

**LABORATOIRE DE PHYSIQUE IIA
(ÉLECTRONIQUE)**

Notes de Cours

TP4

JEAN-MICHEL SALLESE

CÉDRIC MEINEN

DANIELE MARI



TP 3. BASES D'ANALYSE DES CIRCUITS

Semiconducteurs et Dopages . La diode PN

La diode électroluminescente

La photo-diode

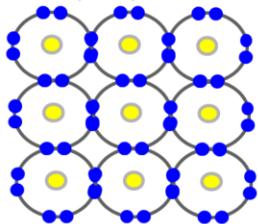
**Conversion Courant-Tension de la photodiode.
Filtrage basses fréquences**

SEMICONDUCTEURS ET DOPAGES
LA JONCTION PN (DIODE)

SEMICONDUCTEURS ET DOPAGES

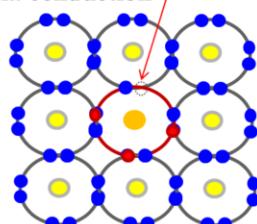
Le dopage dans un cristal de silicium

Silicium à l'état pur: tous les électrons de valence sont mobilisés (à 0K)



Electrons de valence (liaisons entre atome)

Un 'trou': Particule virtuelle qui participe à la conduction

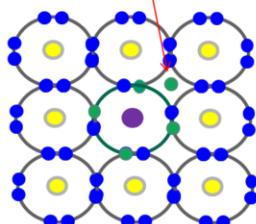


Atome de **Bore** en substitution du silicium: il manque 1 électron au cristal



Dopage de type P

Electron supplémentaire qui participe à la conduction



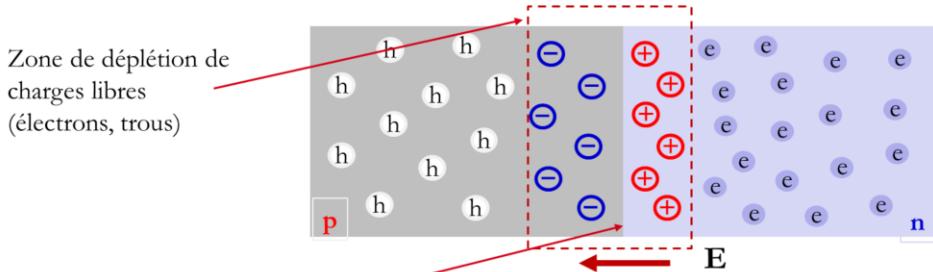
Atome de **Phosphore** en substitution du silicium: ajoute 1 électron au cristal



Dopage de type N

On peut modifier les propriétés d'un semiconducteur en insérant des atomes 'donneurs' ou 'accepteurs' d'électrons.

LA JONCTION P-N À L'ÉQUILIBRE



Au niveau de la **jonction pn**, le gradient de concentration fait que les électrons et les trous (holes) vont diffuser dans la zone adjacente, là où ils sont minoritaires.

Il existe donc une zone qui sera ‘déplétée’ de porteurs: les atomes donneurs et accepteurs perdront ou gagneront un électron.

Dans cette zone, les impuretés ‘donneur’ créeront une charge positive fixe. De même, les atomes ‘accepteurs’ créeront une charge négative fixe.

Ces charges fixes créent un champ électrique qui va s’opposer au phénomène de diffusion. L’équilibre sera atteint lorsque les 2 effets se compenseront.

Du côté n de la jonction il y a des électrons libres et du côté p des trous libres. Ces charges libres se comportent comme des molécules de gaz qui ont tendance à occuper tout l'espace disponible.

Ces charges vont donc diffuser à travers la jonction, là où elles sont minoritaires. Ce transfert va priver les atomes dopants de leur charge: ils seront ionisés (ce sont des ions chargés)

Un donneur dans la zone n qui perd son électron devient ainsi une charge positive fixe, un accepteur dans la zone p qui perd son trou (gagne un électron) devient une charge négative fixe.

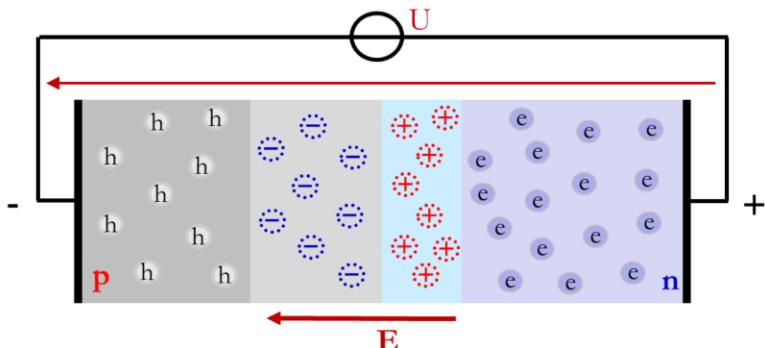
Ces charges fixes, de part et d'autre de la jonction, créent un champ électrique E dans une zone que l'on appelle la Zone de Déplétion (dans cette zone, il n'y a plus de charges mobiles).

On peut montrer que cet échange de charges électriques fini par atteindre un équilibre.

Cette zone de déplétion peut s'étendre de quelques nanomètres à quelques micromètres selon les valeurs des dopages.

Il s'agit donc d'une zone très localisée. De façon imagée, si aucun potentiel externe est appliqué entre les zones n et p, le nombre de charges qui diffusent du côté opposé est compensé par celle qui reviennent sous l'effet du champ électrique interne E. Par conséquent, à l'équilibre le courant est bien nul.

LA JONCTION P-N POLARISÉE EN INVERSE



Si on applique entre les zones **p** et **n** une tension qui renforce le champ électrique **E**, la zone de déplétion s'élargit et la barrière de potentiel augmente: aucune charge ne pourra traverser et le courant sera nul.

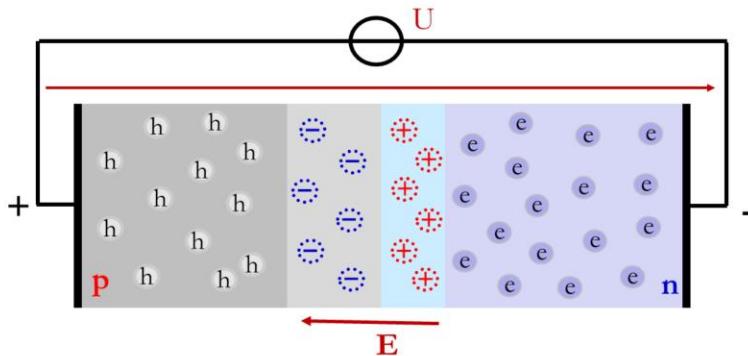
Polarisée en sens inverse, la jonction est bloquée

Si l'on applique entre les deux zones une tension de polarité + sur n, – sur p, elle va accroître la barrière de potentiel et les charges (électrons et trous) ne pourront plus la franchir pour rejoindre la zone opposée.

En même temps, le champ électrique est renforcé et la zone de déplétion augmente.

La jonction est dite en mode inverse, elle est bloquée, aucun courant ne pourra circuler (en réalité, il subsiste un courant ‘inverse’ extrêmement faible)

LA JONCTION P-N POLARISÉE EN DIRECT



Si on applique entre les zones p et n une tension qui réduit le champ électrique E , et donc également la barrière de potentiel, les porteurs pourront traverser la zone de déplétion et générer un courant I (ce courant est constitué d'un courant d'électrons et d'un courant de trous).

Polarisée en sens direct, la jonction est passante

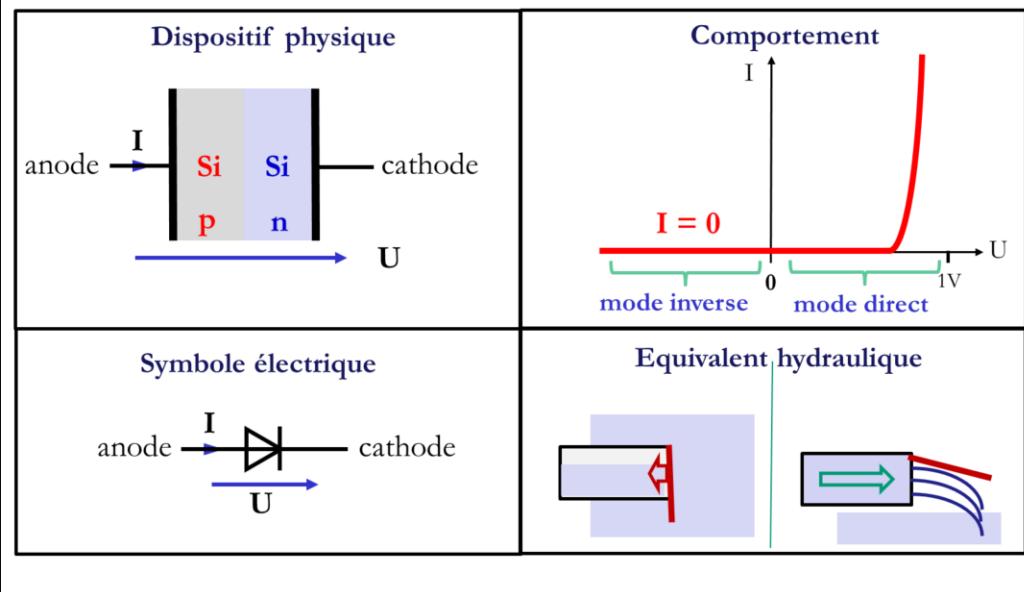
Si on applique une tension de polarité + sur p et - sur n, on va diminuer la barrière de potentiel et permettre aux porteurs de charge d'être injectés dans la zone opposée.

La jonction est dite en mode directe, elle laisse passer le courant.

LE MODÈLE SIMPLIFIÉ DE LA DIODE

DIODE À JONCTION P-N : GÉNÉRALITÉS

La diode à jonction PN est un dipôle non-symétrique et non-linéaire.



Due à cette dissymétrie, dans une jonction pn, le courant ne peut s'écouler que dans une direction, c'est-à-dire de la zone dite dopée P vers la zone dite dopée N.

Notons que les électrons font le chemin inverse.

Le symbole électrique indique le sens ‘passant’ de la diode.

L'image hydraulique de la diode est celui d'un clapet anti-retour.

Lorsque l'eau submerge le tuyau (dessin de gauche), le clapet se ferme et aucun courant ne peut passer dans le tuyau. Par contre, il existe bien une pression sur le clapet. Cette pression serait l'équivalent de la tension inverse aux bornes de la diode.

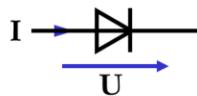
Si le niveau de l'eau passe en dessous du clapet, l'eau contenue dans le tuyau va repousser le claper et s'écouler vers l'extérieur. Le courant passe.

Dans ce cas, on comprend que la pression exercée sur le clapet sera bien plus faible, et ceci quelque soit le débit d'eau.

Cette pression représente la tension aux bornes de la diode en mode direct.

DIODE À JONCTION P-N : MODÈLE NON-LINÉAIRE

La relation entre le courant et la tension est de nature **exponentielle**.
Elle est donc fortement non-linéaire.



$$I = I_S \left(e^{U/nU_T} - 1 \right)$$

$$10^{-15} < I_S < 10^{-9} \text{ [A]}$$

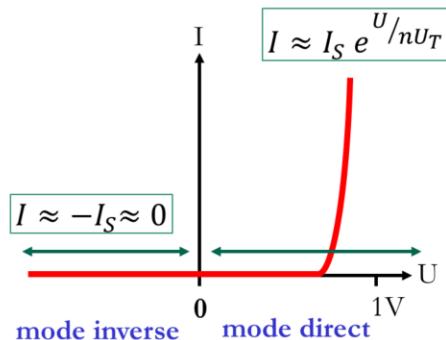
I_S et n sont des paramètres propres au dispositif, tels que le dopage.

Le facteur n dépend de la pureté du semiconducteur.

$$U_T = kT/q = 26 \text{ mV à } 300\text{K (25° C)}$$

Potentiel thermodynamique

Modèle approché



En plus d'avoir une caractéristique non symétrique, qui est d'ailleurs le but recherché lorsqu'on utilise une diode, la dépendance entre le courant et la tension est fortement non-linéaire $I = I_S \left(e^{U/nU_T} - 1 \right)$.

I_S et n sont des paramètres qui dépendent de la technologie de fabrication de la diode, principalement des densités et profils des dopages, ainsi que de la surface de la jonction.

Dans la pratique I_S étant très petit, la relation $I = I_S \left(e^{U/nU_T} - 1 \right)$ peut se réduire à deux expressions :

- en mode direct : $I = I_S e^{U/nU_T}$ dès que $U >$ quelques centaines de millivolts
- en mode inverse : $I \approx -I_S \approx 0$ pour $U < 0$ car I_S est très faible

$U_T = kT/q$ est le potentiel thermodynamique

$k = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ [J/K]}$ la constante de Boltzmann

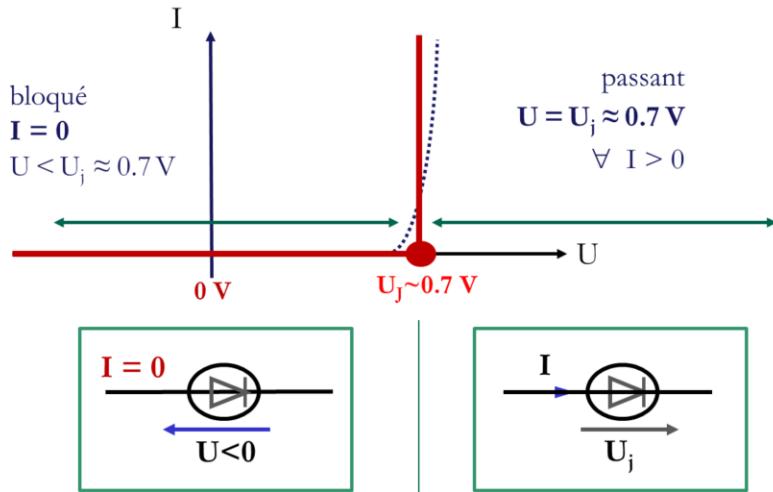
T la température absolue en ° K

$q = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ [C]}$ la charge de l'électron

Généralement, on considère $T = 300^\circ \text{ K}$ ($\approx 25^\circ \text{ C}$) et alors $U_T = kT/q = 26 \text{ mV}$.

DIODE À JONCTION P-N : MODÈLE SIMPLIFIÉ

Le modèle très simplifié



La caractéristique $I = I_S e^{U/nU_T}$ est suffisamment abrupte pour en faire un modèle très simple où l'on approxime la caractéristique de la diode par une demi-droite verticale, c'est-à-dire une tension constante U_j quel que soit la valeur du courant I .

Ce comportement correspond à celui d'une source de tension constante qui vaut environ 0.7 V pour les diodes au silicium (attention, la diode ne fournit aucune énergie, contrairement à une source de tension).

Pour toute tension $U < U_j$ (et donc à fortiori $U < 0$), la caractéristique est approximée par une demi-droite horizontale avec $I = 0$.

Ce comportement correspond à un circuit ouvert.

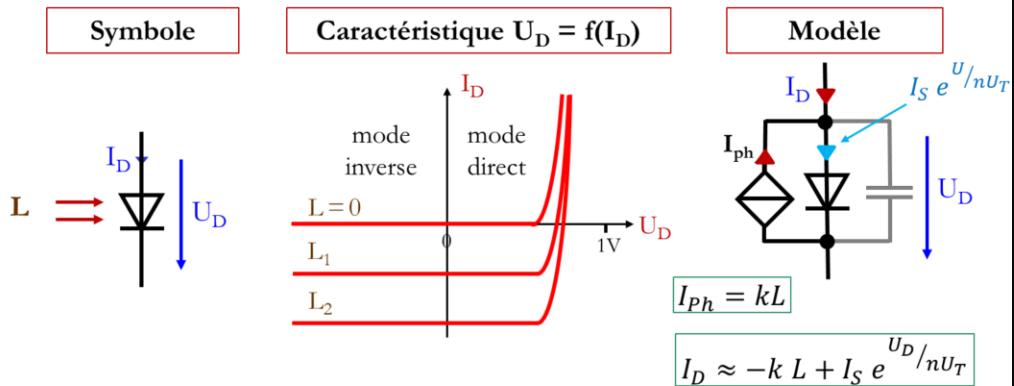
Ce modèle élémentaire est suffisant pour analyser la majorité des circuits où il y a des diodes.

LA PHOTODIODE

PHOTO-DIODE

Lorsque la zone de déplétion d'une diode est illuminée, une partie de l'énergie absorbée crée des paires électron-trou libres. Séparées par le champ électrique 'résidant', elles génèrent un courant inverse qui est proportionnel au flux de photons absorbés.

Une photodiode est une diode qui optimise la conversion lumière-courant.



Une photodiode est une jonction p-n réalisée avec des semiconducteurs qui va absorber des photons.

Pour la modéliser, il faudra donc tenir compte de son comportement intrinsèque et extrinsèque.

Sa caractéristique intrinsèque relie le courant 'intrinsèque' I_{int} à la tension U_D aux bornes de la jonction pn : $I_{int} = I_S e^{\frac{U_D}{nU_T}}$

Sa caractéristique 'extrinsèque' résulte de l'effet photoélectrique qui génère un photocourant I_{ph} proportionnel au flux lumineux L , $I_{ph} = k L$.

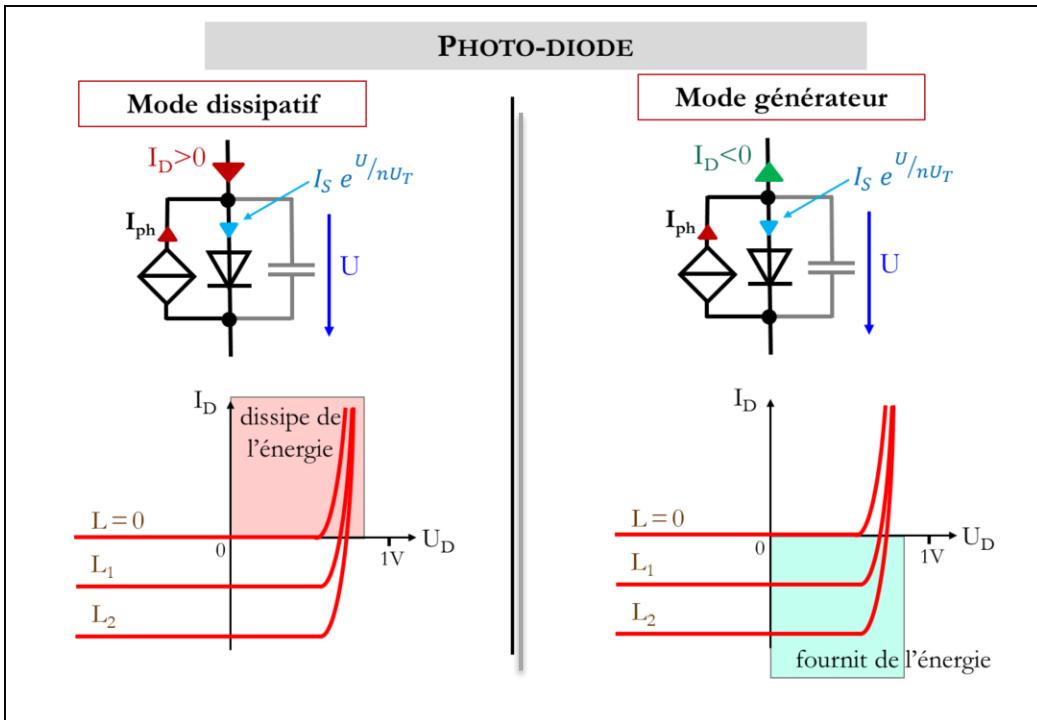
Alors, si I_D est le courant 'vu' à l'extérieur de la photodiode, en appliquant la loi des nœuds, on obtient (selon le sens défini sur le schéma):

$$I_D \approx -k L + I_S e^{\frac{U_D}{nU_T}}$$

La capacité dessinée en gris dans le modèle représente la capacité de la jonction.

Cette capacité a un effet prépondérant lorsqu'il s'agit de traiter des signaux lumineux rapides.

PHOTO-DIODE



Selon l'état de polarisation de la photodiode, celle-ci pourra dissiper ou générer de l'énergie.

En supposant qu'il n'y pas d'absorption de lumière ($L=0$), la photodiode ne peut que dissiper de l'énergie, le produit $I_D U_D$ sera toujours positif. C'est ce que l'on observe sur la figure de gauche.

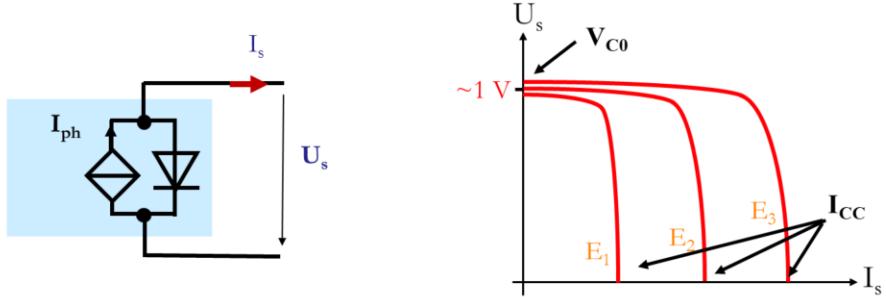
De même, si il y absorption de lumière (L_1 et L_2) mais avec une tension U_D telle que I_D reste positif, la photodiode dissipera de l'énergie (bien qu'elle en reçoive par le biais de la lumière cette fois-ci). Pour obtenir cet effet, il faut une source de polarisation externe, ce qui ne sera pas le cas si on branche une impédance.

Ces situations correspondent au cas où le courant ‘entre’ dans la photodiode ($I_D > 0$).

A contrario, dans le cas où le courant ‘ressort’ de la photodiode, il devient négatif ($I_D < 0$) et le produit $I_D U_D$ devient également négatif. Il s’agit du cas où la photodiode alimente en courant une charge externe. Ce mode de fonctionnement correspond au quadrant inférieur droit de la caractéristique $I_D - U_D$ sur la figure de droite: la photodiode fournit de l'énergie électrique à l'extérieur, elle agit comme un générateur.

LA PHOTO-DIODE

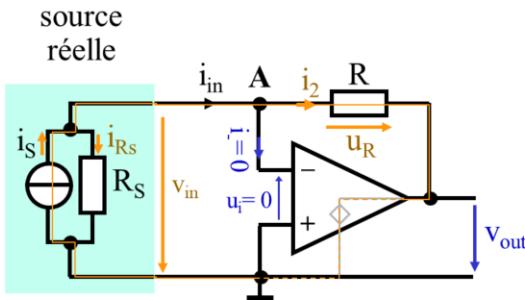
Les panneaux solaires photovoltaïques sont formés de photodiodes de grande surface, assemblées en série et/ou en parallèle pour obtenir une tension et un courant élevés.



Caractéristiques I-V pour trois niveaux d'éclairage $E_1 < E_2 < E_3$.
 Notez que la tension à vide V_{C0} n'est pas très sensible à la puissance lumineuse, contrairement au courant de court-circuit I_{CC}

**CONVERSION COURANT-TENSION
D'UNE PHOTODIODE
FILTRAGE BASSES FRÉQUENCES**

CONVERSION COURANT-TENSION PHOTODIODE



$$i_- = 0 \Rightarrow i_2 = i_{in}$$

$$u_R = R \cdot i_2 = R \cdot i_{in}$$

$$V_{out} = -U_R = -R i_{in}$$

$$u_i = 0 \Rightarrow v_{in} = -u_i = 0$$

$$v_{in} = 0 \Rightarrow i_{R_s} = \frac{v_{in}}{R_s} = 0$$

$$i_{R_s} = 0 \Rightarrow i_{in} = i_S$$

$V_{out} = -R i_S$

La lecture du courant est une tension en sortie
Cette tension est indépendante de la résistance interne R_s de la source

En toute généralité, ce circuit à base d'AO effectue une transformation Courant-Tension.

- On sait que u_i sera nulle.

- Sachant qu'une photo diode peut être vue comme une source de courant, tant

- Etant donné que $i_- = 0$, on a $i_1 = i_{in}$ que la tension ne dépasse pas U_j à ses bornes, ce circuit sera adopté par la

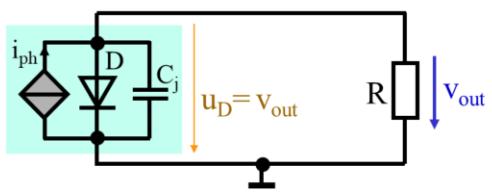
- L'équation de la maille de sortie :

$$u_R + v_{out} + u_i = 0 \Rightarrow v_{out} = -u_R = -i_2 R = -i_{in} \cdot R$$

L'intérêt de ce montage est que sa tension d'entrée, et donc aussi sa résistance équivalente d'entrée, sont nulles. Ceci a pour effet que la résistance interne de la source du signal sera sans effet sur le courant mesuré.

CONVERSION COURANT-TENSION PHOTODIODE

Photodiode



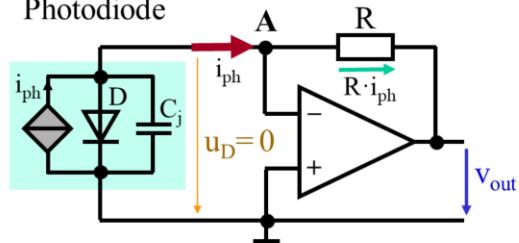
$$v_{\text{out}} = R \cdot i_{\text{ph}}$$

$v_{\text{out}} < U_j$ sinon D conduit et v_{out} sature à U_j

 $f_{\text{max}} = 1/2\pi RC$ car la fonction de transfert intrinsèque à la photodiode est
 $I/(I+j\omega RCj)$

Solution pour étendre la plage fréquentielle:

Photodiode



$$v_{\text{out}} = -R \cdot i_{\text{ph}}$$

$v_{\text{out}} > U_j$ possible

 $f_{\text{max}} = \infty$ (en théorie)
 (aucune charge/décharge de la capacité = 'DC')

Circuit du haut:

Tant que $v_{\text{out}} = u_D < U_j$ le courant dans la diode est nul et i_{ph} passe dans R:

$$v_{\text{out}} = R \cdot i_{\text{ph}}$$

Lorsque $v_{\text{out}} = u_D = R \cdot i_{\text{ph}}$ atteint U_j la diode conduit et limite v_{out} à U_j en absorbant toute augmentation de i_{ph} .

Dans la pratique, la capacité qui existe aux bornes de la photodiode n'est pas gênante si on utilise le composant en régime continu: dans ce cas, la capacité agit comme un circuit ouvert et n'a pas d'influence sur le signal à mesurer.

Par contre, en régime périodique ou transitoire, cette capacité va intervenir.

On adopte alors le circuit avec l'AO.

Circuit du bas:

Comme la réaction négative impose $u_D = 0$, le courant dans la diode sera toujours nul et i_{ph} passera entièrement dans R, d'où:

$$v_{\text{out}} = R \cdot i_{\text{ph}}$$

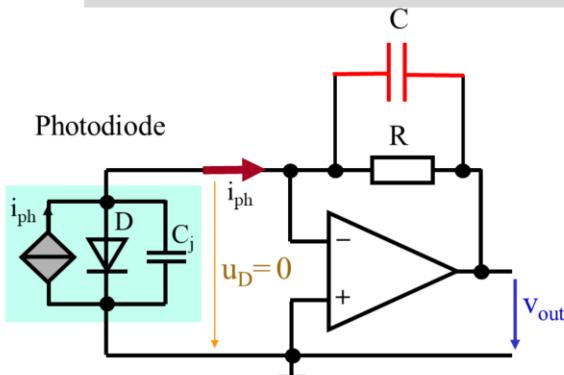
Par contre, en régime sinus il faut tenir compte de l'impédance de la capacité.

Dans le cas du circuit du haut, on aura $\underline{V}_{\text{out}}/\underline{I}_{\text{ph}} = \underline{Z}_{R//C} = R/(1+j\omega RC)$
une réponse de type passe-bas: le signal mesuré dépendra de la fréquence, ce qui affectera la mesure.

Une solution est approuvée par le circuit du bas:

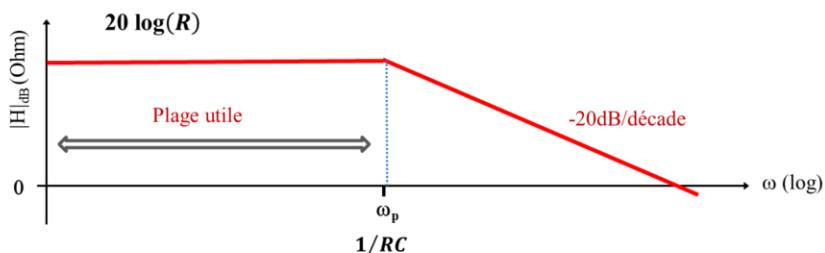
Comme $\underline{U}_D = 0$, le courant dans C sera toujours nul et $\underline{V}_{\text{out}}/\underline{I}_{\text{ph}} = R$ à toutes les fréquences (en théorie).

FILTRAGE BASSES-FRÉQUENCES



Pour éviter les signaux parasites, et ne laisser passer que les fréquences en dessous d'une valeur limite f_p, on ajoute une capacité C en parallèle avec R.

$$H = \frac{V_{out}}{i_{ph}} = -\frac{R}{1 + j\omega RC}$$



Dans la partie, il existe des lumières et des signaux parasites qui seront également amplifiés.

Comme nous allons nous intéresser à des signaux relativement basse fréquence, une solution consiste à n'amplifier que des signaux en dessous d'une fréquence limite, f_c.

C'est ce que permet le simple ajout de la capacité C.