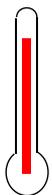


PLAN

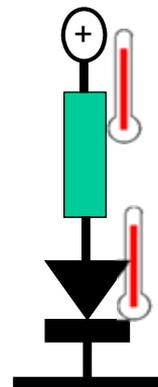
Cours 1

- Diode : principe, mise en oeuvre de base
- Photodiode, du signal optique au signal électrique
incl. CCD/CMOS
- LEDs : spectre, mise en oeuvre, éclairage, tendance, enjeux,
- Energie Photovoltaïque
Silicium, rendement, densité de courant
CIS (CuInSe₂/DCSIG), CdTe
dimensionnement, concentration
protection panne partielle/obscurité partielle
Spectre, cellules tandem

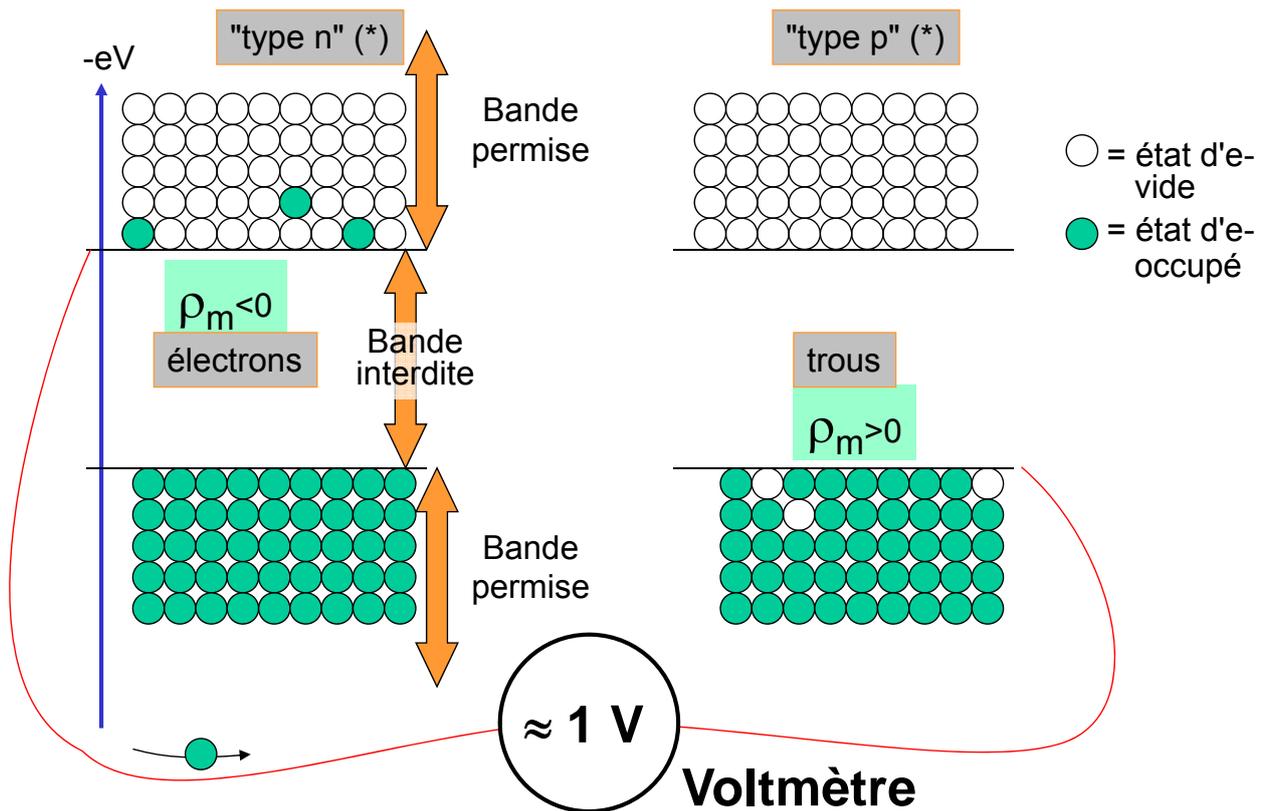
DIODES 1: Principe, Mise en œuvre de base



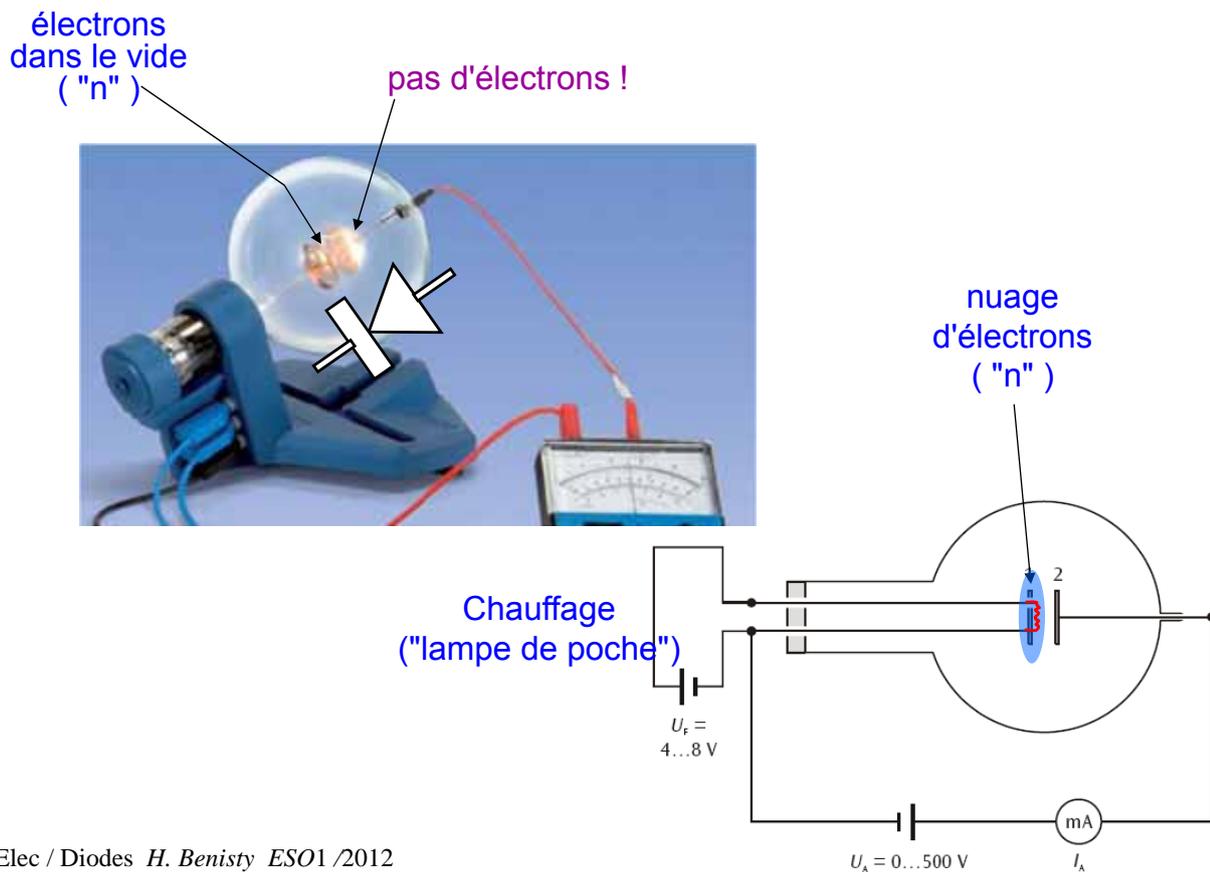
- Semi-conducteur, type n, type p, bande interdite
- Contact, Jonction p-n (homojonction)
- Comportement redresseur
- Caractéristique courant-tension d'une diode p-n
- Mise en œuvre & où va l'énergie
- Limites en direct, en inverse, diode Zener
- Comportement petit signaux
- Comportement en température
- Seuil : "0,6 V" pour Si, mais encore...
- Jonction n-p-n (transistor)



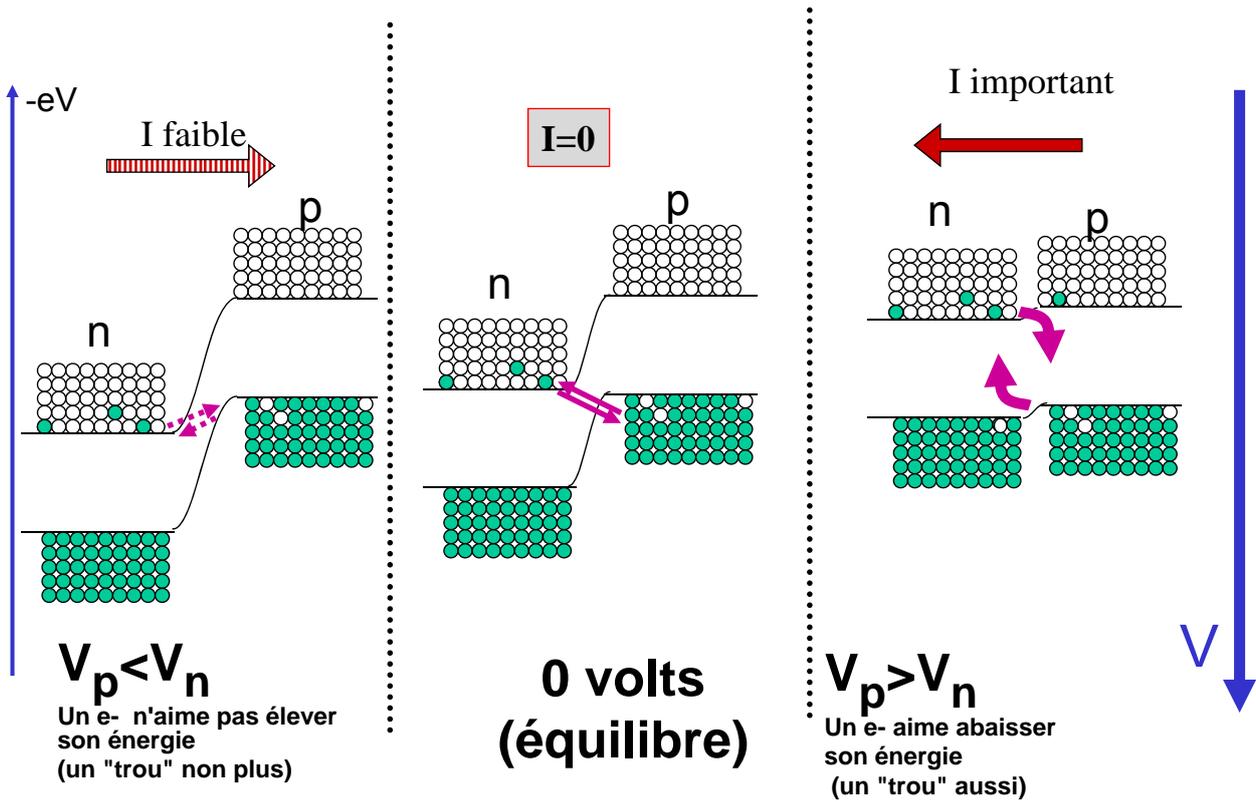
Semi-conducteur type n, type p, bande interdite



Aujourd'hui, "p" et "n" par dopage, mais historiquement

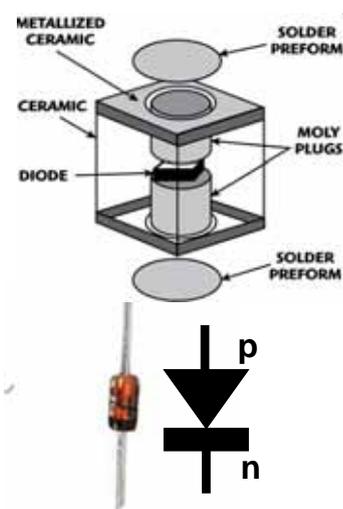


Asymétrie de la Jonction p-n

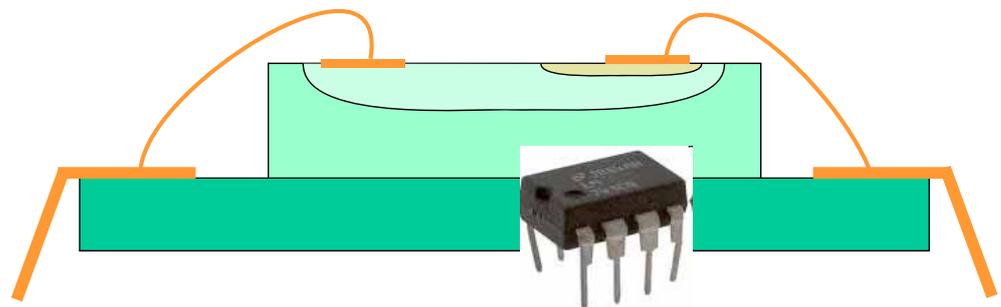
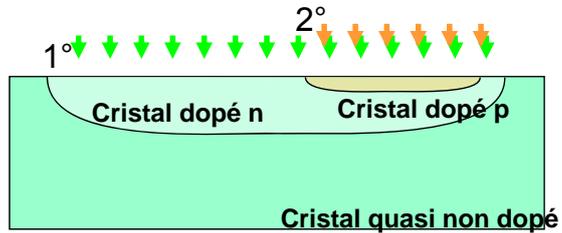


Diode et Circuit intégré "en vrai"

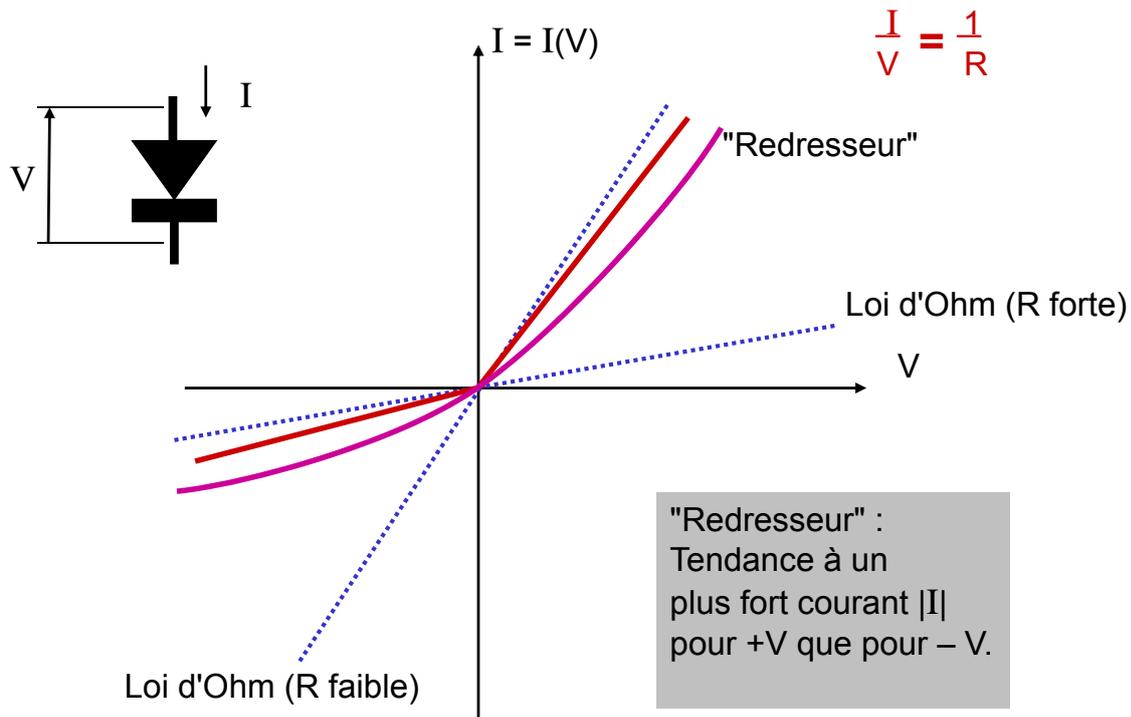
- Fabrication pratique



- Procédé planar (1959 Fairchild)



Comportement Redresseur

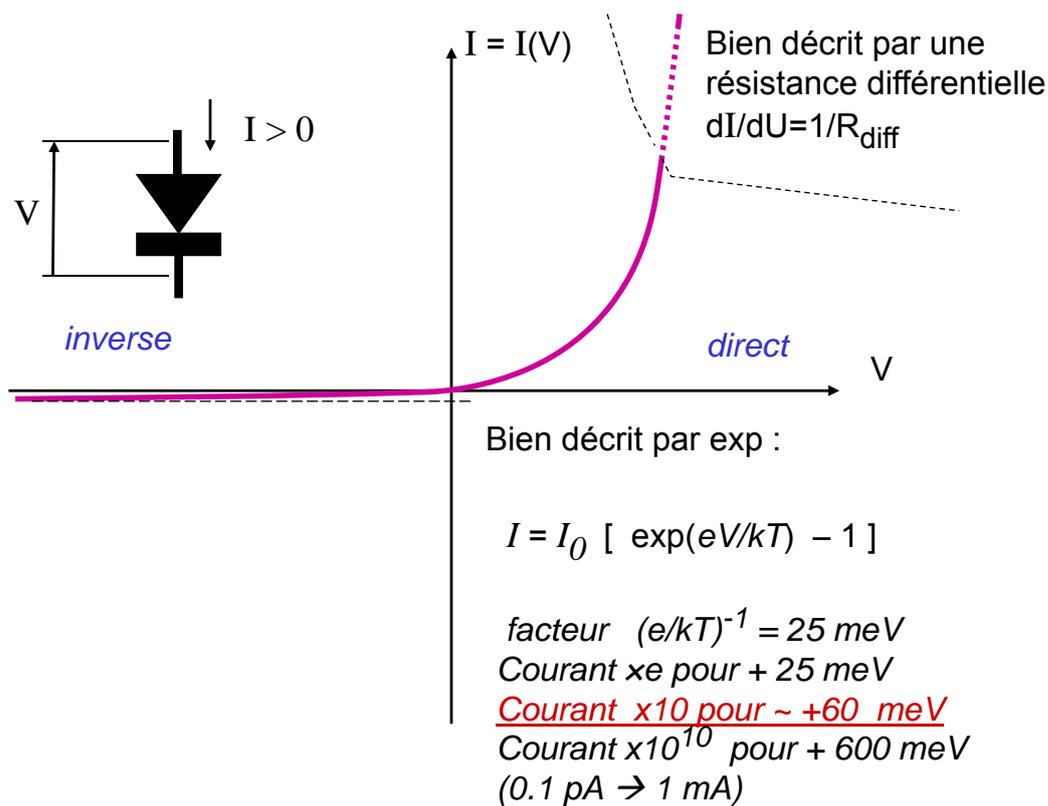
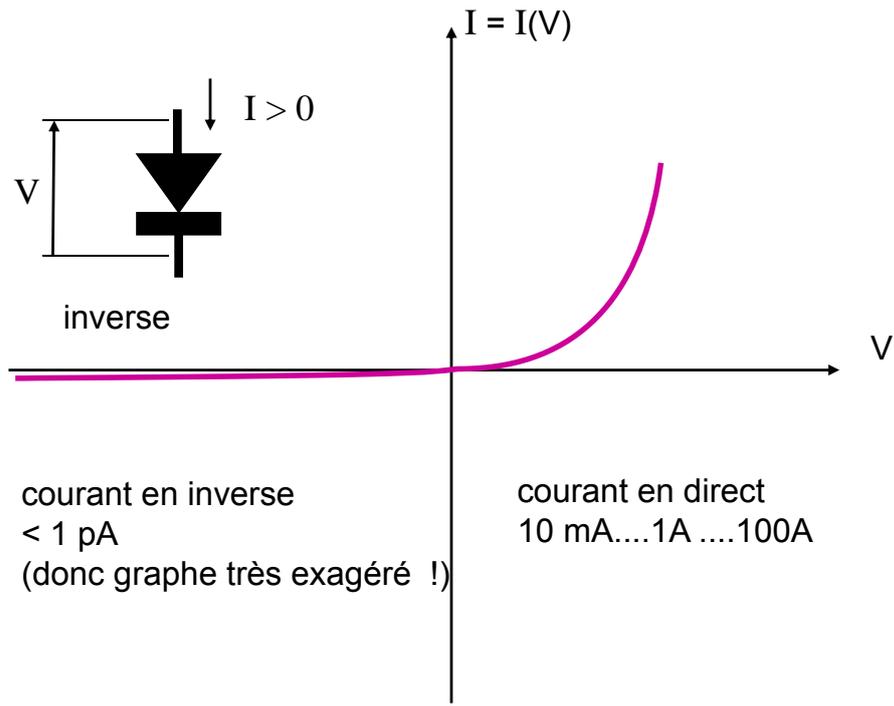


NON LINEARITE

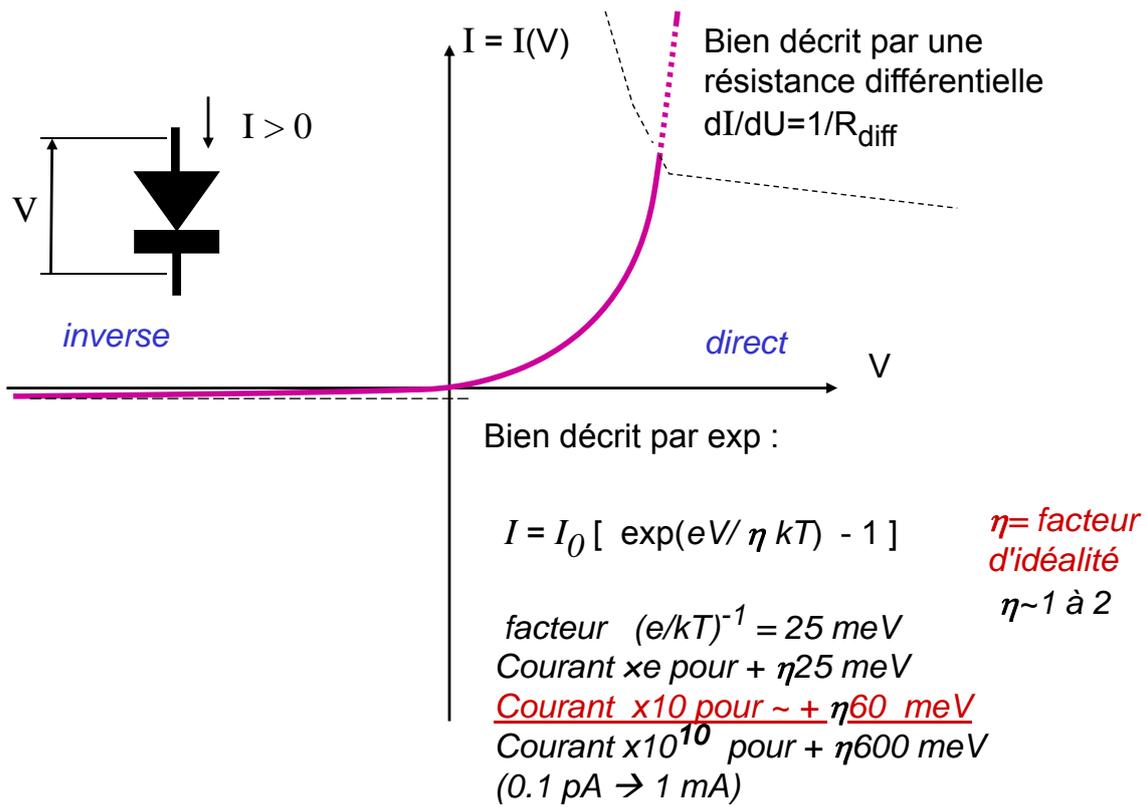
En général

- Pas de linéarité de la réponse
- Pas d'analyse harmonique (sauf « mode différentiel » = en petits signaux)
- Pas de diagramme de Bode ou de Nyquist, de filtre

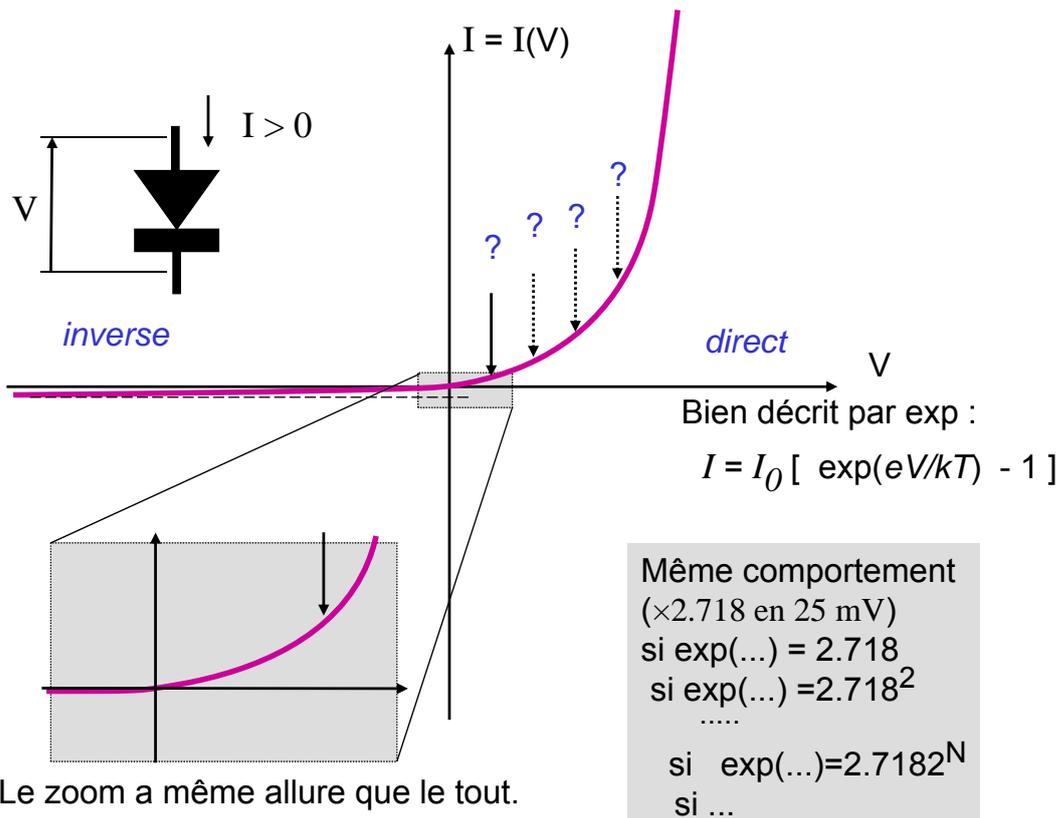




Caractéristique d'une diode pn (1/*)



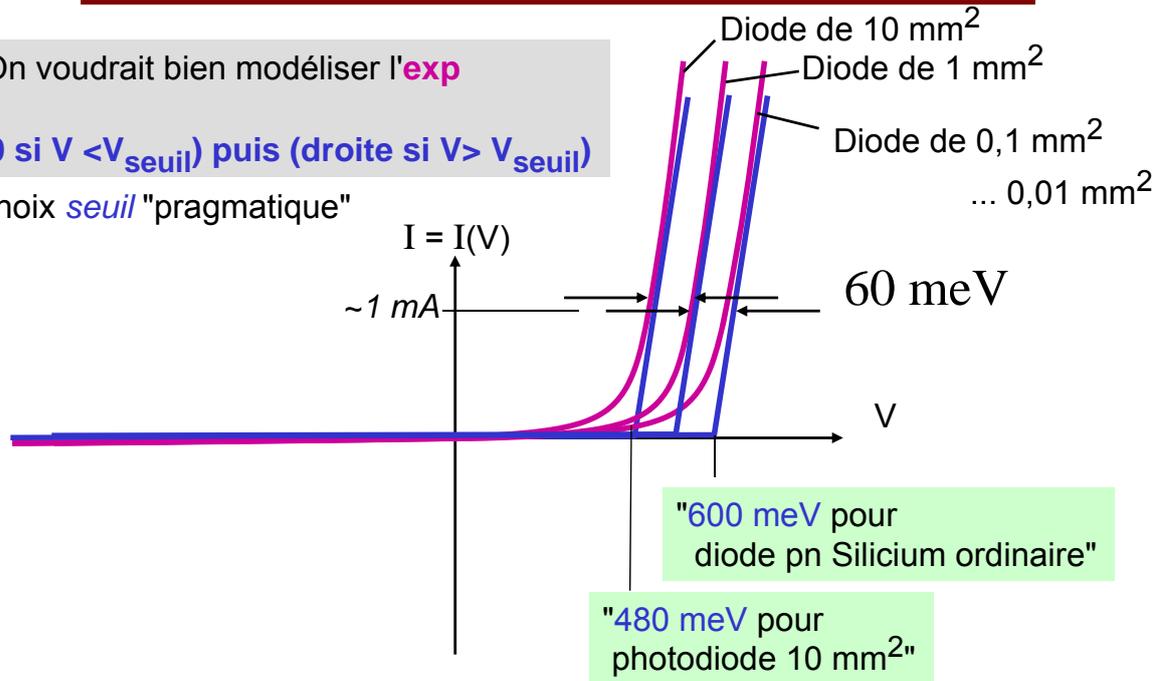
une exponentielle n'a pas un pied bien défini !



Caractéristique d'une diode pn (3/*)

⇒ On voudrait bien modéliser l'exp
par
($I=0$ si $V < V_{\text{seuil}}$) puis (droite si $V > V_{\text{seuil}}$)

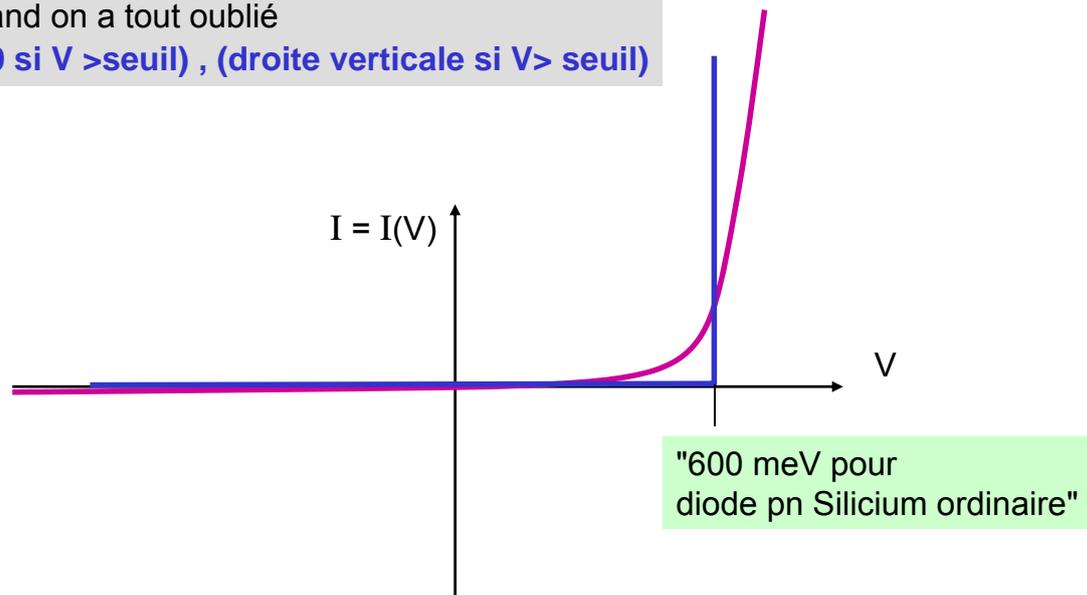
+ Choix *seuil* "pragmatique"



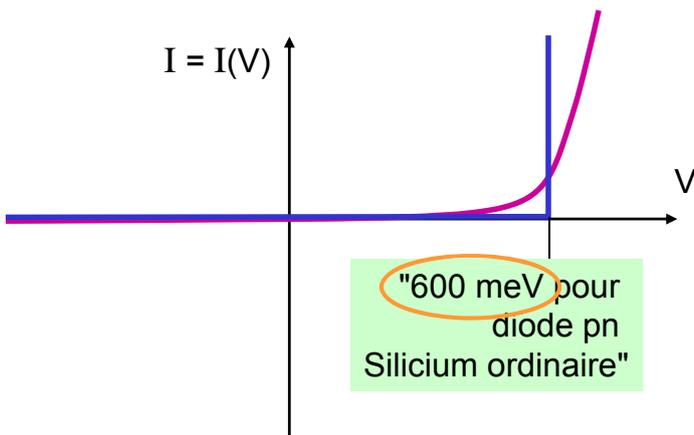
La vraie quantité physique "à seuil fixe" est une densité de courant
notée J , en Ampère / m^2 (A/cm^2 , max 1000 A/cm^2)
[petite graine plantée pour les diodes lasers]

Caractéristique d'une diode pn (4/*)

Quand on a tout oublié
($I=0$ si $V > \text{seuil}$) , (droite verticale si $V > \text{seuil}$)

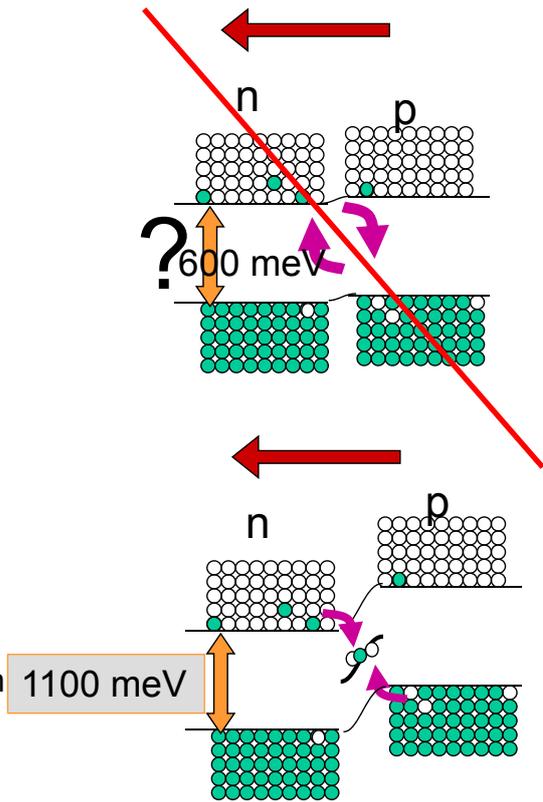


Caractéristique d'une diode pn et "gap" (4/*)



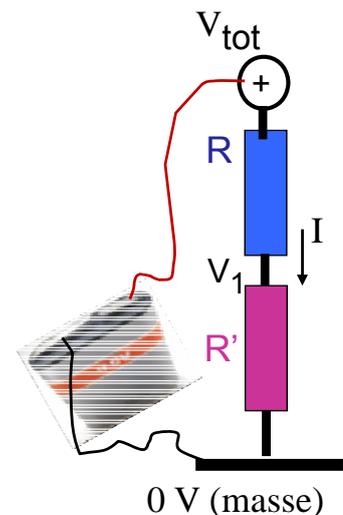
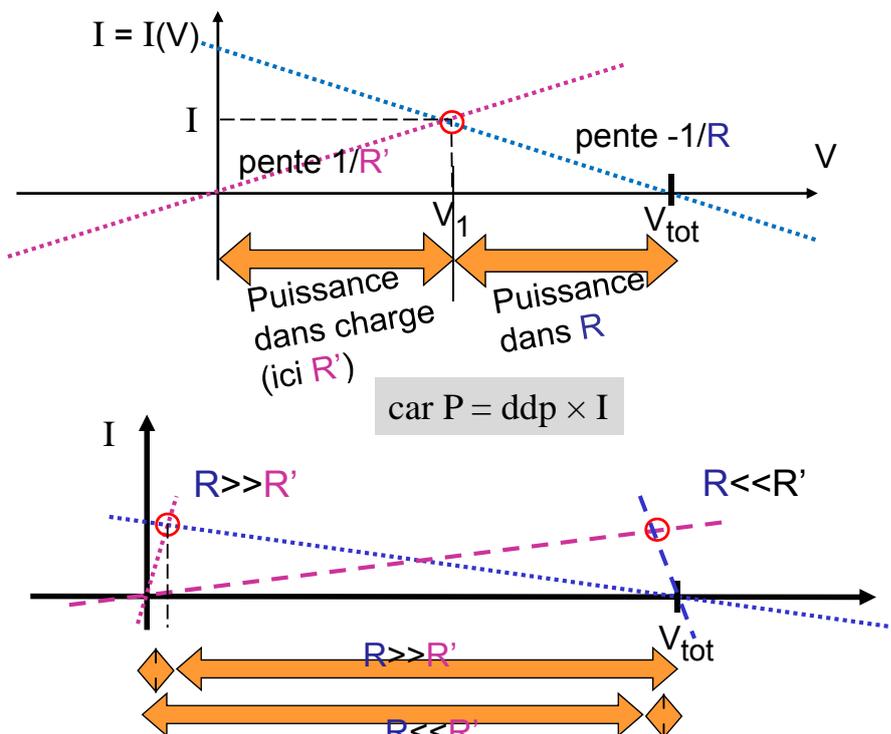
le Silicium est un cas particulier !!!

(tout se passe comme si...)
 Recombinaison e-h au milieu de la jonction
 Le "gap" (bande interdite) $\sim 2 \times V_{\text{seuil}}(\text{Si})$
 (à la conversion près eV \rightarrow V)



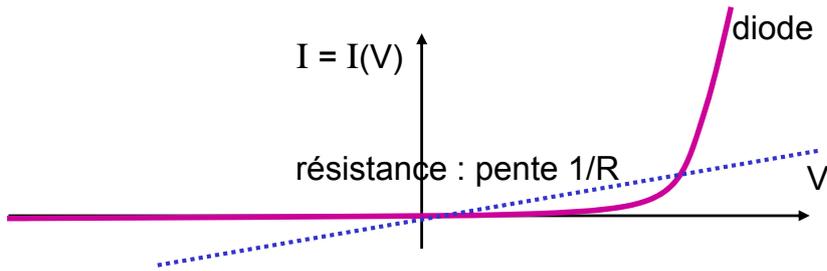
(R)appel : droite de charge & pont diviseur usuel

\Rightarrow Avec loi des mailles $V_{\text{diode}}(i) + Ri = V_{\text{tot}} \rightarrow V_{\text{diode}}(i) = V_{\text{tot}} - Ri$

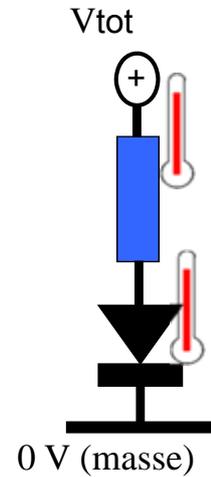
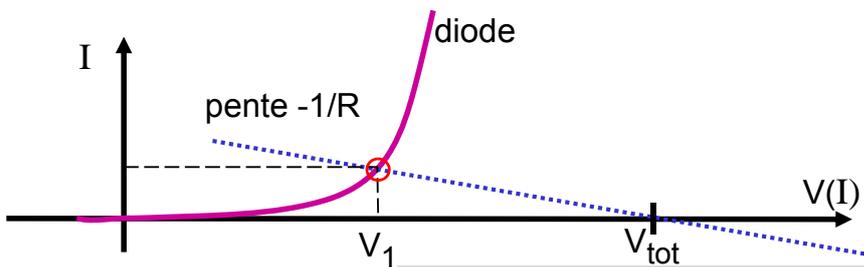


Mise en œuvre & où va l'énergie

A tension constante, en série avec un dipôle (une résistance)



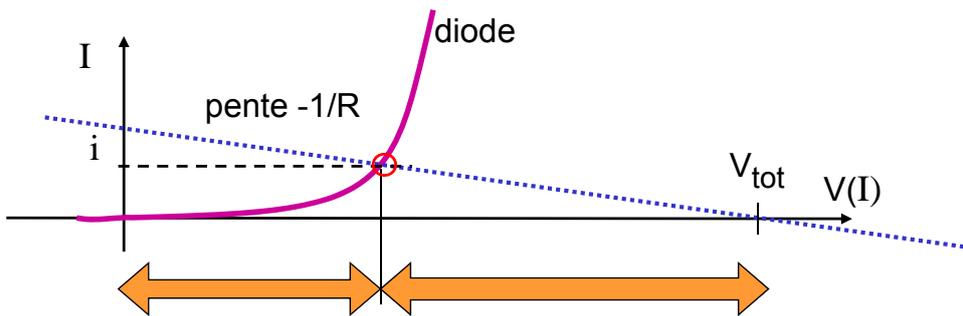
⇒ Avec loi des mailles $V_{diode}(i) + Ri = V_{tot} \rightarrow V_{diode}(i) = V_{tot} - Ri$



⇒ Insister : la droite de charge est **oblique**, la carac est celle de la diode, illustrer $V_{diode}(i) + Ri = V_{tot}$ graphiquement n'a que peu d'intérêt

Mise en œuvre & où va l'énergie

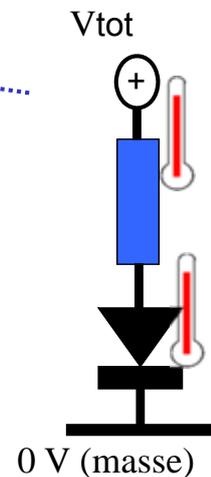
- Avec loi des mailles $V_{diode}(i) + Ri = V_{tot} \rightarrow V_{diode}(i) = V_{tot} - Ri$: sol. GRAPHIQUE



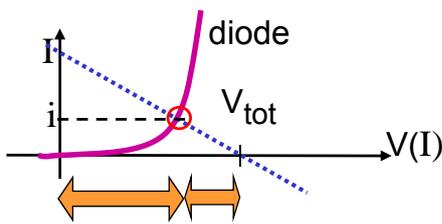
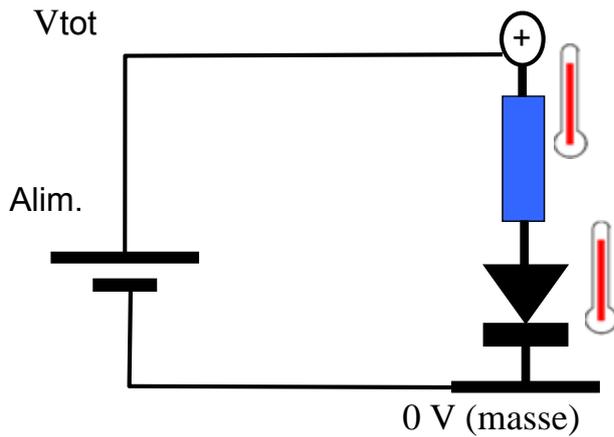
Puissance dans diode

Puissance dans R

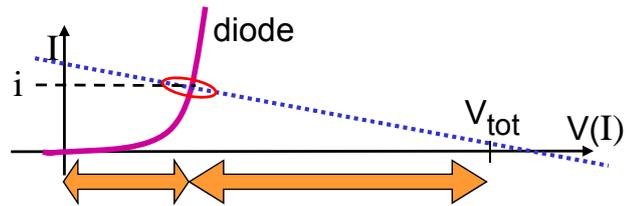
Car $P = \text{chute de tension} \times i$ (montage série)



Mise en œuvre & où va l'énergie

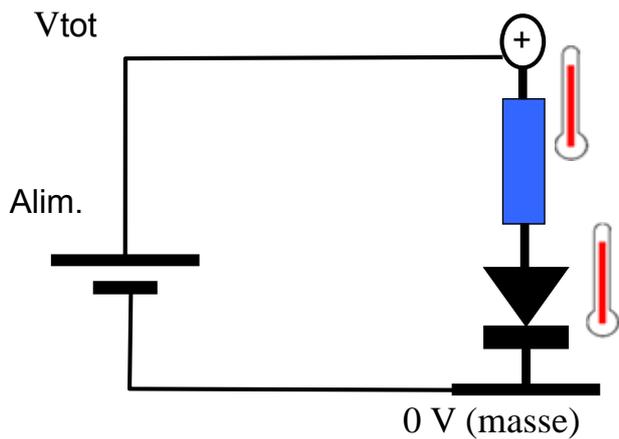


⇒ R chauffe peu ☹️

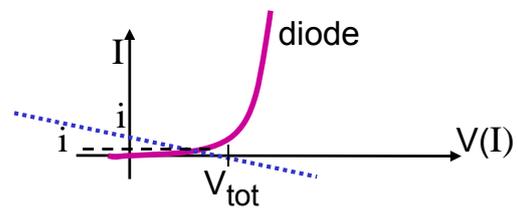


⇒ "quasi régulé en courant"
 ⇒ R chauffe beaucoup et "pour rien" ☹️

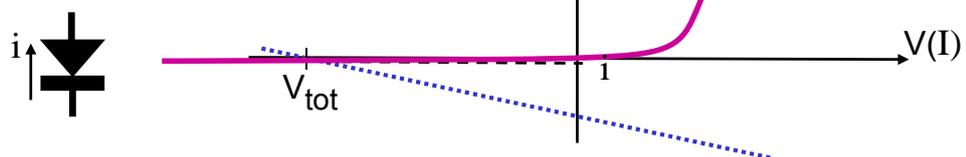
Mise en œuvre & où va l'énergie



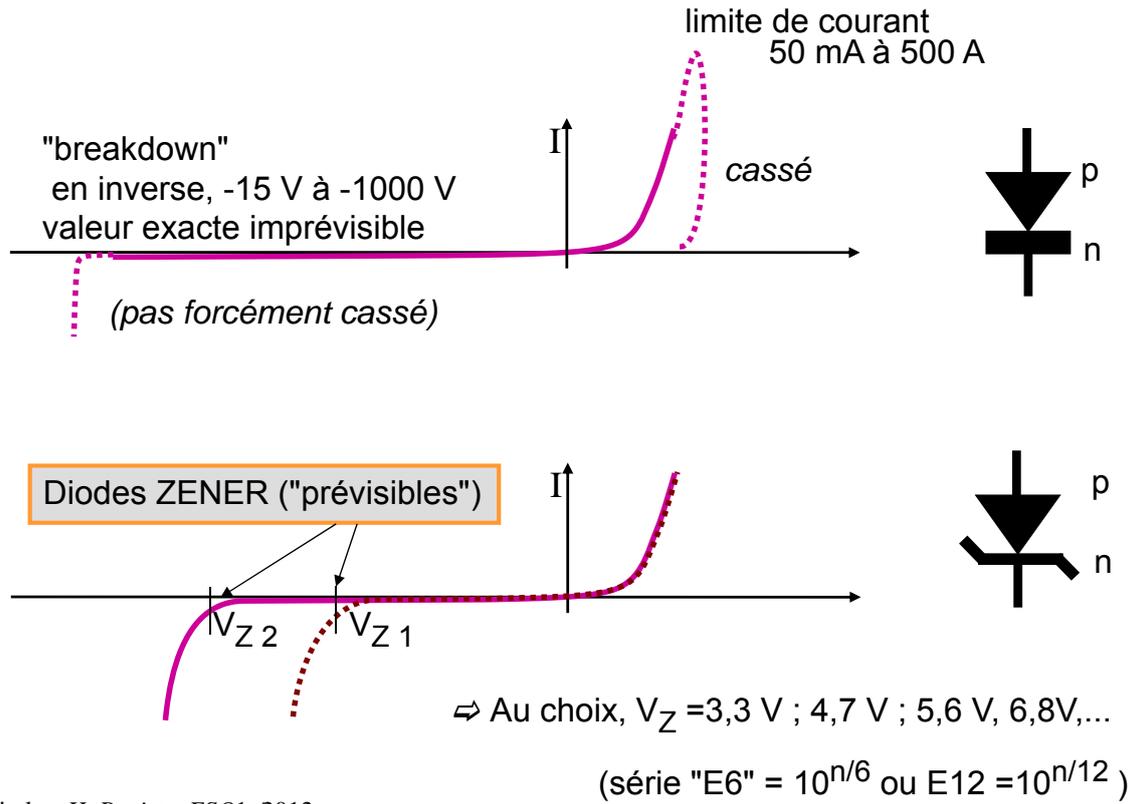
⇒ "Sous le seuil"



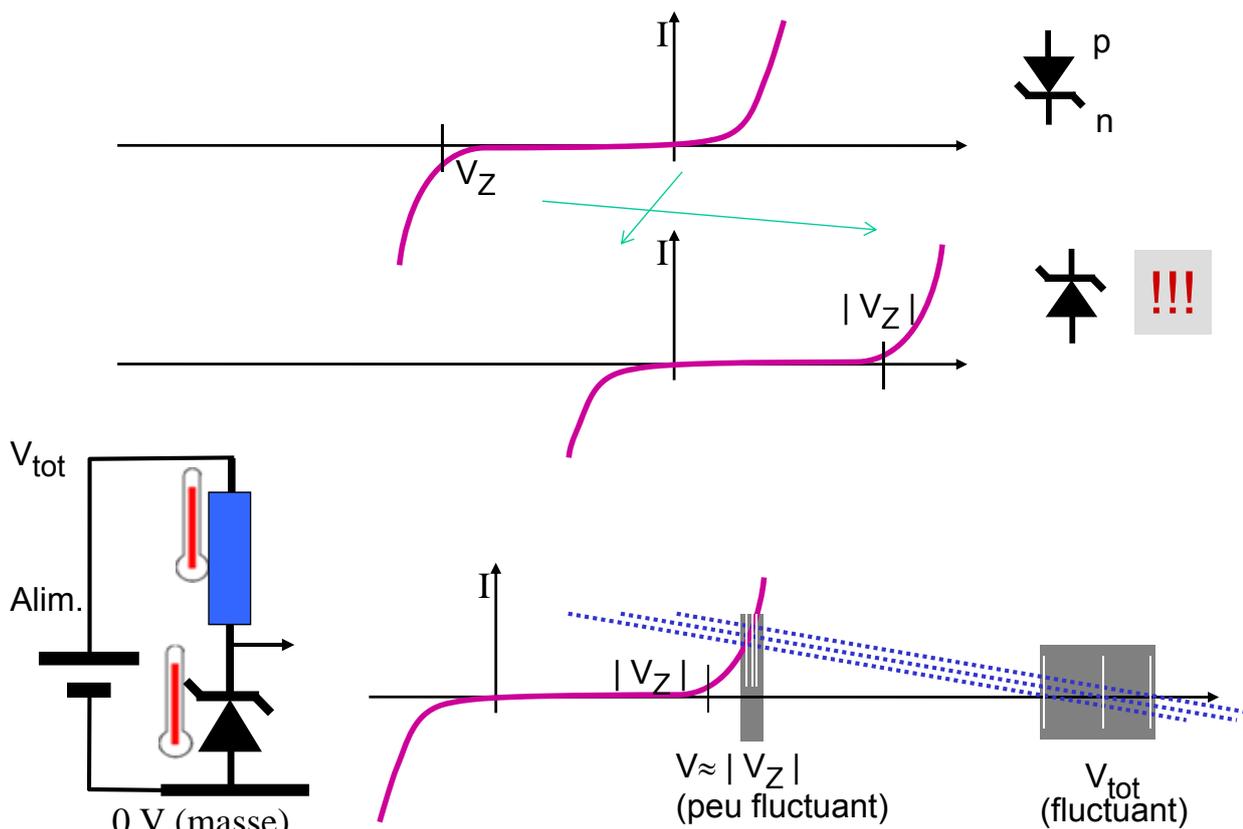
⇒ "en inverse"



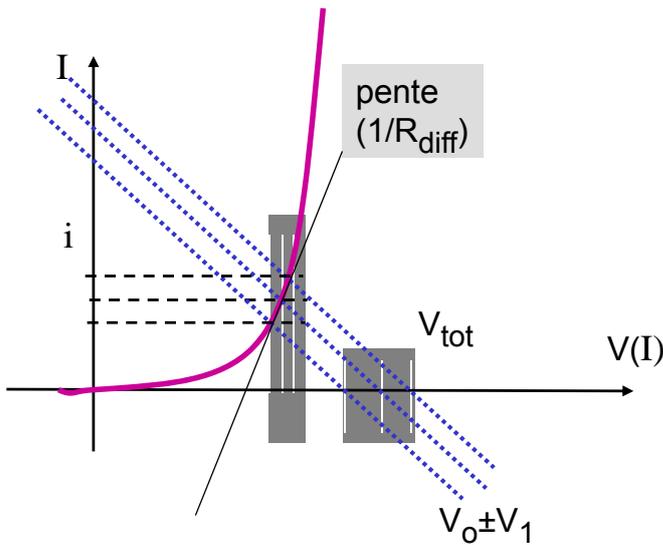
Limites en direct, en inverse, diode Zener



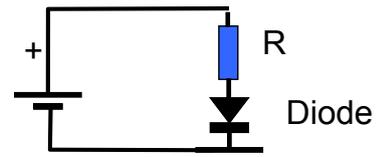
Diode Zener comme stabilisateur de tension



Comportement en petits signaux

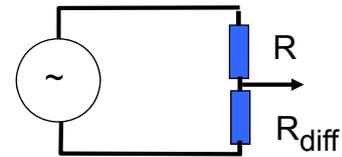


$$V_0 + V_1 \cos(\omega t + \varphi)$$



⇒ Résistance Différentielle $(1/R_{diff}) = dI/dV$

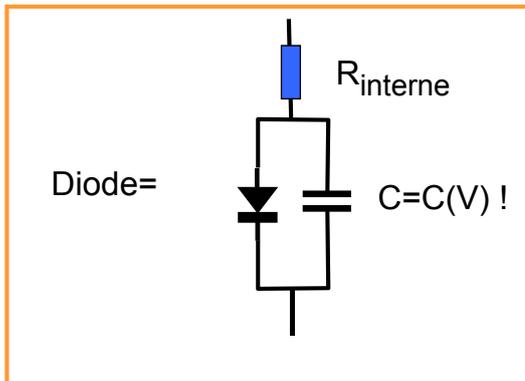
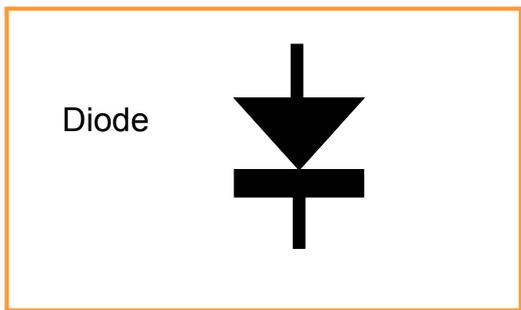
$$V_1 \cos(\omega t + \varphi)$$



⇒ pont diviseur

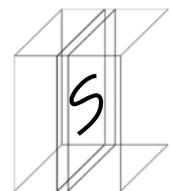
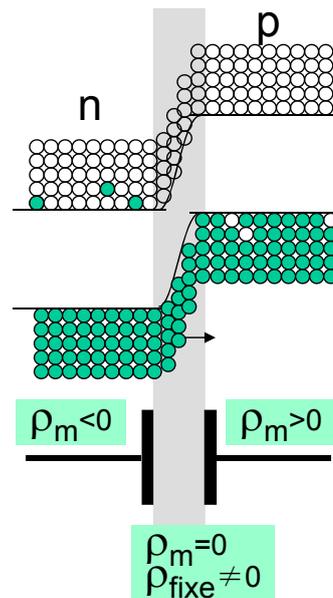
$$\tilde{V}_{sortie} = [R_{diff} / (R + R_{diff})] \times V_1 \cos(\omega t + \varphi)$$
 (+ ~ ~ V_{seuil})

Schéma équivalent plus global



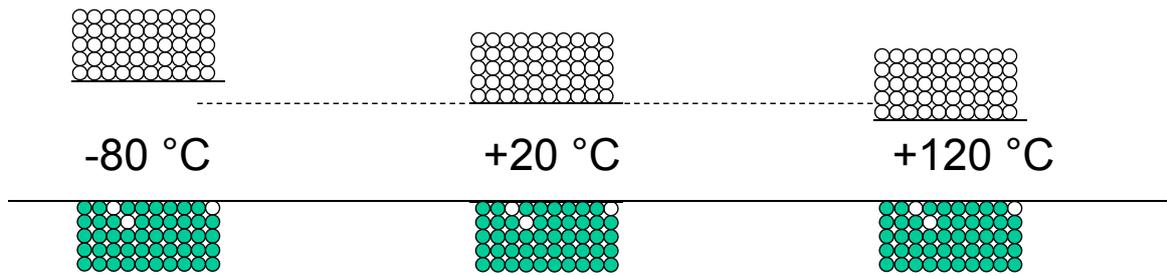
origine physique de la capacité $C=C(V)$

ρ_m = charges mobile



⇒ $C \propto S$
 S = la surface de la diode
 Ordre de grandeur $C/S \sim 1 \mu F/cm^2$

Comportement en température



⇒ La bande interdite dépend de la température (via la dilatation),

⇒ donc V_{seuil} aussi, dans les mêmes proportions

typiquement : $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ pour Si
200 mV sur 100°C d'écart.

A prévoir pour les environnement extérieurs (soleil, gel)

⇒ Application : thermomètre élémentaire (diode + R+ alim + voltmètre !)

⇒ Autres Implications : spectre des photodiodes, cellules solaires, et LEDs (cours suivants)

⇒ "Avancé" : ρ_m dépend peu de T, mais la mobilité μ et donc la résistivité oui

les grandes familles de semi-conducteurs

| II | III | IV | V | VI |
|-----------|-----------|---------------------------------|-----------|-----------|
| | | C (diamant, graphite) | N | |
| | | Si : 600 mV | P | |
| | Ga | Ge : 300 mV | As | Se |
| Cd | In | | Sb | Te |
| | | | | |

| | | |
|------|----|--------|
| Ga | N | 3.0 V |
| Ga | As | 1.4 V |
| GaIn | As | 0.6 V |
| In | Sb | 0.23 V |

| | | |
|----|----|-------|
| Cd | Se | 2.0 V |
| Cd | Te | 1.7 V |

Mendéléiev (extrait)

(nanocristaux, le gap dépend de la taille)

jonction n-p-n = "transistor de type n"

version planar (Fairchild 1959)

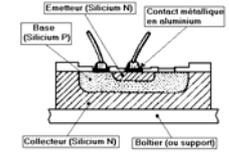
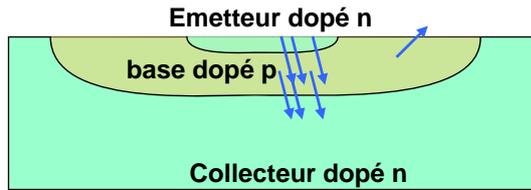
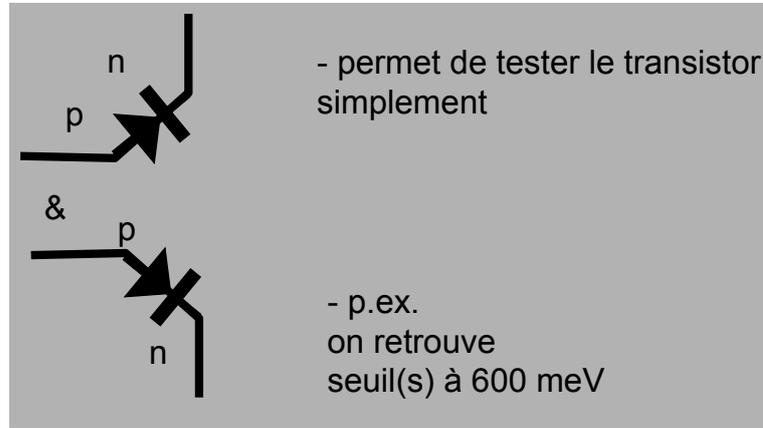
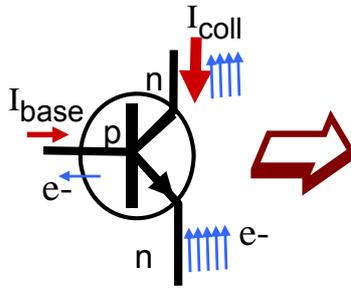


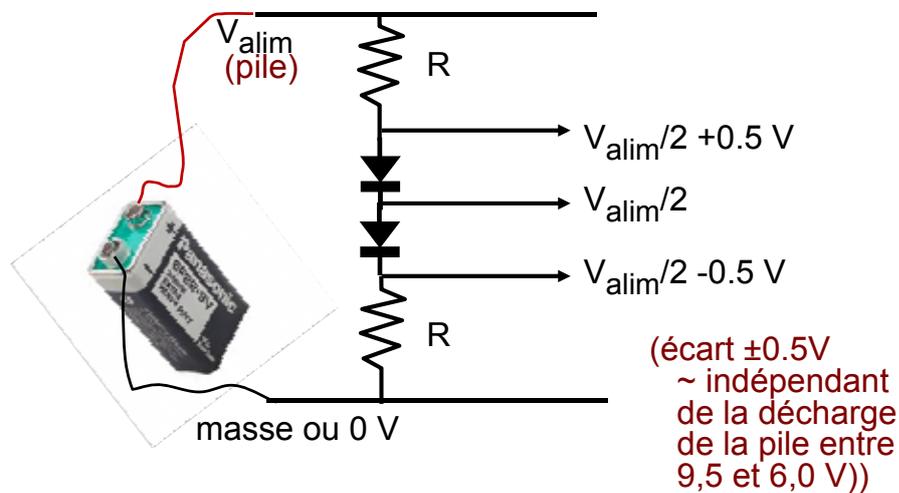
Fig. 13. - Structure d'un transistor planar.



(mais n'explique pas le gain $\beta = h_{FE}$)

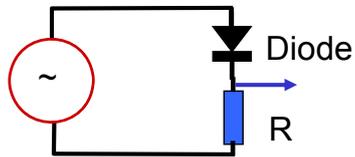
Applications

⇒ Génération de tensions intermédiaires ~ indep. du courant

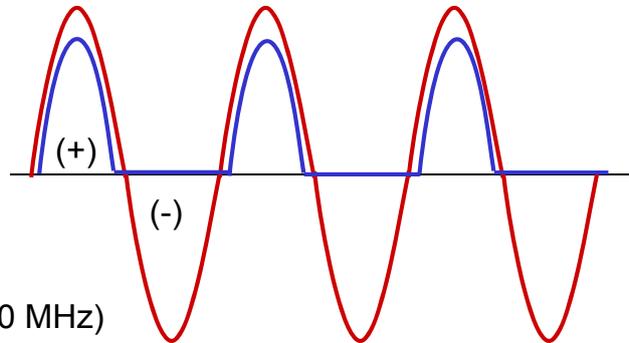


⇒ Redressement simple alternance

$$V_1 \cos(\omega t + \varphi)$$



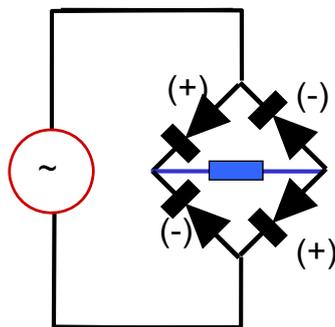
$$V_1 \cos(\omega t + \varphi) - 0.6V \text{ (+) ou } 0V \text{ (-)}$$



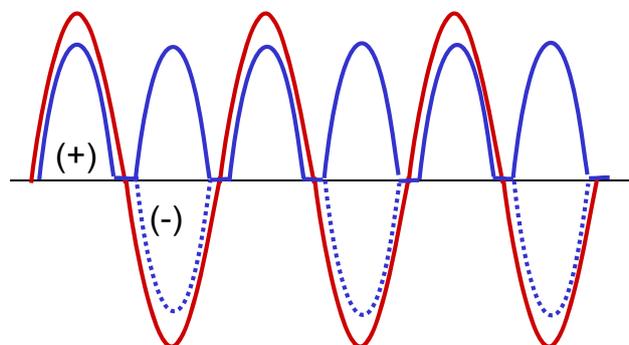
⇒ Diode signal (C faible, 100 kHz ... 1,0 MHz)

⇒ Diode redressement (C + fort, effet fort dès 1 kHz ou 10 kHz)

⇒ Redressement double alternance



$$| V_1 \cos(\omega t + \varphi) \pm 0.6V | \text{ suivant (+) ou (-)}$$

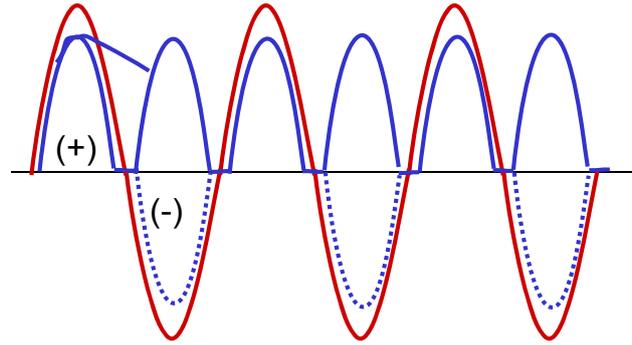
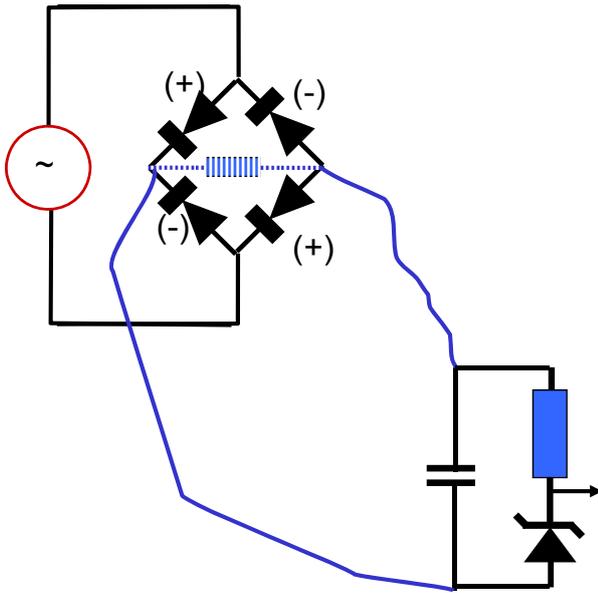


⇒ On "rate" $\pm V_{\text{seuil}}$

⇒ Mais on utilise les deux alternances

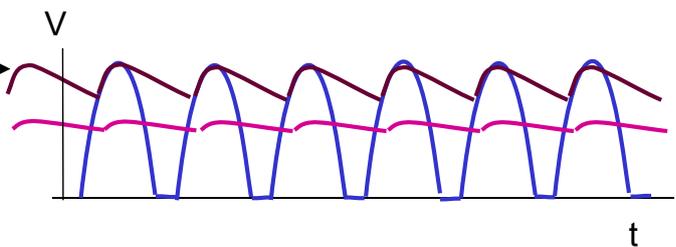
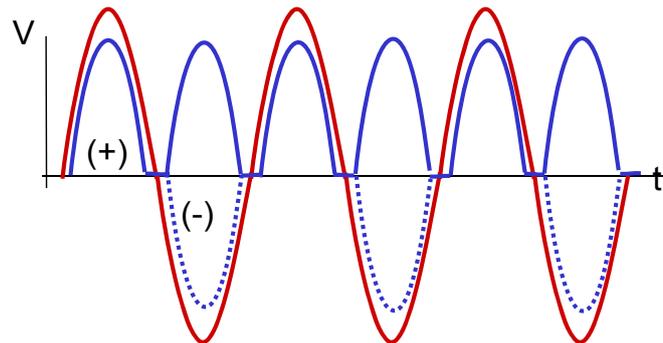
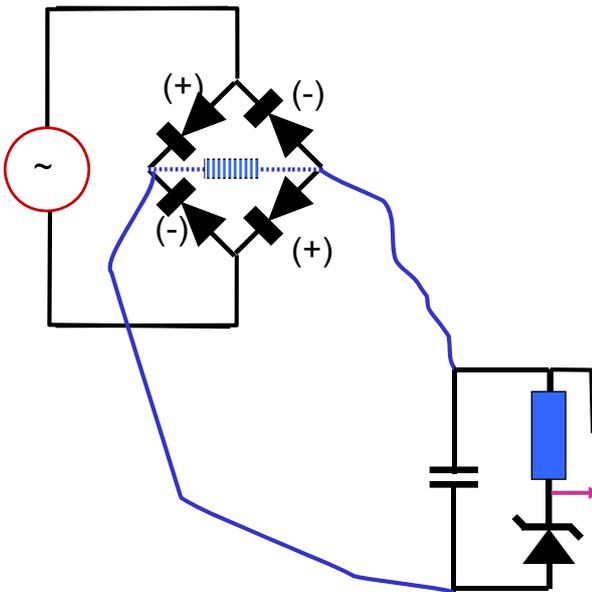
⇒ On complète avec capa, résistance, Zener

Redressement simple et double alternance (3/5)



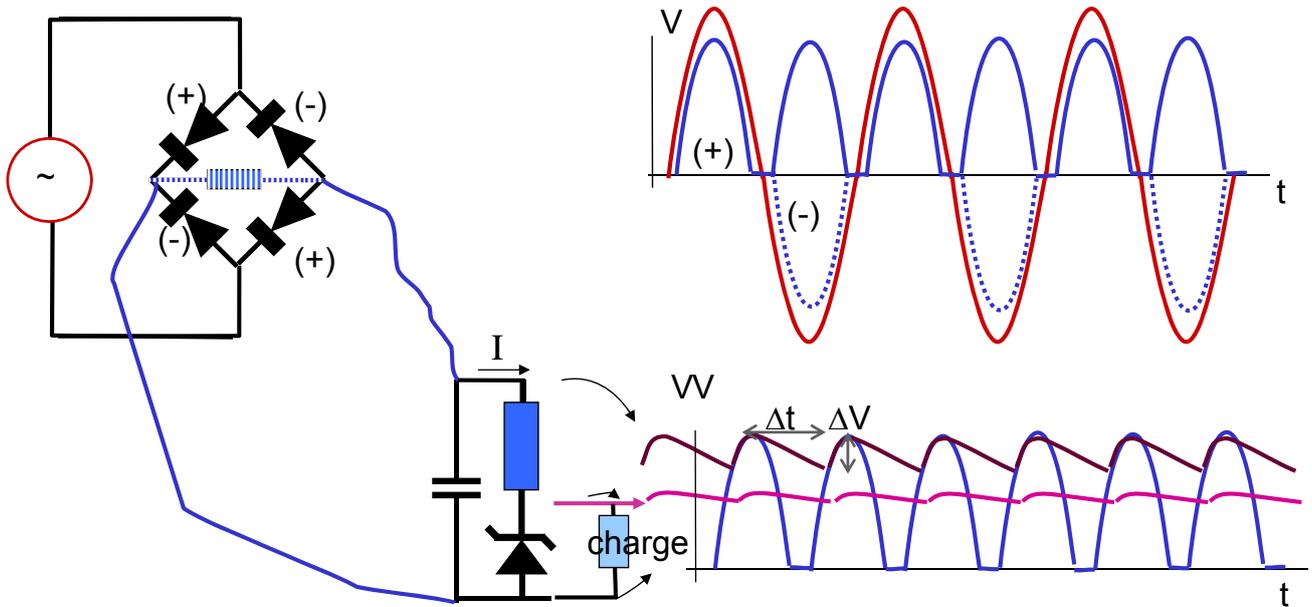
⇒ On complète avec capa, résistance, Zener

Redressement simple et double alternance (4/5)



⇒ On complète avec capa, résistance, Zener

Redressement simple et double alternance (5/5)



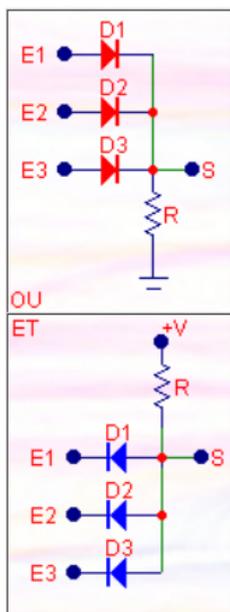
⇒ On complète avec capa, résistance, Zener

⇒ Dimensionnement C : $\Delta Q = I \Delta t = C \Delta V \rightarrow$ capacité électrolytiques souvent (attention, $I = I_{Zener} + I_{utilisateur}$)

⇒ La Diode (Zener ici) va chauffer ~ tant que la charge : pas génial... ☹

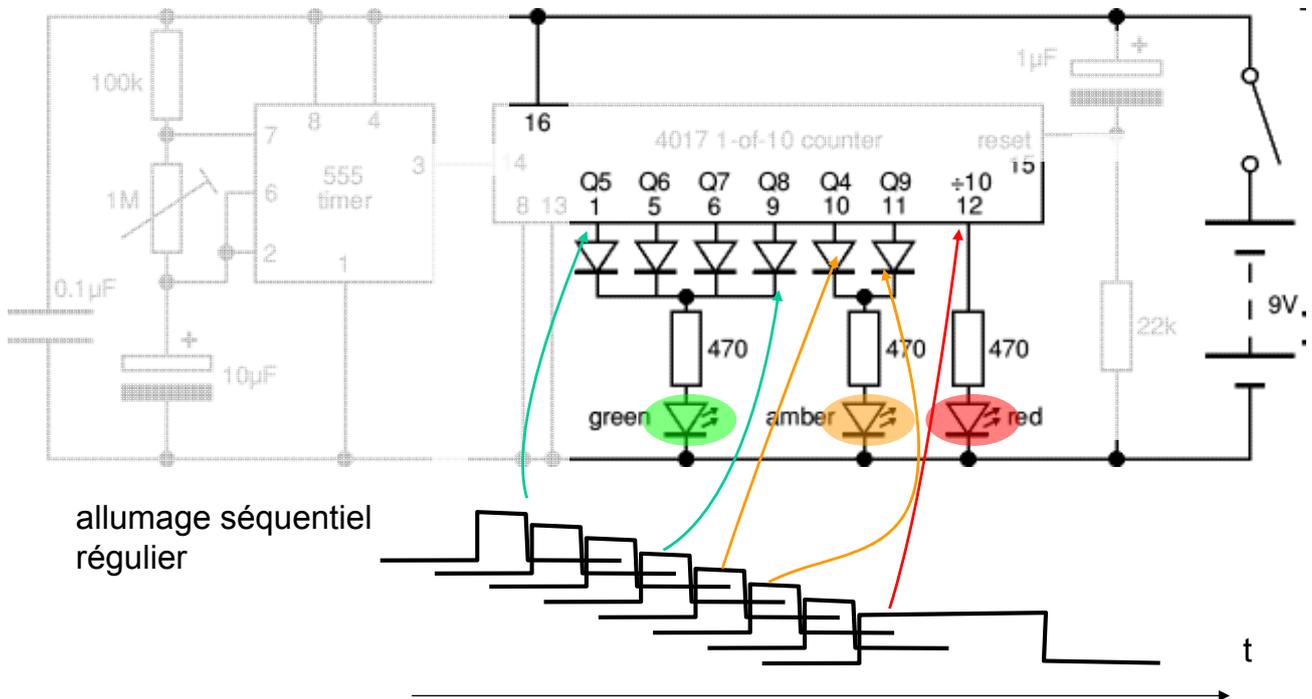
$\Delta t \sim 10 \text{ ms}$ pour 50 Hz redressé

Logique à diode



• N'importe laquelle des trois entrées mise à +5V fait que $S = 4.4 \text{ V}$ (E1 ou E2 ou E3 causent $S = +5\text{V}$)

• Dès qu'une des trois entrées est à 0 V, la sortie est à $S = +0,6 \text{ V}$
(il faut E1 et E2 et E3 à + 5V pour que S reste à $S = +5\text{V}$)



A retenir Diode Cours 1

- Diode = zone p + zone n , avec champ E ,statique, entre les deux, à $V=0$
- Enorme asymétrie de $I(V)$
- "Seuil"; notion pragmatique, car $\exp(eV/kT)$ fait " $\times 10$ " en 60 mV
s'abaisse pour de grandes aires (photodiode "macroscopique" $=0,1 \text{ cm}^2$)
- Pour Si, retenir SEUIL $=0,6 \text{ V}$ ou $0,7 \text{ V}$, même si ce n'est pas le gap (1,1 eV)
- en série avec Charge R, diagramme de charge (doite de pente <0 , V_0 , $I_0\dots$)
Utilisation en **petits signaux** (illustré sur le diag. de charge)
- Capacité parasite, dépendance thermique liée à $I \sim \exp(eV/kT)$,
- Redressement simple & double alternance
- Logique à diode ("ET" , "OU",...)

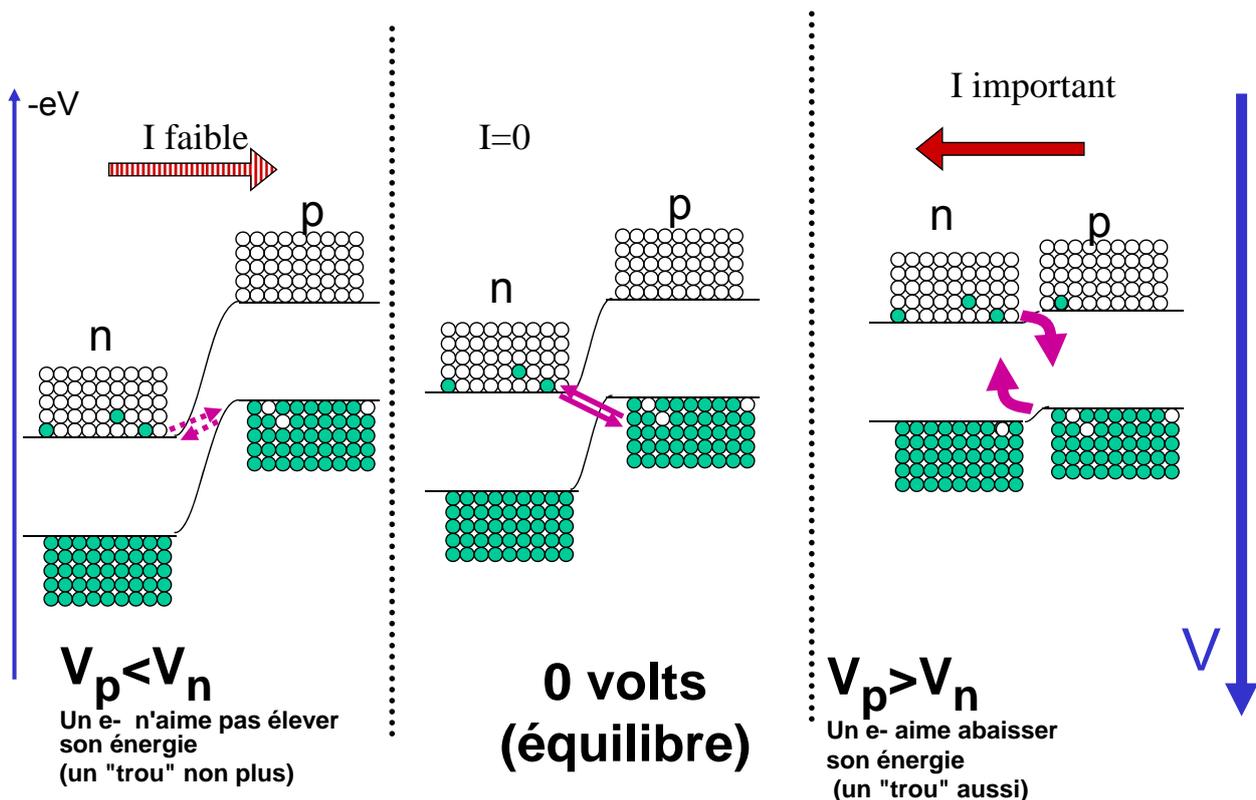
PLAN

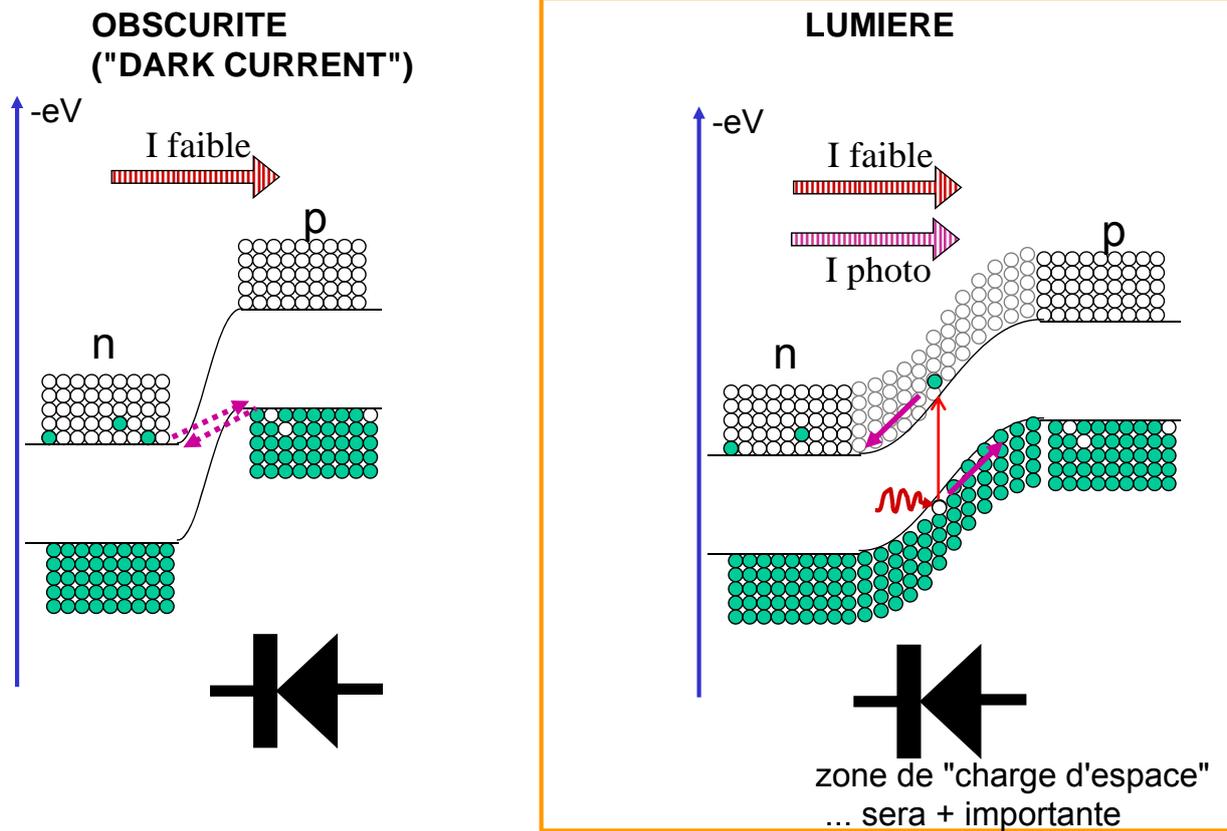
- Diode : principe, mise en oeuvre de base

Cours 2

- Photodiode, du signal optique au signal électrique
incl. CCD/CMOS
- LEDs : spectre, mise en oeuvre, éclairage, tendance, enjeux,
- Energie Photovoltaïque
Silicium, rendement, densité de courant
CIS (CuInSe₂/DCSIG), CdTe
dimensionnement, concentration
protection panne partielle/obscurité partielle
Spectre, cellules tandem

Rappel : Asymétrie de la Jonction p-n





Elec / Diodes H. Benisty ESO1 /2012

39

⇒ L'effet diode (dans le noir) vient de ce que :

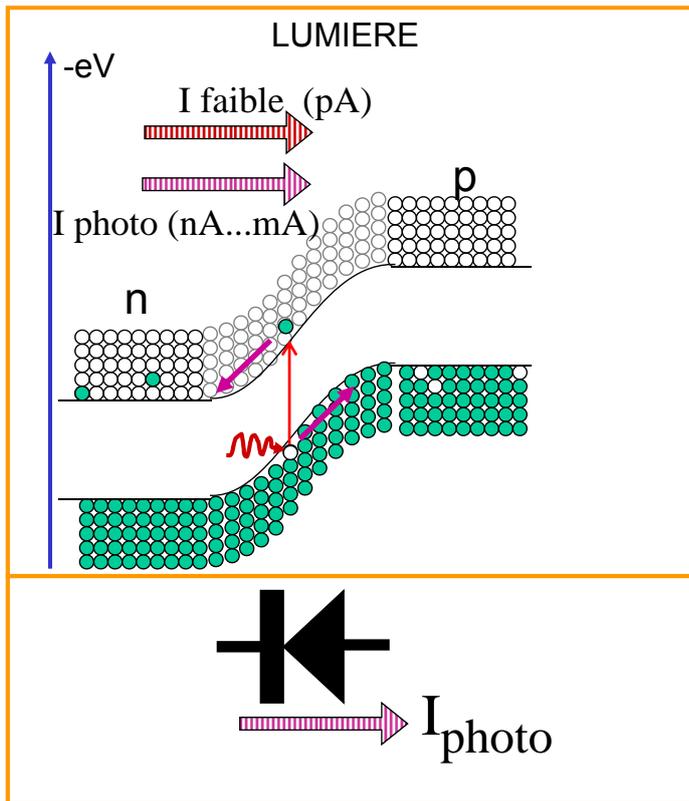
- il n'y a **vraiment pas** d'e⁻ au départ du côté **p**, bien que le moindre électron qui se présenterait adorait dévaler vers le n (*)
- il n'y a **vraiment pas** de **trous** au départ côté **n**, bien que le moindre trou qui se présenterait adorait "remonter" côté p.

⇒ Le photocourant consiste à **créer des paires électrons-trous** autant que possible dans l'entre-deux zones

- Les **photo-électrons** ne manqueront pas de dévaler vers **n**
- les **photo-trous** ne manqueront pas de "remonter" vers **p**

⇒ Le résultat est un **photo-courant "en inverse"**

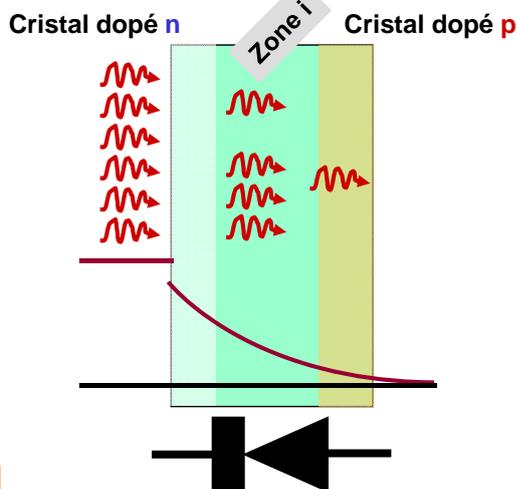
(*) cf. Diode à Tube



La "diode p-i-n"... le rendement quantique

⇒ "i" comme "insulator" = isolant

- ✓ L'absorption "utile" se produit dans la zone "i"
- × L'absorption dans les zones **p** ou **n** est "inutile"

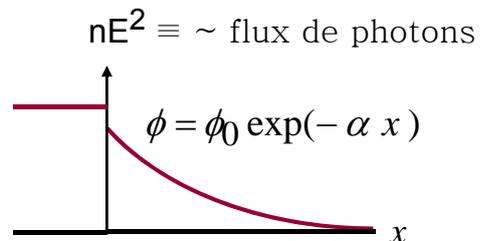


⇒ 6 photons

× 2 photon absorbés en zone n

⇒ 4 photons entrent en zone i

× 1 photon parvient en zone p

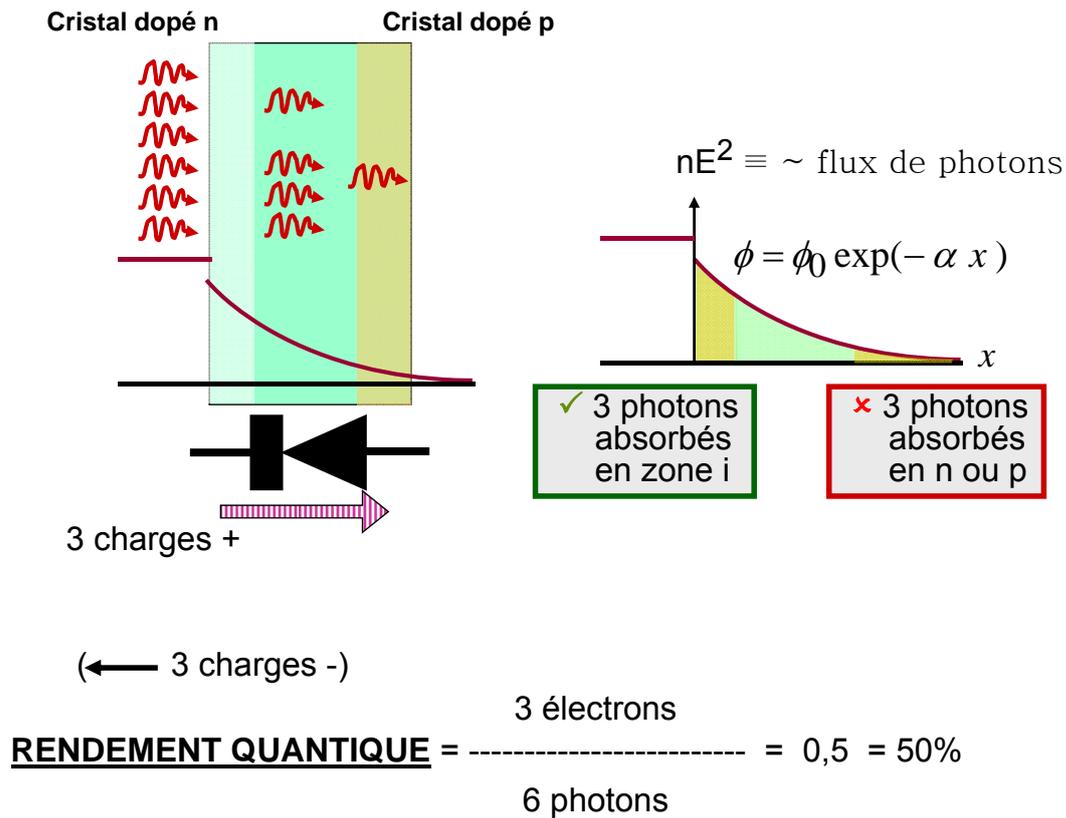


✓ 3 photons absorbés en zone i



× 3 photons absorbés en **n** ou **p**

La "diode p-i-n"... le rendement quantique



Rendement quantique et photo-rendement

Rendement quantique η : sans dimension

$$\eta = \frac{\text{Flux d'électrons}}{\text{Flux de photon}} = \frac{\text{Courant (A)/e}}{P_{\text{opt}}(\text{W})/h\nu} = \frac{I (\text{A})}{P_{\text{opt}}(\text{W})} \times (h\nu/e)$$

Rendement usuel R : **Ampères** (de photocourant) par **Watts** (de flux Lumineux incident sur la photodiode) (A / W) [\rightarrow baptisé ici "photo-rendement"]

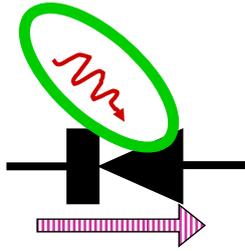
$$\eta = \frac{I (\text{A})}{P_{\text{opt}}(\text{W})} \times (\text{énergie des photons en eV}) = R \times (h\nu/e)$$

Or $h\nu/e \equiv h\nu (\text{eV})$

[R]appel : $\lambda=1,1 \mu\text{m} \leftrightarrow h\nu \approx 1,1 \text{ eV} ; \lambda (\mu\text{m}) \times h\nu (\text{eV})=1,24 [\text{eV}\mu\text{m}]$

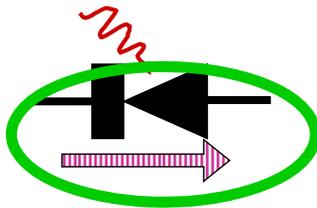
Points à discuter

1)



Quel Spectre ?

2)

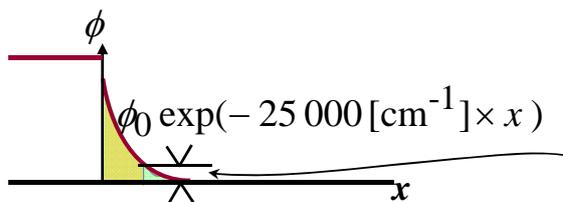


Quel diagramme Courant-Tension ?

Dépendance spectrale du photocourant

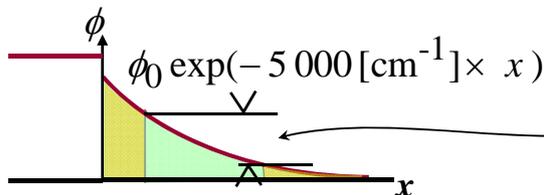
Dépendance via le coefficient d'absorption

$$\alpha = \alpha(\lambda)$$



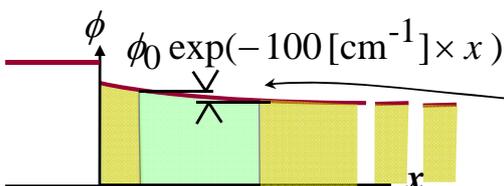
$$\eta = 0,04$$

"Trop absorbé"



$$\eta = 0,5$$

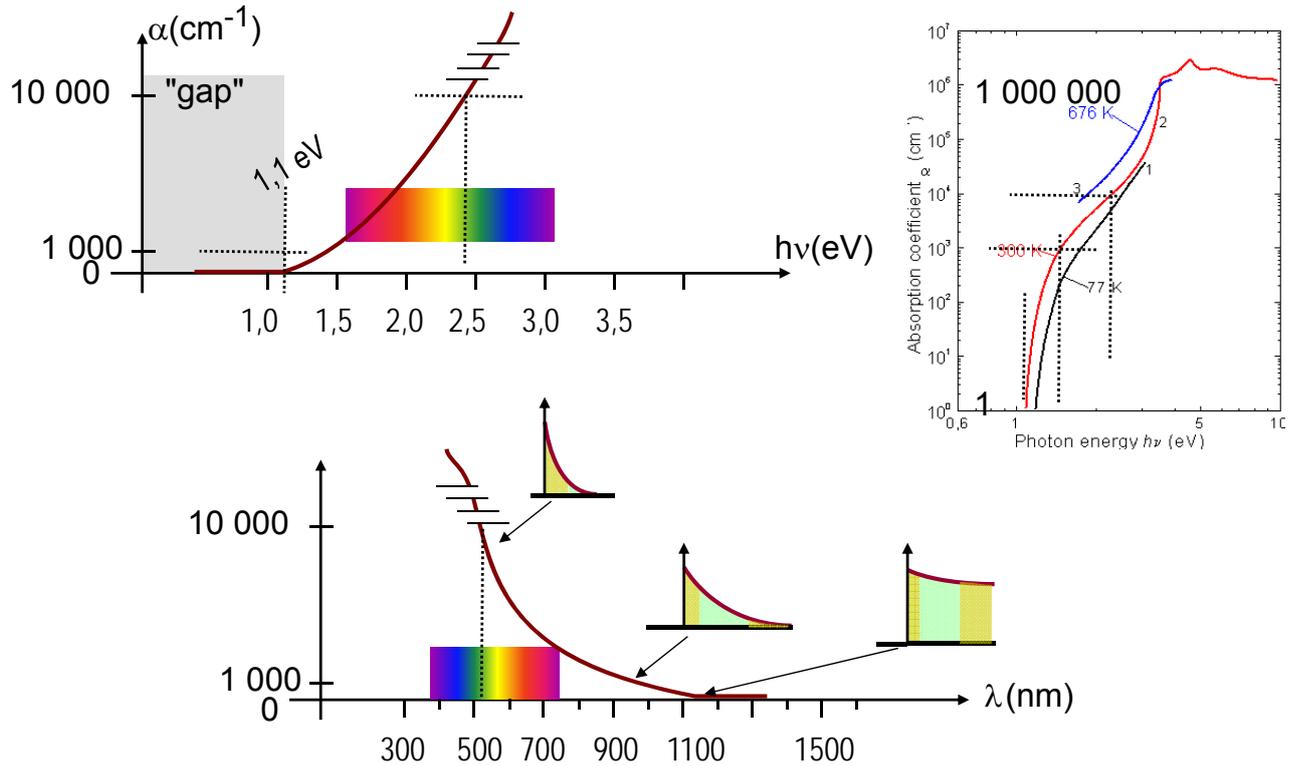
"Comme il faut"



$$\eta = 0,01$$

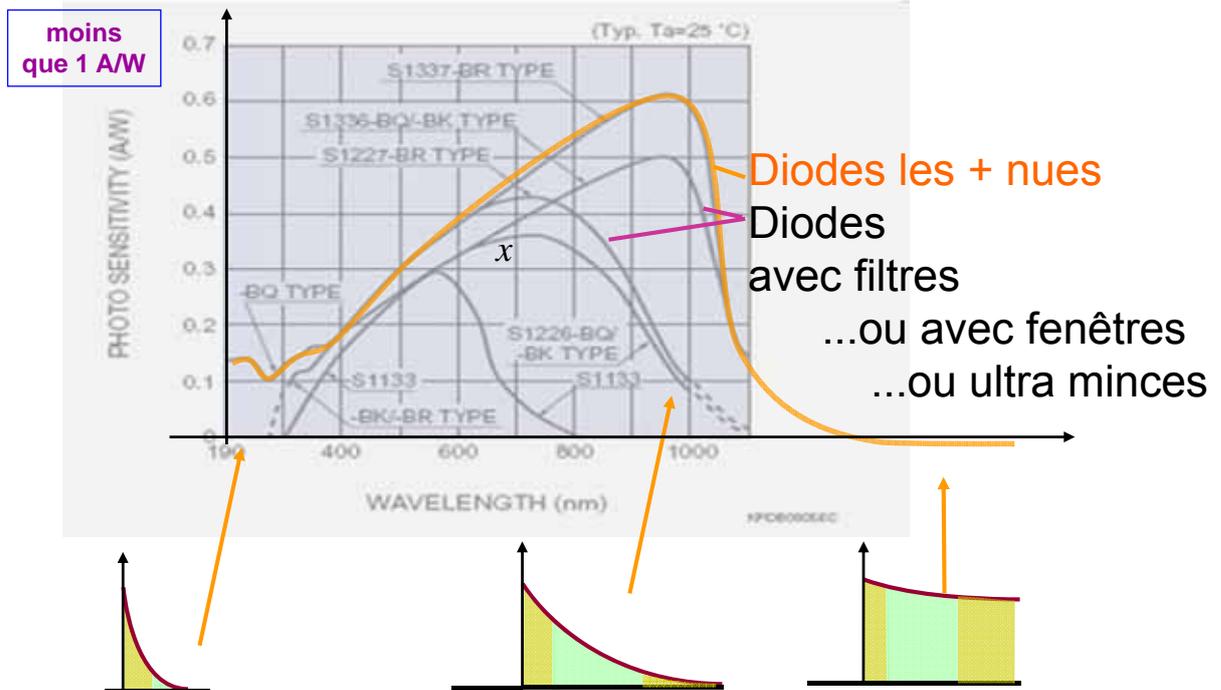
"Trop transparent"

Dépendance spectrale de l'absorption du Si



l'absorption n'est optimale que vers 1000 nm ou 900 nm

Pic spectral de rendement

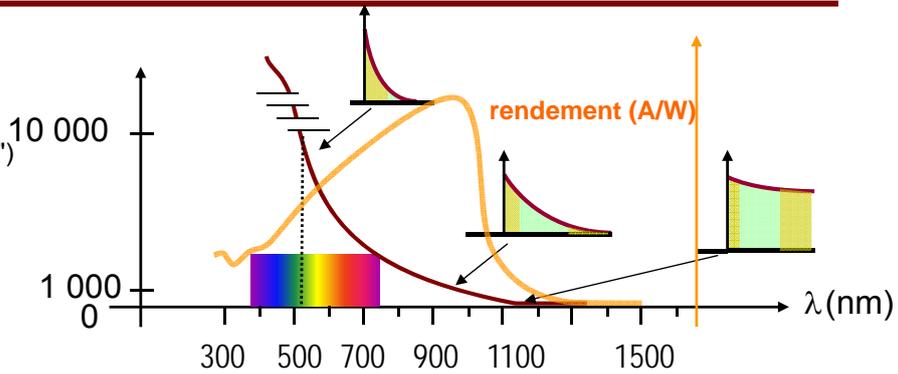


<http://sales.hamamatsu.com/assets/html/ssd/si-photodiode/index.htm>

Pic spectral de rendement : règle générale

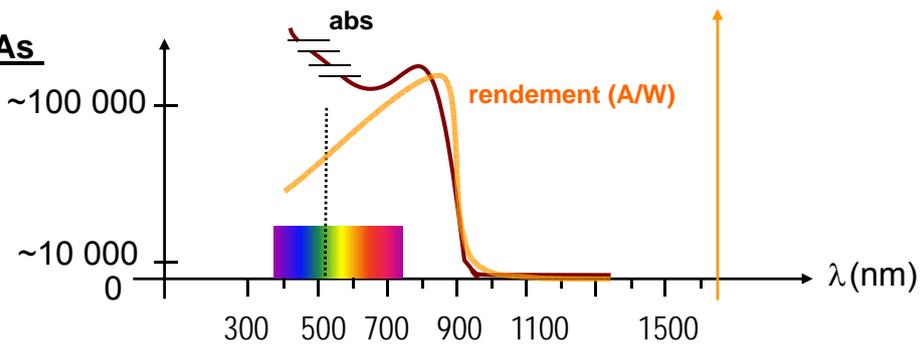
Photodiode Si :

(transition "assez raide")
("gap indirect")

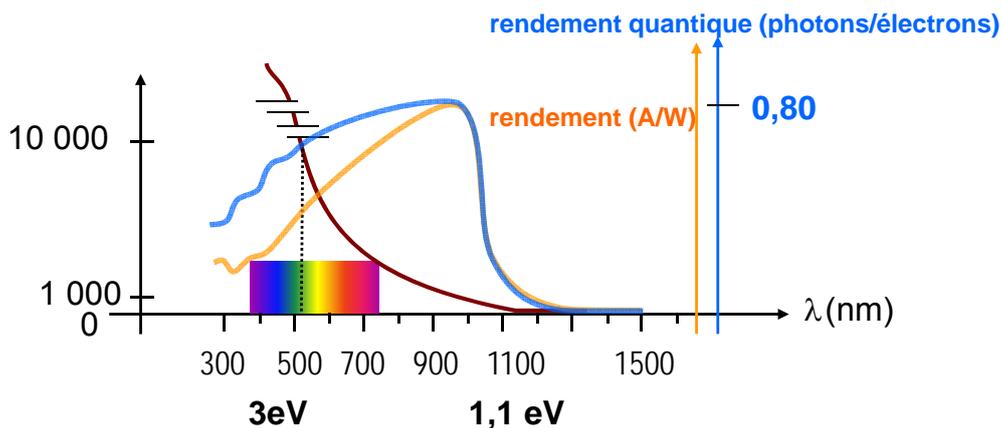


Photodiode GaAs

(transition + raide)
("gap direct")



Rendement quantique et photo-rendement (A/W)



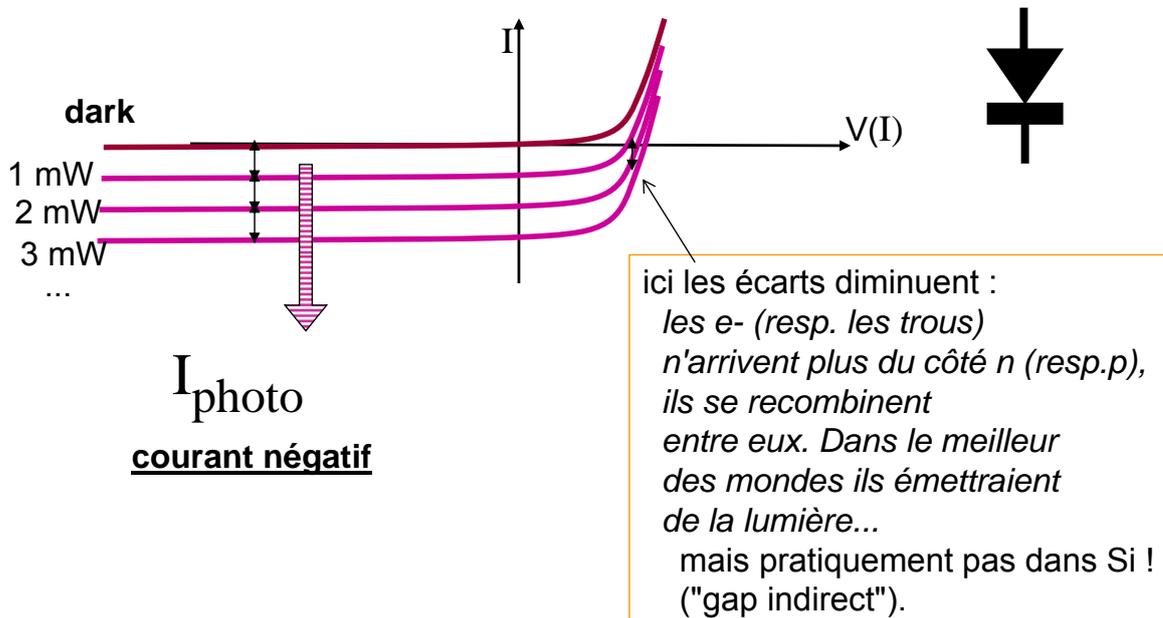
En effet :

$$\eta = \frac{I \text{ (A)}}{P_{\text{opt}} \text{ (W)}} \times (\text{énergie des photons en eV}) = R \times (h\nu/e)$$

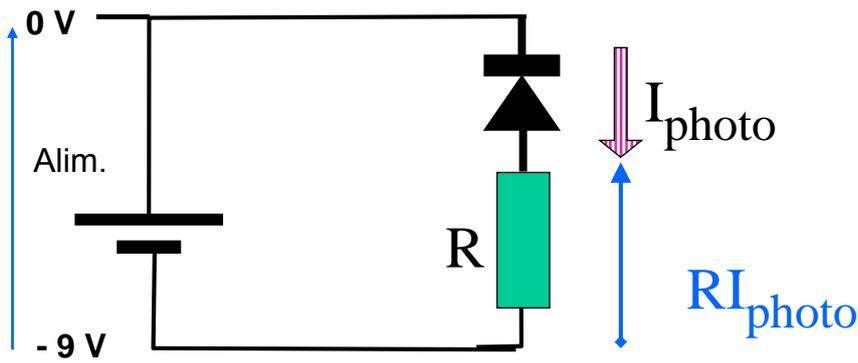
- Dit autrement : les photons les plus énergiques (et "bien" absorbés) donnent le même courant que les moins énergétiques : plus de Watts incidents et autant d'Ampère. Donc moins de photo-rendement à rendement quantique égal. *C'est un des petits drames de l'énergie photovoltaïque...*

- L'absorption se fait pour (énergie de photon) > (bande interdite)
- Le rendement quantique est maximum pour les photons absorbés sur la "bonne" épaisseur, celle de la zone i d e p-i-n
- Le photo-rendement (A/W) est maximal près du seuil d'absorption situé vers 1000 nm pour le Silicium.
- Un rendement quantique de $\eta=1$ se traduit par 1 A/W pour $h\nu=1\text{eV}$ donc typiquement $<1A/W$ pour les photons usuels (1..3 eV)

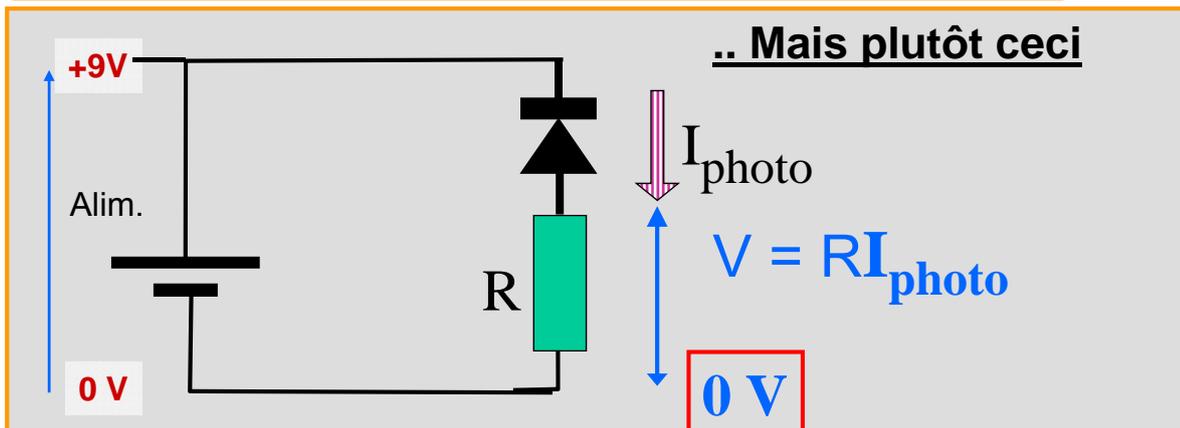
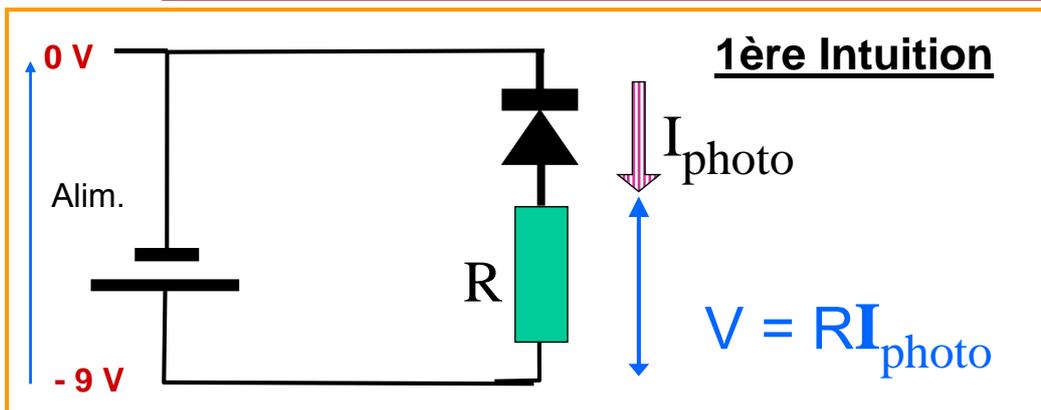
Quel diagramme Courant-Tension ?



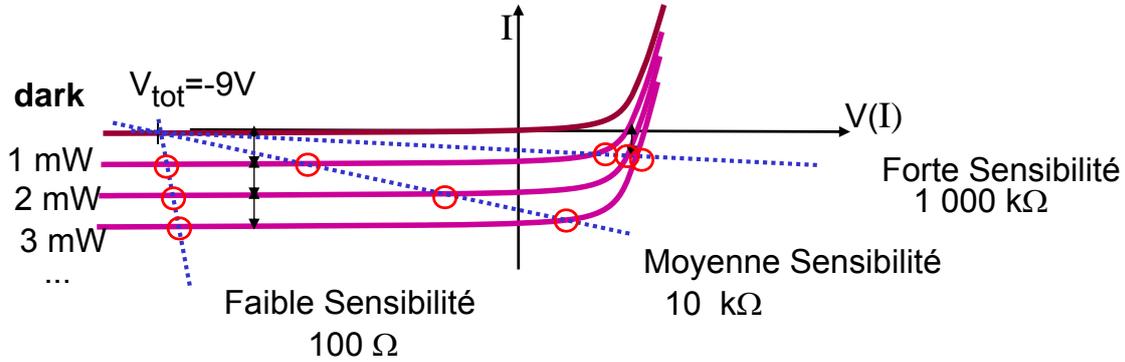
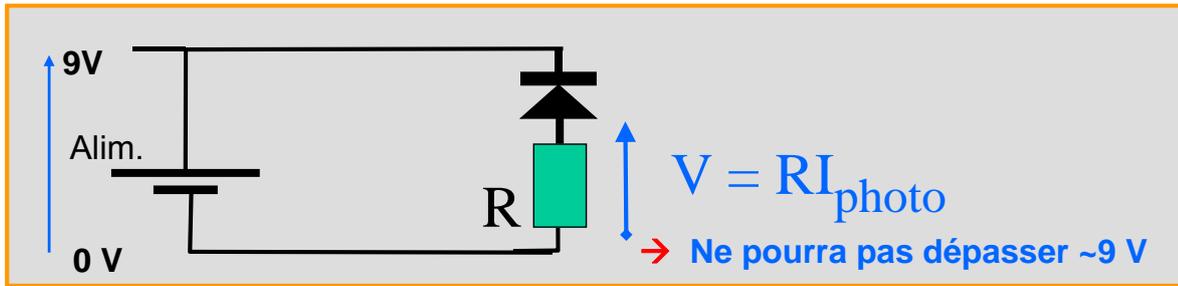
Usage photométrique



Usage photométrique

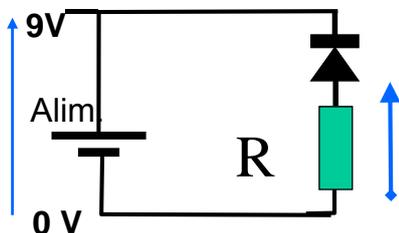
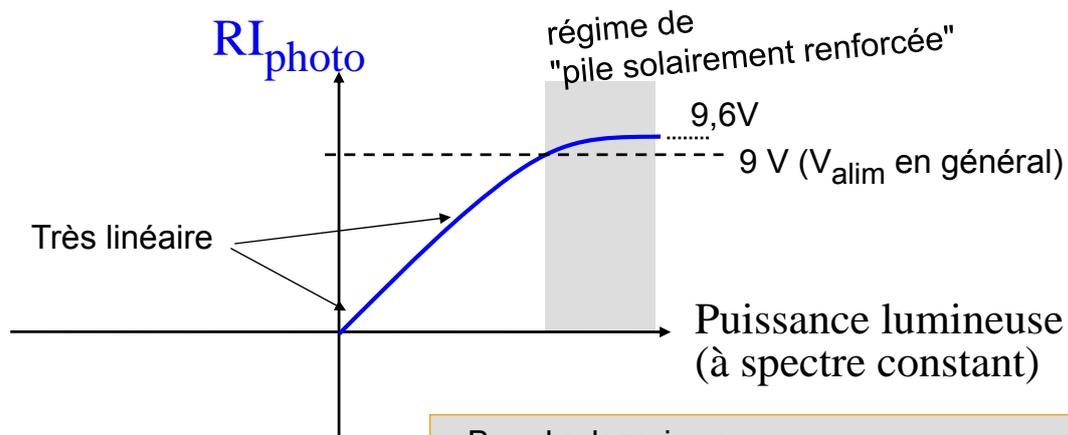


Usage photométrique : ? Courant max ?



$1\text{mA} \times 10\ k\Omega = 10\ \text{Volts}$

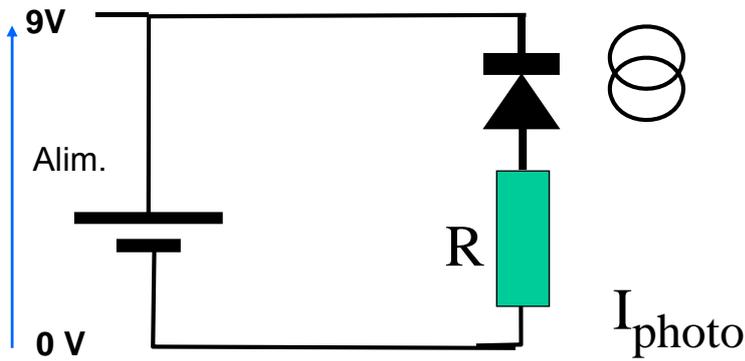
Usage photométrique : ? Courant max ?



- Bas du domaine : limitation par divers "bruits"
- Typiquement 1 mV → 4 décades de "dynamique" de 1 à ~10 000 mV
- La photodiode bien câblée est linéaire dès le premier photon ! ("1 à 10^{16} photons/s" !!!) avec R variable

Usage photométrique : ? fréquence max ?

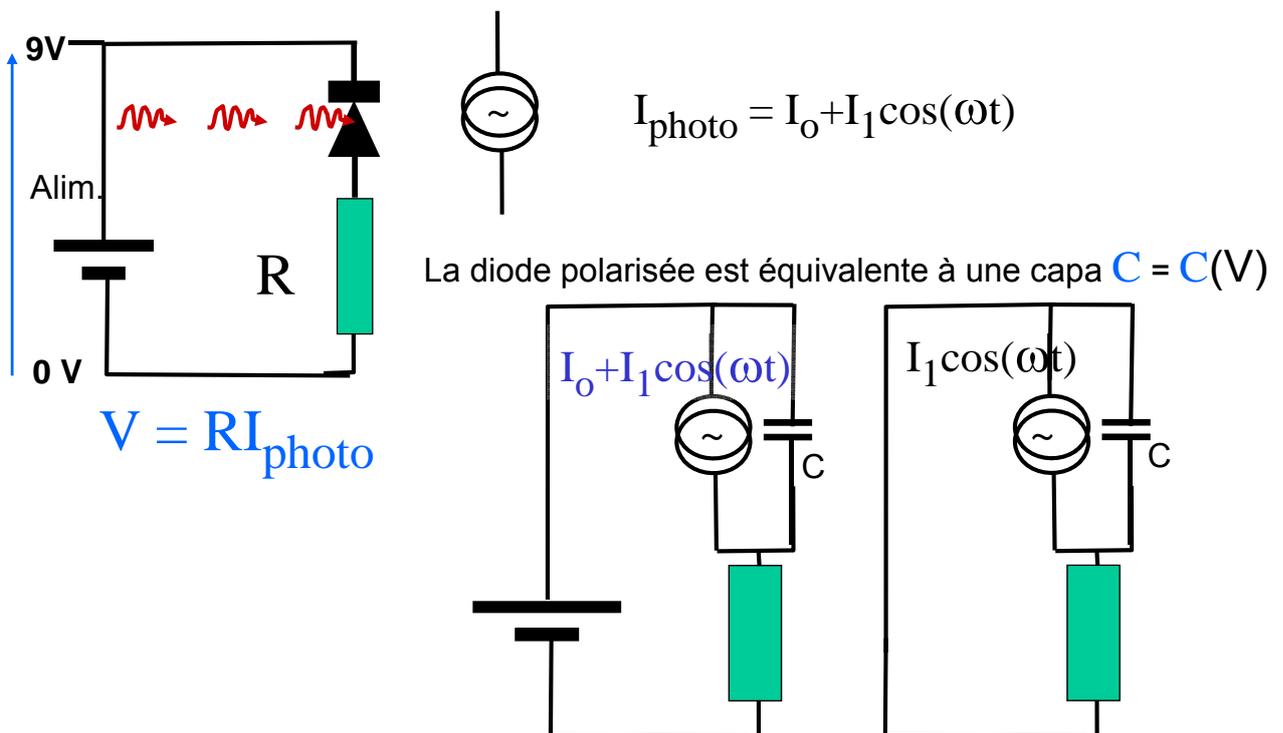
Flux lumineux haché à fréquence



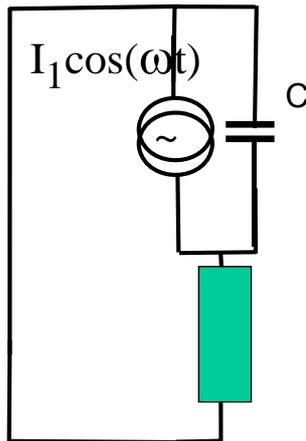
$$V = RI_{\text{photo}}$$

Usage photométrique : ? fréquence max ?

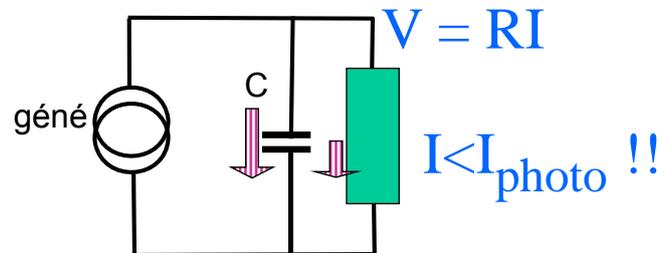
Flux lumineux modulé à fréquence ω (1 kHz \rightarrow 1 GHz)



Usage photométrique : ? fréquence max ?



La diode polarisée est équivalente à une capa $C = C(V)$



→ La diode "se parle à elle-même" (à sa capa)

→ Coupure de type "passé-bas 1er ordre"

$$V_1 = RI_1 \times \frac{1}{1 + jRC\omega}$$

→ Une "évidence" : C est proportionnelle à S , donc $\omega_{\text{coupure}} \sim 1/S$
 "Les Diodes de Grande Surface Vont Leeentement"

Usage photométrique : ? fréquence max ?

→ Ordre de grandeur typique

Diodes $S=10 \text{ mm}^2$ $C=100 \text{ pF}$ (dépend de la polarisation $C=C(V)$ en général)

⇒ Avec $R=100 \text{ k}\Omega$

on espère que $20 \mu\text{A}$ ($40 \mu\text{W}$ incident) se transforment en $2,00 \text{ V}$

• Mais $RC = 10^5 \times 10^{-10} = 10^{-5} \text{ s}$,
 soit une fréquence de coupure $f_c = \frac{1}{2\pi RC} \sim 16 \text{ kHz}$ seulement. ☹️

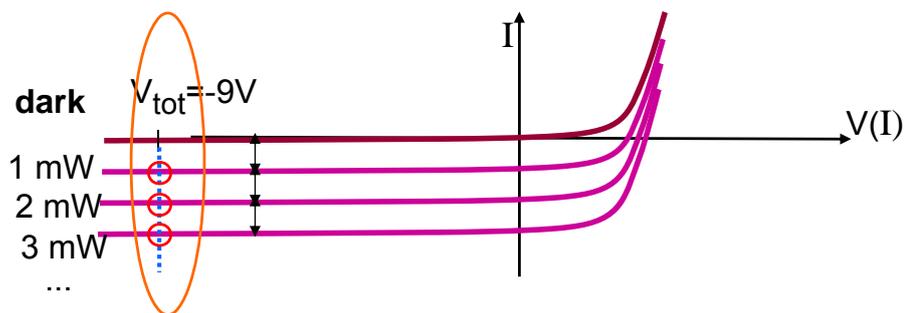
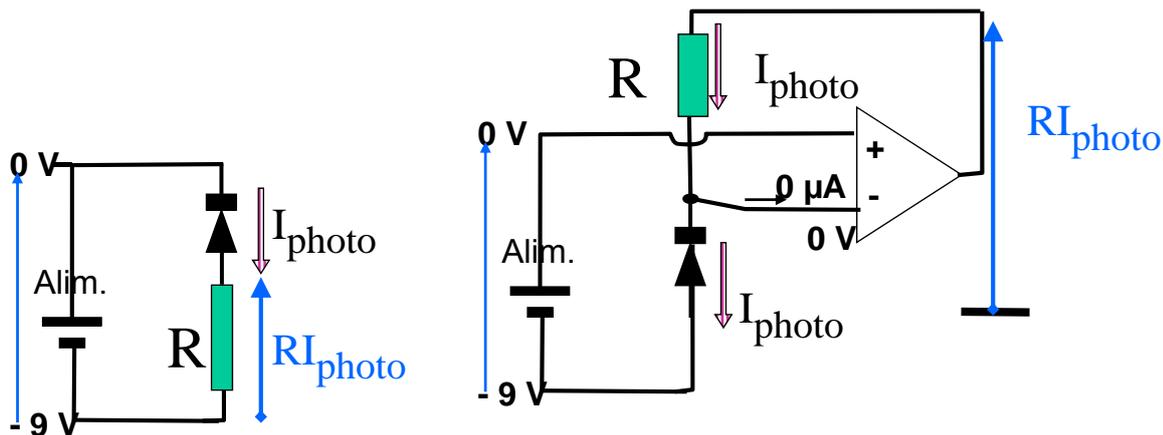
→ Le montage transimpédance combat cet inconvénient

dans une importante mesure

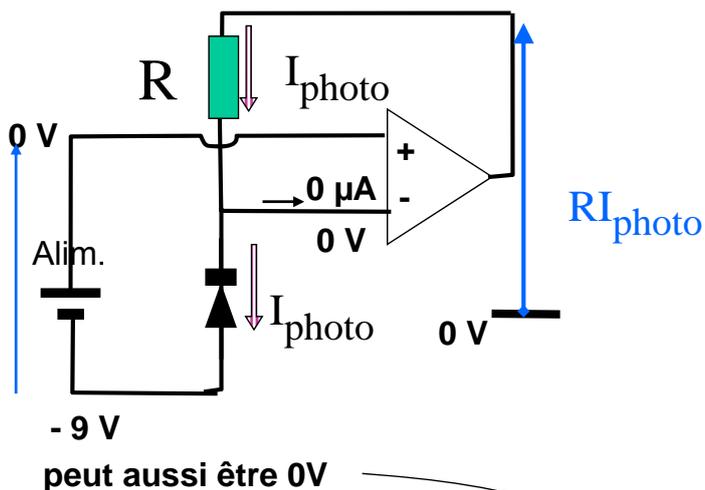
(moyenne géométrique entre "produit gain bande" et "coupure $1/2\pi RC$ ")

Dans le cas d'espèce, passer à 300 kHz se fait aisément

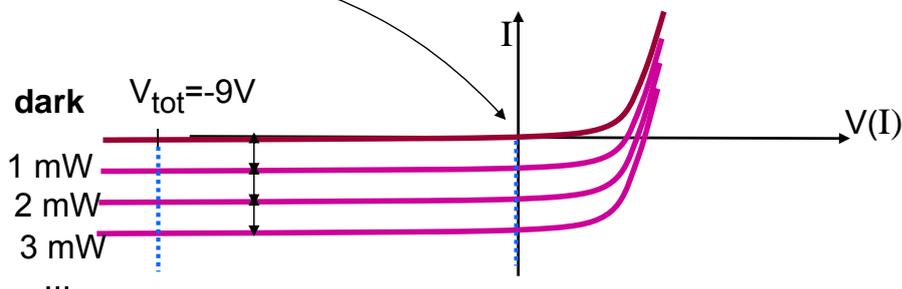
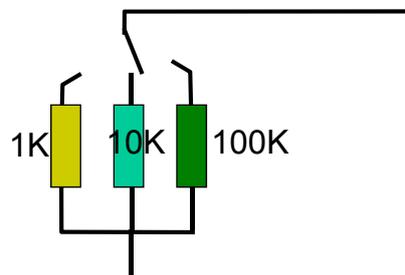
Encore plus linéaire : "Ampli transimpédance"



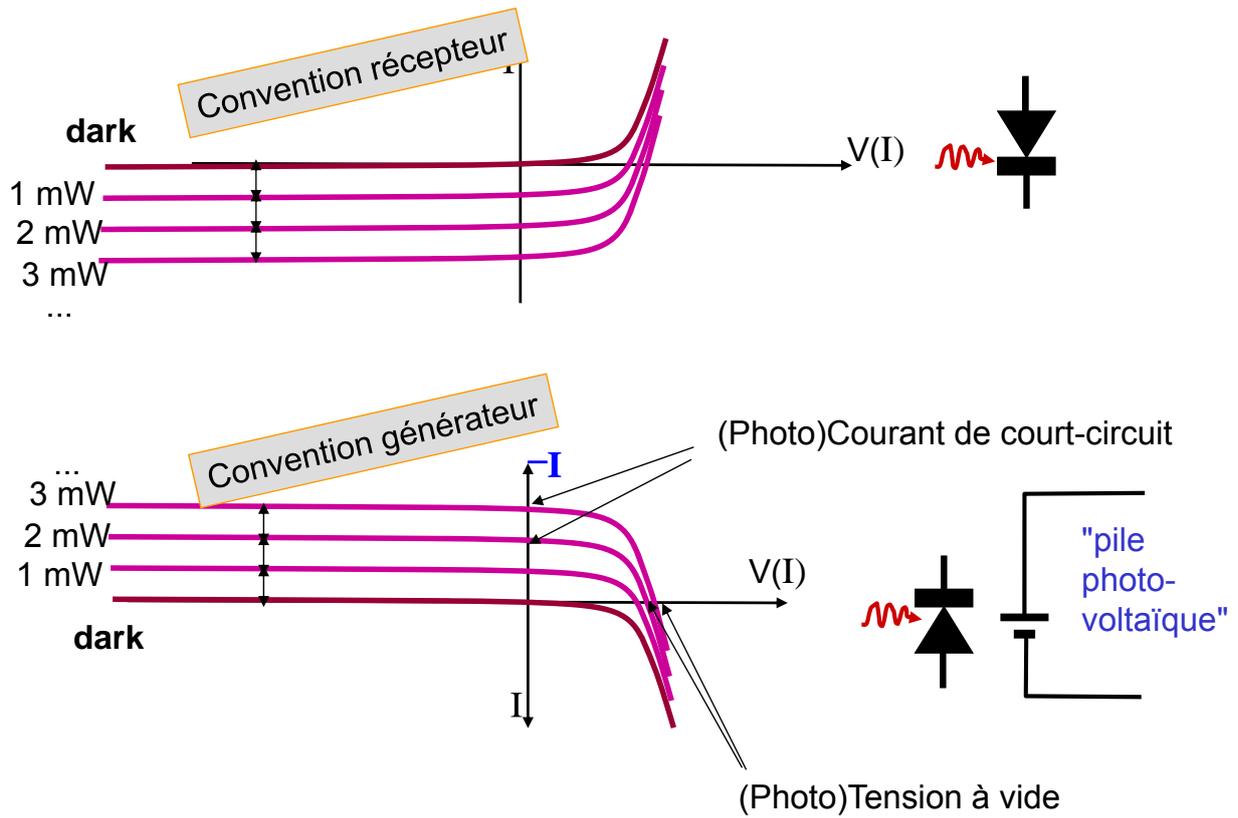
Encore plus linéaire : "Ampli transimpédance"



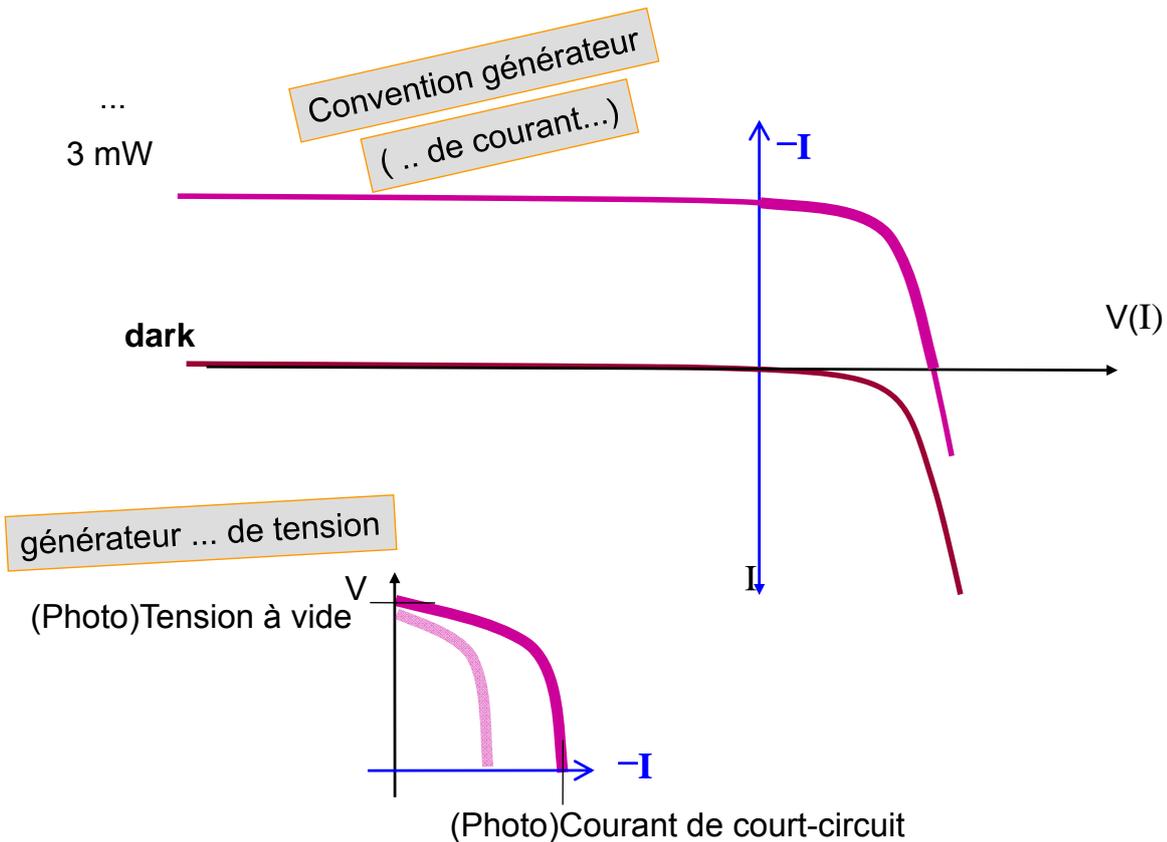
- Seule limite : $|V_{max}|$ de l'AO (3 ... 14,5 V)
- Sensibilité ajustable



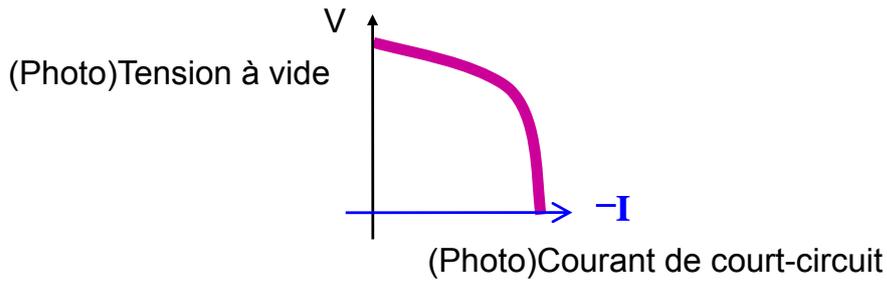
Usage en générateur (cellule photovoltaïque)



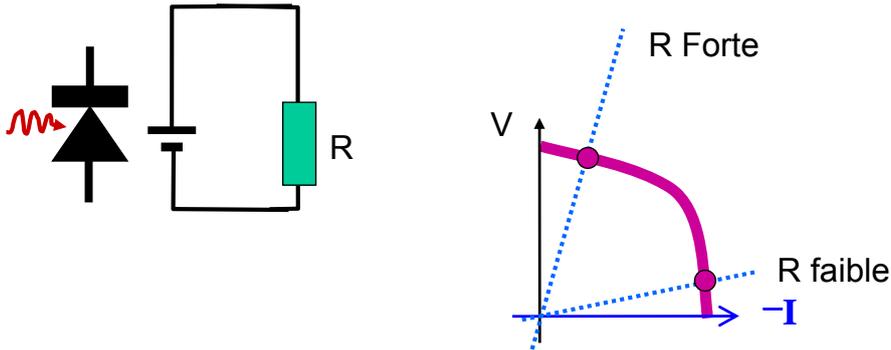
Usage en générateur (cellule photovoltaïque)



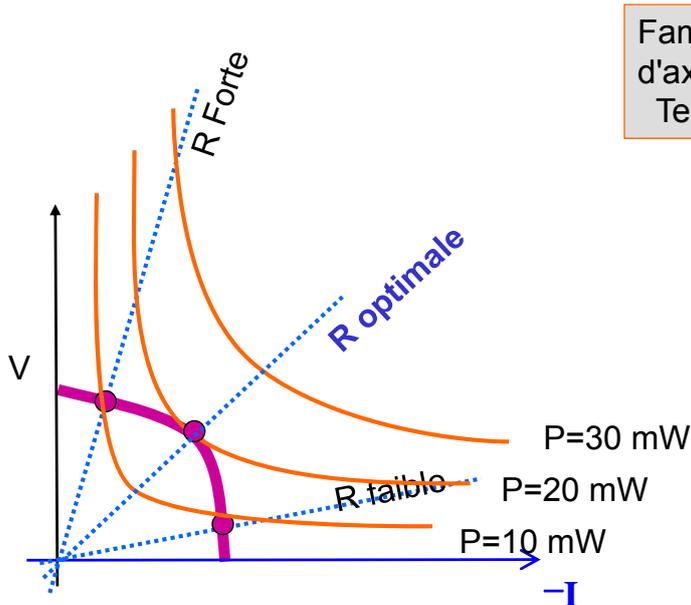
Usage en générateur (cellule photovoltaïque)



- Et on met une charge à ce générateur :



Générateur optimal : hyperbole tangente



Famille d'Hyperboles
d'axes XY
Tension \times courant = P (watts)

- Même si la charge n'est pas ohmique (redresseur ou non linéaire), le point de P maximum est le même, il est propre au générateur...

⇒ Prix Nobel 2009 !

Le capteur "CCD" (Charge-Coupled Device) (entre autres)

✓ aujourd'hui , équipe les bonnes caméras/appareils photos

- Lecture sérielle obligatoire
- Bon rendement
- Technologie spécifique

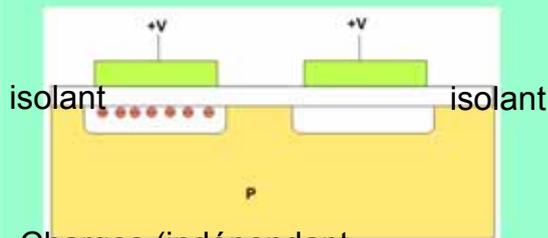
L'autre méthode = CMOS

- Lecture de pixels au choix
- Rendement médiocre (pixel entouré par sa "plomberie")
- Technologie générique de la microélectronique ("mainstream")
en gros la webcam, ou le capteur des tel. portables

Conférence Nobel de Smith 2009

(Metal-Oxide-Semiconductor)

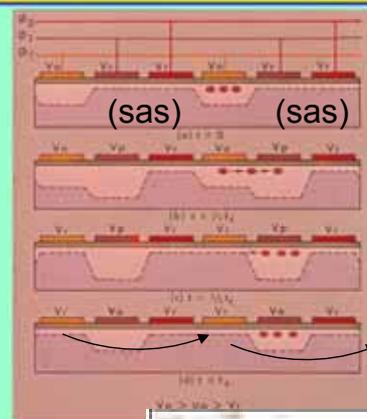
Two MOS Capacitors



Charges (indépendant de la photocapture)
Ici on a les charges (mobiles!) du métal en face des charges mobiles du semi-conducteur, séparées par un isolant (≡oxyde≡ SiO₂ ~sable !)

(Charge-Coupled Device)

Three Phase CCD

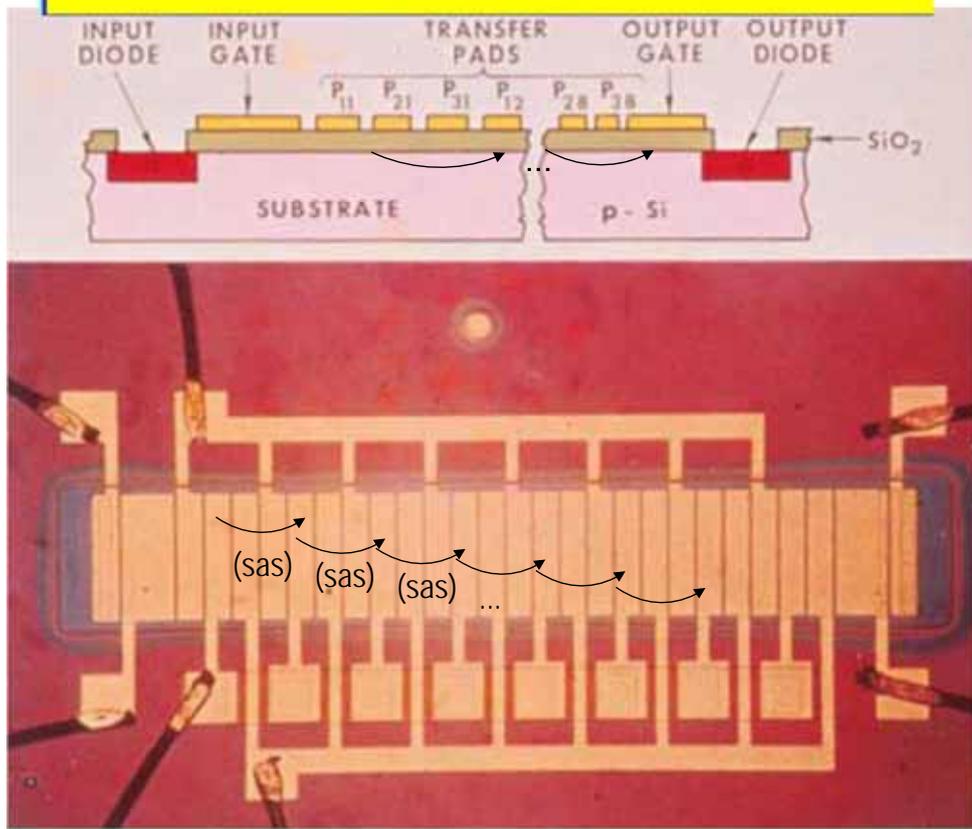


"Fire Bucket brigade"



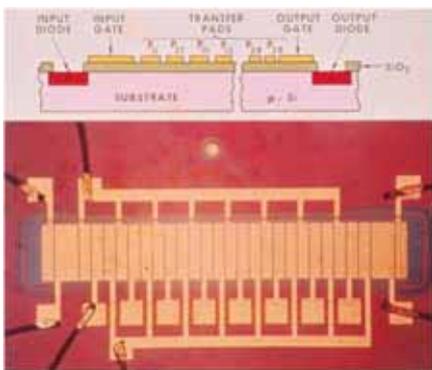
Lecture séquentielle d'une barrette de charge
aucune perte de charge !

First Functional Device

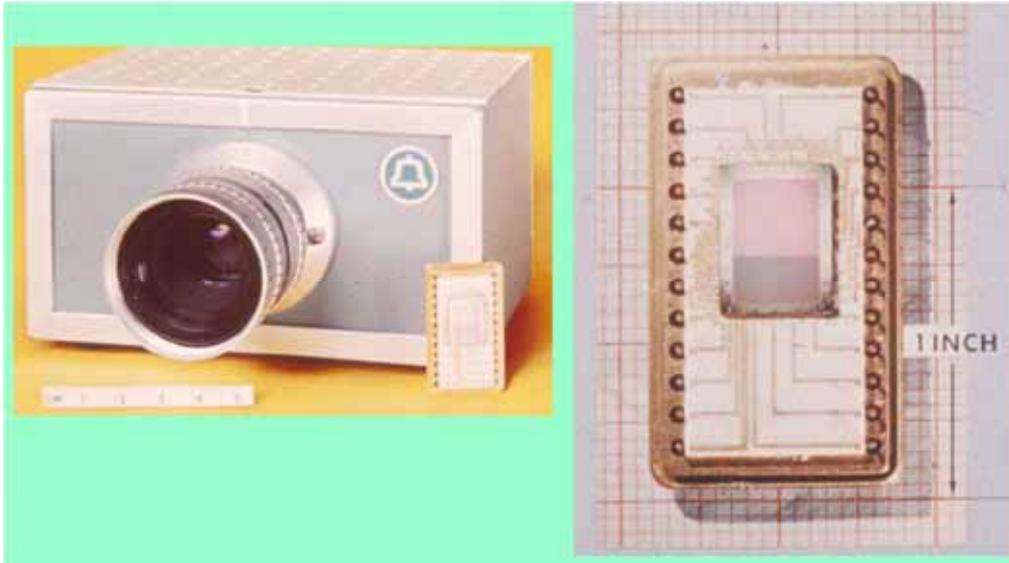


(Transfert
de
Charge)

mécanisme de base ~ jonction p-n et séparation des e-



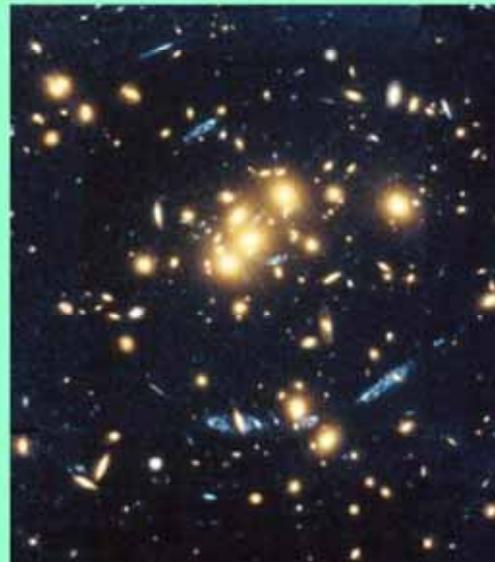
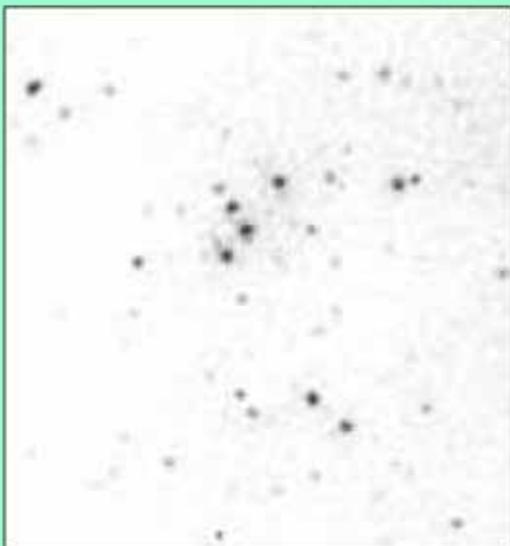
- Trouver des électrodes transparentes ("poly-Si")
- faire en sorte que la jonction p-n débouche sur une "zone de stockage" (capacité) pour des tensions de repos des électrodes



... vite abandonnée (bande passante ...)
(sur le marché en 2012 ? 2011 ?)

Les premiers fanas : les astronomes !

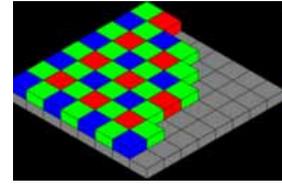
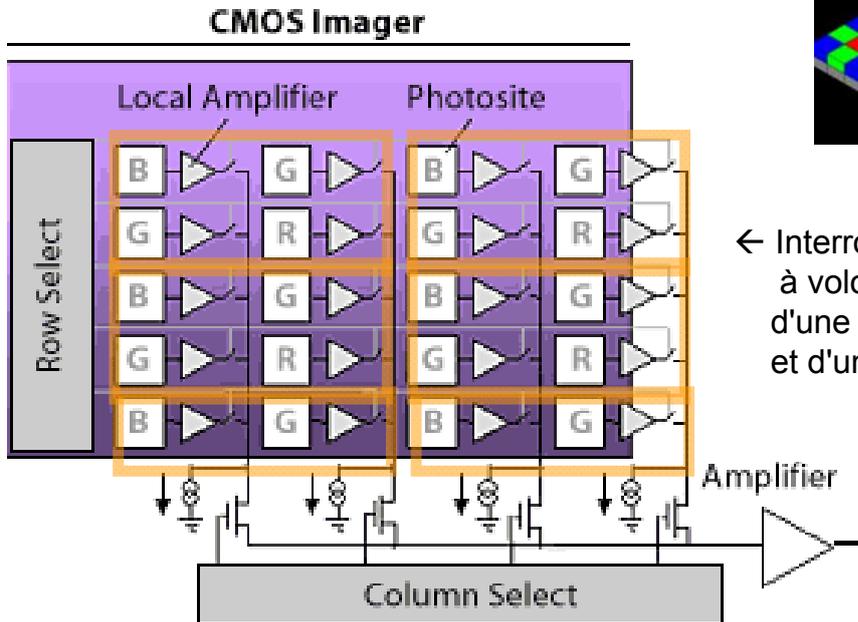
More Before & After



+ architecture couleur quatre pixels munis de filtres "Bayer"

B G
G R

Lecture au choix des lignes & colonnes



Filtres dits "Bayer" (brevet Kodak)

United States Patent [19] [11] 3,971,065
Bayer [45] July 20, 1976

[54] **COLOR IMAGING ARRAY**
[75] Inventor: Bryce E. Bayer, Rochester, N.Y.
[73] Assignee: Eastman Kodak Company, Rochester, N.Y.
[22] Filed: Mar. 5, 1975
[21] Appl. No.: 555,477

[52] U.S. Cl. 358/44; 350/162 SP; 350/317; 358/44
[51] Int. Cl. H04N 9/24
[58] Field of Search 358/44, 45, 46, 47, 358/48; 350/317, 162 SP; 315/169 TV

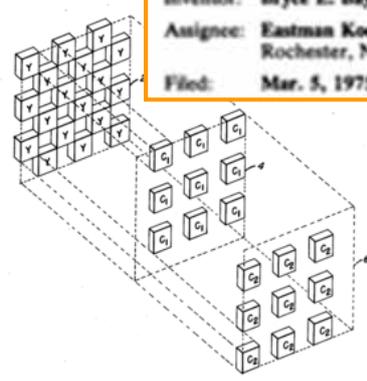
[56] **References Cited**
UNITED STATES PATENTS
2,446,791 4/1948 Schroeder 358/44
2,508,267 5/1950 Kasperovic 358/44
2,884,483 4/1959 Ehrhardt et al. 358/44
3,725,572 4/1973 Karakava et al. 358/46

Primary Examiner—George H. Lilman
Attorney, Agent, or Firm—George E. Crozier

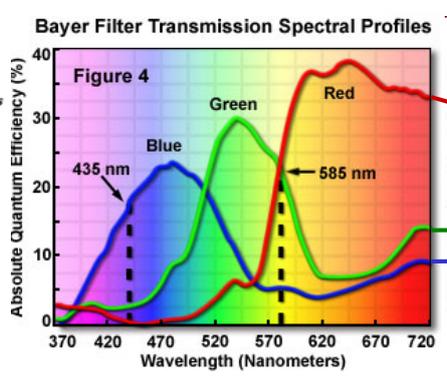
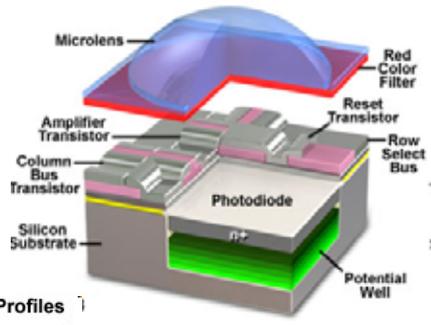
[57] **ABSTRACT**
A sensing array for color imaging includes individual luminance- and chrominance-sensitive elements that are so intermixed that each type of element (i.e., according to sensitivity characteristics) occurs in a repeated pattern with luminance elements dominating the array. Preferably, luminance elements occur at every other element position to provide a relatively high frequency sampling pattern which is uniform in two perpendicular directions (e.g., horizontal and vertical). The chrominance patterns are interlaid therewith and fill the remaining element positions to provide relatively lower frequencies of sampling.

In a presently preferred implementation, a mosaic of selectively transmissive filters is superposed in registration with a solid state imaging array having a broad range of light sensitivity, the distribution of filter types in the mosaic being in accordance with the above-described patterns.

COLOR IMAGING ARRAY
Inventor: Bryce E. Bayer, Rochester, N.Y.
Assignee: Eastman Kodak Company, Rochester, N.Y.
Filed: Mar. 5, 1975



Bayer Color Filter Mosaic Array and Underlying Photodiodes



les filtres "Bayer" laissent passer pas mal d'IR
(spectres exacts peu documentés toutefois !)

- Photocourant : EN INVERSE
- Très grande linéarité (du fA au 100 mA), avec R adapté, hors "bruit".
- montage diode + R ou montage TRANSIMPEDANCE
- Limitation en fréquence = capa de la Photodiode , en 1/S
→ on s'en affranchit en bonne partie par le montage TRANSIMPEDANCE
- Usage en générateur = Cellule Photovoltaïque
- Capteur matricé de la vie de tous les jours (+ Nobel 2009)

Fin Photodiodes

début LED

(Light-Emitting Diodes = Diode Emettrice de Lumière)

- Gisement d'économie d'énergie, peut être un des plus aisés à mettre en œuvre
- Beaucoup de travail pour la Photonique/l'Optique
- Perception biaisée par des préjugés de tous bords:
 - L'histoire de l'électronique : "LED = petit voyant pas très visible à 30 mA"
 - Les éclairages concurrents : "Fluo = pas belle lumière, LED = pas mieux"
 - Un marketing qui fait honte au physicien, risquant d'être contre-productif (puissance annoncée en équivalent tungstène exagérée...)*

Exemple de l'Eclairage aux USA : 20% de l'électricité US.

Or il y a 1200 centrales au charbon (les pire en CO₂) aux USA.

Une réduction de -45% de la consommation pour l'éclairage permet de fermer 100 centrales au charbon !

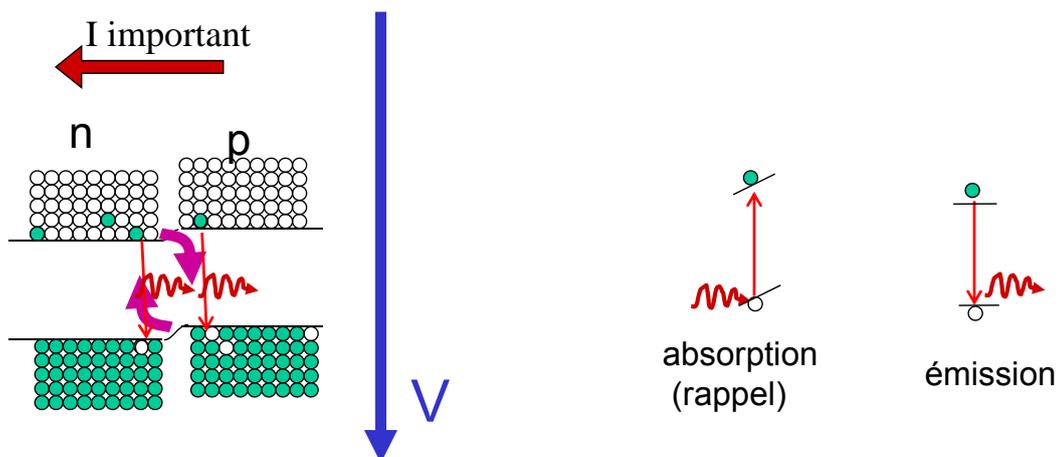
* l'actuel secrétaire d'état US à l'Energie est toutefois un Nobel de Physique, Steven Chu, cela laisse quelque espoir d'une réglementation saine ...)

Elec / Diodes H. Benisty ESO1 /2012

79

Ce serait trop beau si ...

- (i) Si ça marchait bien comme ça (LED historique <1965), en gros comme un atome à deux niveaux



- (ii) Si ça marchait avec le Silicium ("gap indirect", snif)

- (iii) Toutefois à l'échelle microscopique, l'émission est bien réciproque de l'absorption (sera revu pour le laser, raisonnements sur l'émission dus à Einstein)

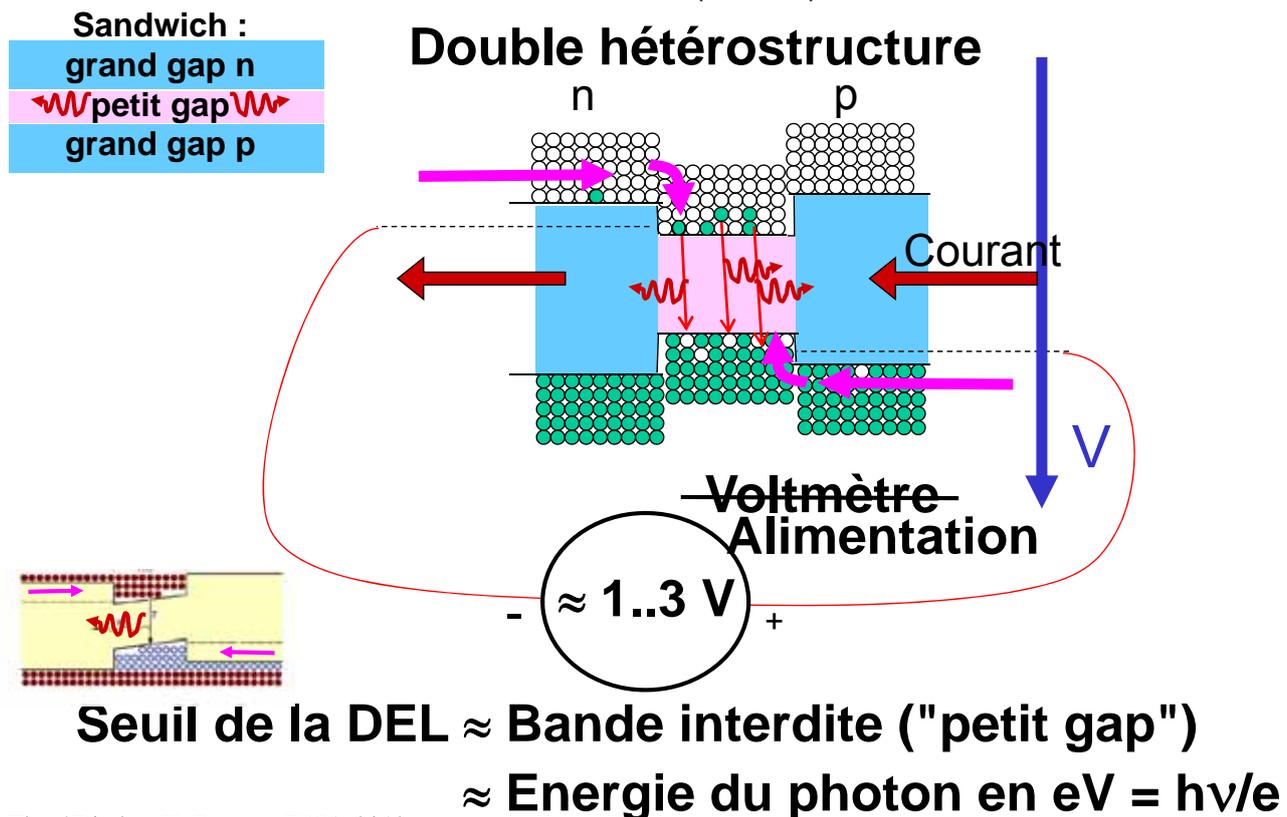
La diode laser (Holonyak 1962, en GaAs, deux ans et demi après le laser à rubis Maiman 1960) utilise la même physique que la LED, sauf que les photons restent assez longtemps dans les "modes" d'une "cavité" pour qu'ait lieu l'émission stimulée (Einstein ...)

- Diode laser ~"Formule 1 des diodes émettrices"
Faible part de marché (~10%)
(malgré CD, DVD, lecteur code-barre, fibre optique & télécom >~ 1 km, imprimante,...)
- LED ~ Industrie principale de l'opto-électronique !
On doit en être à 10 à 100 LEDs par habitant par an !
- Industrie récente, marquée par l'incroyable saga des émetteurs bleus en GaN (moins de 20 ans)
dus à Shuji Nakamura (@ Nichia à l'époque, @UCSB aujourd'hui)



La structure qui marche (1963, prix Nobel 2000)

Herbert Kroemer & Jaurès (Zhores) Alferov



Rendement quantique η : sans dimension

$$\eta = \frac{\text{Flux de photons}}{\text{Flux d'électrons}} = \frac{P_{\text{opt}}(\text{W})/h\nu}{\text{Courant (A)}/e} = \frac{P_{\text{opt}}(\text{W})}{I(\text{A})} \times (e/h\nu)$$

Rendement R : **Watts** (de flux Lumineux sortant) par **Ampère** injecté (W / A)

$$\eta = \frac{P_{\text{opt}}(\text{W})}{I(\text{A})} \times (1/\text{énergie des photons en eV}) = R \times (e/h\nu)$$

Rappel $h\nu/e \equiv h\nu \text{ (eV)}$

NB : Rendement «à la prise» $R_{\text{wall-plug}}$ ("wall-plug efficiency") = $\frac{P_{\text{opt}}(\text{W})}{P_{\text{elec}}(\text{W})} = \frac{\eta}{U}$

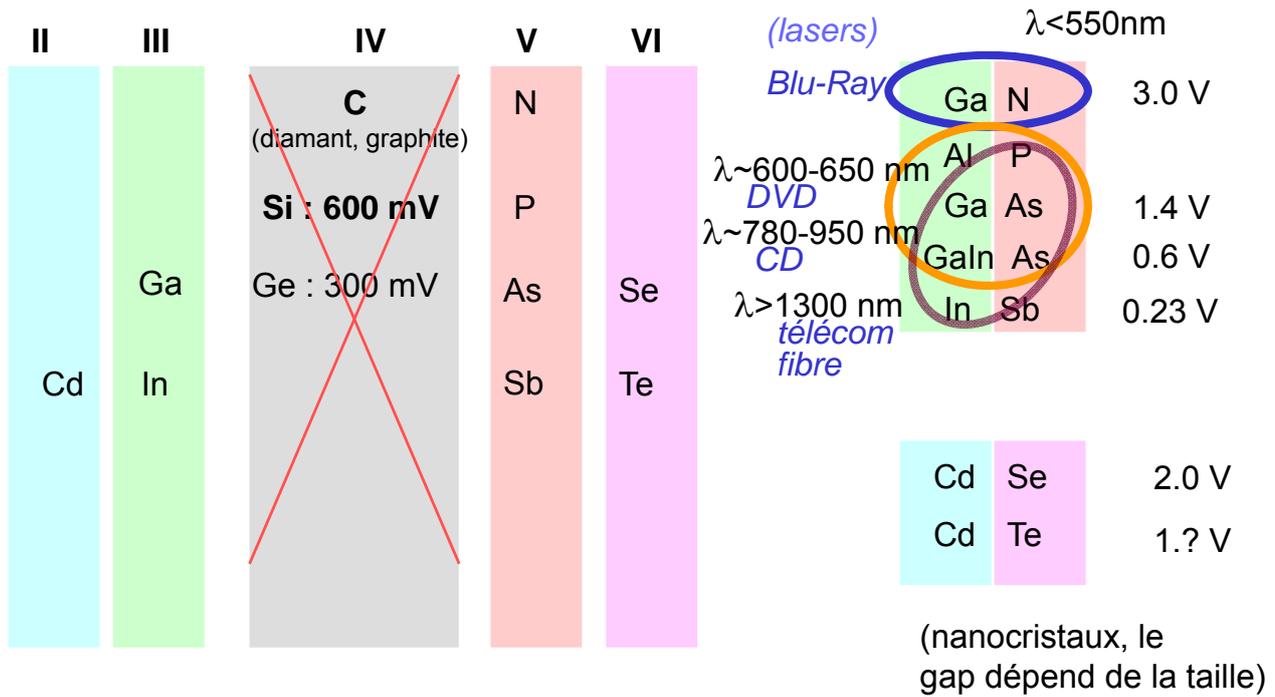
RENDEMENT D'UNE DIODE

- Tous les e- n'ont pas été convertis en photons ?
(recombinaisons "non radiatives", ...)
→ **Chute du rendement quantique**
- Tous les e- n'ont pas été convertis en photons externes ?
(photons réabsorbés avant de sortir)
→ **Mauvais "rendement d'extraction"**
mauvais "rendement quantique externe"
- Les e- injectés à U (volts) sont convertis en photons d'énergie $E=h\nu < U/e$
→ **Chute ohmique (par exemple) avant ou après la jonction**
Mauvais rendement à la prise

- **Challenge des LEDs:**

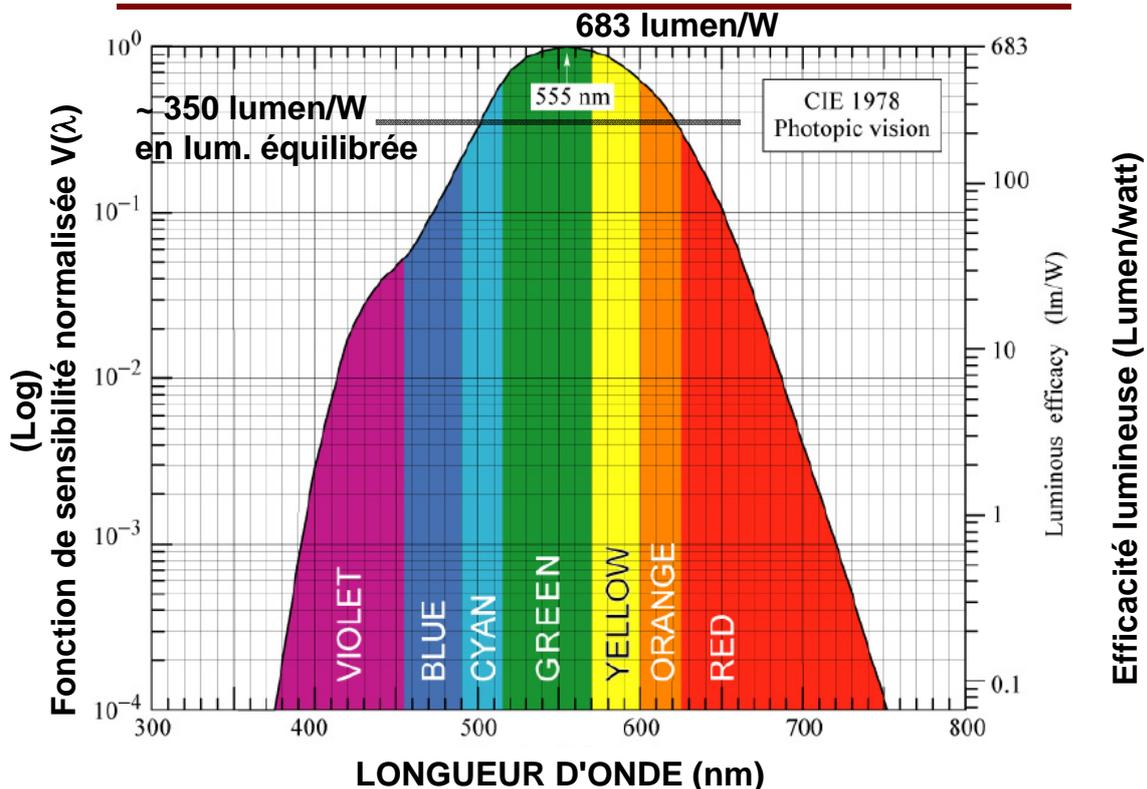
- Utiliser les e- sans chute ohmique
- En faire 100% de photons d'énergie ~bande interdite (à $\pm kT$ près)
- Extraire tous les photons sans aucune absorption
- Qu'il fasse chaud ou froid
- Que le courant soit faible ou fort
- Et si possible en rayonnant de façon un peu ou bcp directive !

Les matériaux qui marchent



"Le" problème : pas de bon émetteur de **550 à 600 nm** (vert-jaune à orange)

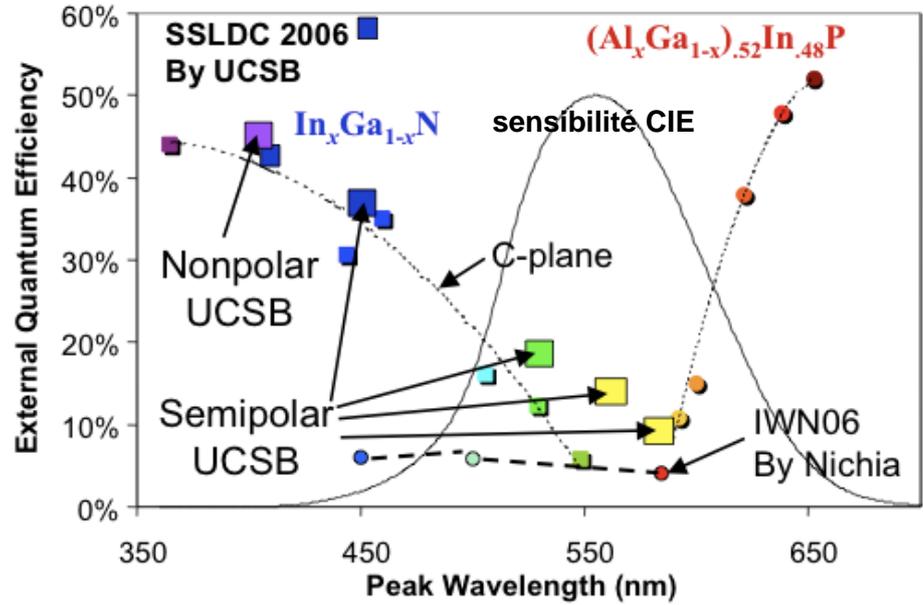
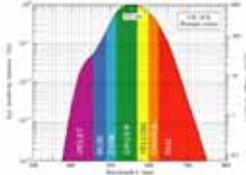
Spécificité : la vision humaine (sensibilité CIE 1978)



A rendement 100%, on a besoin d'au moins 35 W pour faire 10 000 lumens
besoin typique = 1000 lumen/m² (10 000 lumen / grande chambre)

Le "trou du vert"

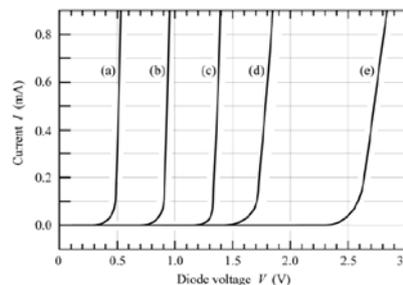
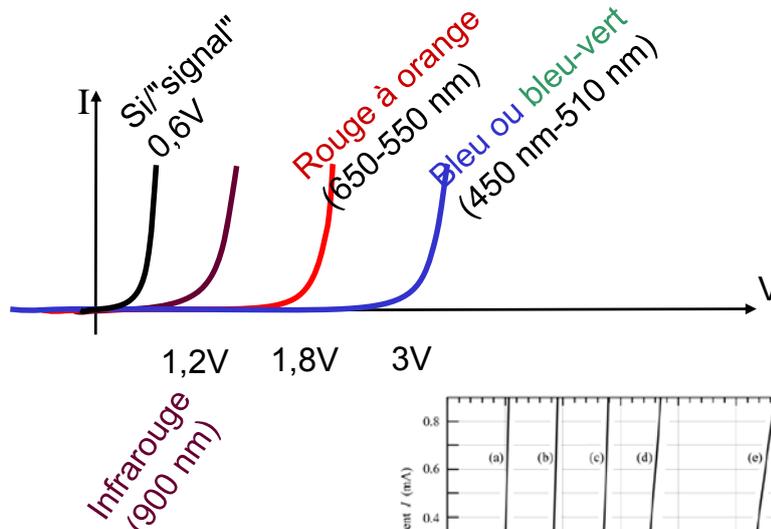
Bien moindre efficacité là où l'oeil est le meilleur !



Caractéristique I-V : le seuil est "quantique"

Moyen mnémotechnique pour conversion volts/longueur d'onde

$$1,1 \text{ eV} \leftrightarrow 1,1 \mu\text{m}$$

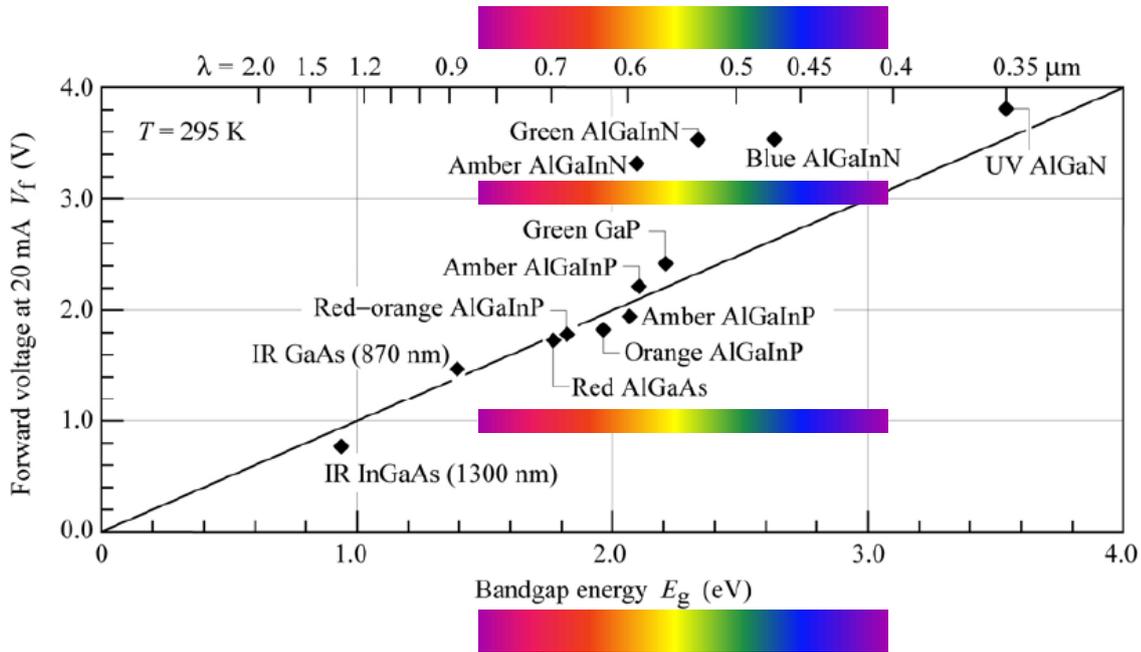


- T = 295 K
- (a) Ge $E_g = 0.7 \text{ eV}$
 - (b) Si $E_g = 1.1 \text{ eV}$
 - (c) GaAs $E_g = 1.4 \text{ eV}$
 - (d) GaAsP $E_g = 2.0 \text{ eV}$
 - (e) GaInN $E_g = 2.9 \text{ eV}$

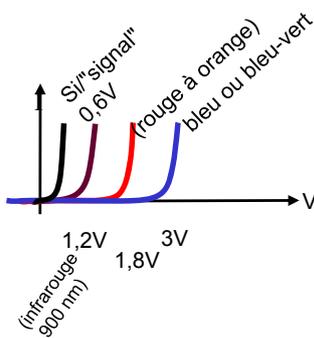
Fig. 4.2. Room-temperature current-voltage characteristics of p-n junctions made from different semiconductors.

Seuil \leftrightarrow bande interdite \leftrightarrow $h\nu$

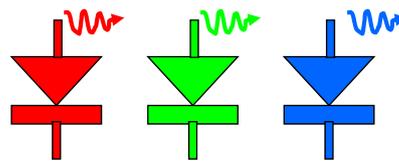
La corrélation est assez bonne mais pas parfaite



Pour faire du blanc : deux choix



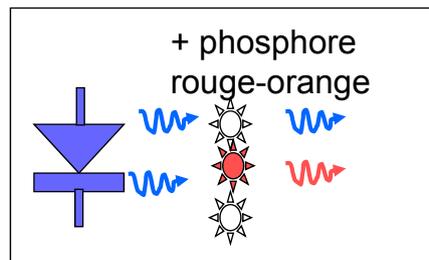
1)



3 LEDs \neq

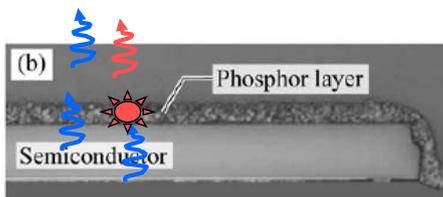
Dosable, mais électronique complexe,...

2)

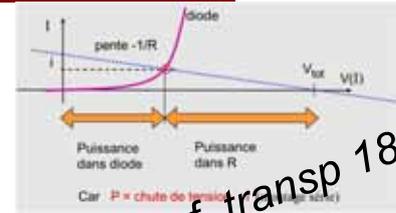


= LED "blanche" usuelle

On a donc "gaché" des "électrons bleus" pour faire des "photons orange" !



Cas simple :
alimentation à tension constante + résistance



cf. transp 18

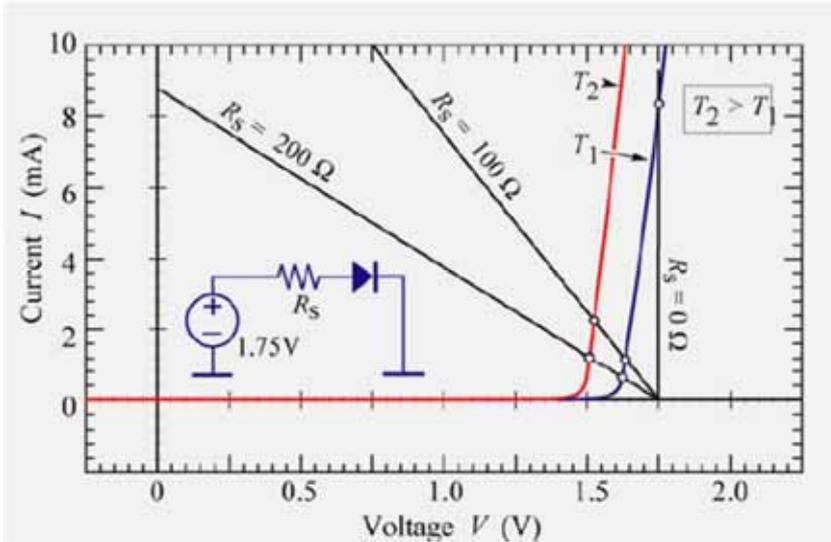


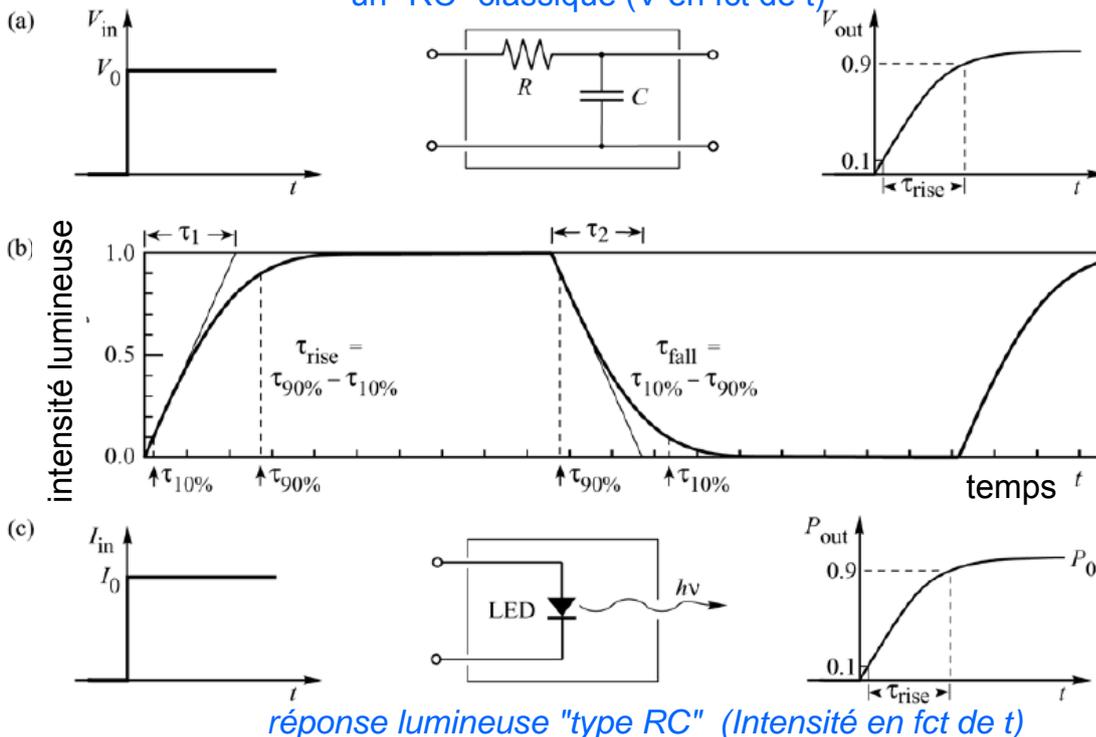
Fig. 6.9. LED drive circuit with series resistance R_s . The intersection between the diode $I-V$ characteristics and the load lines are the points of operation. Small series resistances result in an increased diode current at high temperatures, thus allowing for compensation of a lower LED radiative efficiency.

⇒ Même discussion que Diode pn en général

- ▶ Ici, la température joue sur l'efficacité et la luminosité.
- ▶ ▶ Malheureusement, l'augmentation de I est souvent contre-balancée par une baisse importante du rendement lumineux.

Comportement temporel de la sortie lumineuse : "type RC"

un "RC" classique (V en fct de t)



réponse lumineuse "type RC" (Intensité en fct de t)

LED : fréquence de coupure en petits signaux
jusqu'à qqs 100 MHz (suivant niveau d'injection)

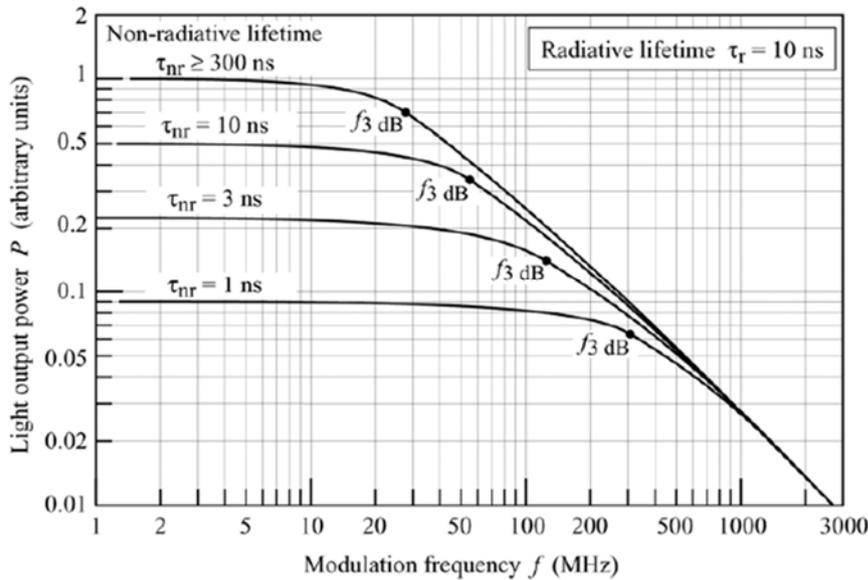


Fig. 24.7. Calculated LED output power versus modulation frequency for different values of the nonradiative lifetime. A radiative lifetime of 10 ns is assumed.

Diodes laser : jusqu'à qqs GHz en raison de l'effet laser...

Un petit tour dans la LED

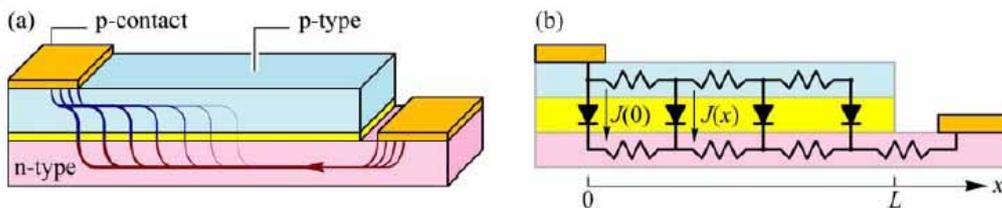
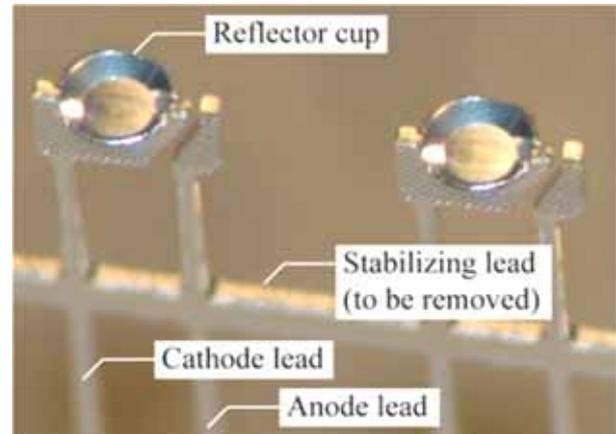
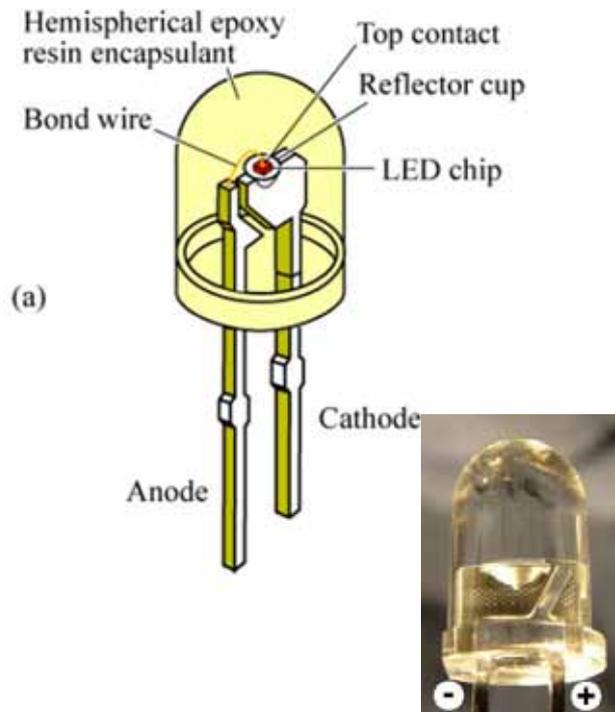


Fig. 8.11. (a) Lateral injection geometry and schematic current distribution for $\rho_n \ll \rho_p$. (b) Corresponding equivalent circuit.

⇒ Répartir le courant, si possible loin des contacts (masquent la lumière)

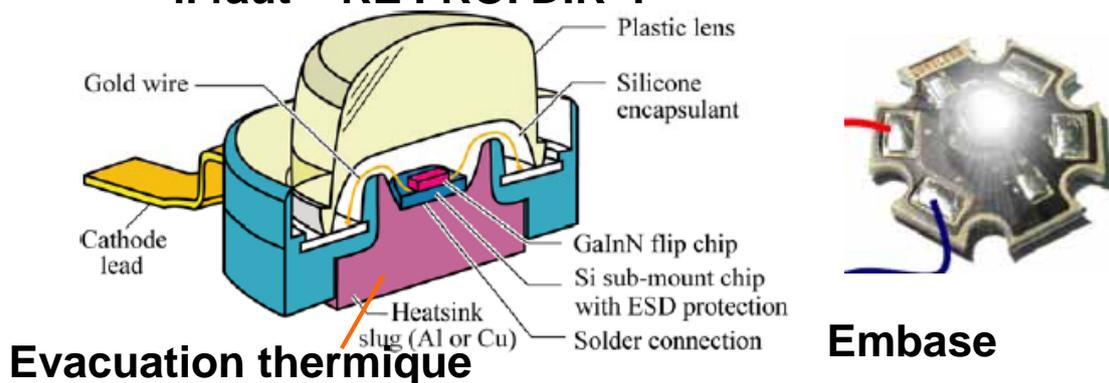
(problème qui ne se pose pas dans les autres diodes)

Un petit tour *autour* de la puce de la LED



LED de puissance (éclairage)

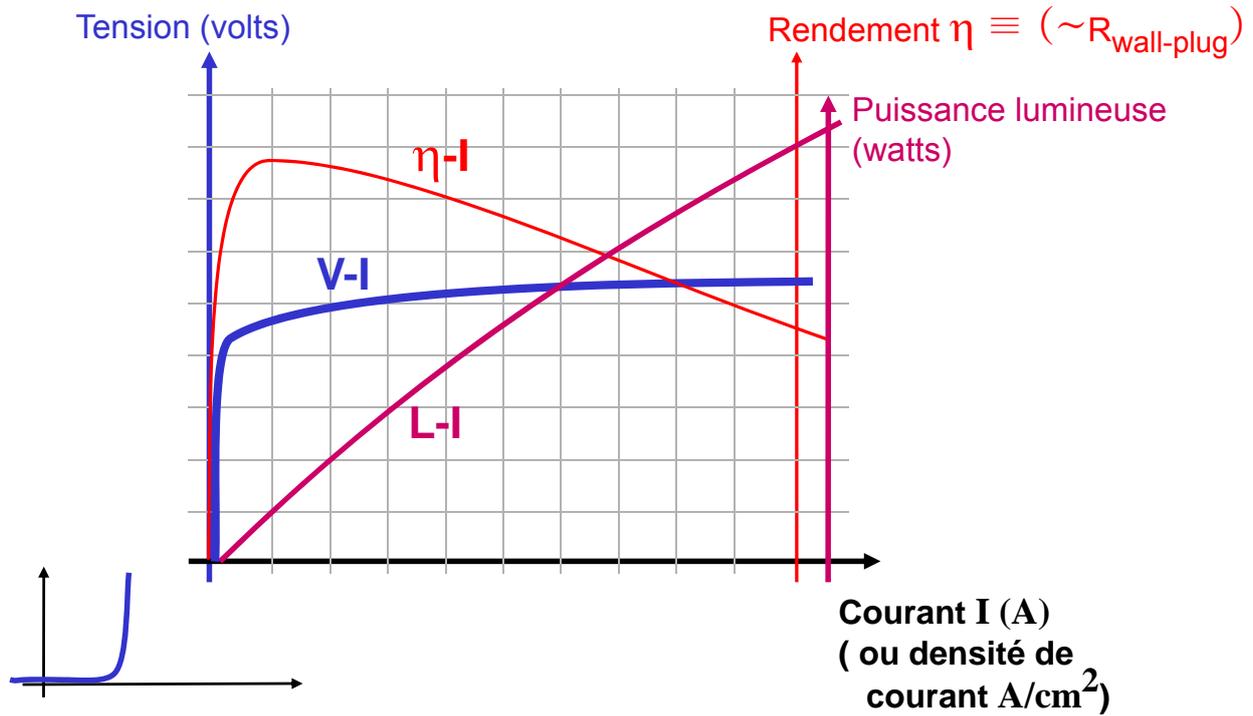
⇒ Entre "Autour" et la jonction ?
il faut **RE-FROI-DIR !**



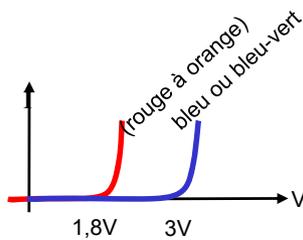
- Noter l'inversion par rapport aux habitudes prises avec les ampoules :
 - ⇒ Une **ampoule** rayonne **mieux** dans un environnement chaud (dure un peu moins aussi)
 - ⇒ Une **LED** rayonne (bcp) **moins** dans un environnement chaud

Diagrammes V-I & L-I & η-I typiques

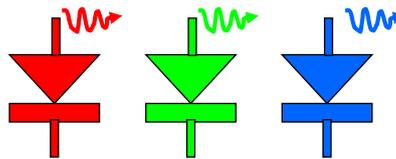
V-I et L-I sont indépendants, η-I s'en déduit.



Discussion rendement LED blanche



1) 3 LEDs ≠

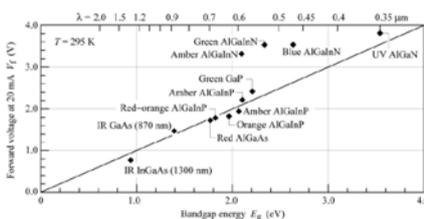


30%

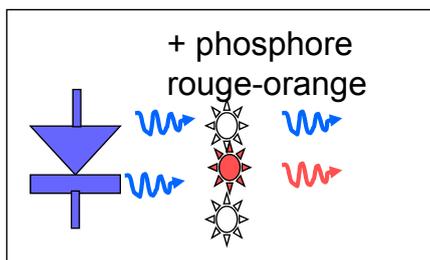
20%

40%

rendements quantiques



2)

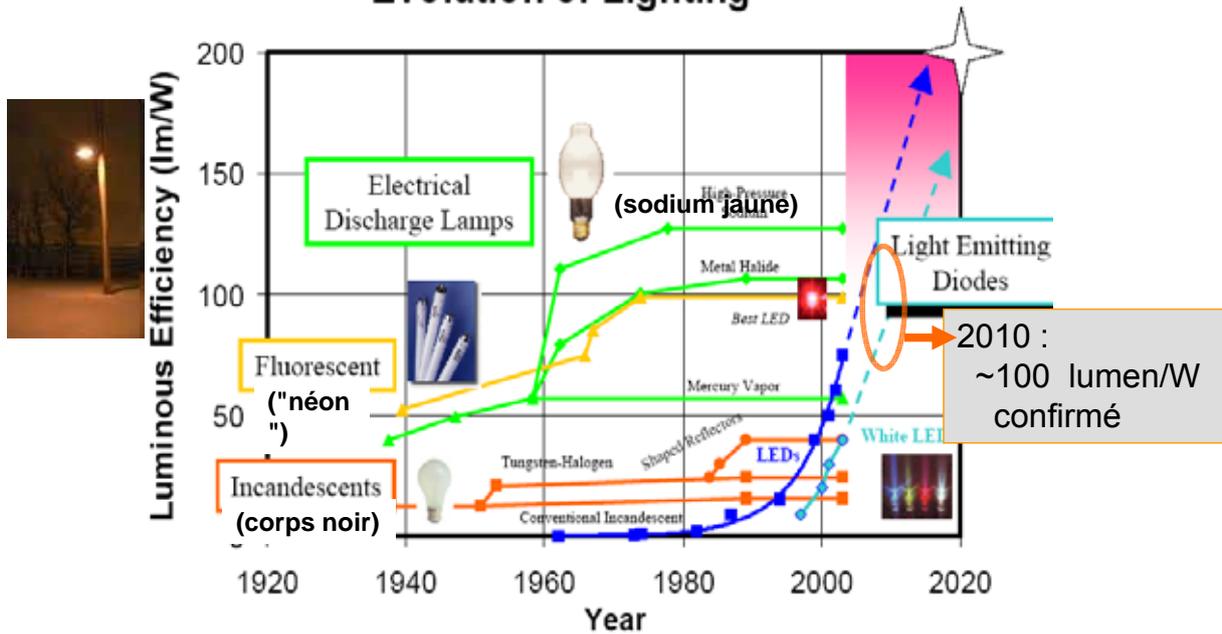


40%

rendement quantique

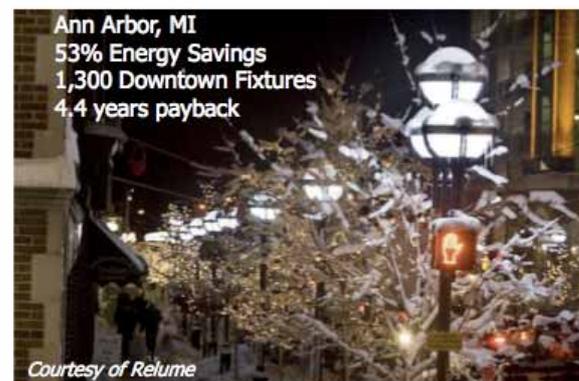
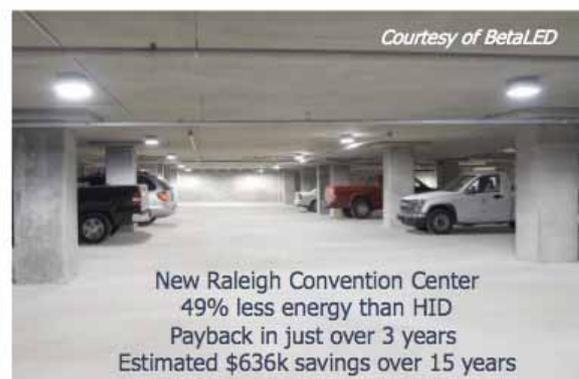
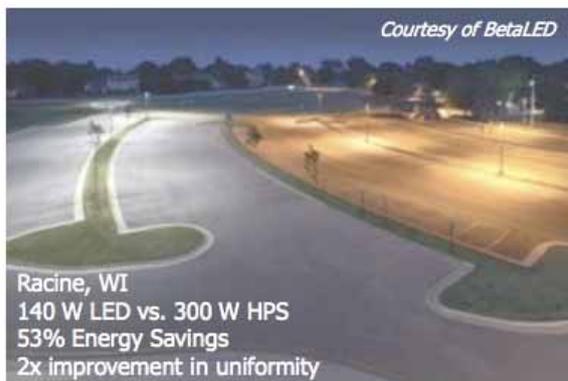
... discussion au tableau...

Evolution of Lighting



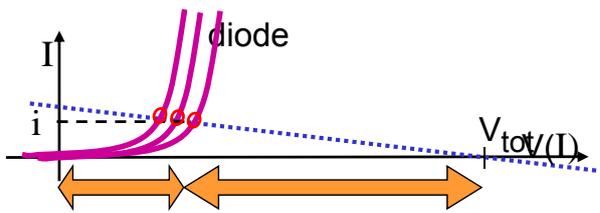
Aujourd'hui, on remplace des ampoules de ~ 50W par des ampoules LED de 5 à 10 W !

Neutral White Component Opportunities

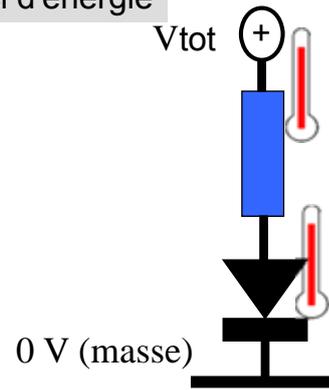


Electronique de commande ... basique

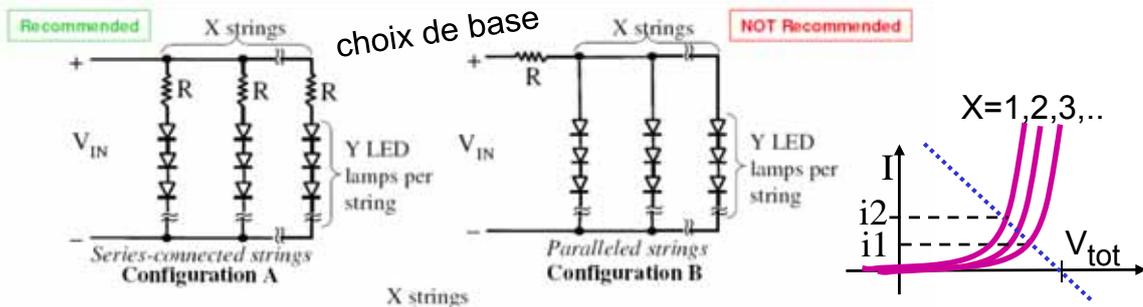
⇒ Solution pour voyant de base, sans souci d'énergie



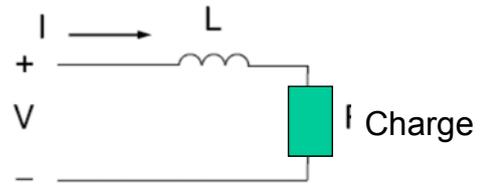
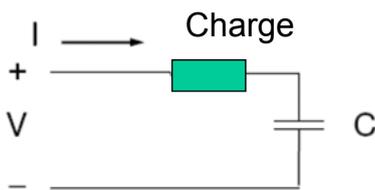
⇒ circuit quasi régulé en courant
 ⇒ R chauffe "pour rien"



⇒ ? Solution pour LED blanche ou tricolore + alim 12V (cahier des charges) ?

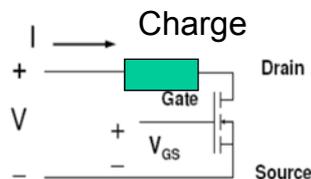


Electronique de commande ... sans résistance



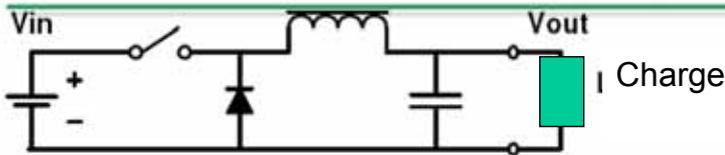
⇒ Encaisser la ddp avec C ou L (ddp Q/C ou dI/dt)
 ⇒ Energie stockée, $\frac{1}{2}CV^2$ ou $\frac{1}{2}LI^2$

- Mais il faut faire quelque chose quand c'est chargé
- Et sans énergie dissipée !



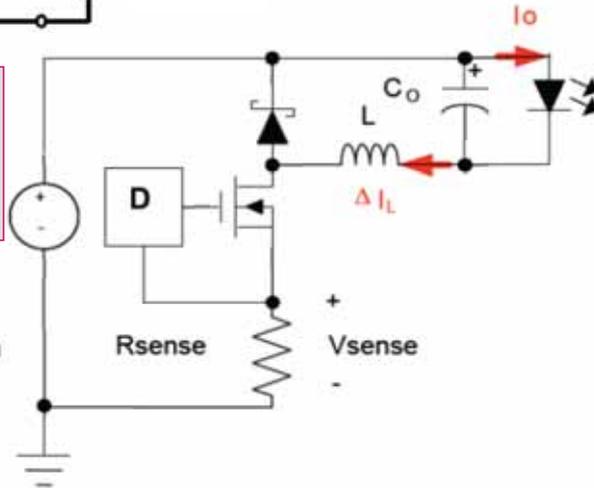
⇒ Commuter !

Buck Converter Topology



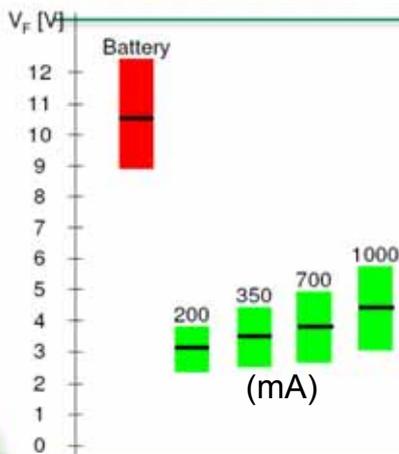
On transfère l'énergie par "seau" ("bucket"), dans un composant non dissipatif (L ou C), et on "recharge" quand il faut...

- Buck converter variations**
- High side or low side switch
 - High side or low side sense



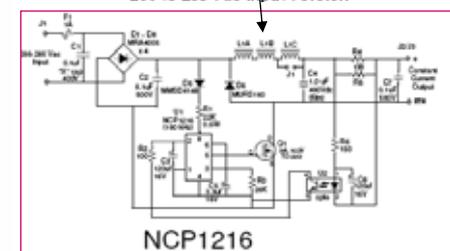
Exemple de composants : de 12V et + à des LEDs

Buck Converter

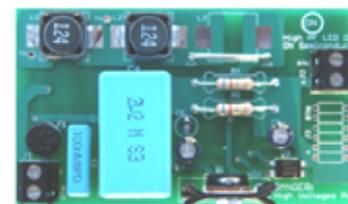


- When $V_{in} > V_f$
- Higher efficiency than linear solutions
- Should be used when driving single LED from greater than 5V

Constant Current LED Buck Driver with High Power Factor 200 to 285 Vac Input Version

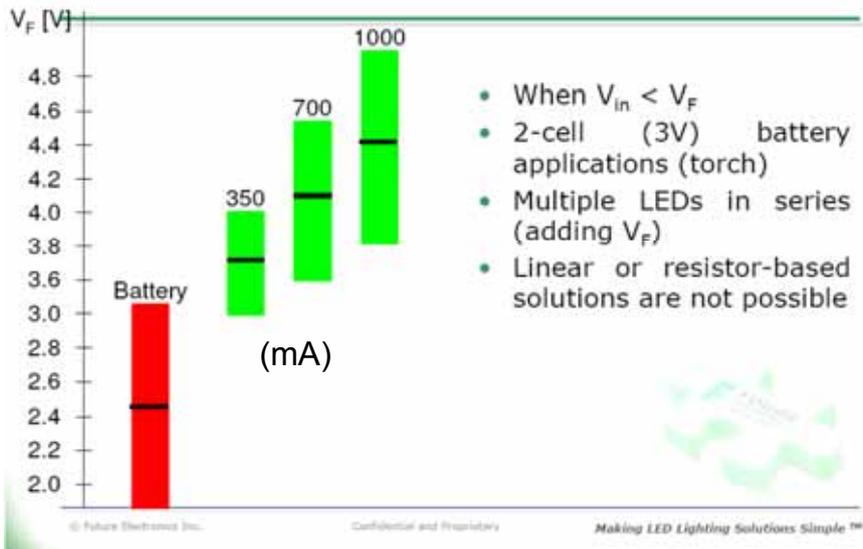


NCP1216



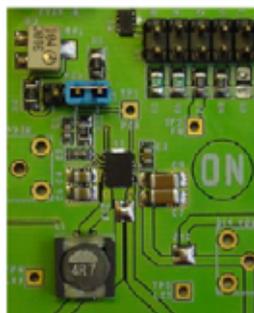
Les efficacités (Watt out / watt in) des convertisseurs peuvent atteindre 80% ...95%

Boost Converter



Haute efficacité électronique

Full Bridge Example



Solution for Li-Ion or 3 cell Alkaline

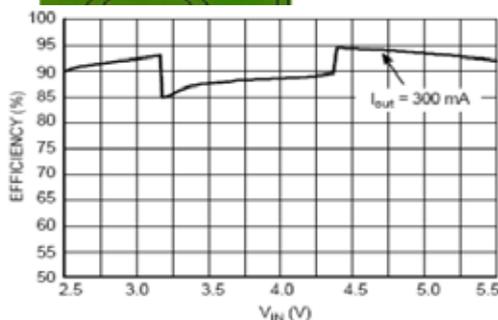
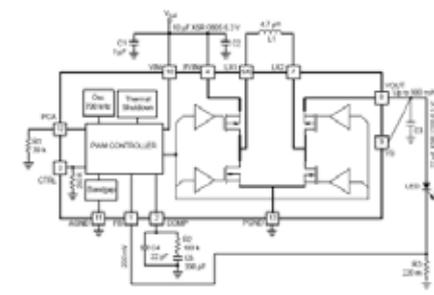
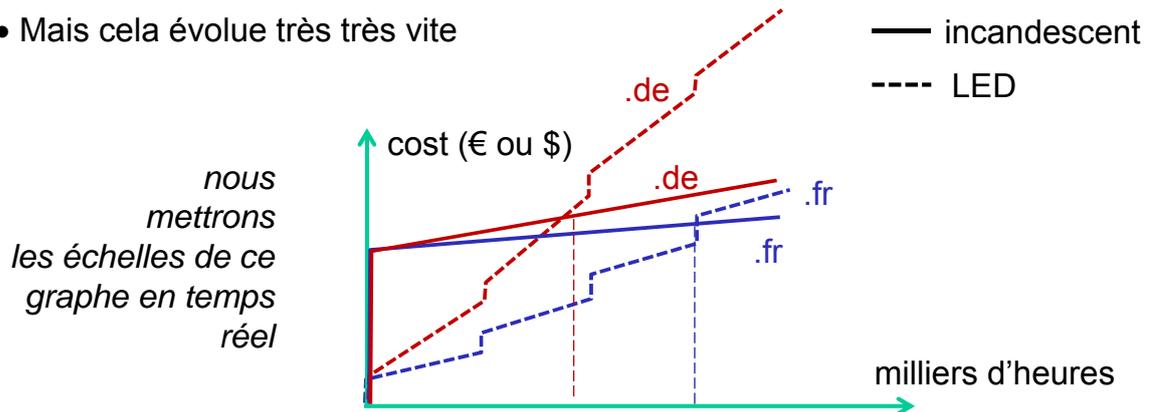


Figure 2. Efficiency vs. V_{in} Voltage



Making LED Lighting Solutions Simple™

- Intérêt supplémentaire d'un bon rendement dans la gamme $R > 50\%$
 - assurer une faible température
 - permettre de monter davantage en courant
 - Diminuer le prix d'achat du watt lumineux !
- Actuellement, compensation achat/conso
 - sur 1 à 3 ans dans les situations d'allumage permanent (enseignes)
 - sur 4 ans ou + dans les situations courantes
- Mais cela évolue très très vite



- *Enfin, je n'ai pas parlé des LEDs organiques*
 - A base de composés organiques/organo-métalliques donneurs & accepteurs d'e-
 - Spécialisées dans les afficheurs & écrans (? et aussi "backlight" d'écran ?)
 - On a longtemps cru que la sensibilité ('corrosion') à H_2O et O_2 était rédhibitoire, ...
 - solution = packaging hermétique
 - Rendement limité, sans doute, mais
 - + Bon dans le bleu-vert et l'orange 
 - + plus simple à implémenter pour des surfaces lumineuses importantes. 
 - Beaucoup se joue encore dans l'amélioration du GaN (15 ans seulement après sa commercialisation, de grands progrès restent à faire) et des phosphores sur les LEDs blanches.

A revoir après vos cours de photométrie...

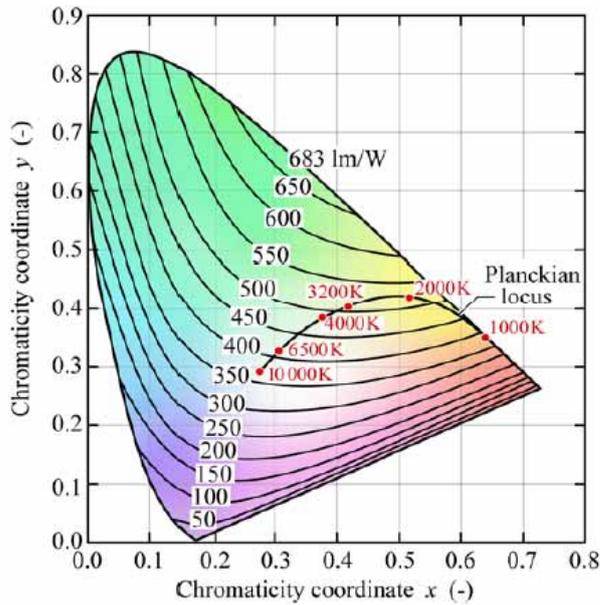
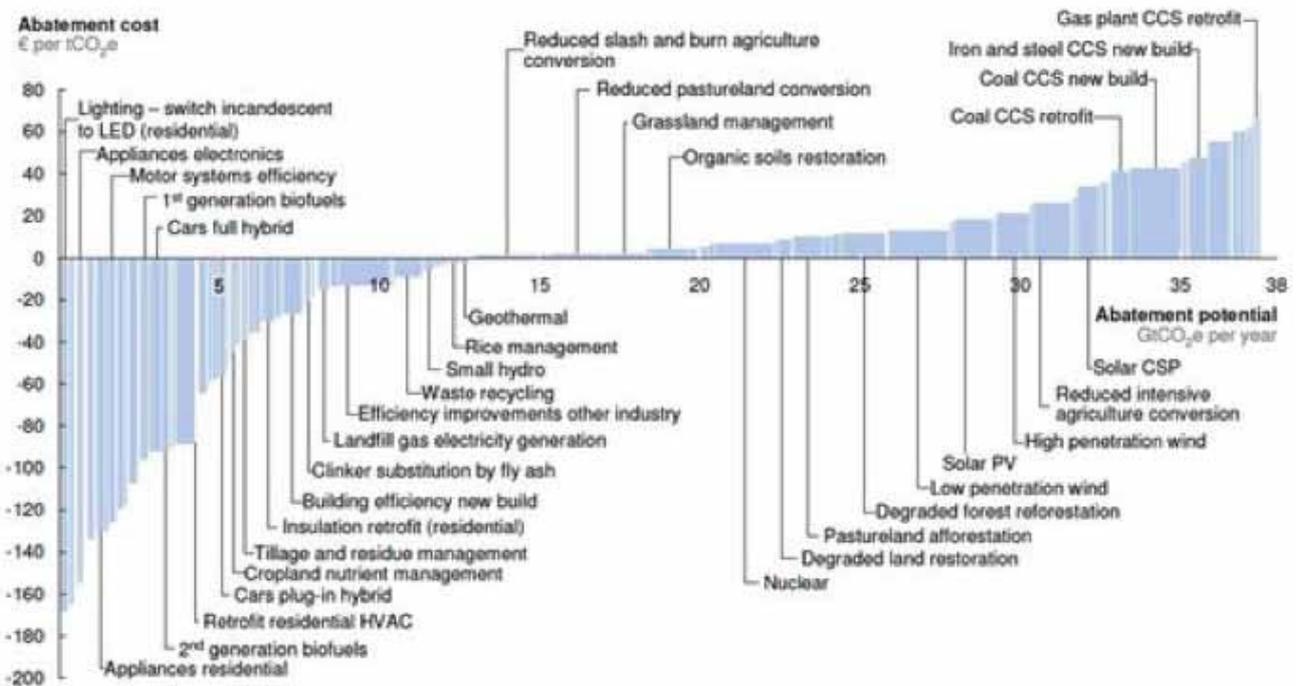


Fig. 16.8. Relation of maximum possible luminous efficacy (lumens per optical Watt) and chromaticity in the CIE 1931 x, y chromaticity diagram (adopted from MacAdam, 1950).

Comparison of investment costs for technologies diminishing CO₂ emissions



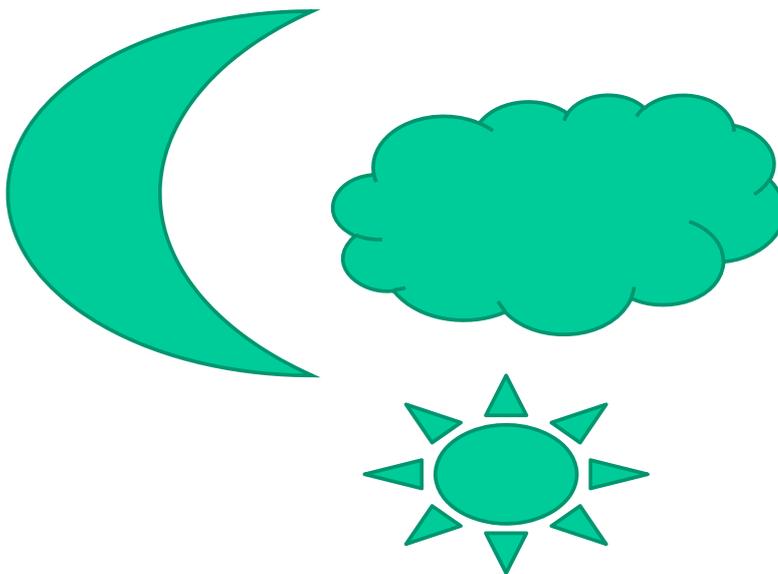
Note: The curve presents an estimate of the maximum potential of all technical GHG abatement measures below €80 per tCO₂e if each lever was pursued aggressively. It is not a forecast of what role different abatement measures and technologies will play.

McKinsey Impact of the financial crisis on carbon economy

Version 2.1 of the global greenhouse gas abatement cost curve

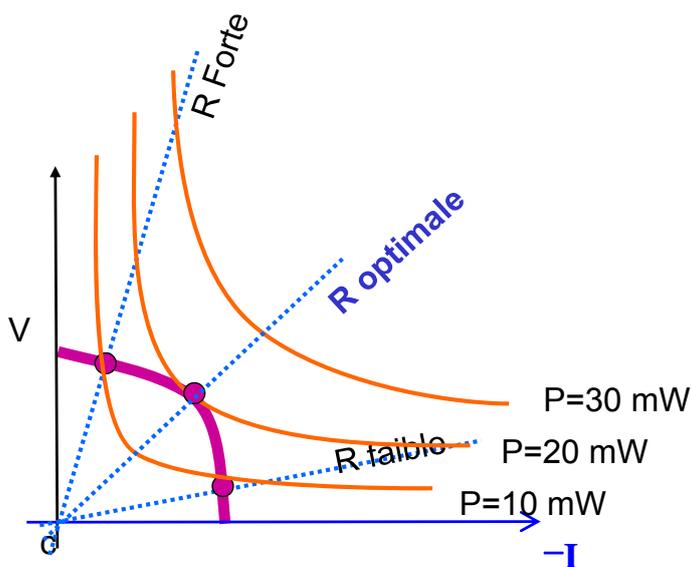
LEDs : conclusion

- Devient un composant à "haut" rendement (>20%, atteindra 40-50%?) grâce au Ga(In)N →bleu + conversion par phosphores
- Devient rentable pour l'éclairage
A un rôle crucial dans le dvltpt durable (énergie électrique et autre)
- Electronique élémentaire OK mais pas rentable.
- Industrie des convertisseurs ("bucket")
- Questions délicates : la thermique, la couleur ressentie, le "vert"
- LEDs organiques : à suivre (moins brillante mais bas cout/m2...)



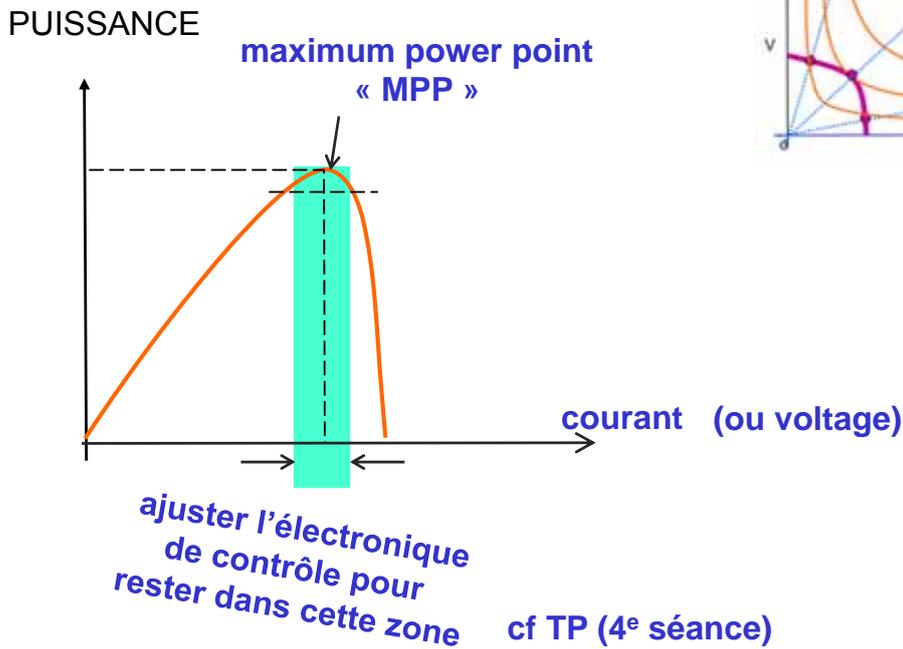
- Les malheurs possibles (spectraux, électriques)
- Silicium, rendement, densité de courant
- CIS (CuInSe₂/DCSIG), CdTe
- dimensionnement, concentration
- protection panne partielle/obscurité partielle
- Spectre encore, cellules tandem

Rappel charge optimale

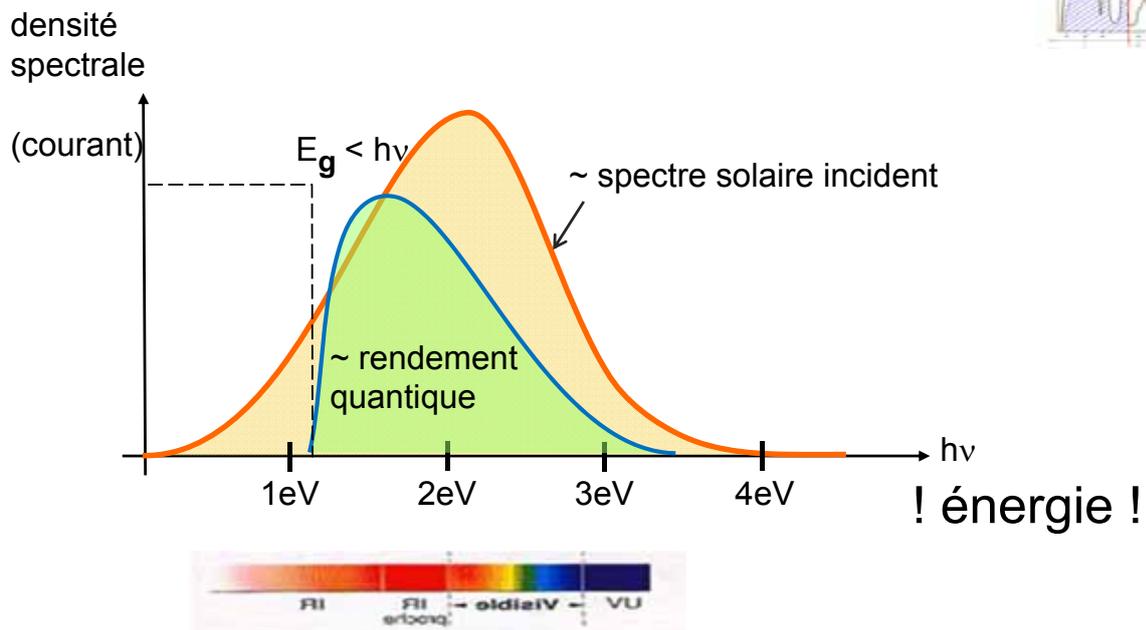


"Le plus d'énergie = l'hyperbole la plus éloignée de l'origine"

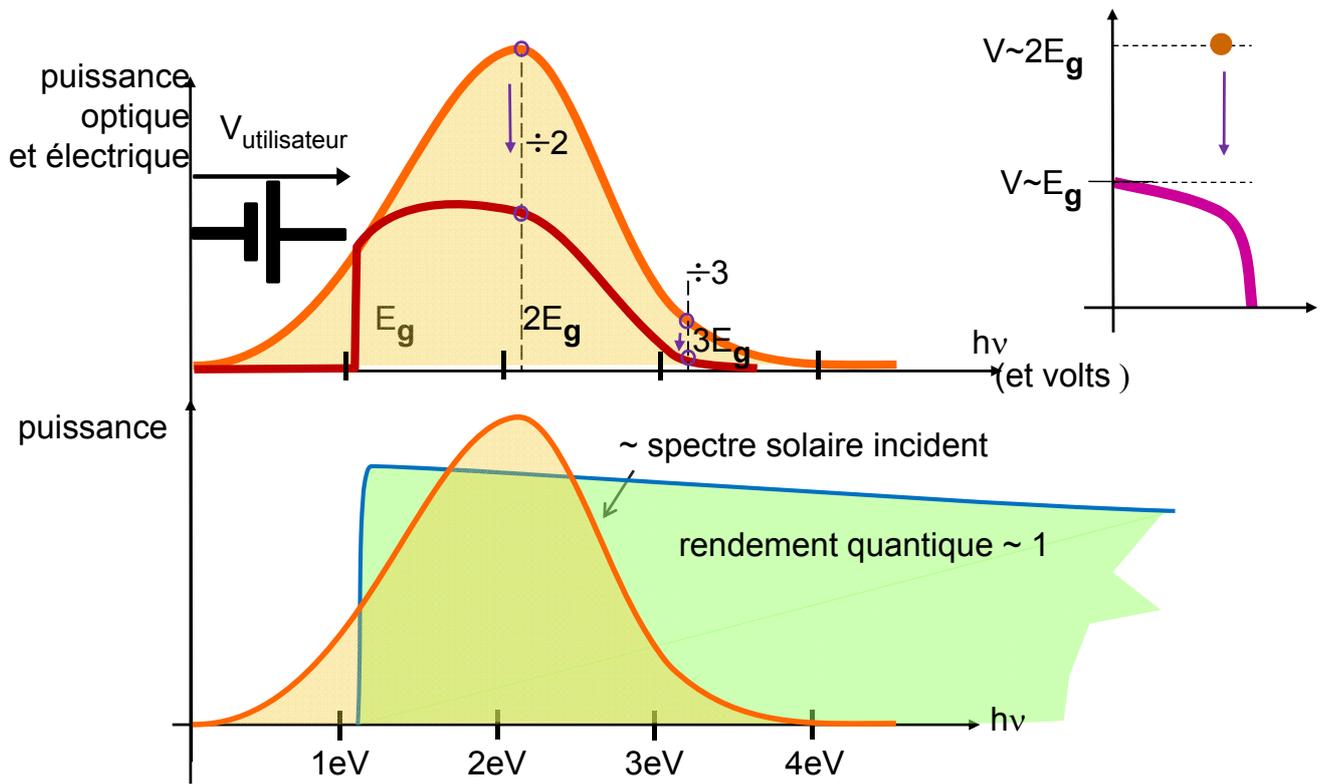
Tracé charge optimale



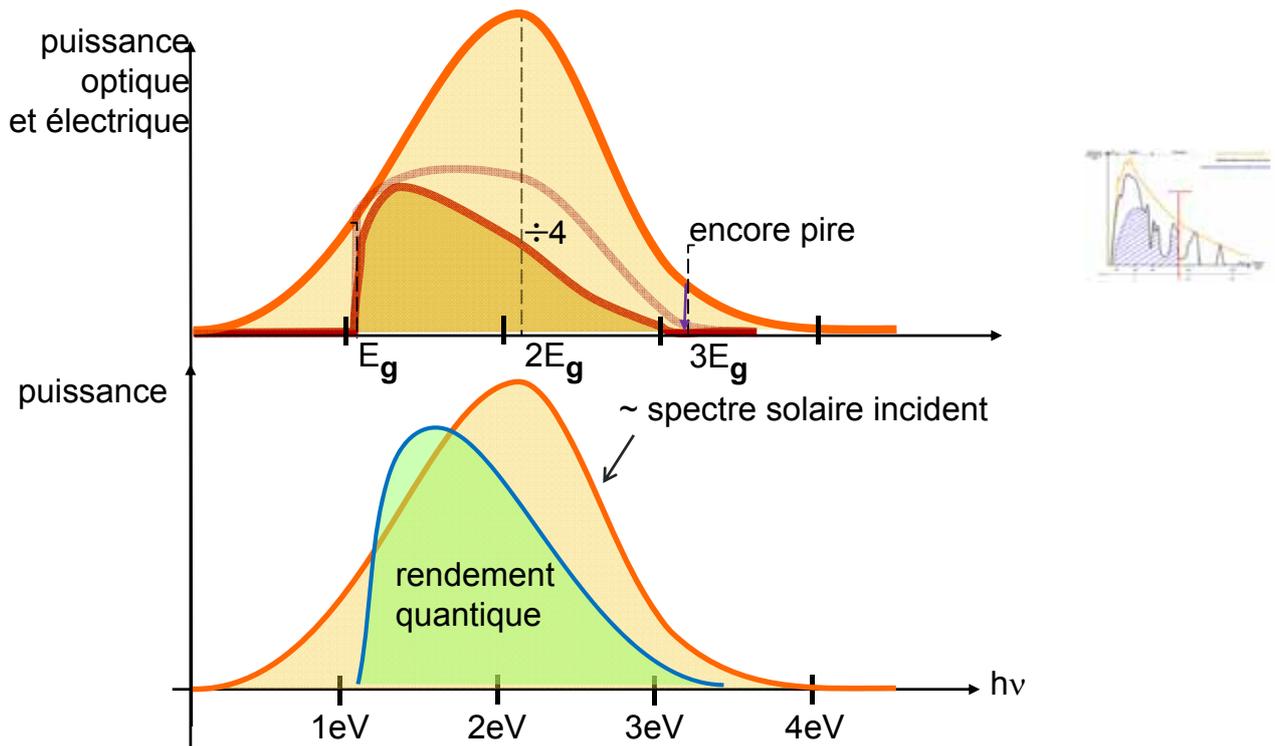
Voir les photons comme des futurs électrons



Voir les photons comme des futurs électrons



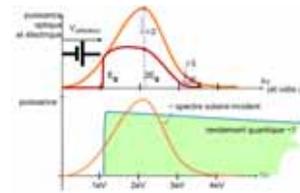
Voir les photons comme des futurs électrons



D'où des limites au rendement

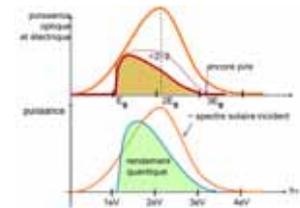
▶ Limite due au gap à $QE = 1$

~ 31%



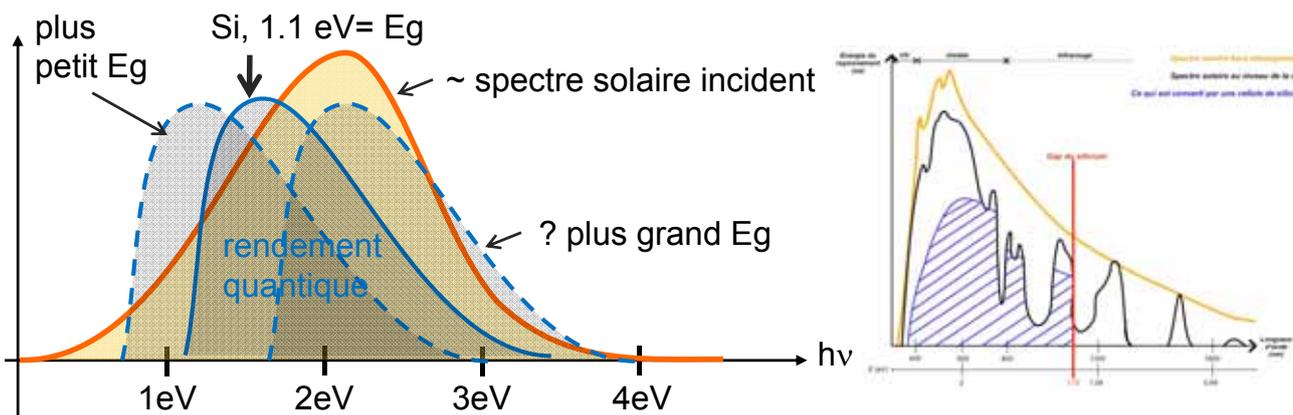
▶ Limite due au gap, due à $QE < 1$
et à $V = 0,7V < 1.1V$

~21-23%



⇒ + des subtilités thermodynamiques
(rendement de Carnot entre soleil et source froide)

Silicium ou pas silicium ? That's the question



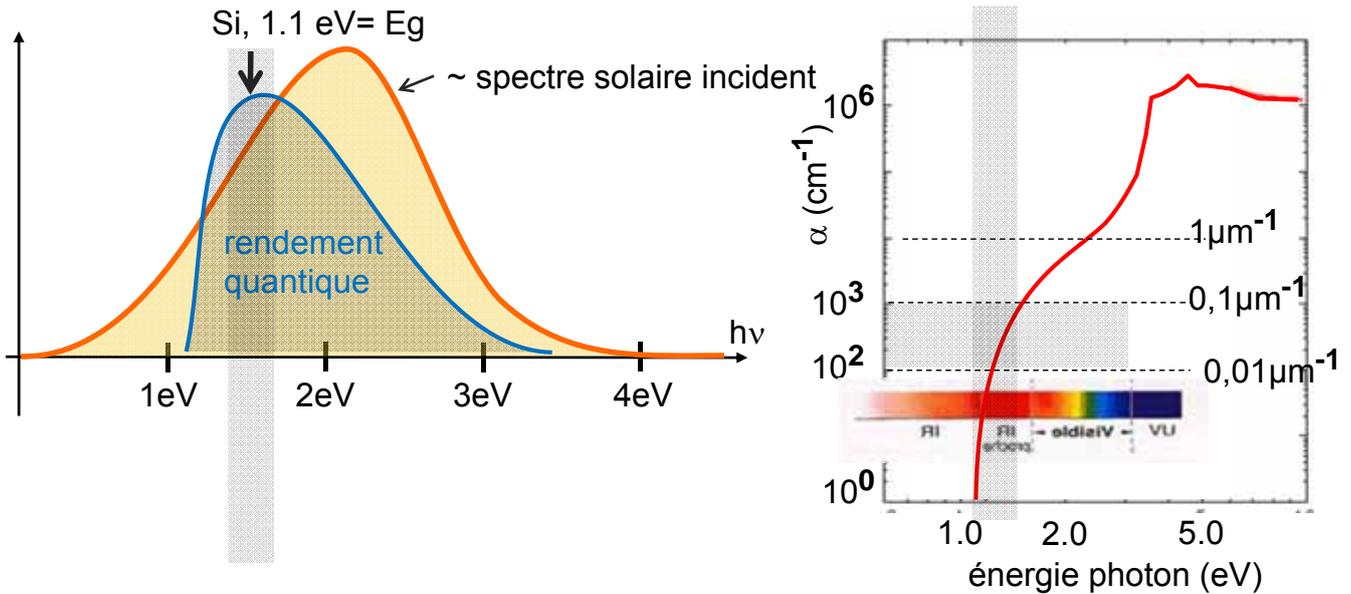
▶ Bonne nouvelle : Si est quasi à l'optimum

▶ Bonne nouvelle : Si est très abondant (le + sur Terre)

▶ Moins bon : Si absorbe 1,1eV et ne rend que 0,7V (phys. sol...)

▶ Moins bon : Si a besoin d'être épais

Pourquoi votre silicium est épais ?



⇒ Il en faut très épais pour être sûr
d'avoir (d'absorber) les photons "NIR" (780-1100 nm)

⇒ absorption **en 10 à 100 μm** → diode hyper épaisse (100-500 μm)

Cellules Photovoltaïques au Silicium

⇒ Silicium idéal = **monocristallin** (sciés dans des lingots de >1 tonne, ceux de l'industrie microélectronique)

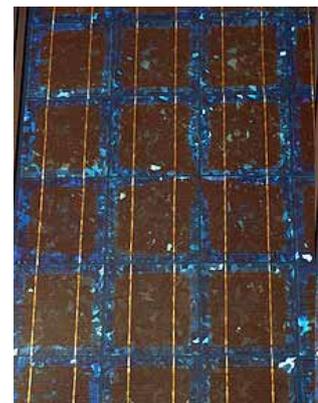
- ▶ Reste "cher" au cm^2 (1 euro)... si on pense à des m^2 .
- ▶ Rendements records ? 23%

⇒ Silicium polycristallin (déposé par une méthode chimique phase vapeur, CVD)

- ▶ De loin le plus utilisé
- ▶ Rendements de 18 à 20%

⇒ Silicium amorphe (non cristallin)

- ▶ Gap plus grand que Si (rouge au lieu d'infrarouge).
- ▶ Matériau standard des "TFT" transistors d'écran plats, et d'électronique grande surface (assez mauvais conducteur).
- ▶ Rendement faible (<~ 10%)



TOUTEFOIS, DES BULLES ...

Source : *New York Times*

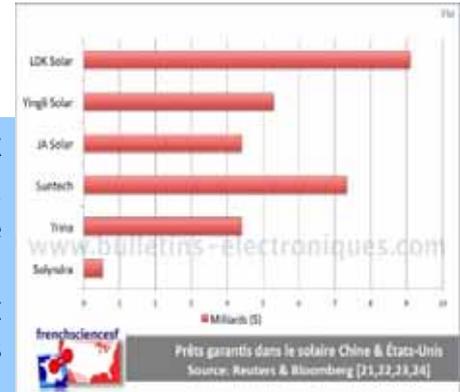
- Biais du tarif aidé (x4 à x8)
- Biais des coût industriels « variables » (Chine ...)



"It's here that companies like Solyndra are leading the way toward a brighter and more prosperous future," the president declared in May 2010 (...). The start-up business had received a \$535 million federal loan guarantee (...)

Barely a year later, Solyndra (...) declared bankruptcy, laid off 1,100 workers and was raided by F.B.I. agents seeking evidence of possible fraud.

(...)[c'est] le coût élevé de sa technologie en pleine chute des prix – - 42% depuis 12/2010 pour les modules PV [11] – qui a causé sa perte. En effet les investisseurs de Solyndra avaient tablé lors de leurs calculs initiaux sur un prix du silicium fort et stable (...)[ou] l'illustration que le modèle d'affaire de cette société n'était pas viable car reposant sur des mécanismes incitatifs artificiels et temporaires.



<http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/67635.htm>

Discussion sur l'énergie ...

Boite de Pandore... et quelques perles dont une ...

<http://www.withouthotair.com/>

Sustainable Energy - without the hot air
David J. Morris

Sustainable Energy – without the hot air

"For anyone with influence on energy policy, whether in government, business or a campaign group, this book should be compulsory reading."
Tony Juniper
Former Executive Director, Friends of the Earth

"At last a book that comprehensively reveals the true facts about sustainable energy in a form that is both highly readable and entertaining."
Robert Sansom
EDF Energy

"The Freakonomics of conservation, climate and energy."
Cory Doctorow,
boingboing.net

"...a tour de force..."
The Economist

"... a cold blast of reality ... a must-read analysis..."
Science magazine

"...this year's must-read book..."
The Guardian

10-page synopsis: [\(pdf\)](#)

| | | |
|---|---|--|
| <p>I Numbers, not adjectives</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 Motivations [html] 2 The balance sheet [html] 3 Cars [html] 4 Wind [html] 5 Planes [html] 6 Solar [html] 7 Heating and cooling 8 Hydroelectricity [html] 9 Light [html] 10 Offshore wind [html] 11 Gadgets [html] 12 Wave [html] 13 Food and farming [html] 14 Tide [html] 15 Stuff [html] 16 Geothermal [html] 17 Public services [html] | <p style="text-align: center;">Dedication Preface (p.viii) (p.ix)</p> <p>II Making a difference</p> <ol style="list-style-type: none"> 19 Every BIG helps [html] 20 Better transport [html] 21 Smarter heating [html] 22 Efficient electricity use 23 Sustainable fossil fuels? 24 Nuclear? 25 Living on other countries' renewables? 26 Fluctuations and storage [html] 27 Five energy plans for Britain [html] 28 Putting costs in perspective [html] 29 What to do now [html] 30 Energy plans for Europe, America, and the World 31 The last thing we should talk about [html] 32 Saying yes [html] | <p>III Technical chapters</p> <ol style="list-style-type: none"> A Cars II [html] B Wind II C Planes II D Solar II E Heating II F Waves II G Tide II H Stuff II <p>IV Useful data</p> <ol style="list-style-type: none"> I Quick reference [html] J Populations and areas K UK energy history <p style="text-align: right;">Power and carbon translation tables</p> <p>Bibliography Index</p> <p style="text-align: right;">http://www.withouthotair.com/</p> |
|---|---|--|

Dimensionnement

Chiffres Basiques :

⇒ Soleil ~ 1 KW/m²

⇒ Rendement ~20% (y compris électrique ? passage 0.7 V dc → 220 V ac)
200 W / m² le jour & à incidence normale

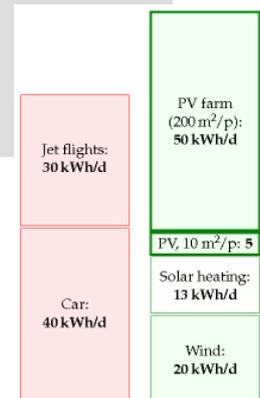
- Produit 1 KWh en 1 jour si tout va bien
200 KWh par an (été/hiver...) si tout va bien
production intermittente (20 W/m² sur l'année).

- Durée = 10 ans , et 200 euros/m² (1€/Wcrête) par exemple
200 euros / 2000 KWh → 0,10 € / KWh vs. 0,045 € @EDF
(nucléaire)

- Atteindre 200 m²/personne rapidement (< an 2050) ?

→ Choix en partie politique et volontariste, qui ne peut satisfaire qu'une faible fraction de la demande dans sa forme de 2010.

(→ idem Eolien : intermittence incontrôlable, stockage douteux ...
mais le KWh éolien est moins cher et paye l'éolienne en <5 ans)



127

Dimensionnement intra-cellule

Densité de courant ~ 200 A /m² (rendement 20%)

On veut en général moins d'un Ampère pour gérer l'électronique

La cellule élémentaire est alors typiquement de <1 dm²
(~1 galette de polycristallin)

On fait des associations série-parallèle, typiquement 30-40 cellules
pour atteindre 24 V, où l'électronique est de conception aisée, notamment
pour la conversion à 220 V

Suivi solaire

- idéalement : zénith θ et azimuth φ

Lourd pour 1 m^2 !

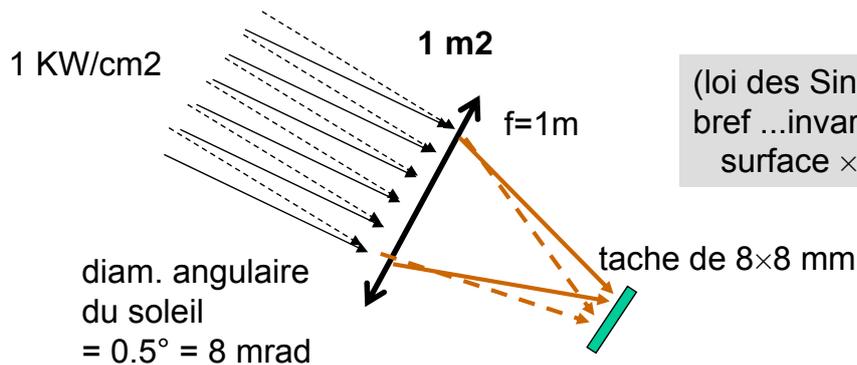
Donc souvent panneaux fixes au sud à $30\text{-}60^\circ$ d'inclinaison

Mais c'est plus facile si ...

"on n'oriente pas le panneau mais le soleil"

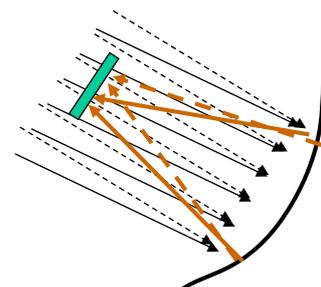
→ la concentration

Concentration



(loi des Sinus d'Abbe, loi de Lagrange
bref ...invariant d'1 S.O =
surface \times angle solide = c^{te})

- Concentration idéale = $\times 14\,000$!
 - Concentration pratique = $\times 100, \times 350$
- on passe alors de 20 mA/cm^2 à $2\text{-}10 \text{ A/cm}^2$



⇒ Orientation mécanique d'une lentille (de Fresnel)
ou d'un miroir (en métal) en limitant l'ombrage...

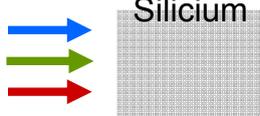
Principe utilisé dans les "fermes PV" actuelles (Orientation θ et/ou φ)

Faire mieux qu'une seule jonction

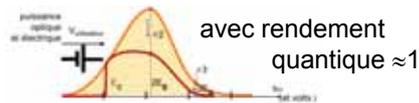


Photons

3,0 eV
2,0 eV
1,1 eV

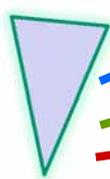


3 Electrons à ~1 eV, → en tout 3 eV



Photons

3,0 eV
2,0 eV
1,1 eV

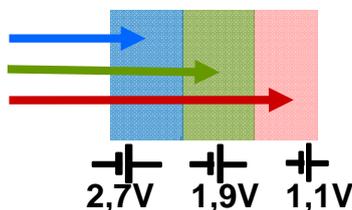


1 Electron à ~2,7 eV
1 Electron à ~1,9 eV
1 Electron à ~1,1 eV

→ en tout 4,7 eV !!

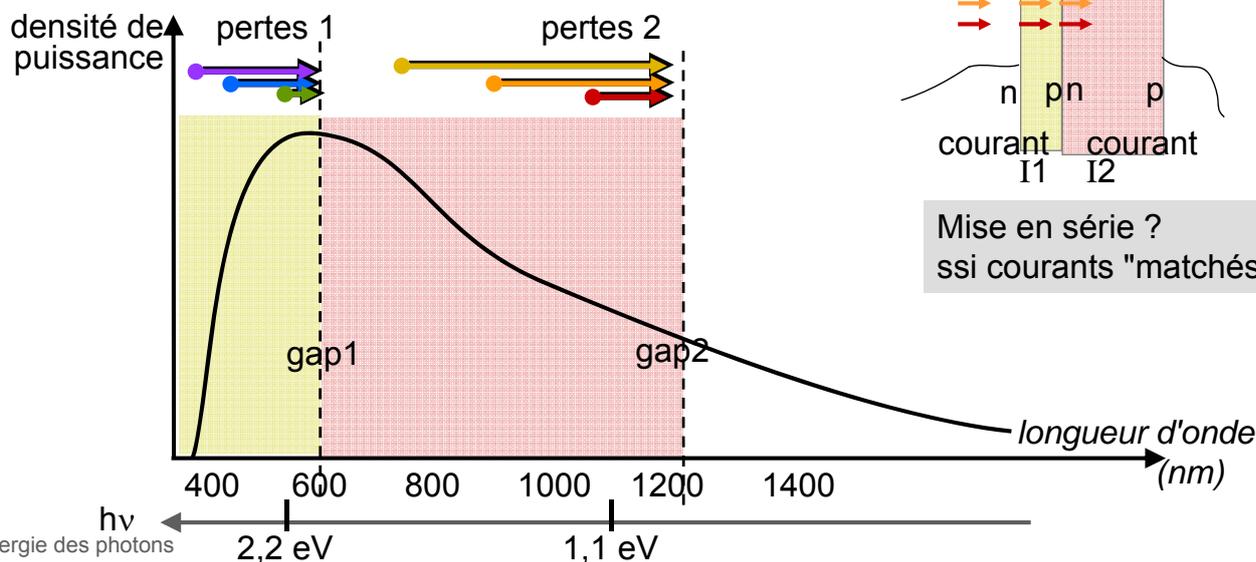
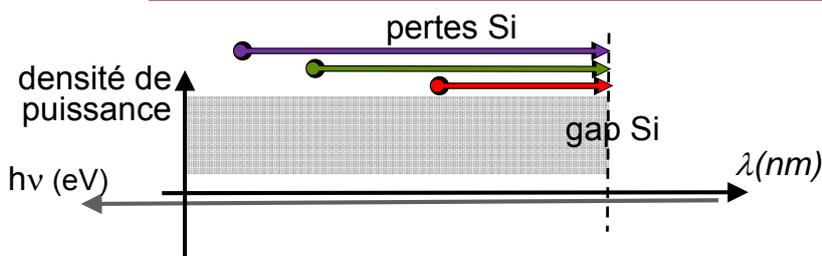
A chaque photon "son" semi-conducteur

Mise en une seule cellule (transparence aux $h\nu < E_{gap}$)

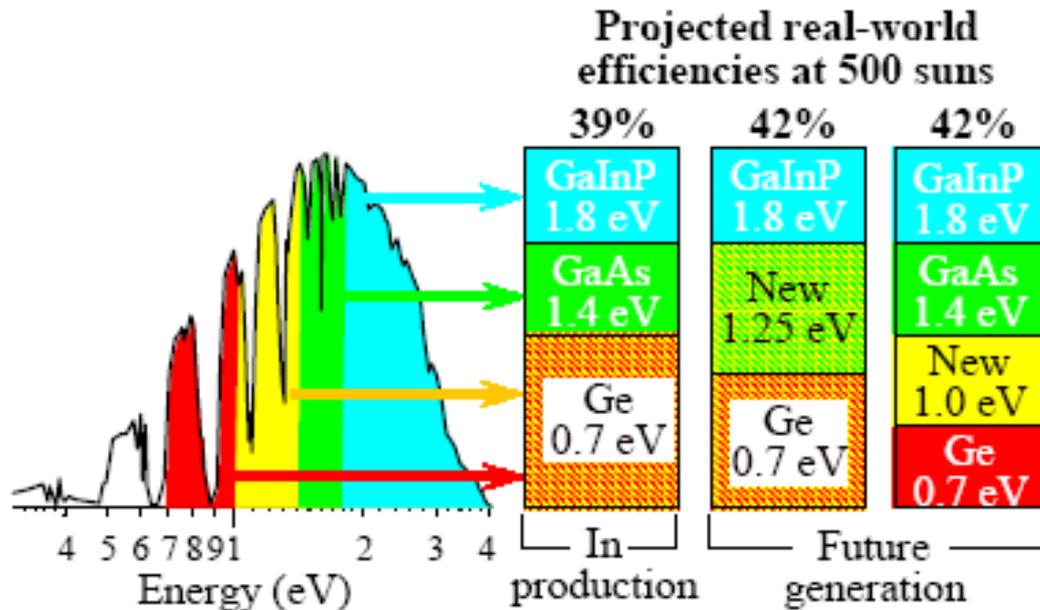


Sous-cellules (couches) en série

Cellules "tandem"



Cellules triple ou quadruple jonction



- Bien plus chères donc utilisables seulement avec concentration « 500 suns »
- Dépend des « coûts d'opportunité » (compétition avec prix Kwh, subventions, acteurs chinois du Poly-Si,...)

Optiques de concentration

message : on s'amuse bien (« non-imaging optics »)

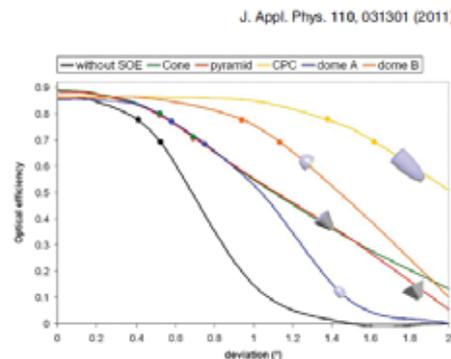
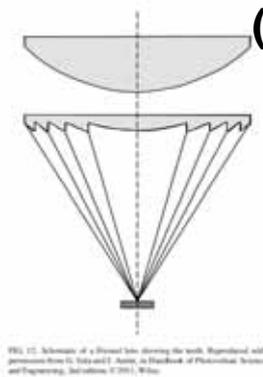


FIG. 14. (Color) Angular transmission curves for the different SOE studied. Circular marks over the lines indicate the deviation angle where optical efficiency becomes 90% and 80% of the maximum. Lens to cell geometrical concentration 1000X. Reproduced with permission from Victoria *et al.*, Opt. Express 17, 6487 (2009). © 2009, OSA.

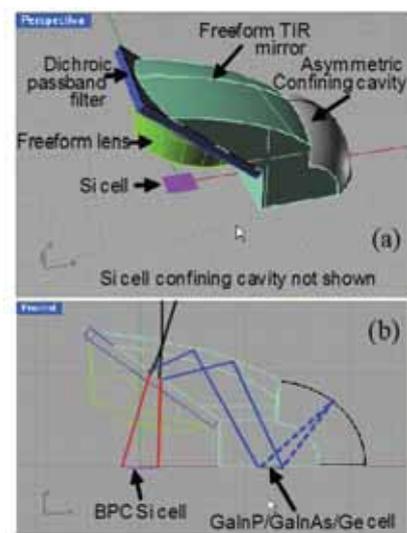


FIG. 18. (Color) The beam is split by means of a band-pass filter and directed onto two cells by means of free form optics. The filter is under medium level concentration on filter for reducing area (low cost) and good performance (moderate angular dispersion). Additionally, a mirrored cavity is recycling light reflected by the MJ cell. The optics performs the Koehler integration for good irradiance uniformity on top of cells. (a) Perspective. (b) Cross-section. (Courtesy of Prof Méhazo, UPME).

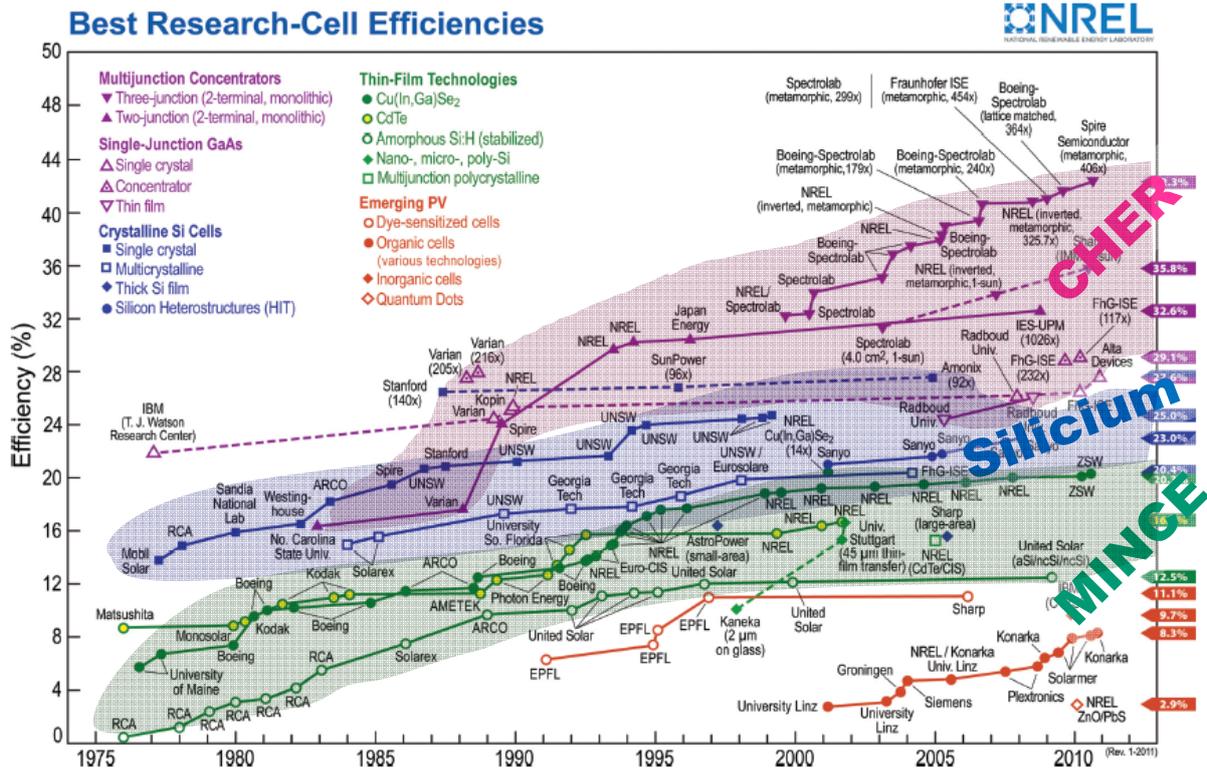


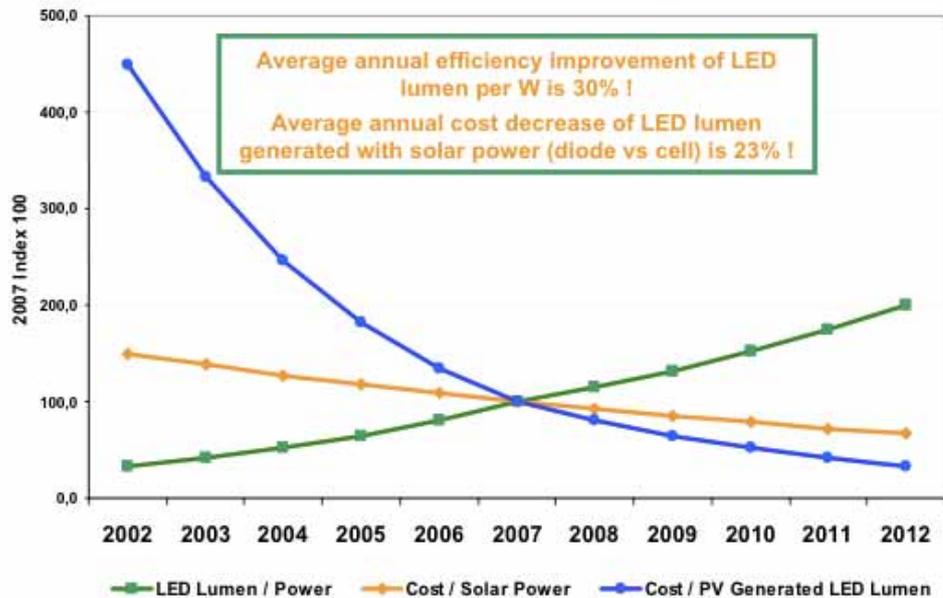
FIG. 1. (Color) Unlike most other cell types, which appear to have reached close to their maximum efficiency performance in recent years, research teams are still showing significant progress with multi-junction devices. Over the past decade, the best-performing multi-junction cells have moved from around 35% efficiency to the latest record of 42.3% achieved by Spire Semiconductor. Production line cell efficiency tends to lag the champion-cell figure by about 2 years. Courtesy of NREL (Dr. Nozik). Elec / Diodes H. Benisty ESO1/2012

Un point de vue de pays en développement ?

LED in Solar Electricity Systems



VII Combined Photovoltaic and LED Development



LEDs in Solar Electricity Systems

NAPS*

X Case: Solar Powered Obstruction Lights (SPOL)



- LED based airtraffic warning lights for masts, high-raise buildings, other high structures etc.
- Independent solar power system designed for this specific purpose



OBELUX
LED LIGHTING



NAPS*

LEDs in Solar Electricity Systems

NAPS*

XI Case: SPOL Cost Development

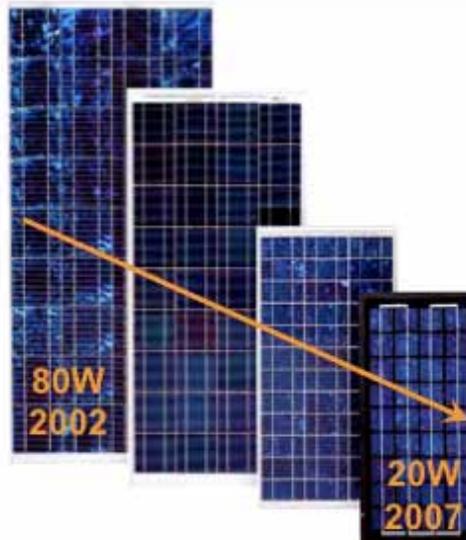
32 cd SPOL system installed in Northern Europe



108 LEDs



2002

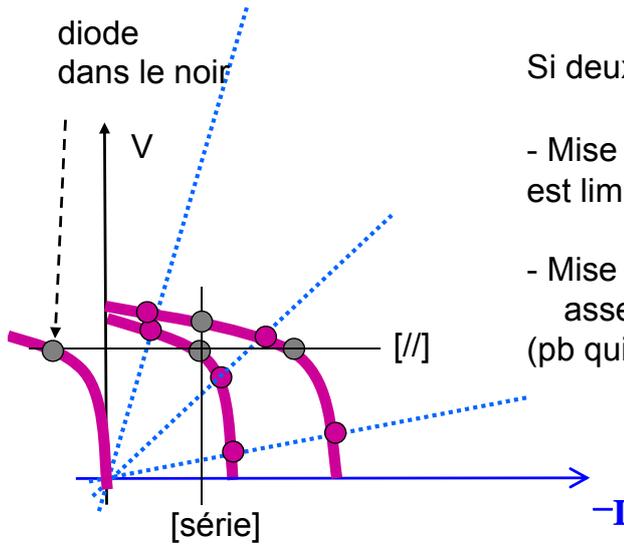


1 LED



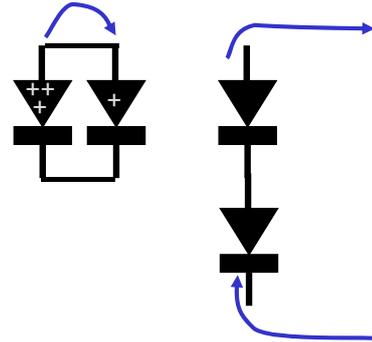
2007

System cost down to 1/4 in five years!



Si deux cellules n'ont pas le même éclairement ?

- Mise en série de diodes ? **I** des faiblement éclairées est limitant (cas limite : diode "dark" = ...diode)
- Mise en parallèle ? Là le courant des fortes peut être assez "englouti" par les faibles (pb qui ne se posait pas en inverse avec polarisation)



Il faut donc des **éclairages uniformes**, donc des cellules pas trop grosses suivies par... de l'électronique pour faire le tri !

trouvé au hasard du web :

De l'ombre qui arrive sur un panneau ou même seulement sur une partie de ce panneau entraîne un effondrement de la puissance fournie.

On aura compris que l'on devra étudier l'environnement des panneaux pour qu'aucune ombre ne vienne s'y balader ! Attention donc aux cheminées, arbres et même poteau électrique.

pratiquement ...

→ Branchement (série + parallèle)

pour utiliser des onduleurs $12V \rightarrow 230 V$ ou $24 V \rightarrow 230 V$

→ Appareils vendus par des spécialistes pour optimiser "en dynamique"

résumé PV

- ▶ Plusieurs choix de semi-conducteurs,
Silicium reste assez privilégié, épais, cher & "lourd" en version de base
- ▶ Notion de cellules "tandem" ou plus pour exploiter les photons au mieux
- ▶ Choix de concentration+ suivi ou non
- ▶ Densité de courant fixée dans chaque choix
- ▶ Délicat d'exploiter le générateur au mieux à tout moment !
→ besoin d'électronique de base
- ▶ Interaction des panneaux élémentaires, ombres :
bcp de choses "agaçantes"
- ▶ Prix actuel lourdement subventionné,
rentabilité "brute" dans qqs années, vers 1\$/W installé.

→ **Voir le site de David Mc Kay** « <http://www.withouthotair.com/> »