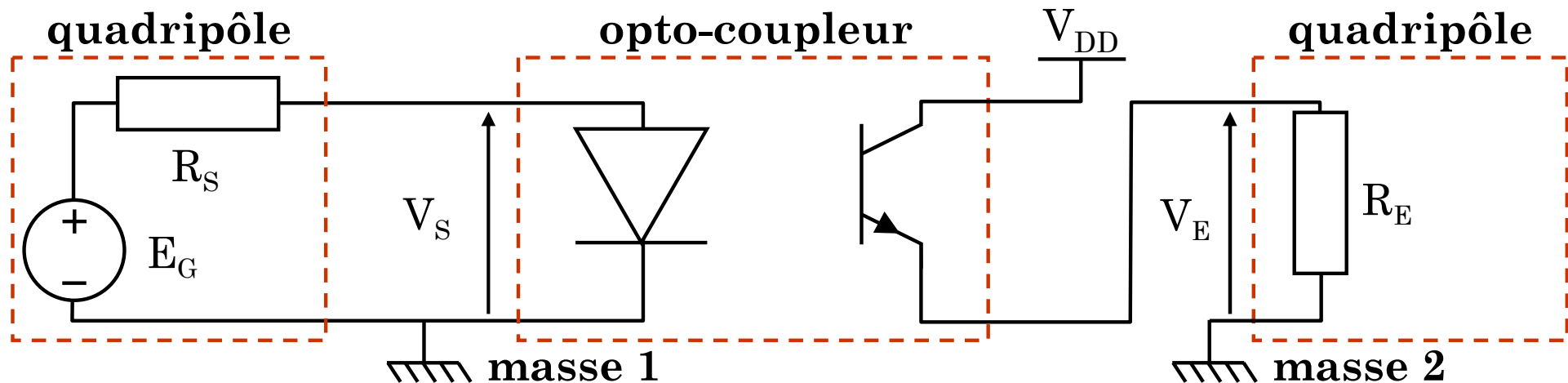
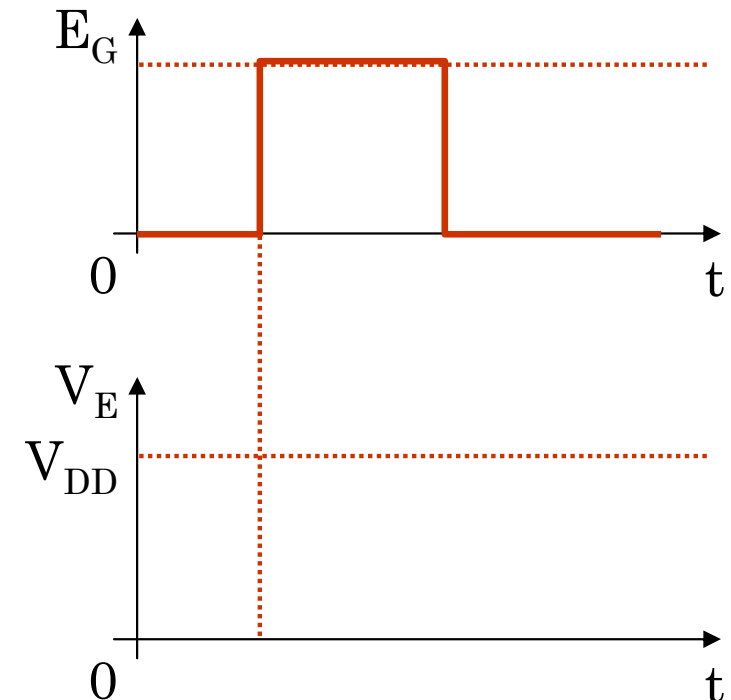


11,06 m<sup>2</sup>, 442368 LED

## VII.2. Application : diode électroluminescente (LED)

### □ L'opto-coupleur

- Il sert à transmettre une information entre deux circuits électroniques isolés électriquement.





## VII.3. Quelques chiffres sur les LED

	LED classique	LED haute luminosité	LED de puissance
Puissance consommée	3 à 20 mW	30 à 200 mW	1 à 5 W
Puissance lumineuse	< 0,1 lm	0,1 à 1 lm	15 à 75 lm
Applications	Témoins lumineux	Eclairage d'appoints Lampe de poche	Eclairage monochrome

	Incandescence	Halogène	Lampe Fluo-compactes	LED Blanches
Efficacité lumineuse	5 à 20 Lm/W	10 à 26 Lm/W	50 à 70 Lm/W	15 à 100 Lm/W
Durée de vie	1 000 h	4 000 h	2 000 h	100 000 h

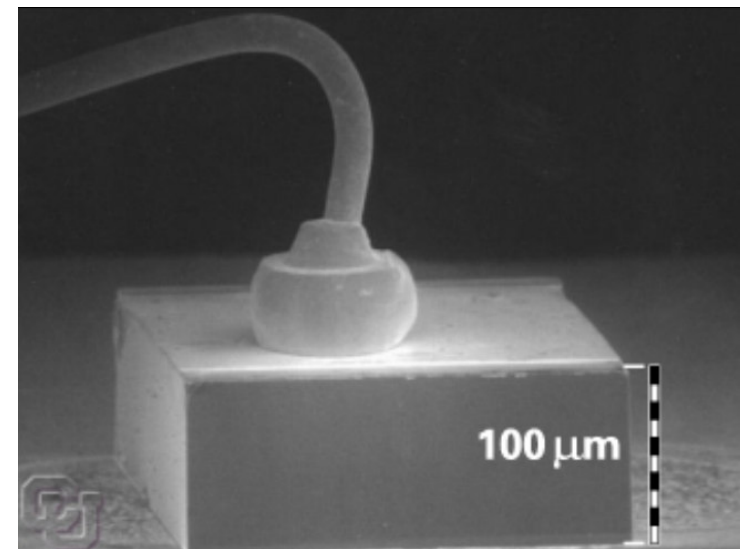
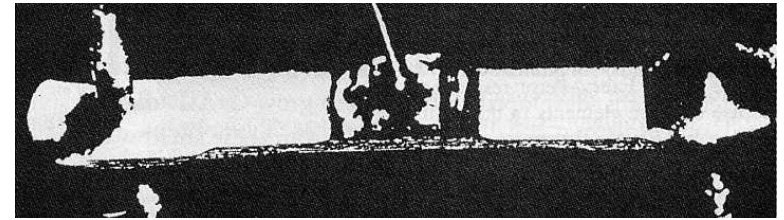
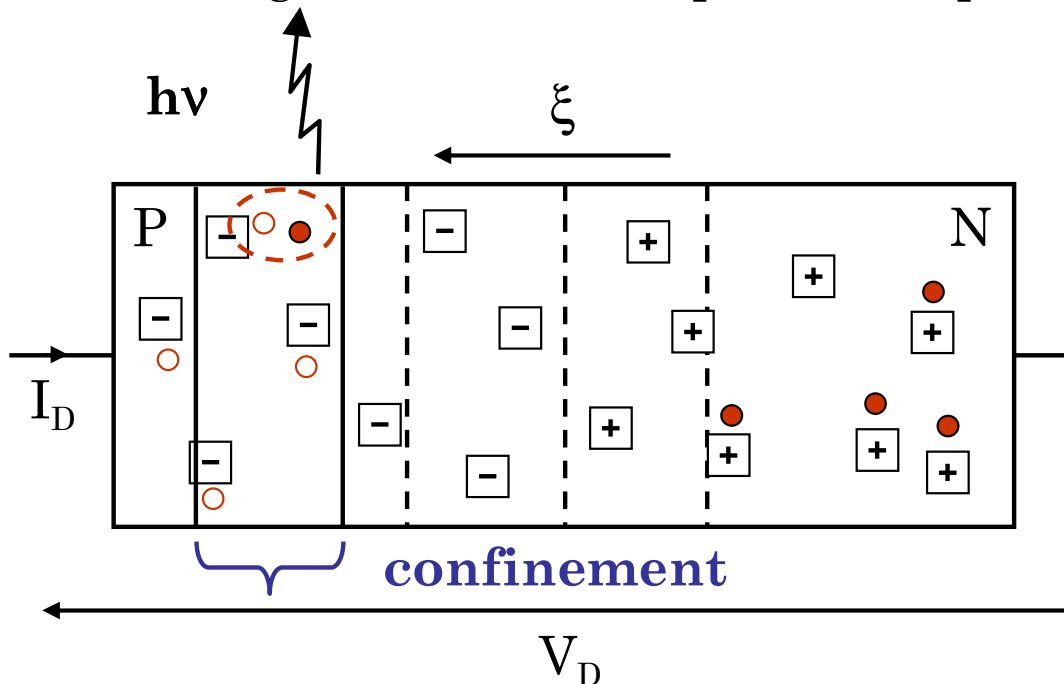
## VII.3. Quelques chiffres sur les LED

Couleur	Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )	Tension de seuil (V)	Semi-conducteur
InfraRouge	$\lambda > 760$	$V_s < 1,63$	arseniure de gallium-aluminium (AlGaAs)
Rouge	$610 < \lambda < 760$	$1,63 < V_s < 2,03$	arseniure de gallium-aluminium (AlGaAs) phospho-arseniure de gallium (GaAsP)
Orange	$590 < \lambda < 610$	$1,63 < V_s < 2,03$	phospho-arseniure de gallium (GaAsP)
Jaune	$570 < \lambda < 590$	$2,10 < V_s < 2,18$	phospho-arseniure de gallium (GaAsP)
Vert	$500 < \lambda < 570$	$2,18 < V_s < 2,48$	nitride de gallium (GaN) phosphure de gallium (GaP)
Bleu	$450 < \lambda < 500$	$2,48 < V_s < 2,76$	séleniure de zinc (ZnSe) nitride de gallium/indium (InGaN) carbure de silicium (SiC)

## VII.5. Diode laser

### □ Phénomène physique

- La diode laser est une hétérojonction : empilement de semi-conducteurs différents.
- Les électrons sont confinés dans un puits quantique : même énergie.
- L'émission de photons provient de la recombinaison électron-trou.
- La longueur d'onde des photons dépend du semi-conducteur.



## VII.5. Diode laser

### □ Exemples d'utilisation

