

**Dopage par modulation d'hétérostructures
de semiconducteurs II-VI semimagnétiques
en épitaxie par jets moléculaires**

Thèse présentée par
Alexandre ARNOULT

Motivations et état de l'art

Dopage du matériau barrière

Dopage par modulation

Etude de l'interdiffusion

Caractérisation électrique

Un exemple :

Interaction ferromagnétique

Conclusion et perspectives

Contrôler un système de spins localisés dans un semiconducteur grâce à des porteurs de charges

Beaucoup d'études menées

GaMnAs (Belgique, Japon, USA)

système 3D

Mn = spin localisé et dopant

défauts structuraux (croissance à basse température)

système difficile à étudier et à comprendre

PbMnSnTe (Pologne)

contrôle indépendant des spins localisés et des porteurs

système 3D

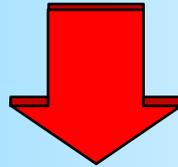
nouveau système présentant un contrôle plus complet

introduction indépendante des trous et des spins localisés

T. Dietl *et al.* (1996)

«The results show that the hole densities that can presently be achieved are sufficiently high to drive a **paramagnetic-ferromagnetic phase transition** in bulk and modulation-doped structures of II-VI diluted magnetic semiconductors.»

Phys. Rev. B **55**, R3347

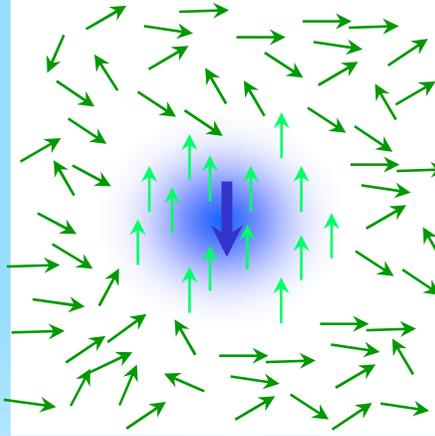


BUT : Croissance d'hétérostructures dans lesquelles on va utiliser le couplage entre

- des spins localisés de Mn^{2+}
- et
- un gaz de trous 2D

pour induire une

transition de phase ferromagnétique



interaction trou - Mn^{2+}



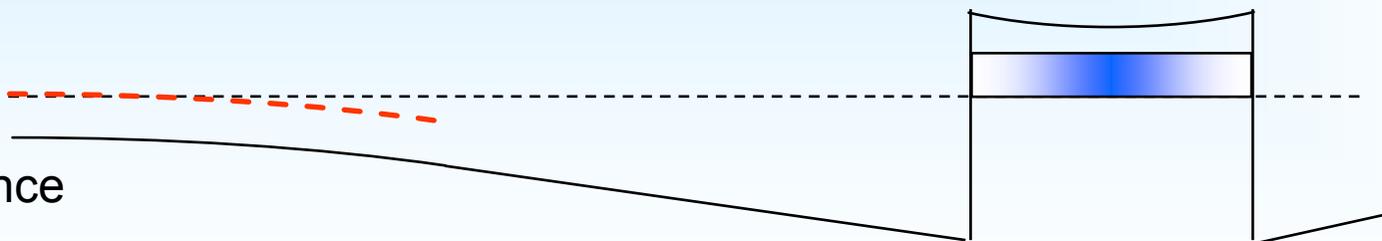
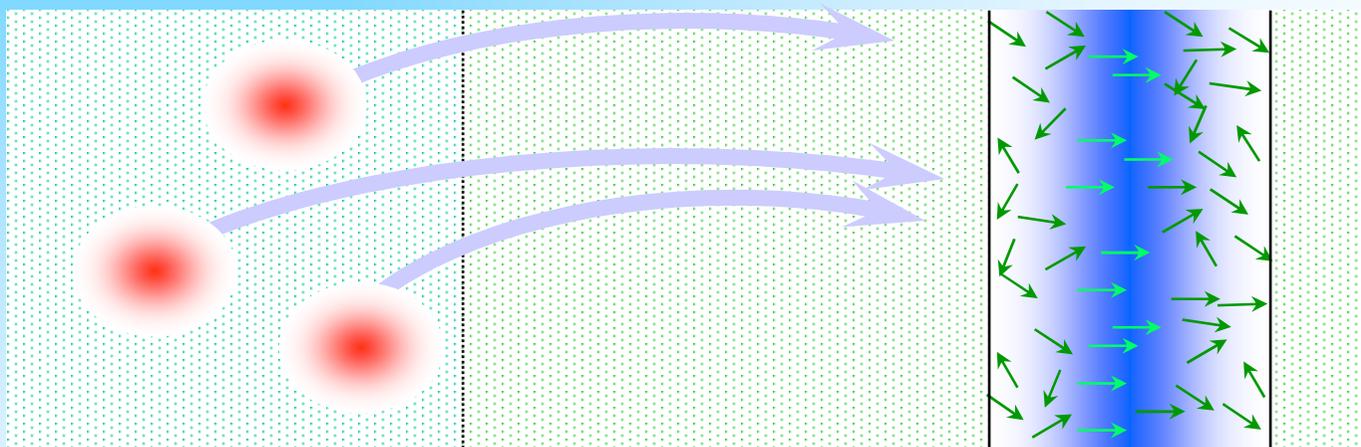
alignement des spins de manganèse

Gaz de trous → transition de phase ferromagnétique

Dopage par modulation séparation spatiale dopants - charges

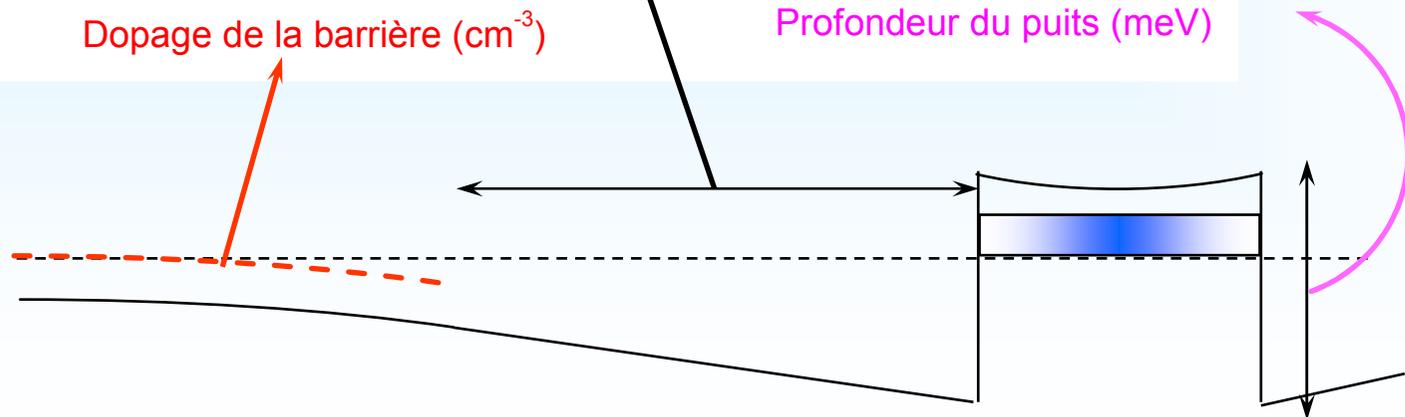
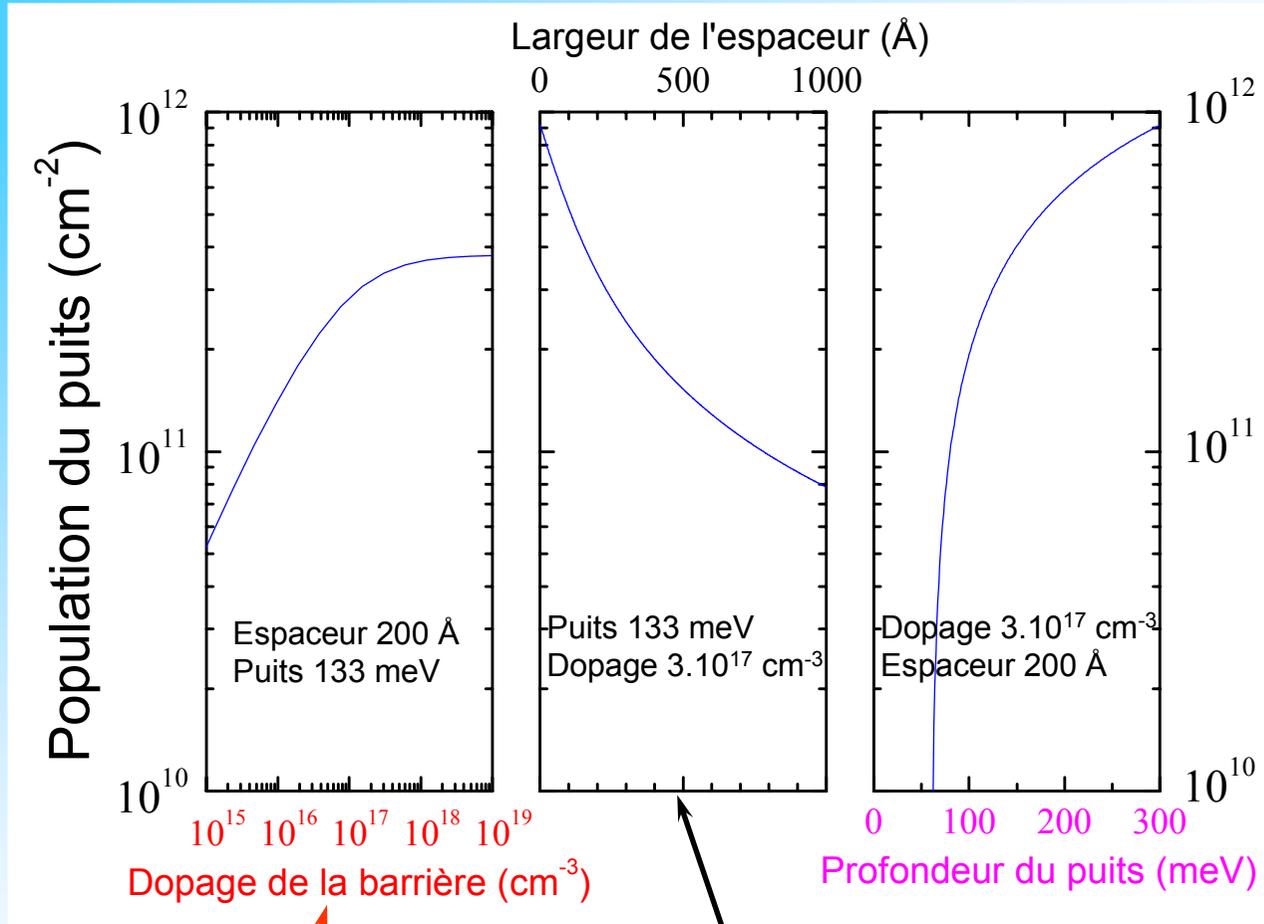
Accepteurs (-)

trous (+)



Bande de valence

Population d'un puits quantique

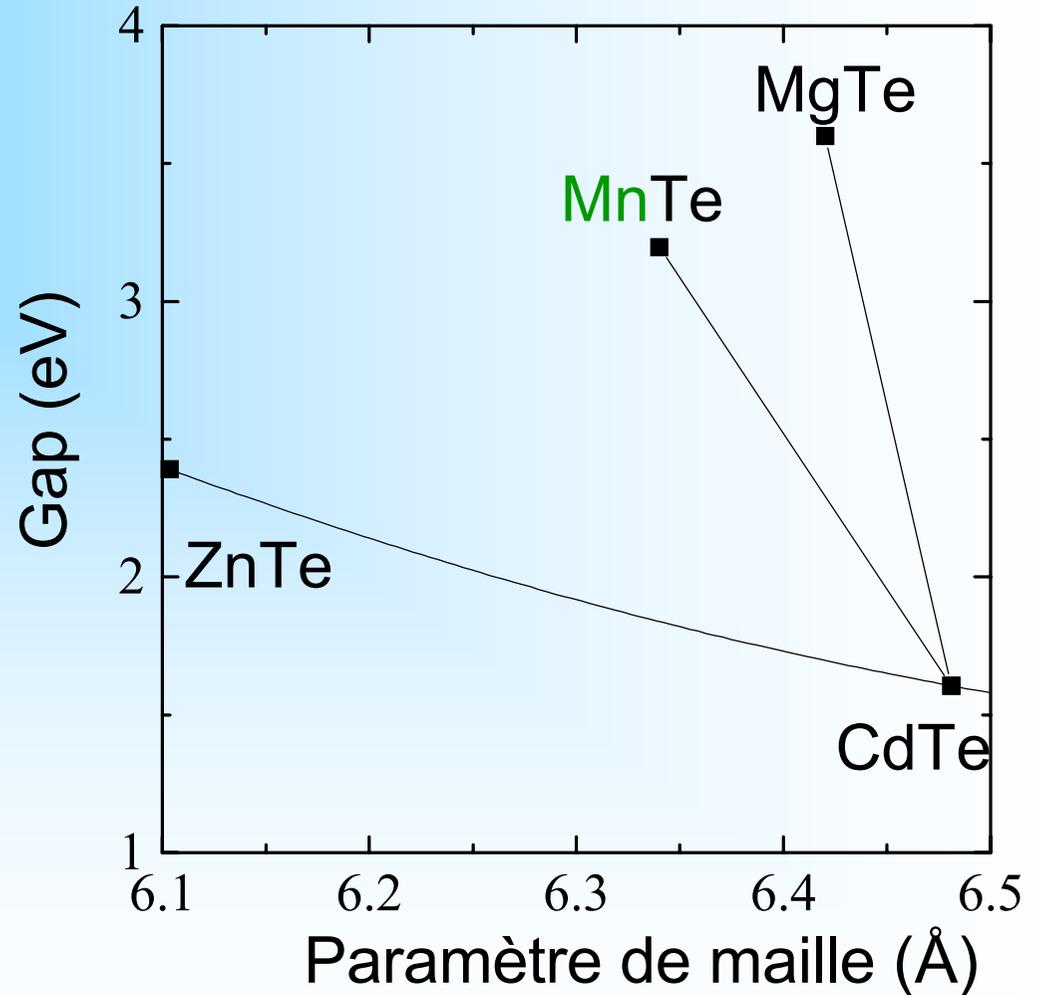


cellules d'effusion

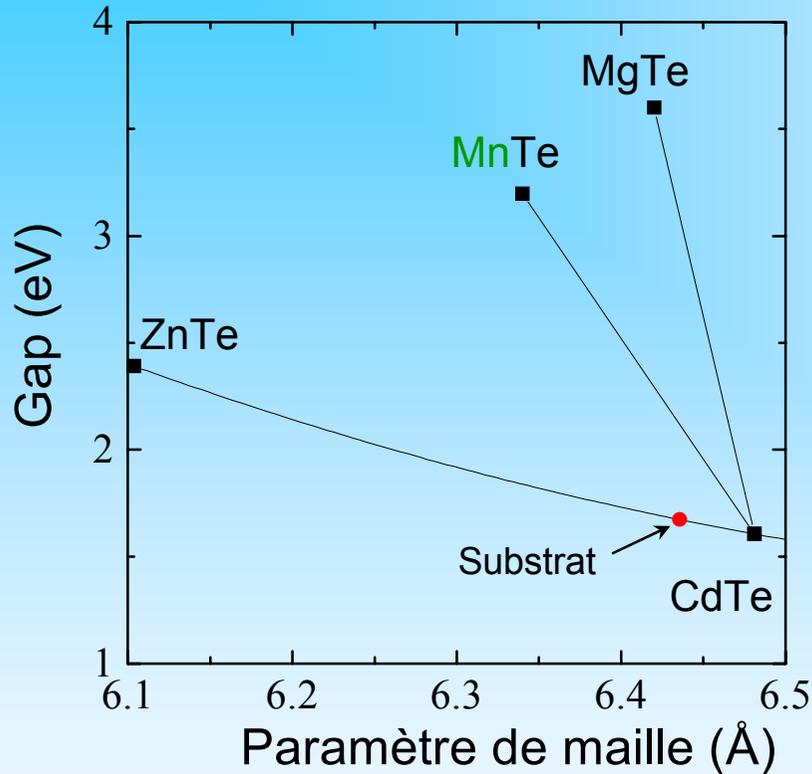
- CdTe
- ZnTe
- Cd
- Te
- Mg
- Mn

dopant

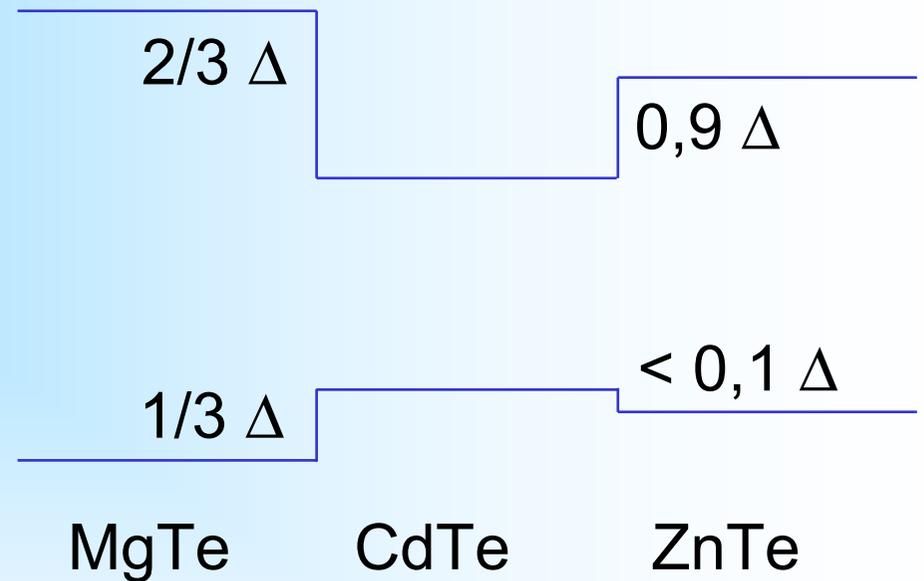
- azote (cellule ECR)
- Al



Décalages de bandes



$$\Delta_{\text{total}} = \Delta_{\text{BC}} + \Delta_{\text{BV}}$$



matériau barrière : $\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mg}_y\text{Te}$

accorder le paramètre de maille avec le substrat

augmenter le décalage de bande de valence

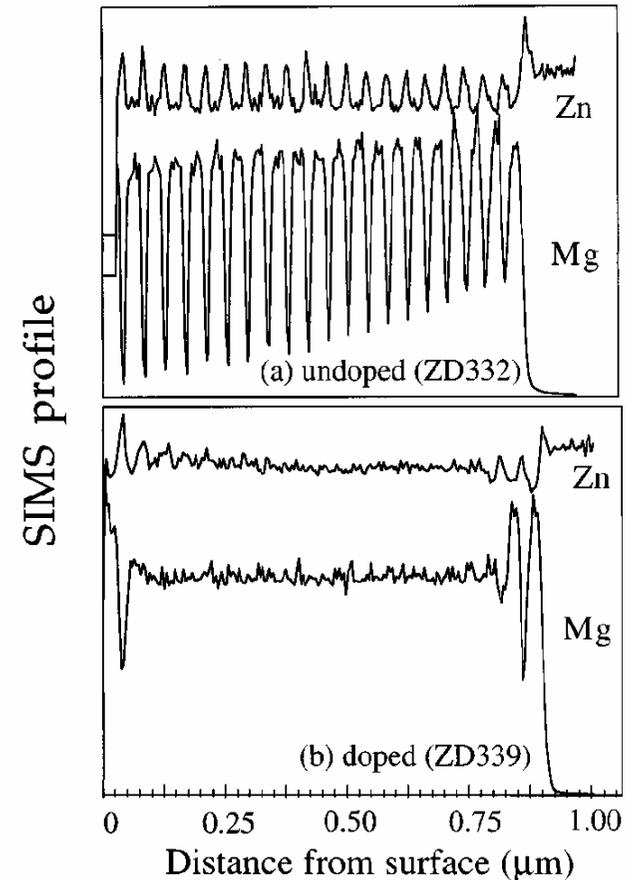
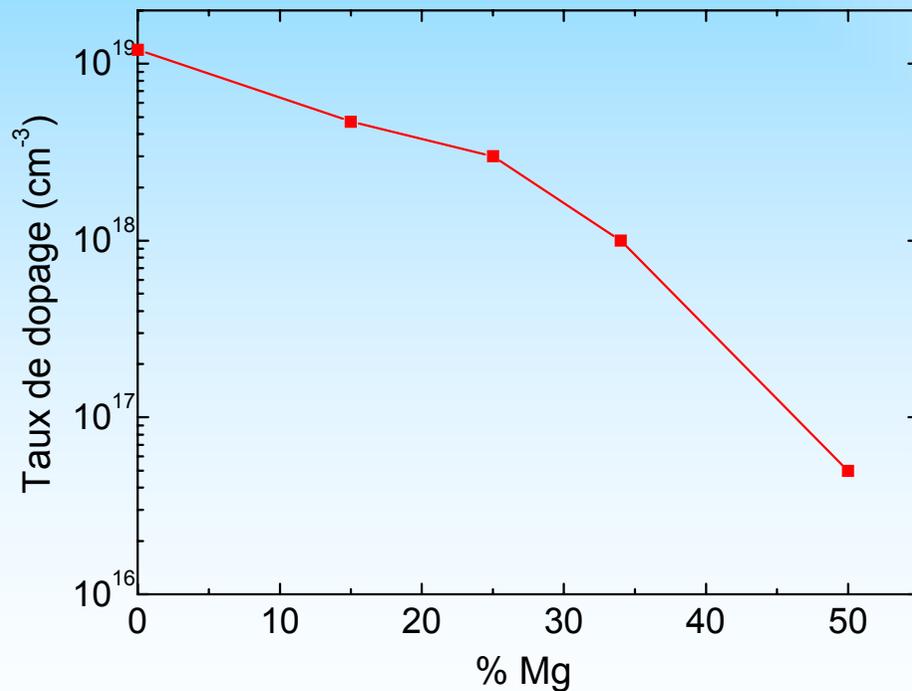
Etat des connaissances dopage de type p

	CdTe	ZnTe		
As	10^{16}	10^{16}	cm^{-3}	} dopants peu efficaces
P		$4 \cdot 10^{17}$	cm^{-3}	
Sb	$5 \cdot 10^{16}$	10^{18}	cm^{-3}	
N	10^{17}	10^{20}	cm^{-3}	(T. BARON)

N excellent dopant du ZnTe
dope le CdTe

problèmes lors de l'ajout de Mg :

- dopage de couches épaisses chute
- superréseaux inderdiffusés

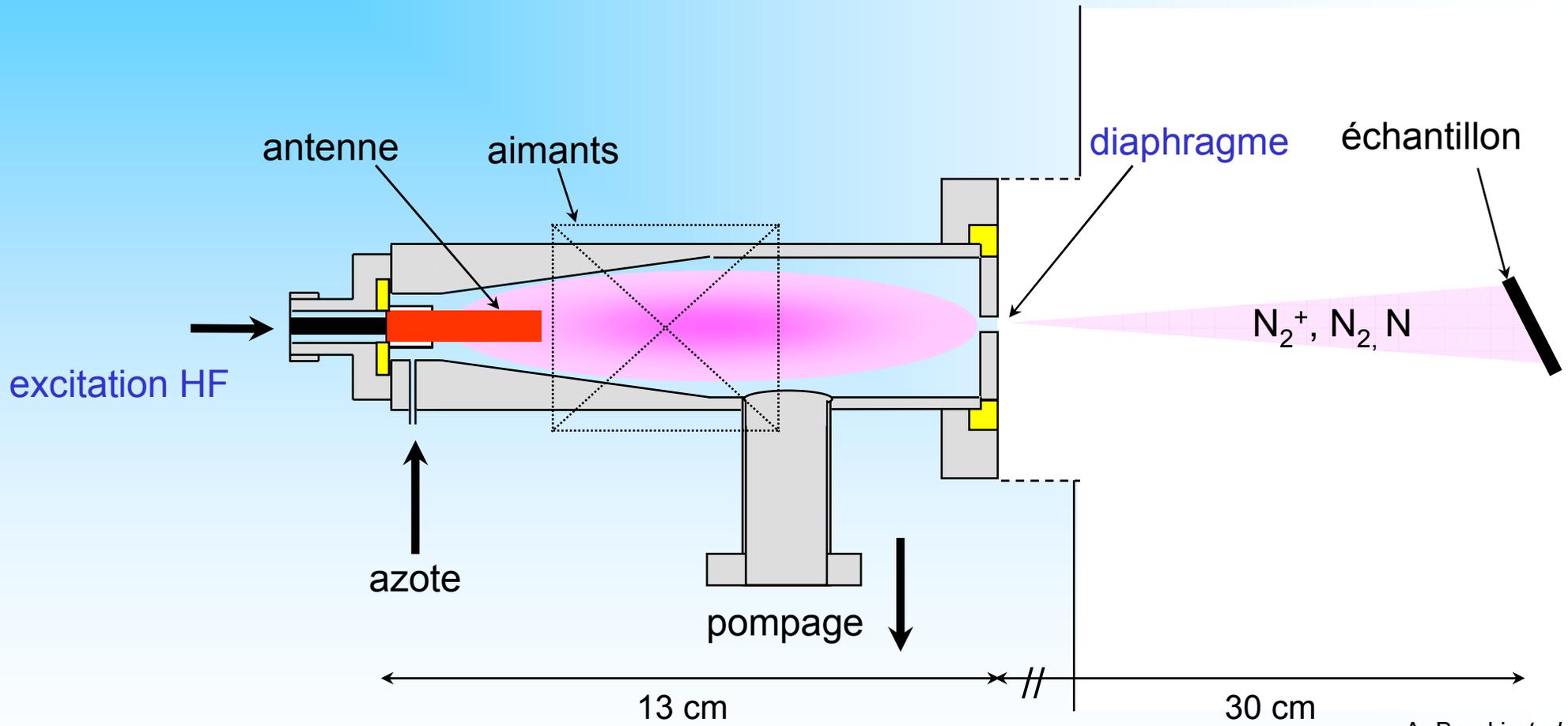


T. Baron et al.
Appl. Phys. Lett. **70** (22), 1997

Dopage à l'azote

12

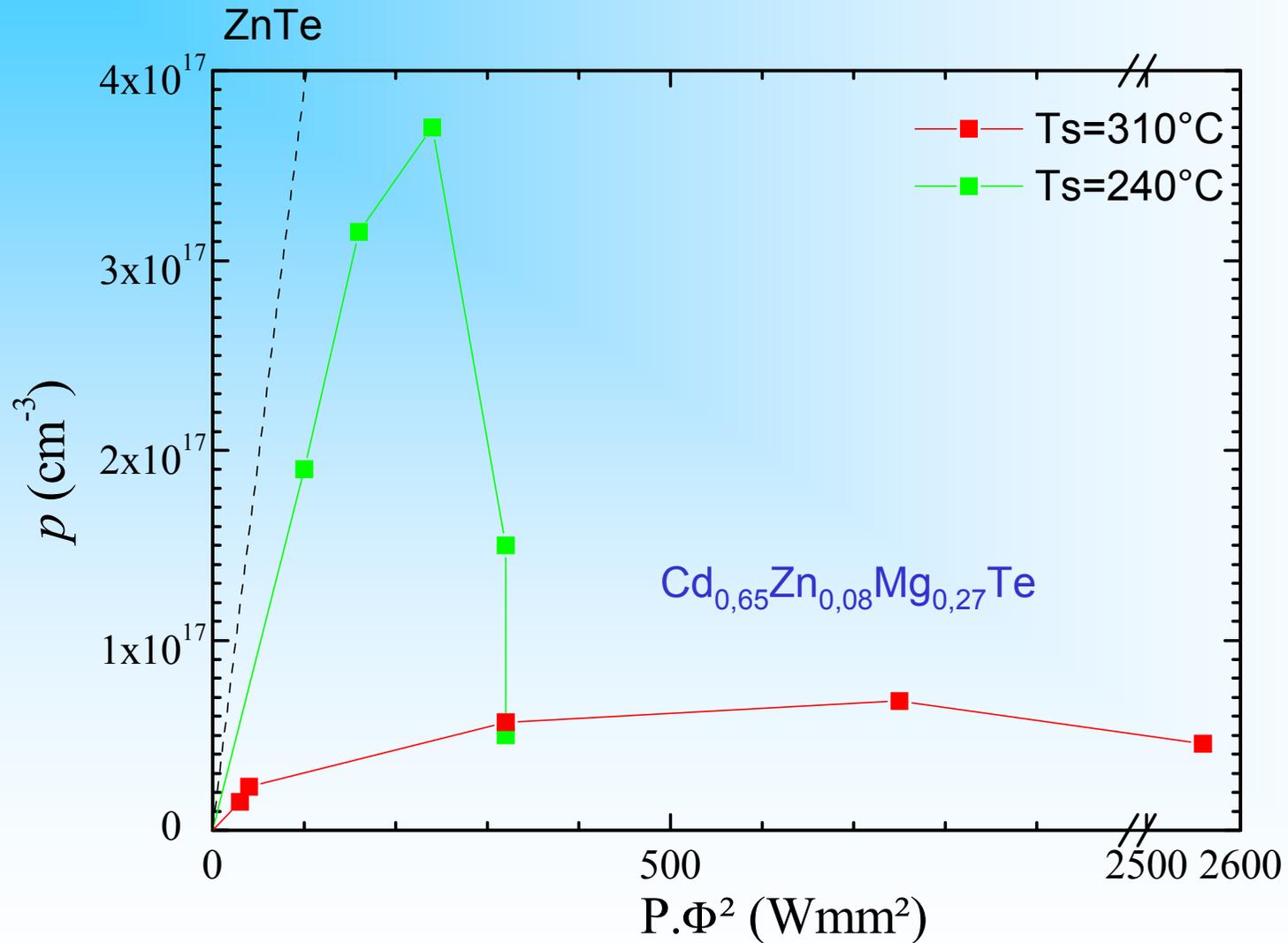
Cellule plasma **ECR** (Electron Cyclotron Resonance)



Deux paramètres ajustables : **puissance d'excitation**
diamètre du diaphragme

A. Barski *et al.*
M. Chamel
M. Grün
Y. Genuist
N. Sadeghi

Dopage de couches épaisses (matériau barrière)

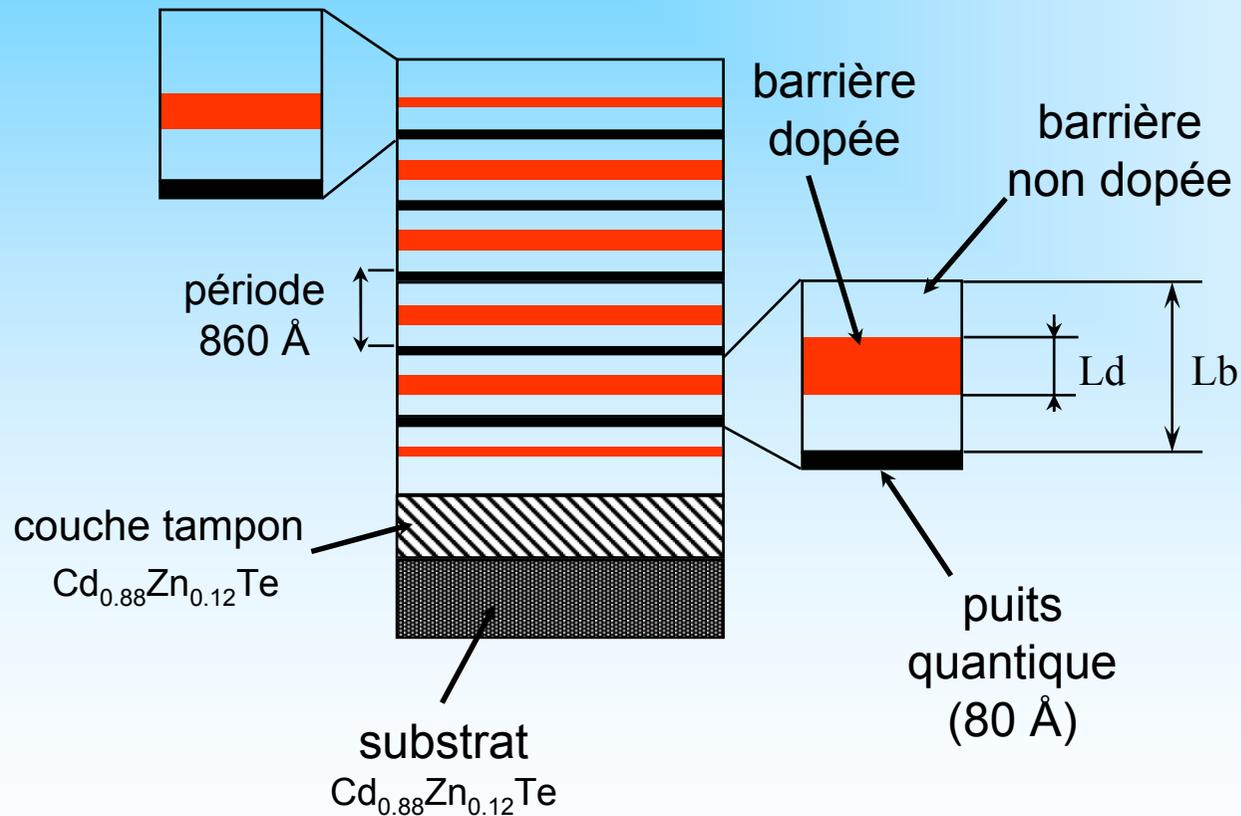


Problèmes rencontrés

- interdiffusion des puits quantiques
- diffusion de l'azote
- formation de complexes

- caractérisation électrique
- épinglage du niveau de Fermi

description des échantillons



six couches :

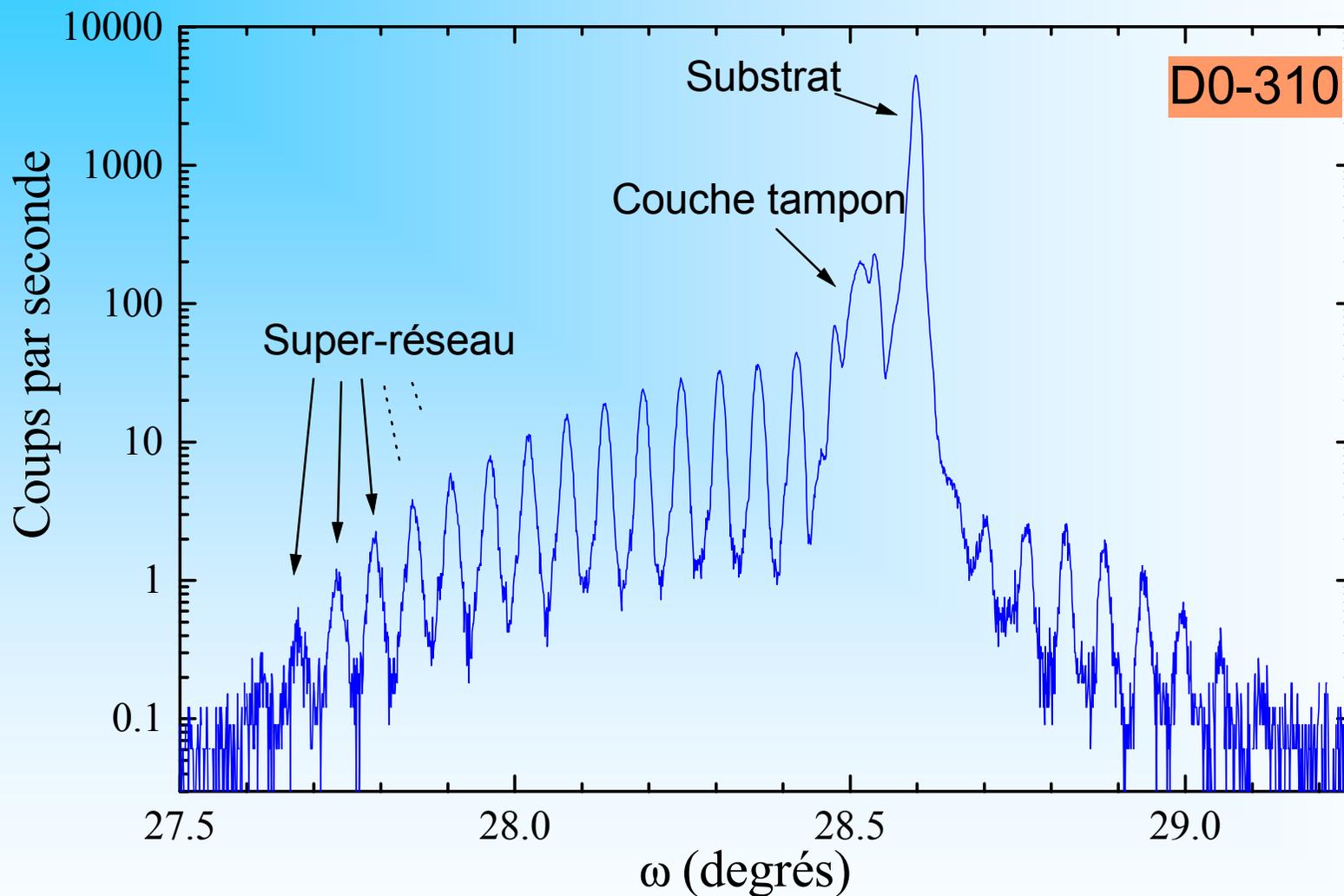
TS=310°C

D0-310	non dopée
D10-310	$L_d/L_b=0,1$
D30-310	$L_d/L_b=0,3$

TS=240°C

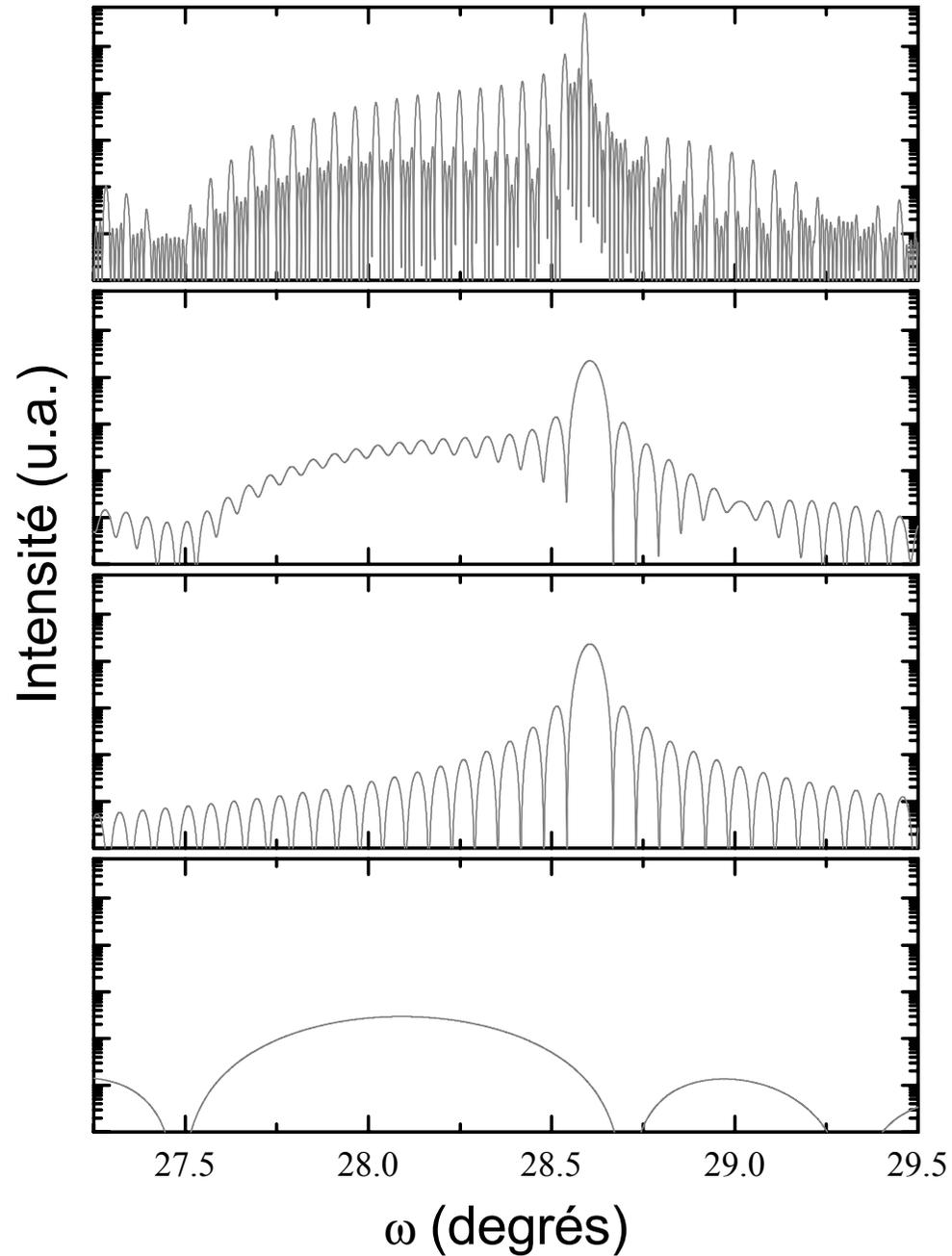
D0-240	non dopée
D10-240	$L_d/L_b=0,1$
D30-240	$L_d/L_b=0,3$

Diffraction X



balayage ω - 2θ



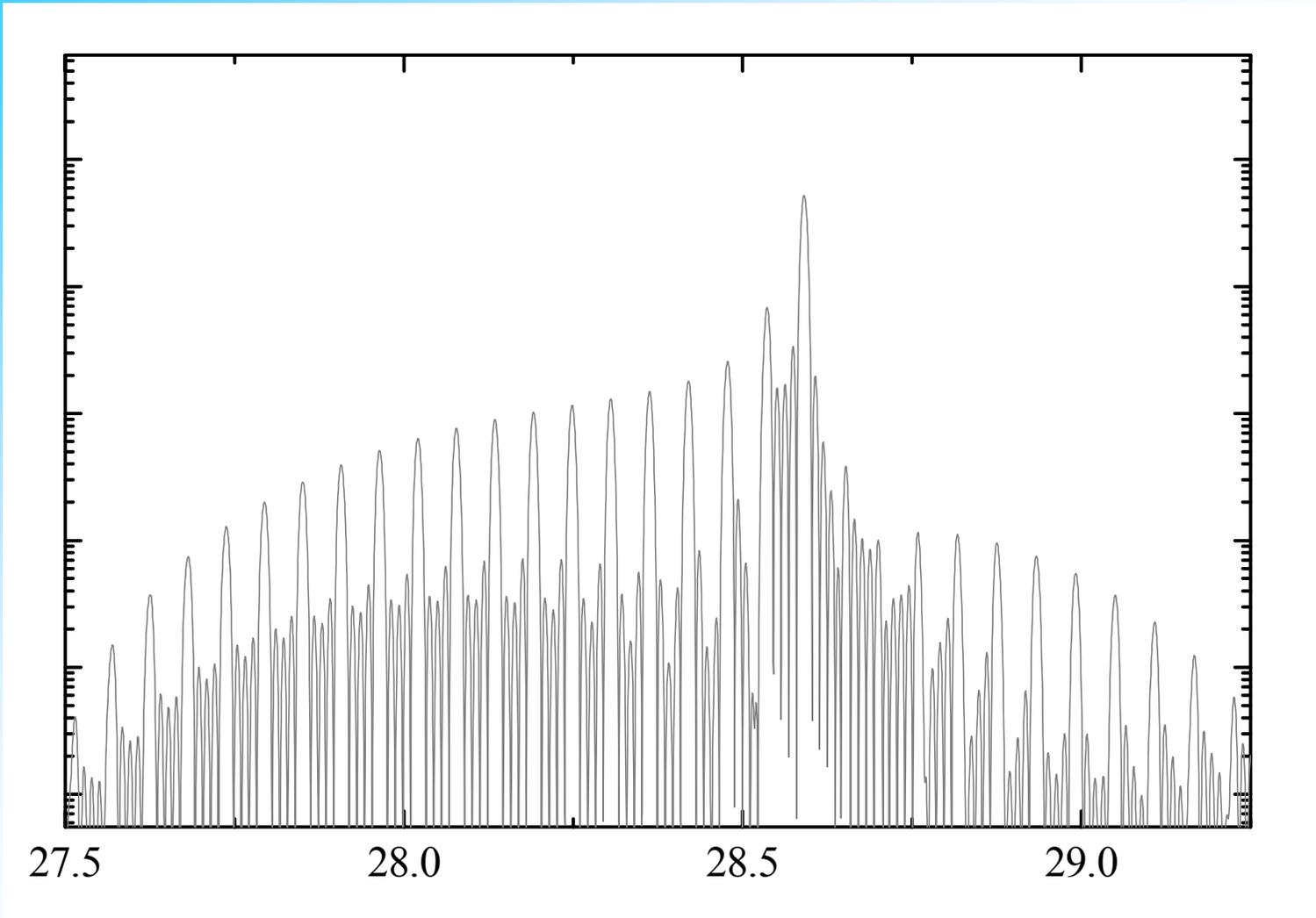


5 x (1 puits + 1 barrière)
identiques

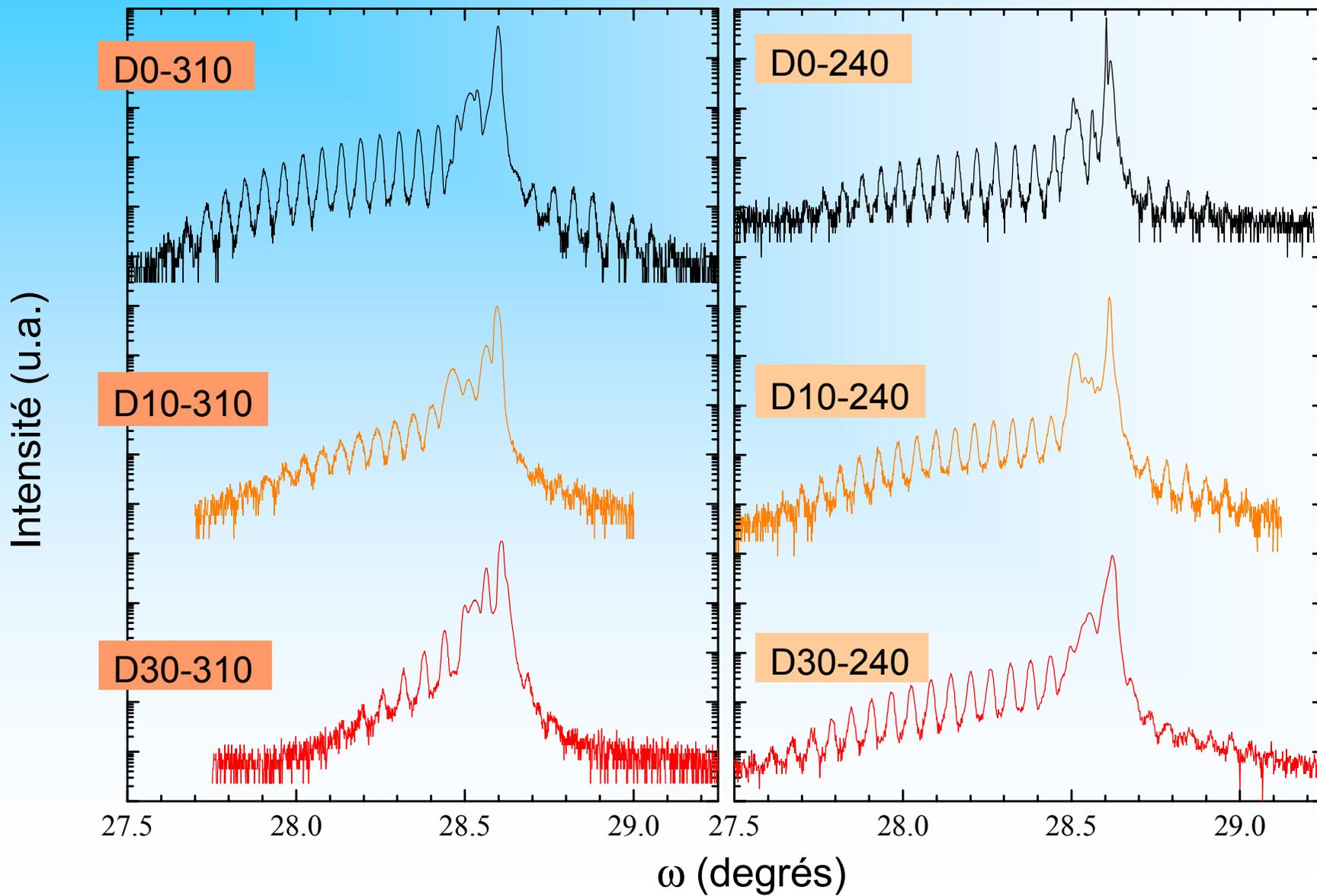
1 puits + 1 barrière

1 barrière

1 puits

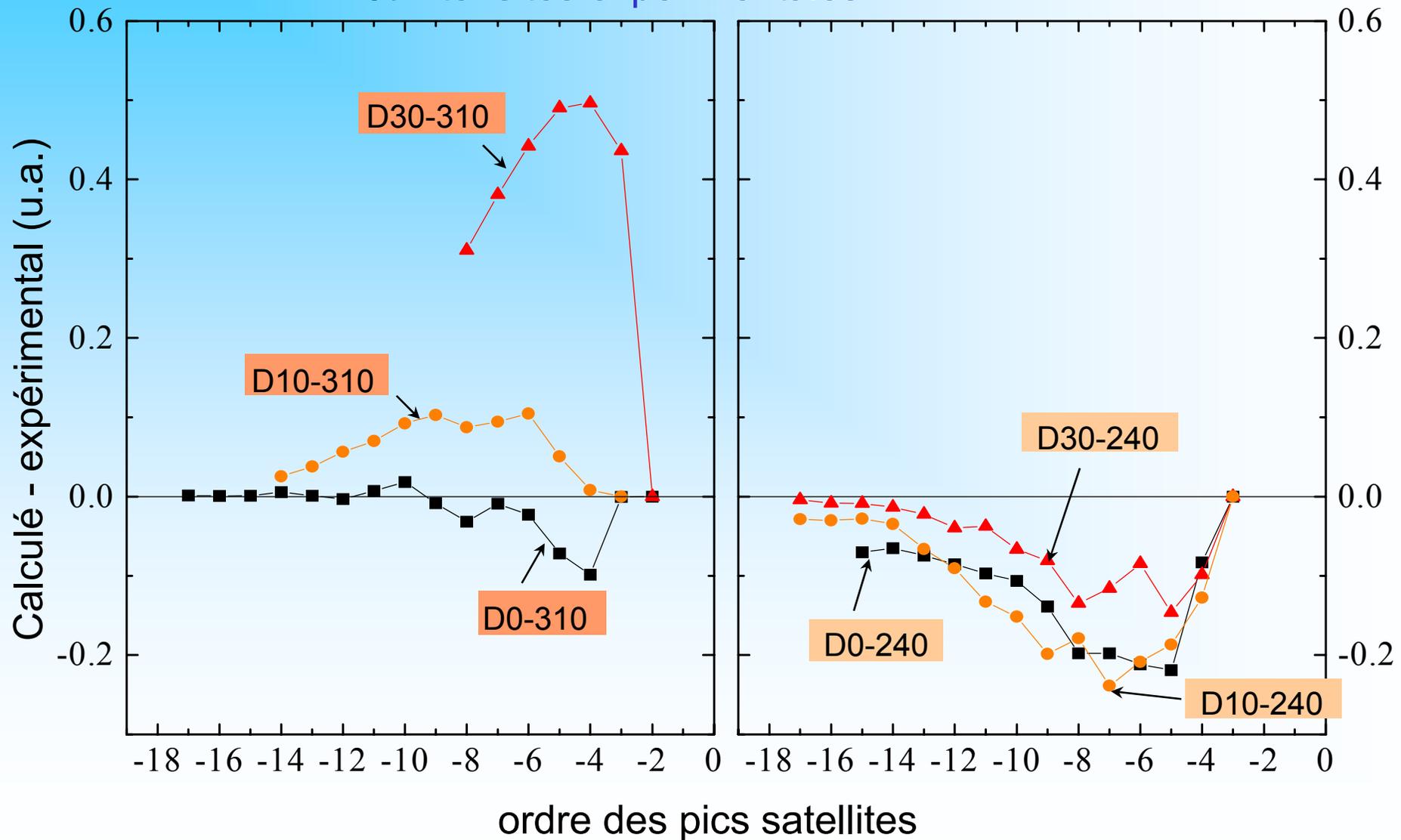


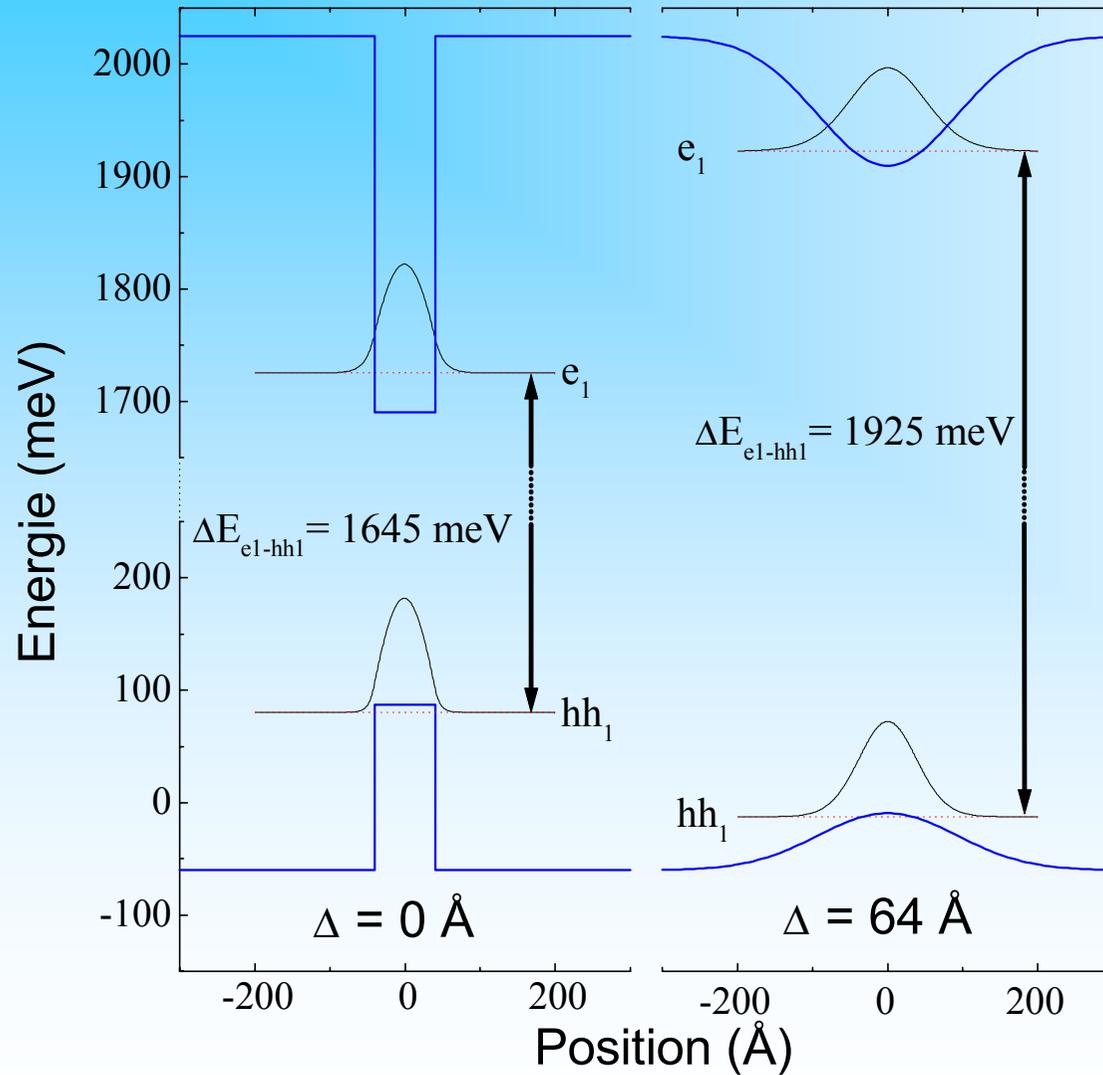
Profils expérimentaux



Mise en évidence d'une interdiffusion

différence entre intensités calculées pour une structure parfaite et intensités expérimentales



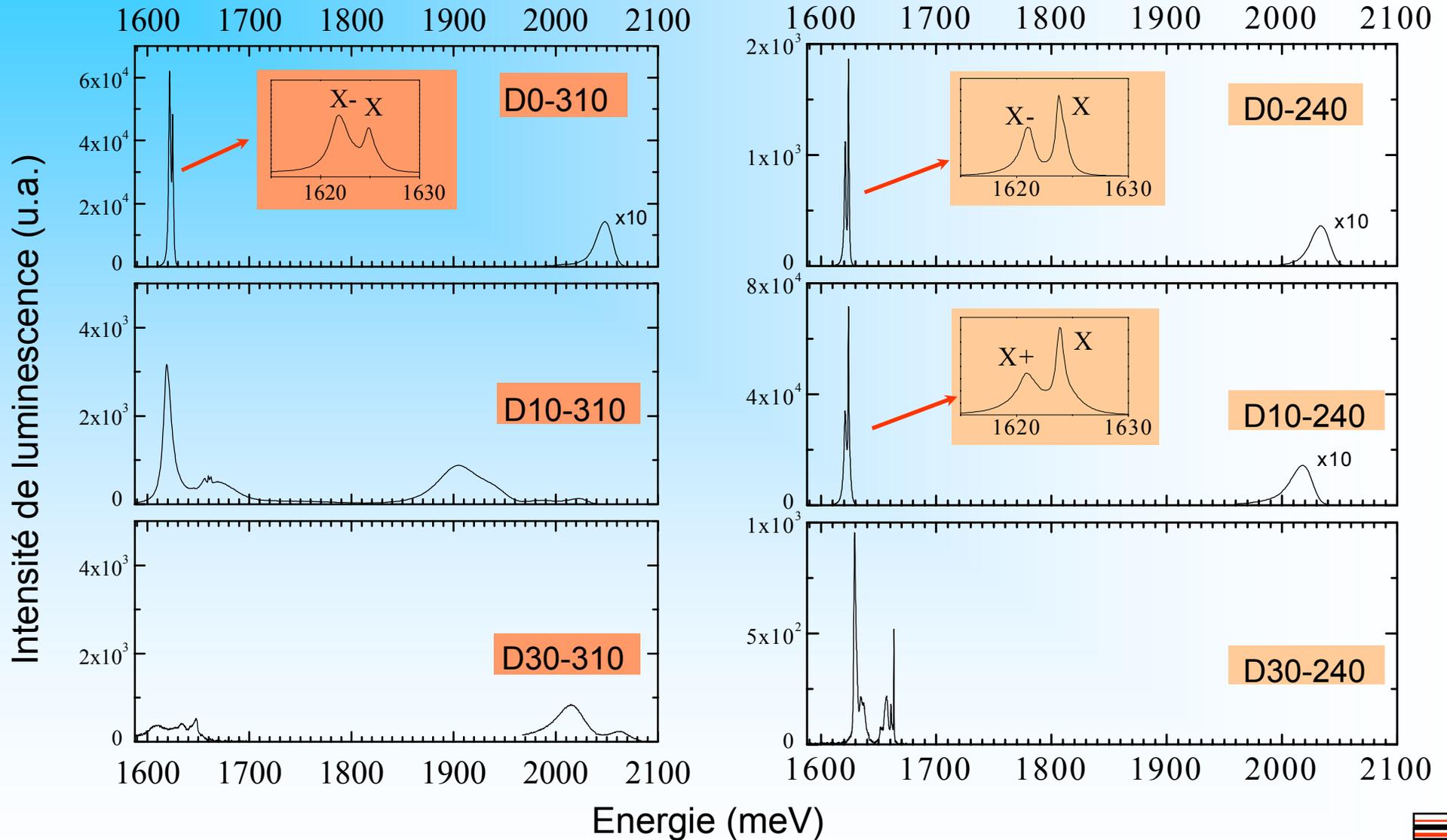


Diffusion du magnésium

résolution numérique de l'équation de Schrödinger

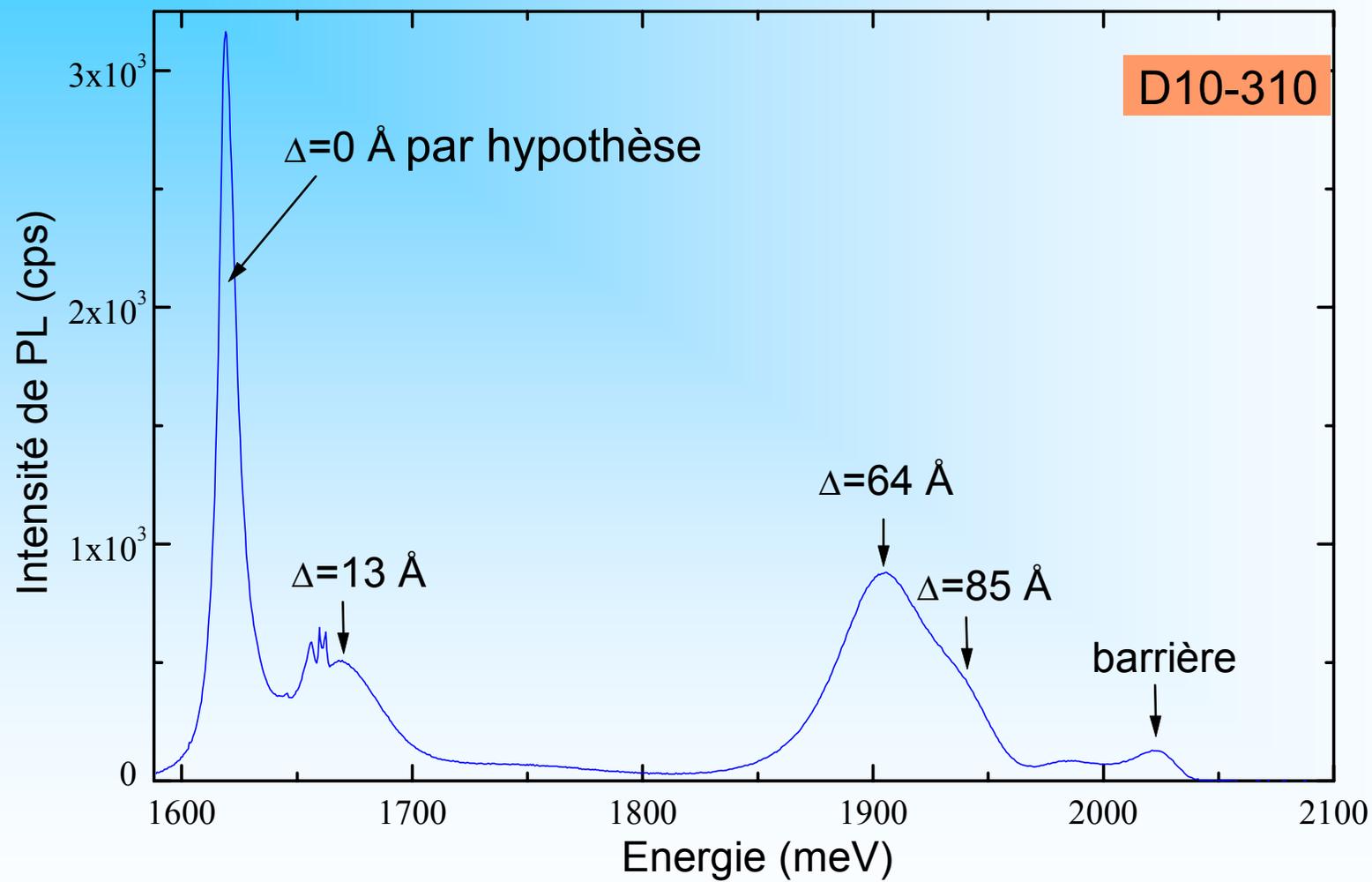
largeur du puits : 80 \AA

masses effectives : $m_{hh_1}^z = 0,63 m_0$
 $m_{e_1}^z = 0,099 m_0$

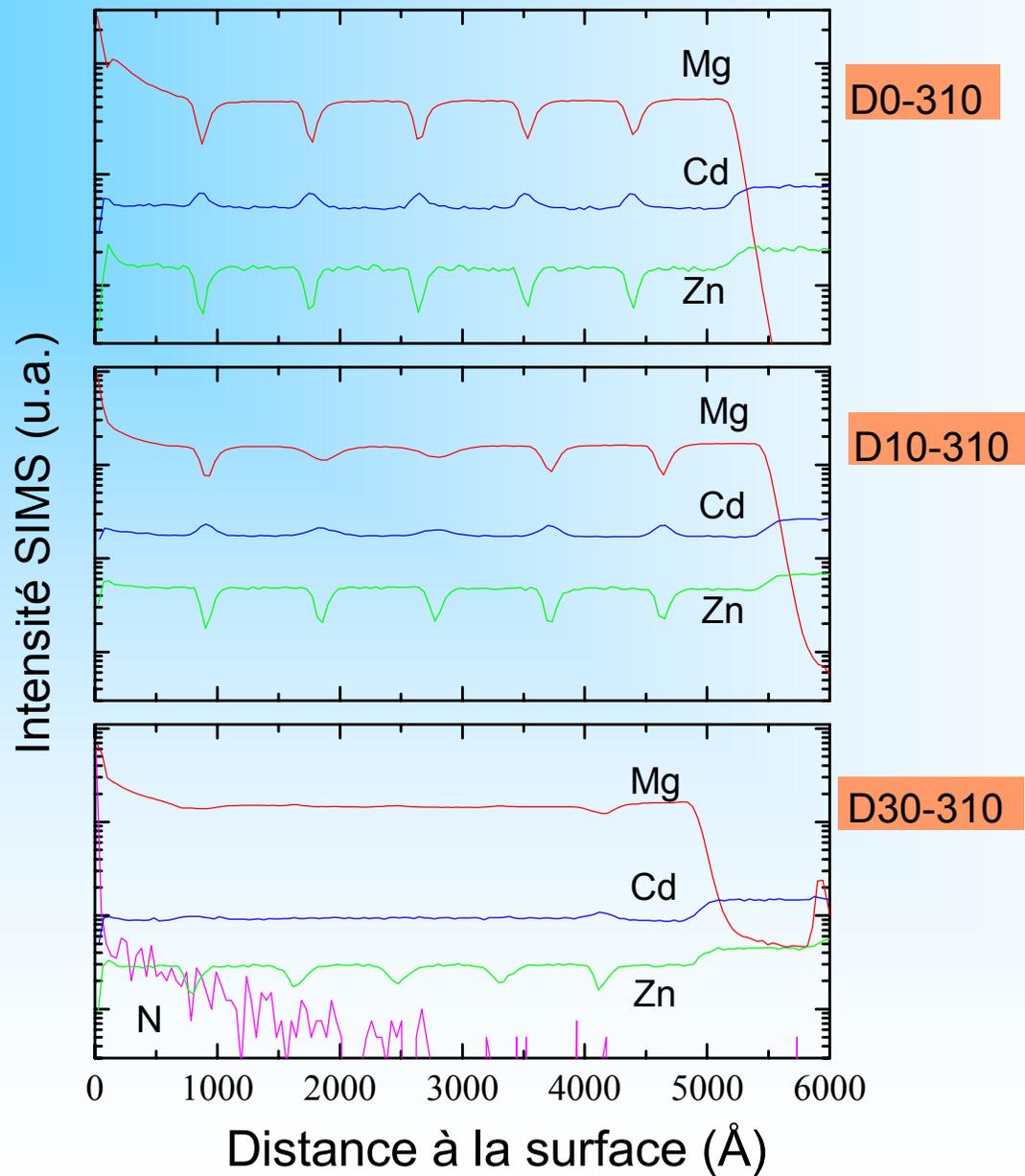


→ interdiffusion

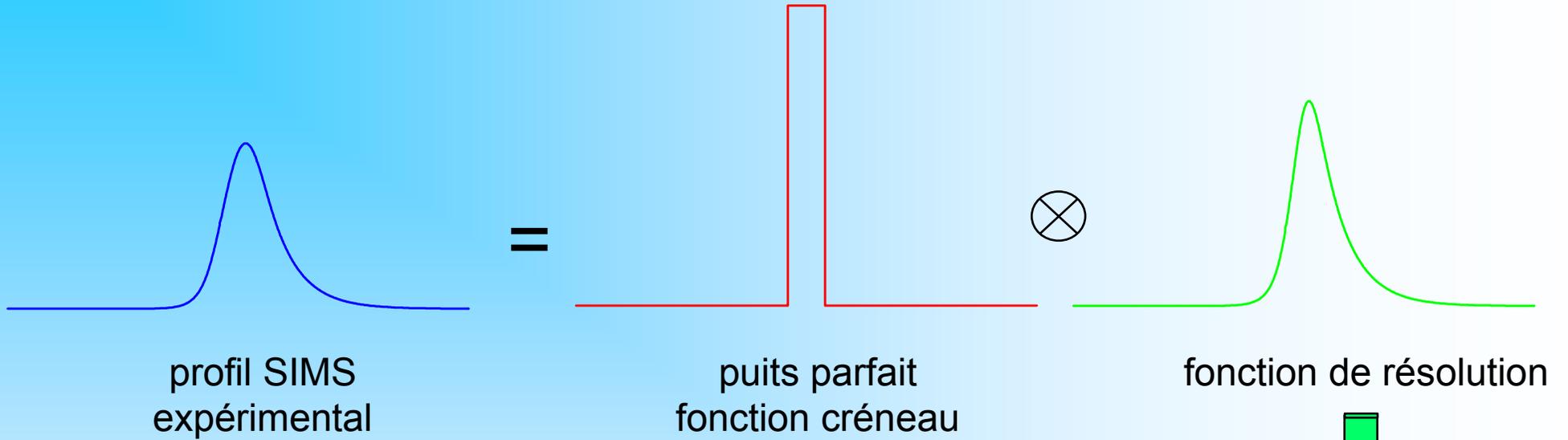




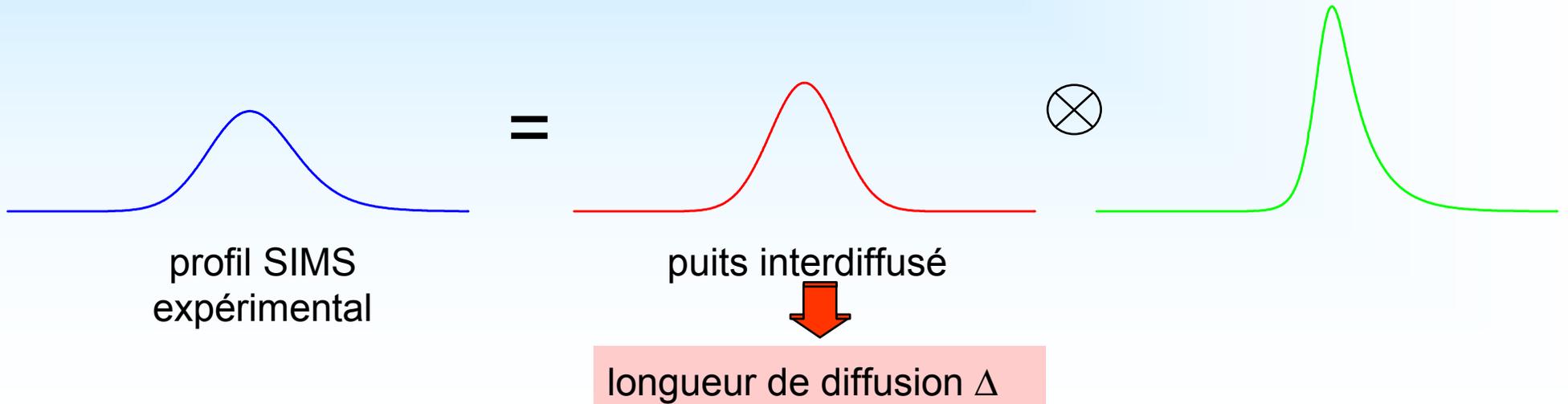
Profils SIMS expérimentaux



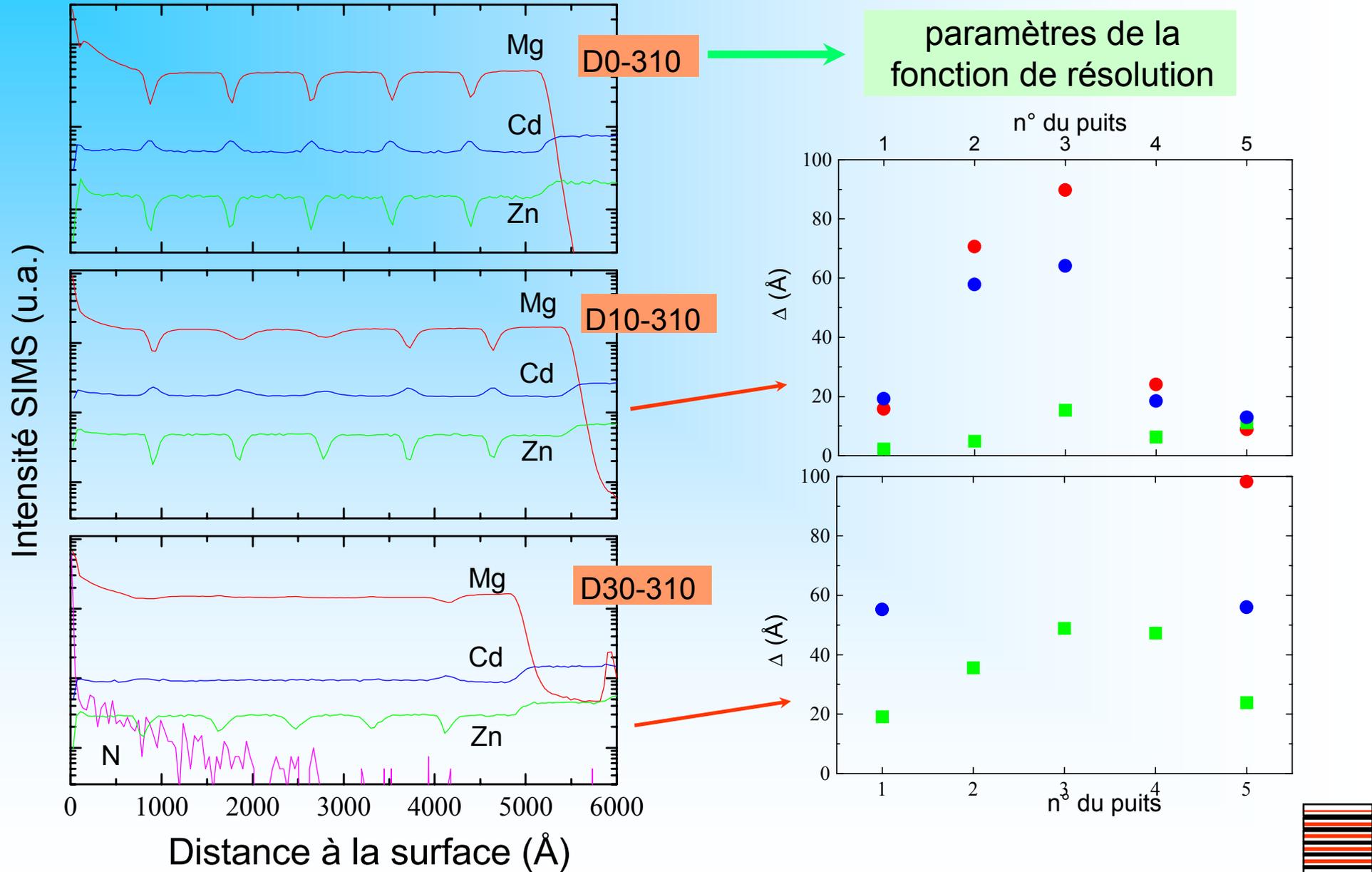
SIMS



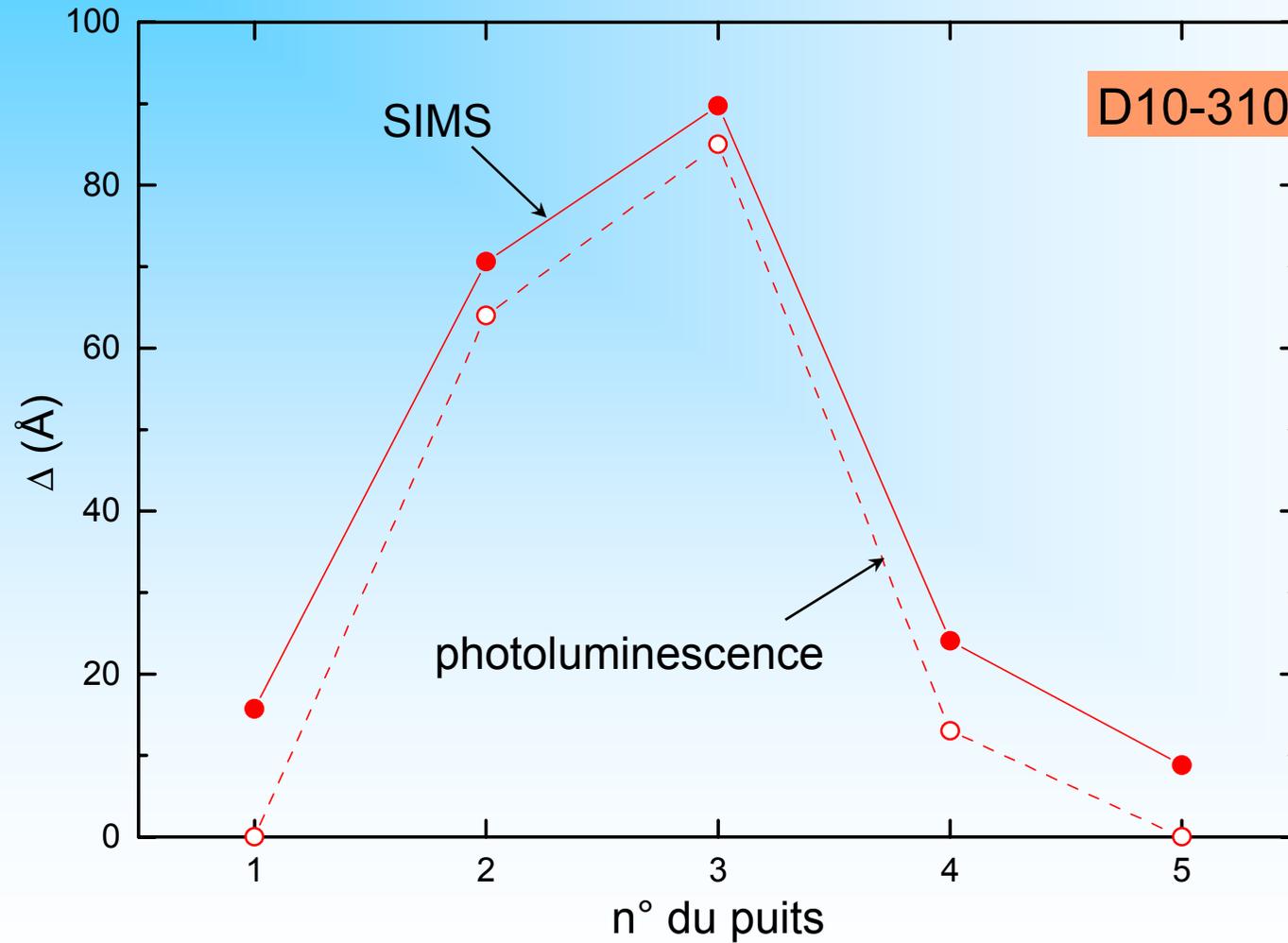
3 paramètres de la fonction de résolution



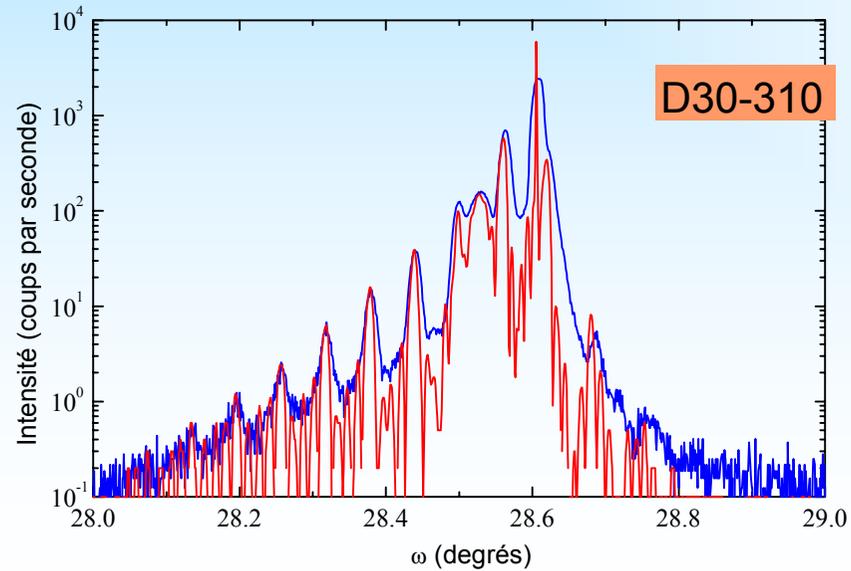
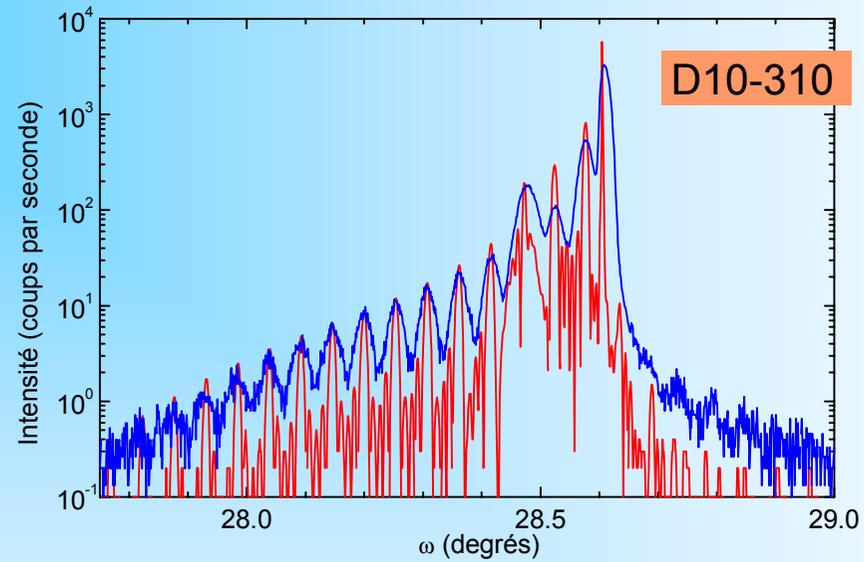
Longueur de diffusion Δ



Comparaison SIMS - photoluminescence



Comparaison SIMS - diffraction X



Diffraction X

- mise en évidence non destructive d'interdiffusion géantes
- ne permet pas de déterminer l'état de l'interdiffusion

Photoluminescence

- plus sensible dans notre cas
- ne permet pas l'attribution des longueurs de diffusion aux puits

SIMS

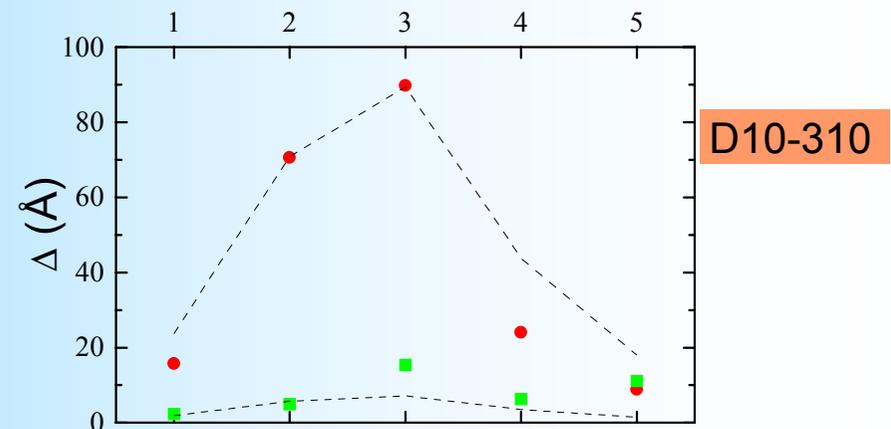
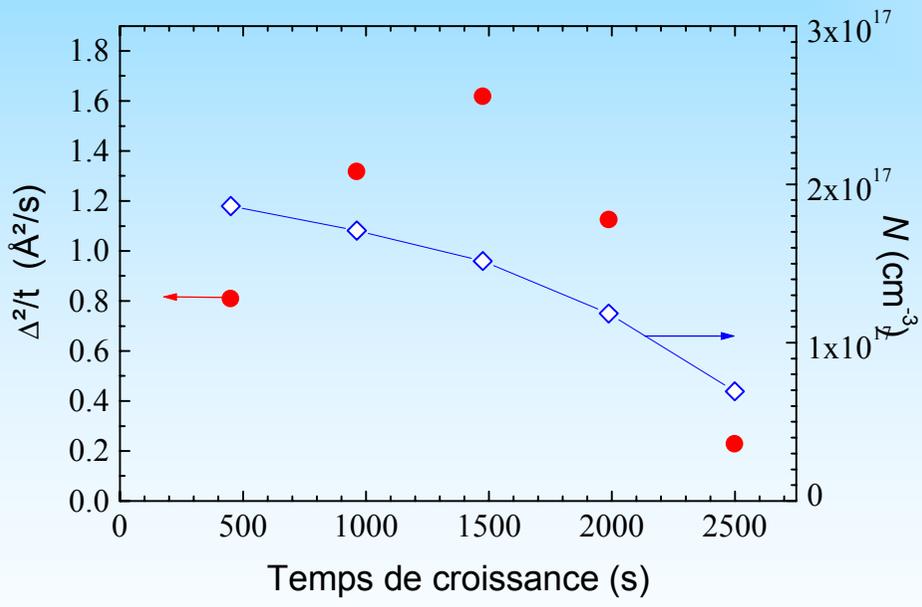
- methode destructive
- permet une détermination complète de l'état d'interdiffusion des puits par comparaison

3 méthodes cohérentes entre elles

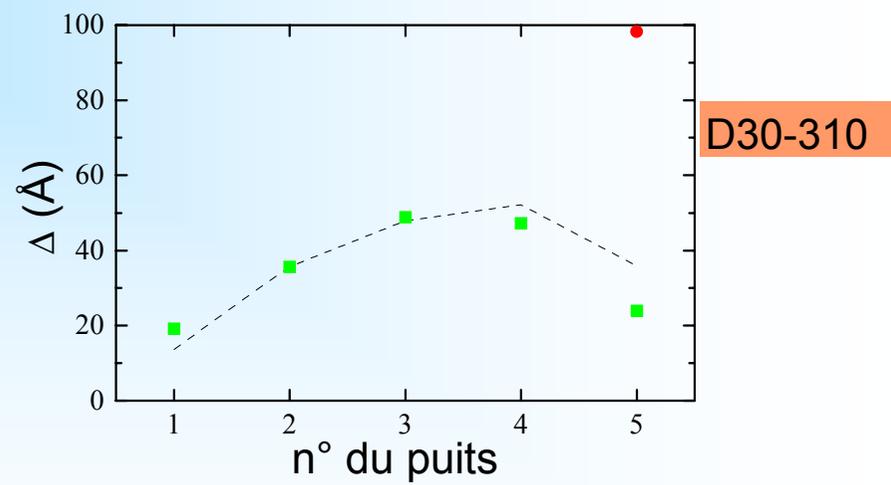
Ségrégation ou diffusion de l'azote ?

$$\Delta^2 = Dt$$

$$D = f[N] \quad \longrightarrow \quad \Delta^2 / t = f[N]$$

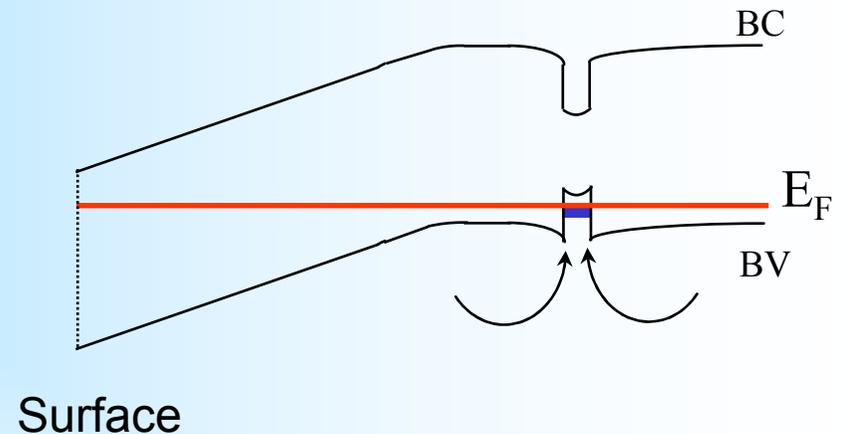
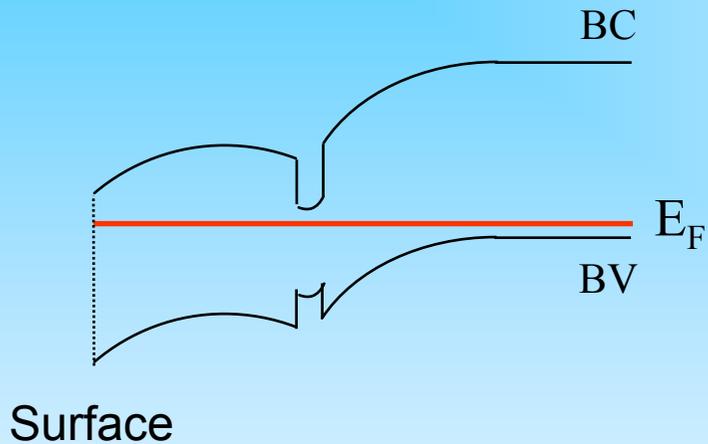


D10-310



D30-310

$$D(t) = \alpha N(t)^3$$

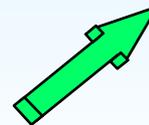


Le niveau de Fermi est épinglé près de la bande de conduction



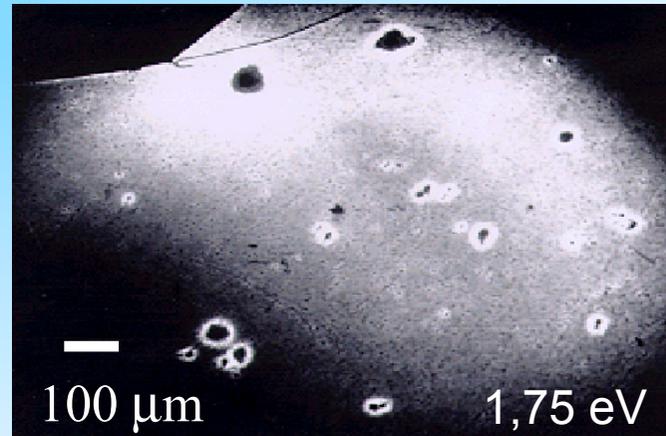
désertion du puits quantique en trous

augmenter la largeur de la partie dopée proche de la surface



Croissance à 220°C

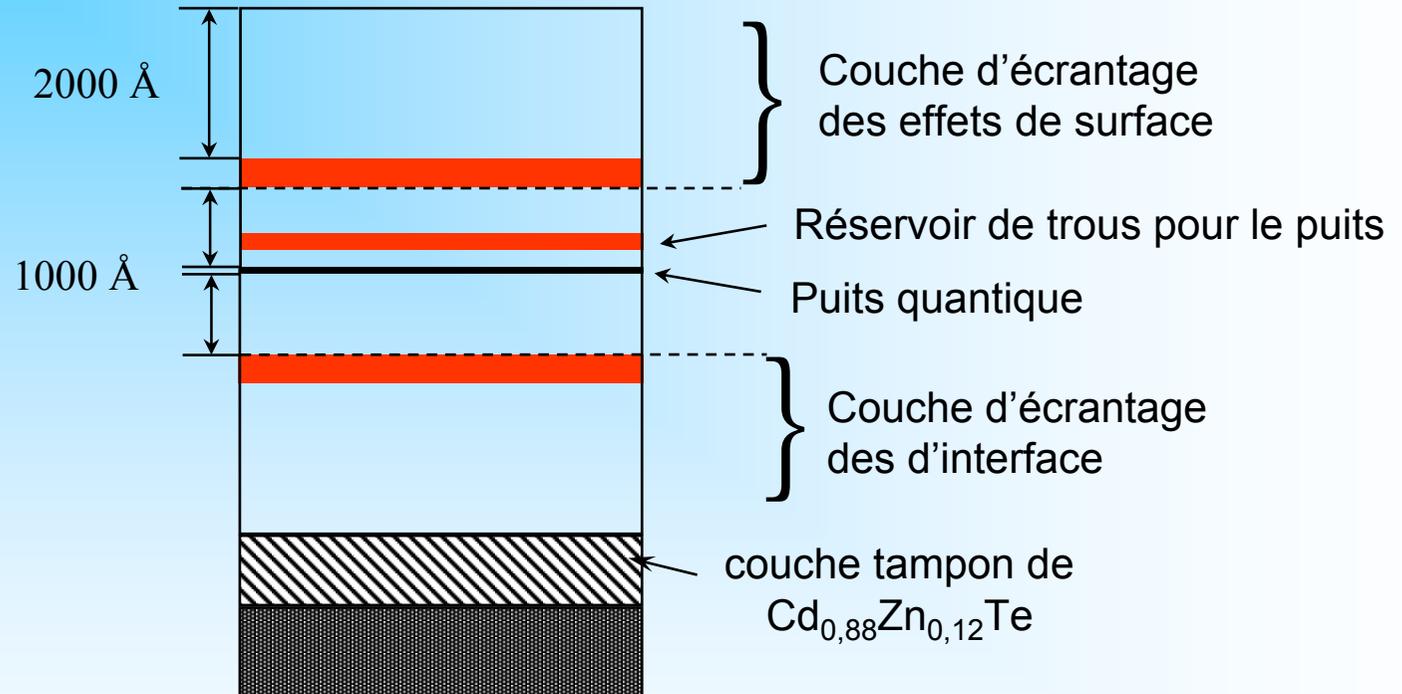
→ présence de défauts structuraux



réduction au maximum de la quantité d'azote



Structure optimisée



Optique

déplacement de Moss-Burstein

Méthode indirecte

Effet Hall

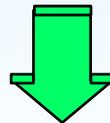
prise de contacts électriques sur un gaz de trous enterré

Méthode directe, mais non systématique

Capacité - Tension

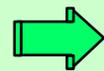
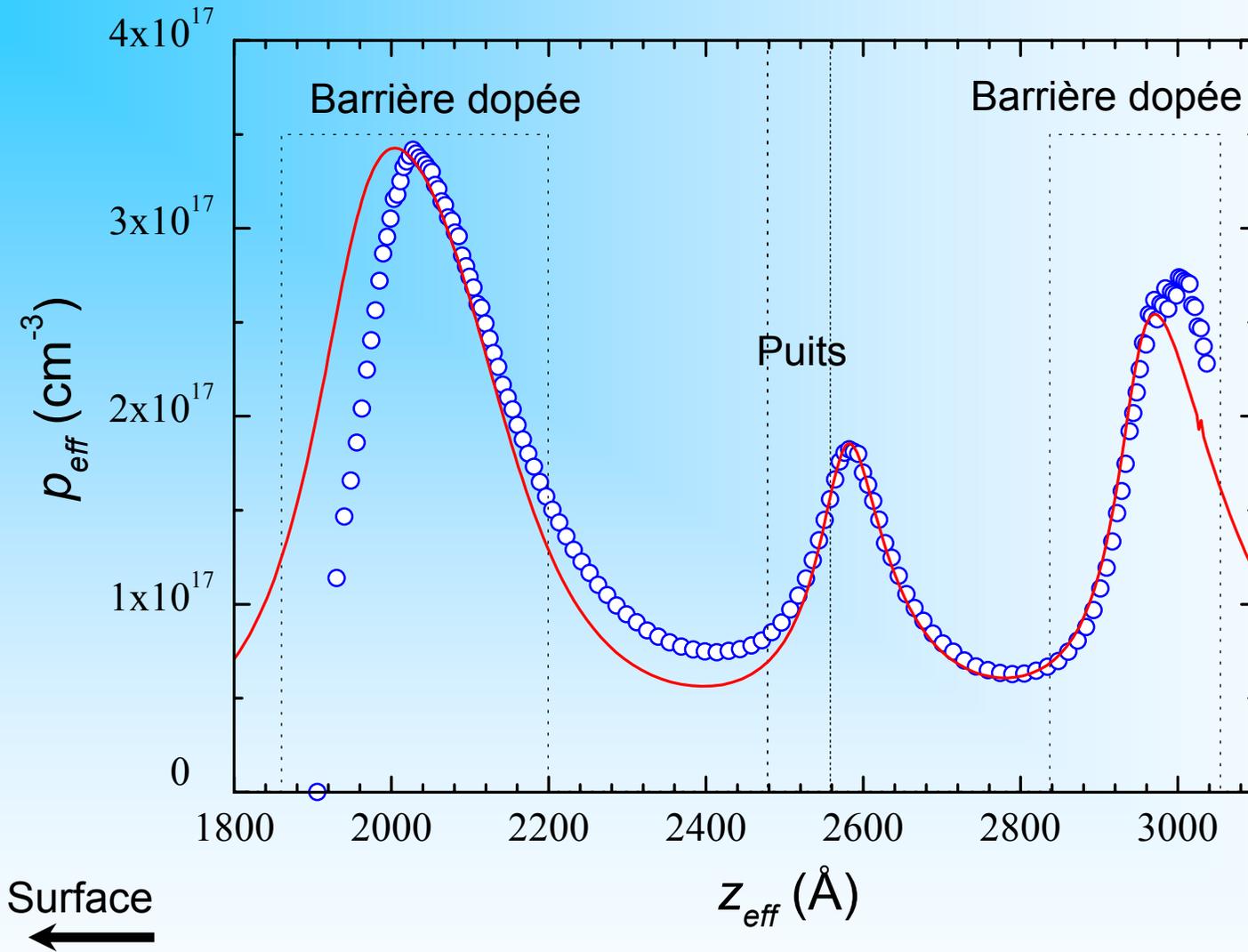
Méthode systématique

a nécessité la modélisation numérique de la courbure de bandes



Densité de trous atteinte suffisante
(quelques 10^{11} cm^{-2})

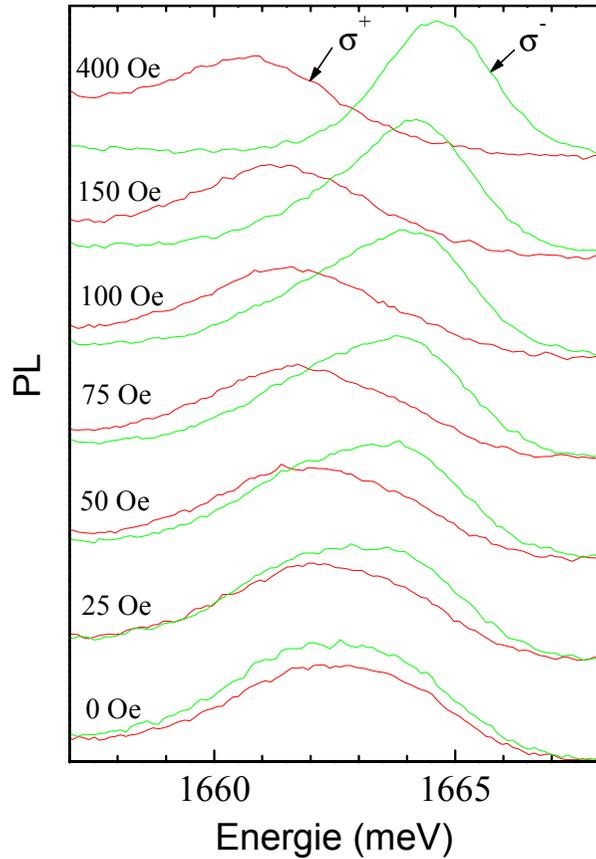
Capacité tension



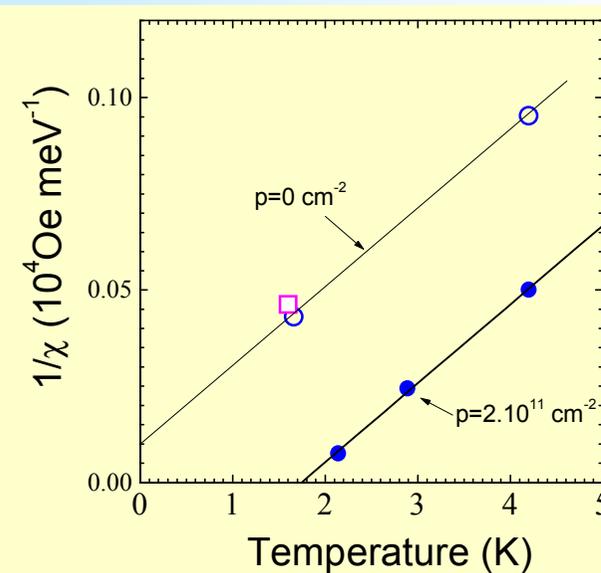
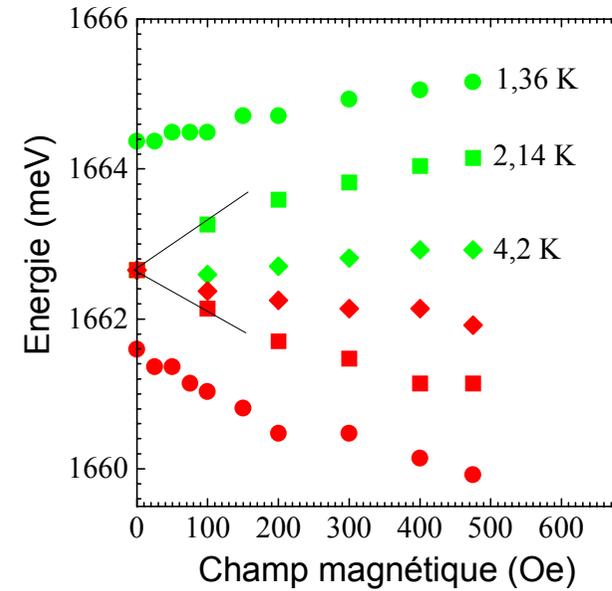
population dans le puits : $p = 3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$
profondeur du puits = 137 meV



Mise en évidence d'une transition de phase ferromagnétique



effet Zeeman géant



Mise au point de l'élaboration

Caractérisation des interfaces et du transfert de charges

Conditions :

- température de croissance basse (220°C) pour empêcher la diffusion de l'azote qui entraîne une interdiffusion des puits quantiques l'apparition de complexes
- structure à un puits unique pour limiter la quantité d'azote
- écranter l'effet d'épinglage du niveau de Fermi près de la bande de conduction en surface

Nombreuses études physiques réalisées sur ces échantillons en collaboration (exciton chargé positivement X^+ , localisation de cet exciton, ...)

et mise en évidence d'une **transition de phase ferromagnétique**

Court terme

améliorer le dopage des barrières pour augmenter la polarisation du système de spins

étudier plus finement les mécanismes d'interdiffusion

poursuivre l'étude sur les contacts électriques à la température de la transition de phase

Long terme

insérer notre système dans des fils ou des boîtes quantiques

déposer des métaux magnétiques dont l'aimantation est perpendiculaire à la surface