Chapitre IV:
Mécanisme de conduction dans les semi-conducteurs

I. Mécanisme de conduction:

Densité de courant de conduction

- On définit la densité du courant j(A/cm^2) par le flux des charges à travers une unité de surface

- Si on applique un champ électrique E, les électrons et les trous subissent des forces favorisant leur déplacement

→ Courant de conduction ou courant de dérive

→ Les charges ont une vitesse v appelée vitesse de dérive ou vitesse drift:

$$v = \mu.E$$

<u>- Pour les électrons:</u> $$v_n = -\mu_n.E$$

<u>- Pour les trous:</u> $$v_p = \mu_p.E$$

La mobilité est une grandeur qui traduit la performance des dispositifs électroniques

	Mobilité ($cm^2. V^{-1}.s^{-1}$)	
Cristal	Électrons	Trous
Si	1600	400
Ge	3800	1800
GaAs	8500	400
InP	3400	650
InAs	23000	100

- La densité de courant de conduction des électrons: $J_{cn} = -q.n.v_n$

$J_{cn} = q.n.\mu_n.E$ Et la conductivité: $\sigma_n = q.n.\mu_n$

- La densité de courant de conduction des trous: $J_p = q.p.v_p$

$J_{cp} = q.p.\mu_p.E$ Et la conductivité: $\sigma_p = q.p.\mu_p$

- La densité de courant de conduction totale:

$$J_{Ctotal} = J_{cp} + J_{cn} = (q.p.\mu_p + q.n.\mu_n).E = \sigma.E$$

Avec $\sigma = \sigma_n + \sigma_p$

II. Mécanisme de diffusion:

Densité de courant de diffusion

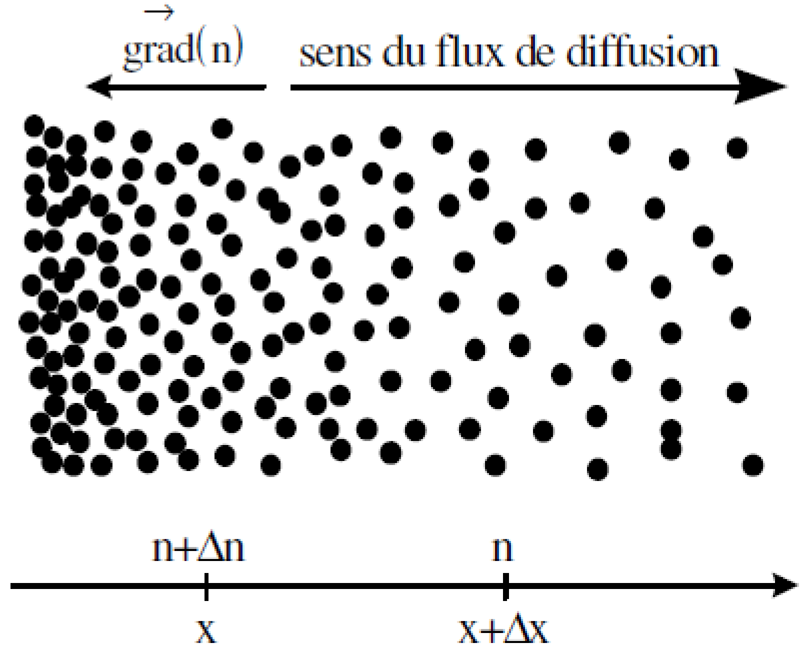
- Dans un semi-conducteur inhomogène, les concentrations n et p varient avec la position.

S'il y a un gradient de concentration, les porteurs se déplacent des régions de fortes concentrations vers celles de plus faibles concentrations.

→ **c'est le phénomène de diffusion**

→ Apparition d'un *courant de diffusion* qui tend à uniformiser les densités

- La création d'une distribution non uniforme peut se faire avec:
  - Un dopage non uniforme
  - Un éclairement
  - Une injection des porteurs



Le flux des porteurs est donné par la loi de Fick:

$$\vec{flux}_n = -D_n \vec{g}rad(n)$$

$$\vec{flux}_p = -D_p \vec{g}rad(p)$$

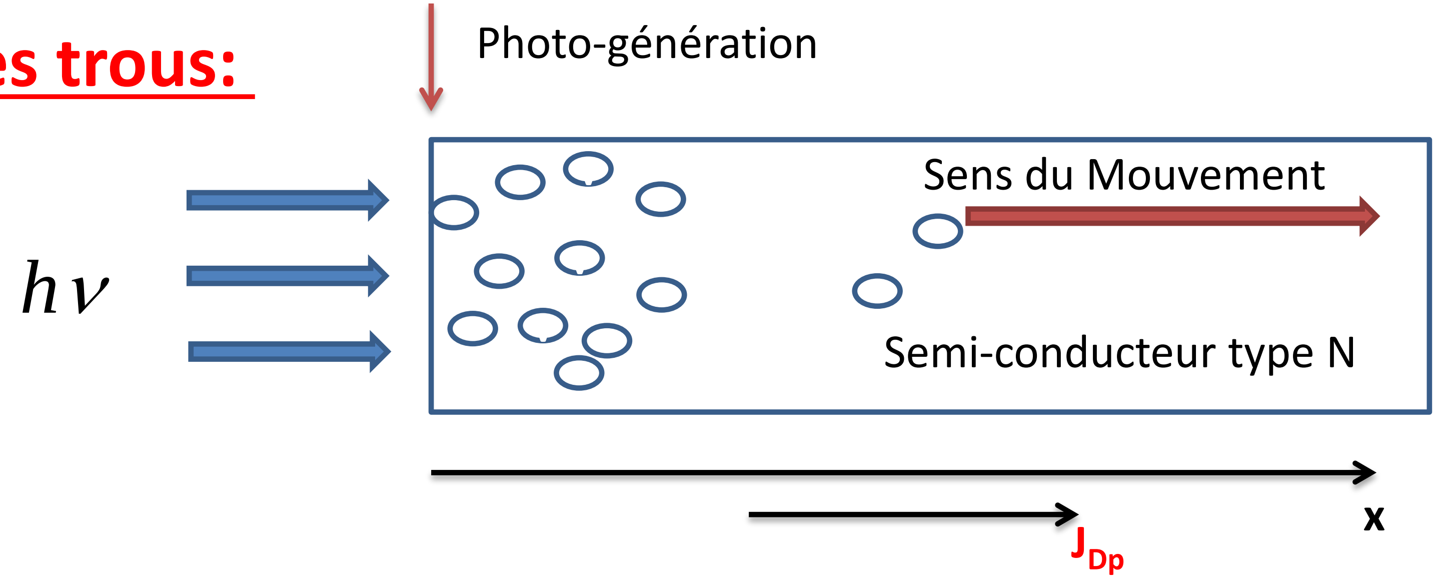
- Où $D_{n,p}$ ($m^2.s^{-1}$) est le coefficient de diffusion des porteurs
- Le signe (-) vient du sens du flux qui est opposé à celui du gradient

Les courants de diffusion des électrons et trous:

$$\vec{J}_{Dn} = -q.\vec{flux}_n = q.D_n \vec{g}rad(n)$$

$$\vec{J}_{Dp} = q.\vec{flux}_p = -q.D_p \vec{g}rad(p)$$

Diffusion des trous:



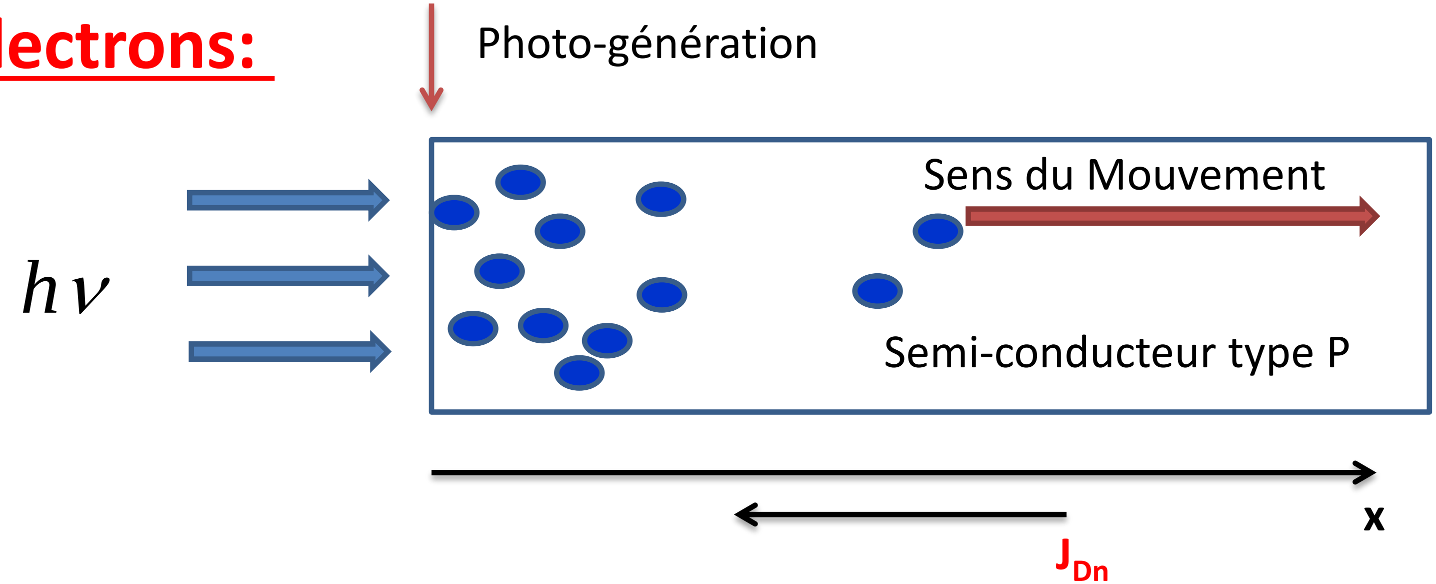
- ✓ Génération locale des paires électron-trou
- ✓ Les trous en surplus vont diffuser de la face éclairée vers l'intérieur du barreau
- ✓ Ces trous vont se recombiner avec les électrons majoritaires et leur concentration va diminuer en fonction de x

→ Phénomène de diffusion des trous excédentaires donnant lieu à un courant de diffusion des trous: J_{Dp} proportionnelle au gradient de concentration

$$J_{Dp} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

Avec p(x) la concentration des trous en fonction de x
D_p est la constante de diffusion des trous

Diffusion des électrons:



- ✓ Génération locale des paires électron-trou
- ✓ Les électrons en surplus vont diffuser de la face éclairée vers l'intérieur du barreau
- ✓ Ces électrons vont se recombiner avec les trous majoritaires et leur concentration va diminuer en fonction de x

→ Phénomène de diffusion des électrons excédentaires donnant lieu à un courant de diffusion des électrons: $\mathbf{J_{Dn}}$ proportionnelle au gradient de concentration

$$J_{Dn} = qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

Avec n(x) la concentration des électrons en fonction de x.
D_n est la constante de diffusion des électrons.

III. Densité totale de courant :

Dans un semi-conducteur, dans le cas général, la densité totale de courant:

$$J = J_n + J_p$$

$$J_n = J_{Dn} + J_{Cn} = q.\mu_n.n.E + qD_n.\nabla n$$

$$J_p = J_{Dp} + J_{Cp} = q.\mu_p.p.E - qD_p.\nabla p$$

Relation d’Einstein:

- Donne la relation entre la constante de diffusion et la mobilité d’un type de porteur.

- Ces deux grandeurs traduisent l’aptitude des porteurs à se déplacer dans le réseau Sous l’action d’une force.

$$D_n = \frac{kT}{q}.\mu_n$$

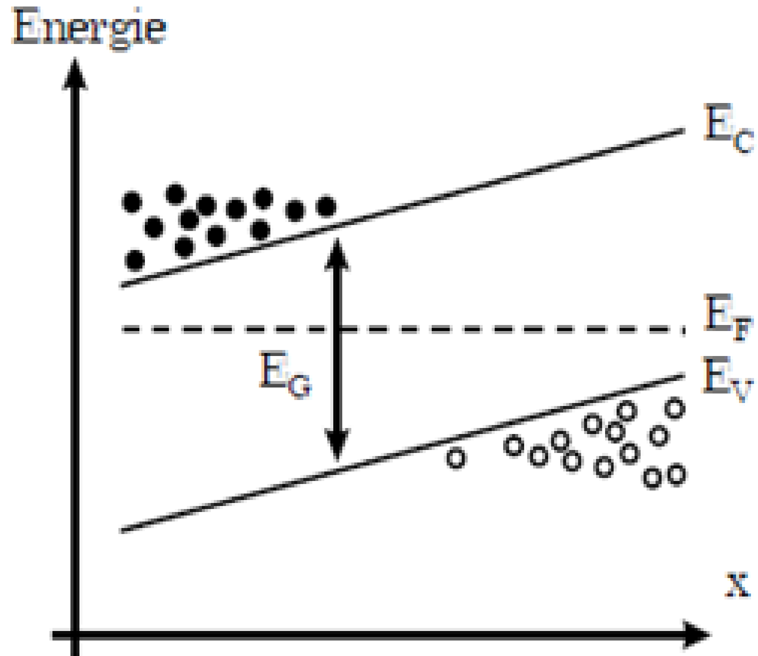
$$D_p = \frac{kT}{q}.\mu_p$$

❑ Soit un semi-conducteur isolé à l'équilibre avec une densité des électrons inhomogène dépendant de x.

$$n\ (x) = N_c \exp(-\frac{E_c(x) - E_F}{kT})$$

Inhomogénéité →force de diffusion et présence d'un champ E

→ Courant de diffusion et conduction



semi-conducteur isolé →Le courant total =0

$$J_n = q.\mu_n.n(x).E + qD_n.\frac{dn(x)}{dx} = 0$$

Le champ E résulte du gradient de concentration

$$E = -\frac{dV(x)}{dx} = \frac{1}{q}\frac{dEc(x)}{dx} = \frac{1}{q}\frac{dEc(x)}{dn(x)}.\frac{dn(x)}{dx}$$

En dérivant l’expression de n(x):

$$\frac{dn(x)}{dx} = -\frac{1}{kT}\frac{dEc(x)}{dx}.n(x) \rightarrow \frac{dn(x)}{dE_c(x)} = -\frac{1}{kT}.n(x)$$

D’où: $$E(x) = -\frac{kT}{q}.\frac{1}{n(x)}\frac{dn(x)}{dx}$$

$$J_n = q.\mu_n.n(x).E + qD_n.\frac{dn(x)}{dx} = 0$$

$\rightarrow$ $$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q}$$ De même: $$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q}$$

IV. Génération-Recombinaison-Durée de vie des porteurs:

❑ La création des porteurs dans un semi-conducteur se caractérise par le paramètre: **g’** qui donne le nombre de porteurs crées par unité de volume et unité de temps

g’($cm^{-3}.s^{-1}$): englobe la génération thermique g_{th} (spontanée) et l’agitation extérieure (g)

Soit **r’** : nombre de porteurs qui disparaissent par unité de volume et unité de temps

❑ La variation de nombre de porteurs par unité de volume et unité de temps due au phénomène génération/recombinaison.

$$\left(\frac{dn}{dt}\right)_{g/r} = g' - r' = g + \underbrace{g_{th} - r'}_{\text{Spécifique au matériau}} = g - r$$

Fonction de l’excitation

$$\left(\frac{dn}{dt}\right)_{g/r} = g - r$$

g: taux de génération
r: taux de recombinaison

- A l’équilibre, la génération et la recombinaison se compensent.

Les densités des électrons (n_0) et des trous (p_0) sont indépendantes du temps et suivent la loi d’action de masse.

- Sous excitation, le système est hors équilibre, la densité des électrons et des trous deviennent:

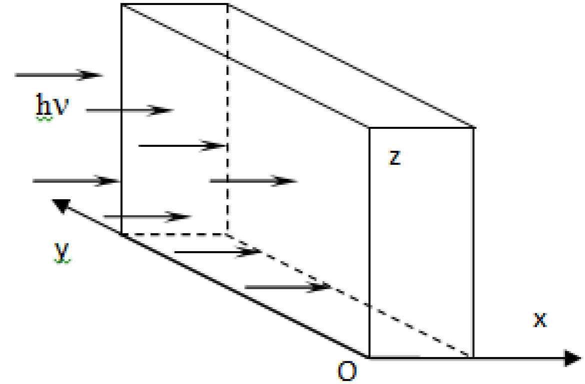
$$n = n_0 + \Delta n$$

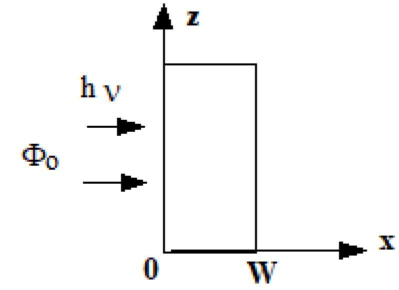
$$p = p_0 + \Delta p$$

On travaille souvent en régime « faible injection » qui consiste à supposer que la variation des porteurs reste faible devant la densité des porteurs majoritaires:

- Dans un Semi-conducteur type N: $\Delta n, \Delta p << n_0 \approx N_D$
- Dans un Semi-conducteur type P: $\Delta n, \Delta p << p_0 \approx N_A$

❑ Génération par des photons:





✓ Sous l'effet d'un flux de photons d'énergie il y aura génération de pairs d'électron- trou.

$$h\nu \geq Eg$$

✓ Le flux de photons qui ont traversé le matériau et ont atteint le plan d'abscisse x est donné par :

$$\phi(x) = \phi(0).\exp(-\alpha x)$$

α est le coefficient d'absorption du matériau. En supposant que chaque photon absorbé crée une paire é-h, le taux de génération est donné par la diminution du flux de photons par tranche d'épaisseur dx:

$$G(x) = -\frac{d\phi}{dx} = \alpha.\phi_0.\exp(-\alpha x) = \alpha.\phi(x)$$

❑ **Processus de recombinaison:**

- ✓ c'est le phénomène inverse de la génération. Un électron de la bande de conduction retourne vers la bande de valence cédant de l'énergie et comble ainsi un trou.

- ✓ Le taux de recombinaison représente le nombre de paires qui disparaissent par unité de volume et unité de temps $R(cm^{-3}.s^{-1})$.

- ✓ L'état stationnaire correspond à R=0. En régime faible injection, R est proportionnel à la concentration des porteurs en excès:

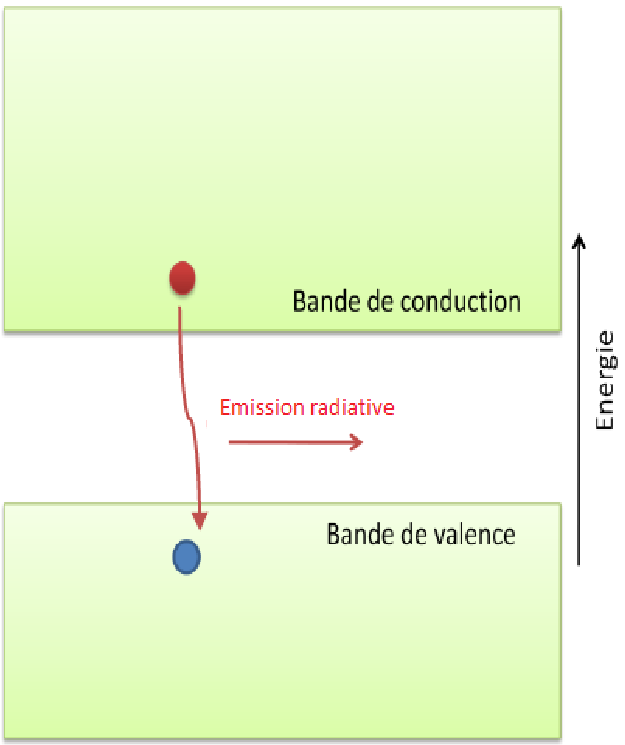
$$R_n = \frac{\Delta n}{\tau_n}$$

τ_n, τ_p :la durée de vie des porteurs en excès (électrons et trous)

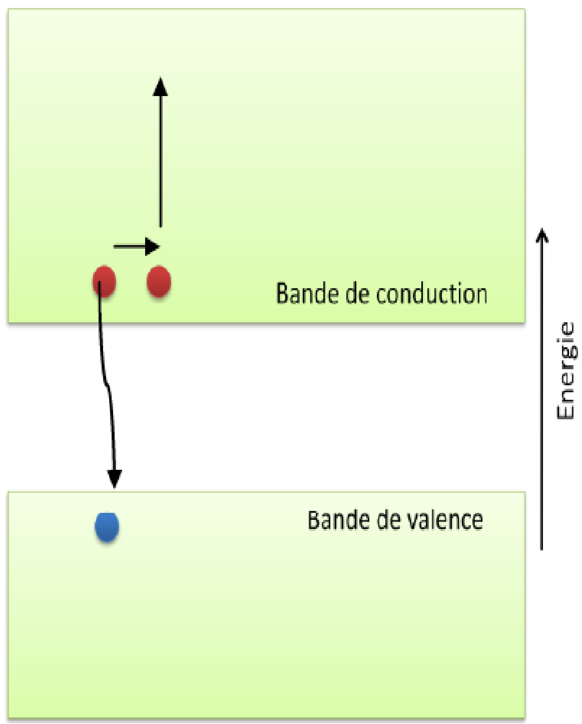
$$R_p = \frac{\Delta p}{\tau_p}$$

Rq: En régime faible injection, la recombinaison concerne que les porteurs minoritaires

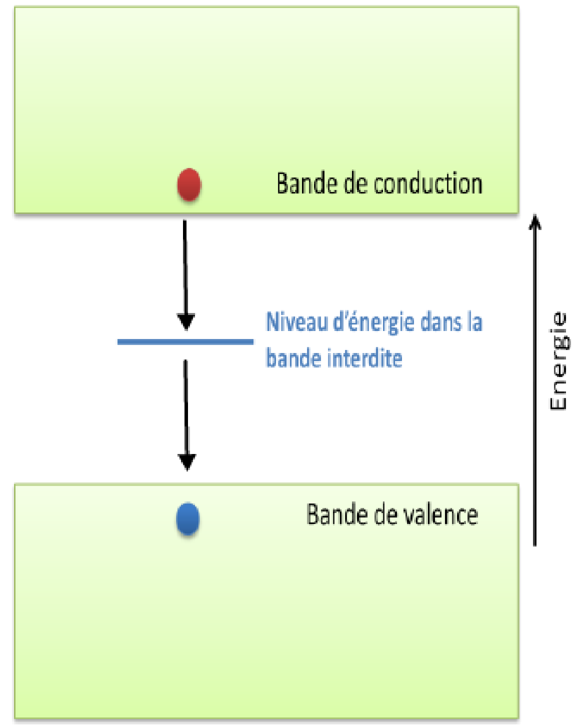
❑ <u>Différents processus de recombinaison:</u>



<u>Recombinaison radiative</u>



<u>Recombinaison Auger</u>



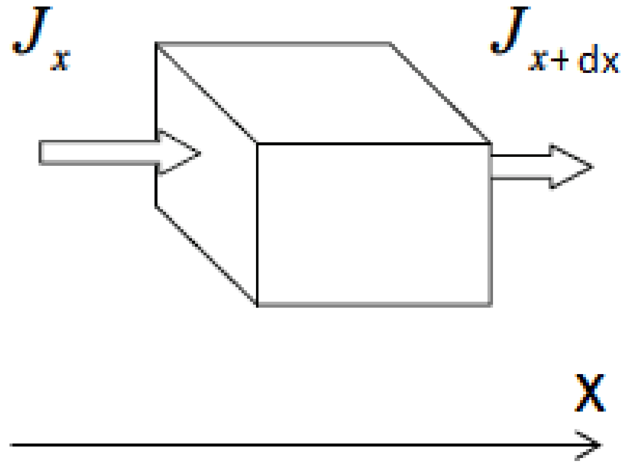
<u>Recombinaison par piège ou impureté</u>

Equations d'évolution (espace et temps)

Décrire l'évolution de la concentration des porteurs et de la charge électrique.

Equations de continuité:

Dans un semi-conducteur inhomogène et hors équilibre, les phénomènes de recombinaison sont accompagnés de flux de porteurs de charge qui participent à l'établissement des régimes permanents et l'équilibre.
L'équation qui tient en compte de tous ces phénomènes et qui régit l'évolution de la charge au cours de temps est appelée ***équation de continuité***.



Dans un barreau semi-conducteur excité et parcouru par un courant dans la direction (ox), on considère un élément de volume de section unitaire dans le plan perpendiculaire à (ox) et d'épaisseur dx.

On va déterminer la variation de la concentration des électrons libres pendant le temps dt dans une tranche du barreau (entre x et x+dx).