

Ecole Franco-Roumaine
Magnétisme des systèmes nanoscopiques
et structures hybrides

Introduction aux couches minces et aux réseaux

Stéphane ANDRIEU

*Laboratoire de Physique des Matériaux,
UMR 7556, CNRS-Université H. Poincaré,
Nancy, FRANCE.*



Plan



Introduction

Les techniques de dépôt

Pulvérisation cathodique

Epitaxie par jets moléculaires, Ablation laser

Electrodéposition

Les phénomènes physiques impliqués pendant la croissance

Adsorption, diffusion, Nucléation

Arrangement atomique, relaxation

Texture, relation d'épitaxie

Modes de croissance, Energie de surface

Influence de la contrainte

Croissance 2D : RHEED et STM

Notion d'auto-organisation

Exemple : jonctions tunnel magnétiques

croissance de la barrière

croissance de la 2ème électrode

problème de continuité de la barrière

Obtention d'objet à l'échelle nanométrique

Conclusion

Introduction

Intérêt des dépôts en films minces

- ✓ Croissance de film plan épaisseur 1-100 nm
- ✓ amorphe, polycristallin, épitaxié
- ✓ surface plane sur de grande dimension, rugosité très faible
- ✓ contrôle des épaisseurs à l'échelle de l'angström

Intérêts pour le magnétisme :

- ☞ démagnétisant : anisotropie $\perp$ (CoPt)
- ☞ couplage entre couches magnétiques à travers une couche non magnétique très fine :
magnétorésistance géante (Fe/Cr en 88)
- ☞ effets de taille (T_c , structures en domaine,...)

Les techniques de dépôts

Principe de la casserole d'eau chauffée

expérience en école primaire



Nous avons fait chauffer l'eau
jusqu'à ébullition.

*Nous avons remarqué que de la vapeur
d'eau s'échappait au-dessus de la
casserole.*

*Explication: L'eau s'évapore sous
l'action de la chaleur: l'évaporation.*

*Ensuite, Guy a mis le plat en verre
pendant 10 secondes*

Le fond du plat s'est recouvert de buée.

*Explication: La vapeur quand elle
refroidit, se condense en fines
gouttelettes d'eau: la condensation.*

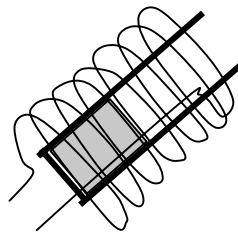
**Même chose pour dépôt de films minces
sauf qu'on veut évaporer Fe, Co, Ni,.....!!!
Sur un substrat "froid": verre, monocristaux**

Les techniques de dépôts

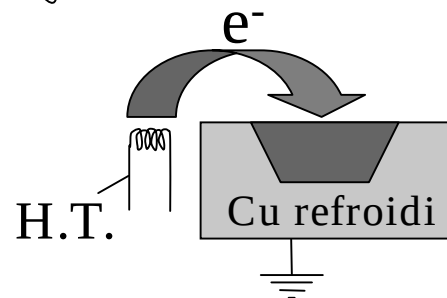
**Comment avoir un flux
d'atomes / molécules ?**

Chauffage jusqu'à évaporation ou sublimation :

**Cellule de Knudsen
(300-1300K)**



**Canon à électrons
(jusqu'à 4000K)**



Creuset résistif (300-....)



Pulvérisation d'une cible :

Pulvérisation cathodique : on utilise des ions

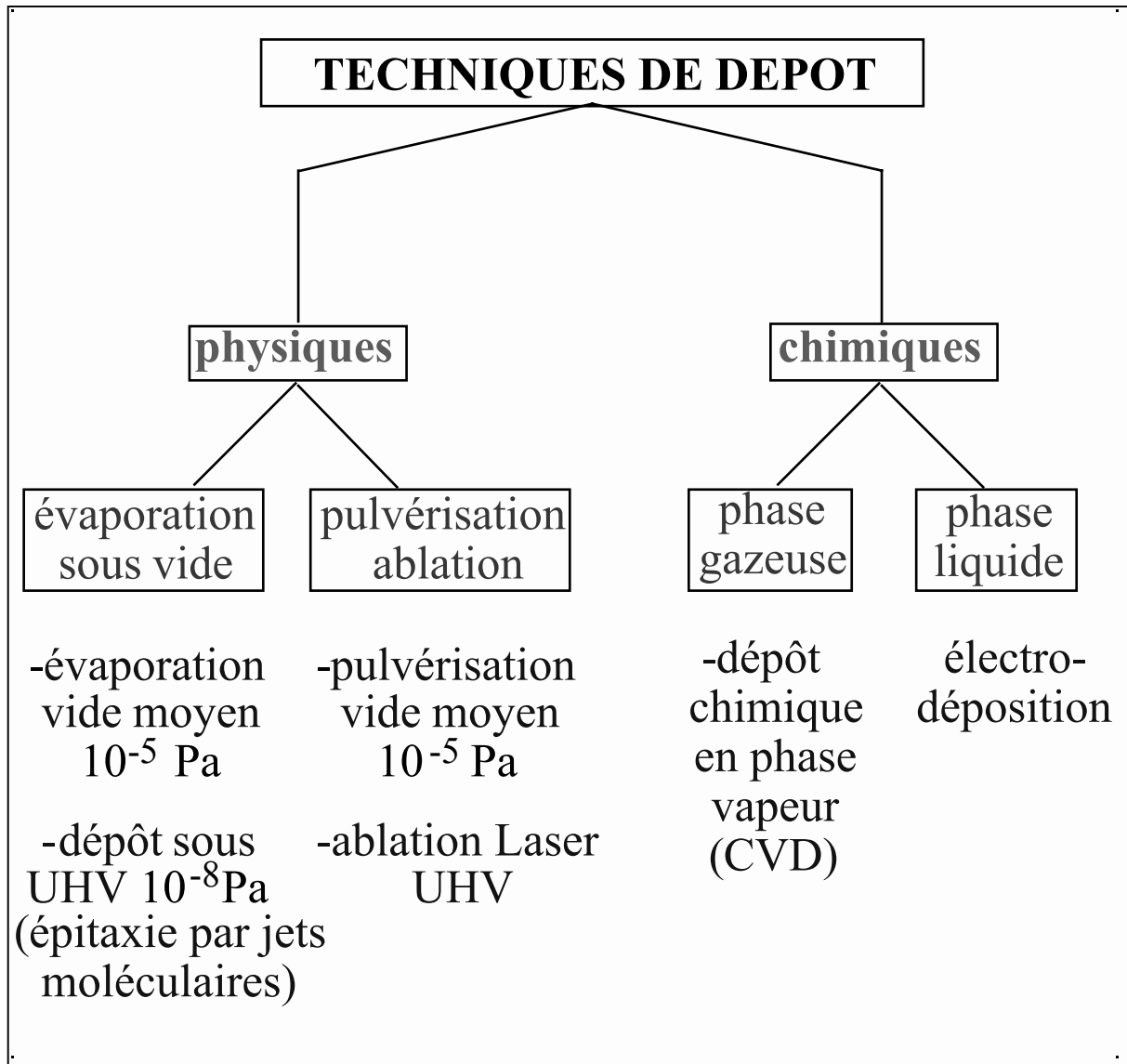
Ablation laser : on utilise un laser puissant

Chimie :

Décomposition d'un gaz à la surface (CVD)

Oxydo-réduction : électrolyse

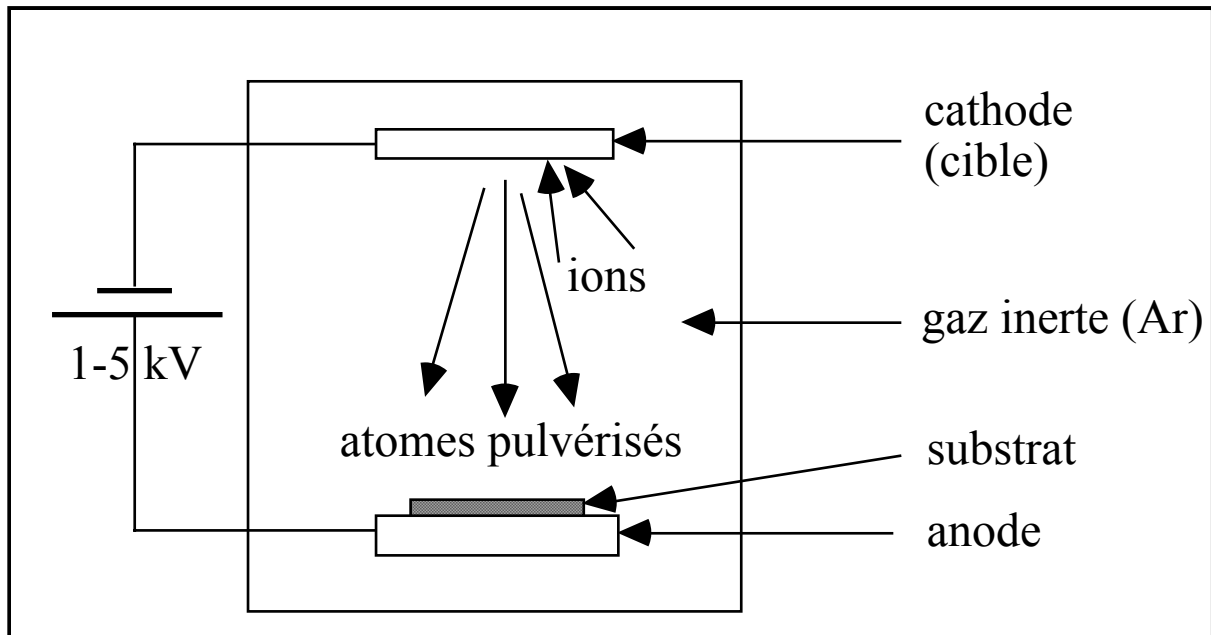
Les techniques de dépôts



- ✓ **Contraintes : interdiffusion des métaux**
⇒ **température faible : méthodes physiques**
- ✓ **Electro-déposition donne de bons résultats**

Les techniques de dépôts

La pulvérisation cathodique



décharge auto-entretenu qui ionise un gaz inerte
pression 1 à 500 mtorr

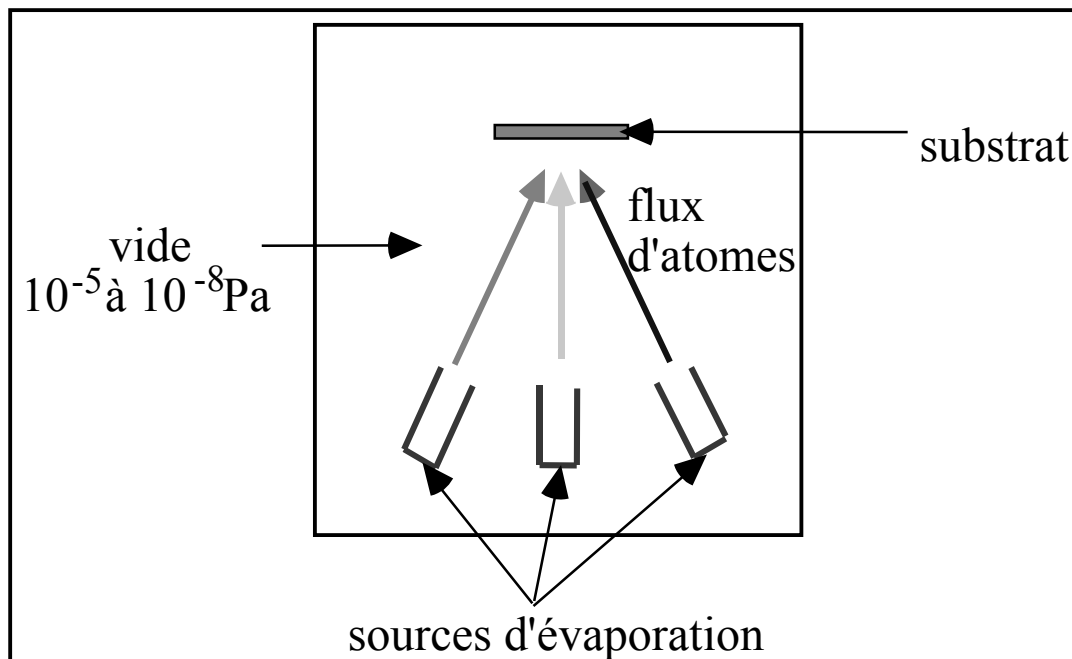
Procédé triode : source d'électrons supplémentaire
permet de baisser la pression de gaz 0,1 mtorr

Procédé radio-fréquence : on applique à la cible une
tension alternative 13 ou 27 MHz. permet la
pulvérisation d'isolants. pression 1-500 mTorr

Procédé magnétron : confinement du plasma près de la
cible par champ magnétique. pression 0,5-5 mTorr

Les techniques de dépôts

L'évaporation sous vide



libre parcours moyen : 5 m à 10⁻³ Pa, 50km à 10⁻⁷ Pa !

pas de choc, pas de pression : théorie cinétique des gaz

Quel vide choisir ?

vitesse de croissance du matériau $\gg$ vitesse de croissance des impuretés constituant le gaz résiduel.

Ex: 0,2 s à 10⁻³ Pa, et 40 min à 10⁻⁷ Pa pour de l'air à 25°C

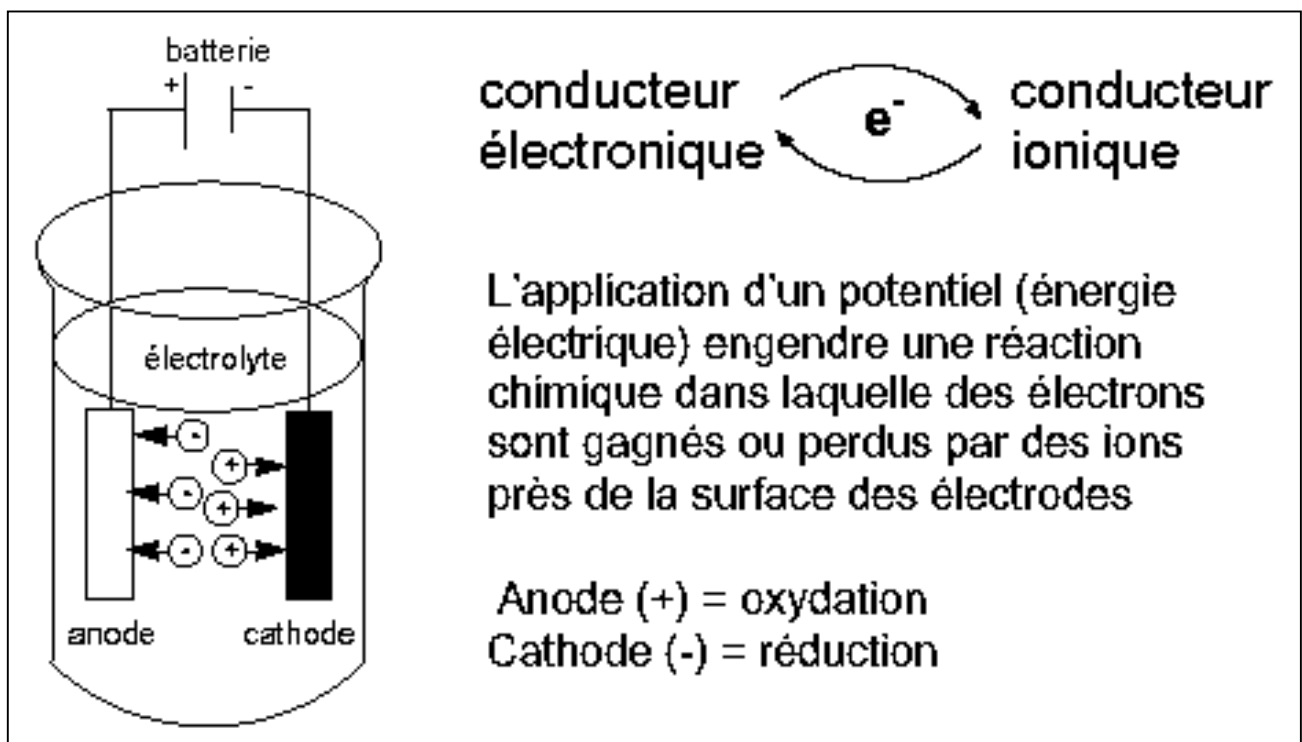
épitaxie : basse vitesse (monocouche/s) $\Rightarrow$ UHV 10⁻⁸ Pa

Nom des techniques change avec moyen d'évaporation

- solide évaporé : épitaxie par jets moléculaires MBE
- source gaz : CBE, MOMBE,....
- cible+laser : ablation laser

Les techniques de dépôts

Dépôt électrochimique



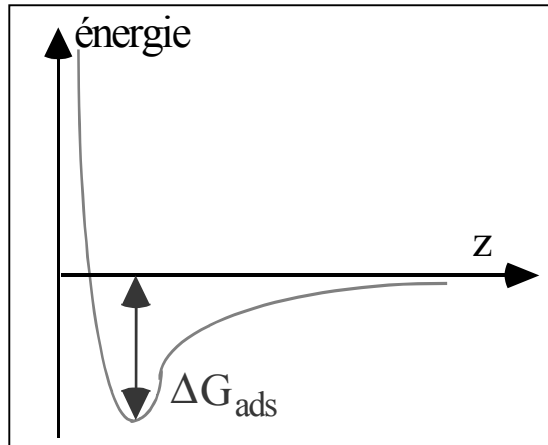
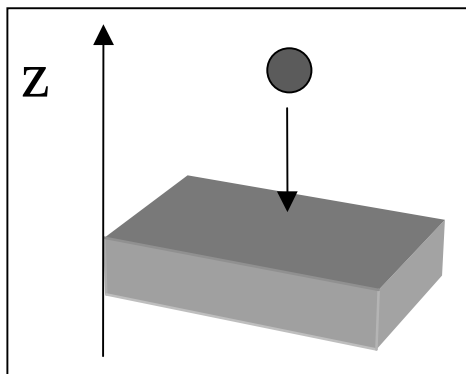
Par un choix judicieux des solutions électrolytiques, et en jouant sur le potentiel appliqué, possibilité de réaliser des multicouches

exemple : $\text{Cu}^{2+}(\text{aqueux}) + 2e^- \rightarrow \text{Cu}^0(\text{solide})$

**Avantages : très pur, peu coûteux, rapide
mais on ne peut pas tout faire !**

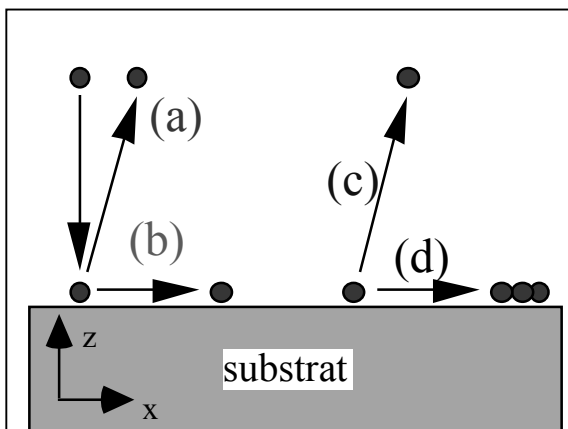
Physique de la croissance

L'atome arrive à la surface...



Il "voit" un potentiel de surface

Plusieurs mécanismes



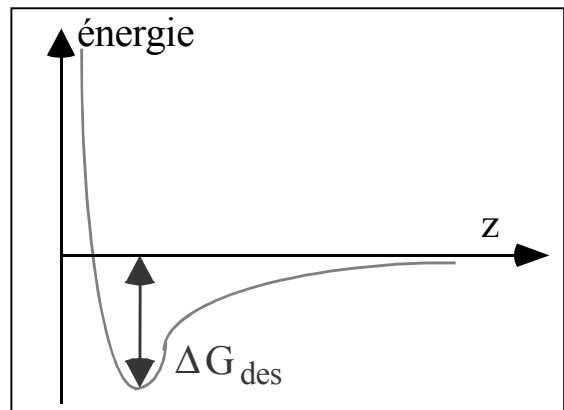
(a) : réflexion sur la surface
(b) : adsorption et diffusion
(c) : désorption d'un atome
(d) : condensation

Physique de la croissance

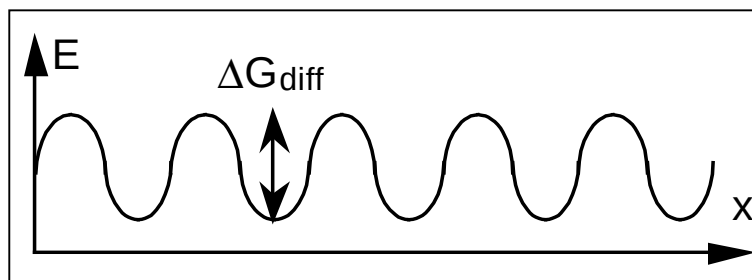
S'il reste à la surface : adsorption

**Combien de temps ?
Maxwell-Boltzman**

$$\tau = \tau_o \exp \frac{\Delta G_{des}}{kT}$$



Il "voit" encore un potentiel selon x,y



Diffusion par saut : encore Maxwell-Boltzmann

$$\nu = \nu_o \exp \frac{-\Delta G_{diff}}{kT}$$

$$x_s^2 = D_s \tau_{diff} = D_s / \nu$$

Physique de la croissance

Quelques ordres de grandeur

Energie de désorption : 2 à 4 eV

temps de désorption à 300K : $> 10^{20}$ s pour 2eV

à 800K : 10^{12} s pour 4eV, 1s pour 2 eV

à 1300 K : 100s pour 4eV, 10^{-6} s pour 2eV

Pour les métaux, plutôt 4 eV, et température de dépôt modérée (interdiffusion) : pas de désorption

Energie de diffusion : 0.1 à 1 eV

fréquence de sauts à 300K :

10^{11} s⁻¹ pour 0.1eV, 10^{-4} s⁻¹ pour 1eV

Pour les métaux, plutôt 0.1 eV, diffusion de surface importante même à l'ambiante

Pour les semi-conducteur, plutôt 1 eV, donc il faut chauffer pour avoir de l'ordre cristallo !

Physique de la croissance

Quelques ordres de grandeur

Diffusion de surface aisée dans le cas des métaux

systeme	Fe/ Fe(001)	Ni/ Ni(111)	Ag/ Ag(111)	Fe/ Mo(110)
E_{diff} (eV)	0.45	0.33	0.15	0.1

Mais attention à l'interdiffusion

system	Mn/ Fe(001)	Ni/ Fe(001)	Fe/ Cu(001)	Mn/ Ni(001)
T_{diff} (C)	≈ 100	≈ 200	≈ 150	RT

Conséquence :

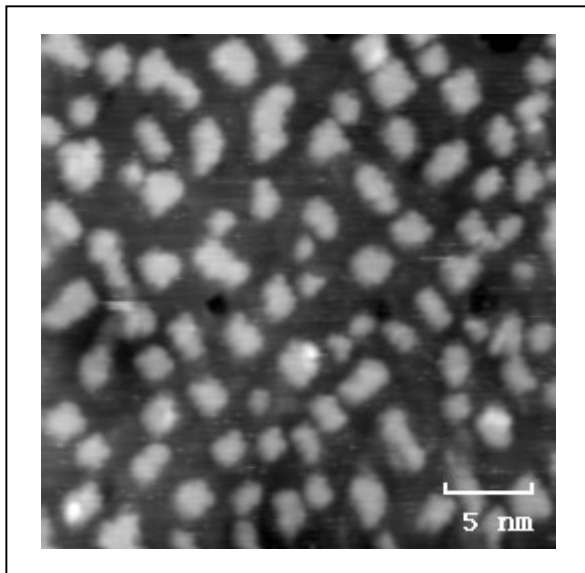
dépôts des métaux "toujours" polycristallins
sauf à très basse température

Monocristal (épitaxie) à l'ambiante

Physique de la croissance

Que se passe-t-il quand plusieurs atomes sont en surface ?

Diffusion de surface : les atomes se rencontrent $\Rightarrow$ condensation en "paquets" d'atomes appelés îlots : nucléation



**densité d'îlots en surface
 N dépend du coefficient
de diffusion D , ainsi que
du flux incident F**

$$N = \frac{1}{L^2} \propto \left(\frac{Flux}{D} \right)^\alpha$$

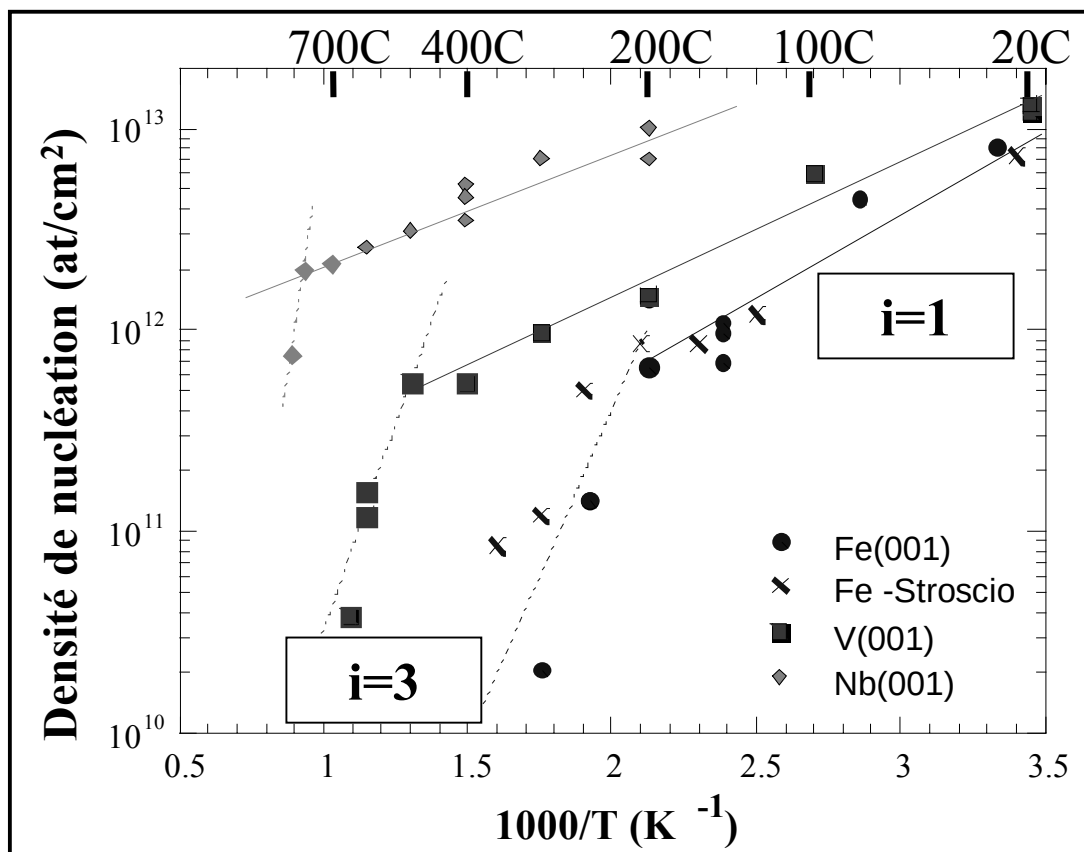
îlots stables si taille critique de i atomes : $\alpha = \frac{i}{i+2}$

**d'où : $N \propto \exp E_{nucl} / kT$ $E_{nucl} = \frac{E^* + iE_{diff}}{i+2}$
avec E^* énergie de cohésion du germe critique**

Physique de la croissance

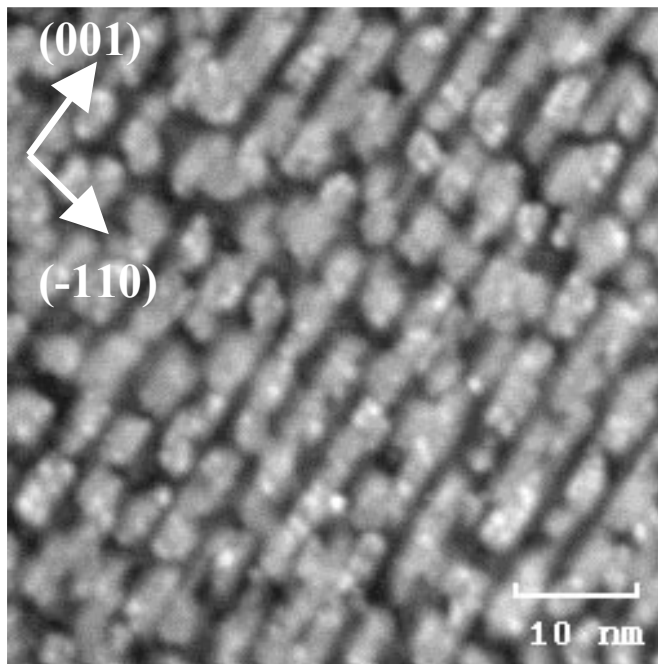
Que se passe-t-il quand plusieurs atomes sont en surface ?

Si la taille critique change avec la température, la densité de nucléation change via E_{nucl}

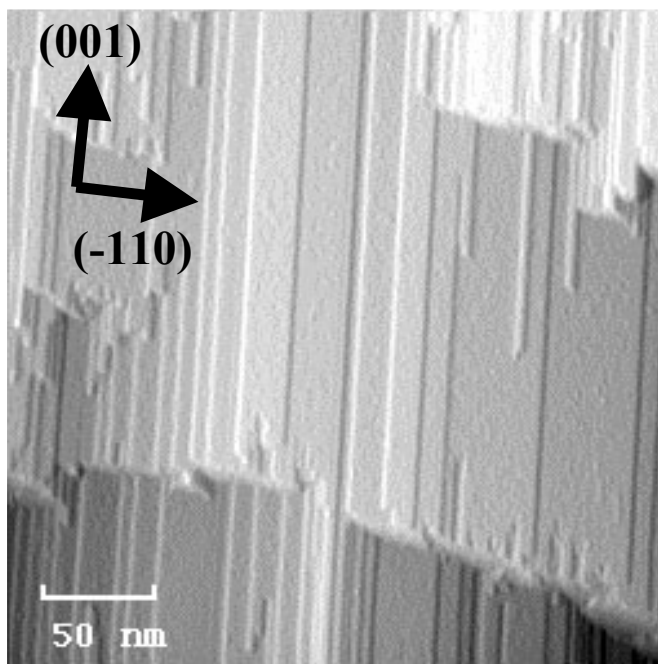


Physique de la croissance

Diffusion anisotrope et nucléation



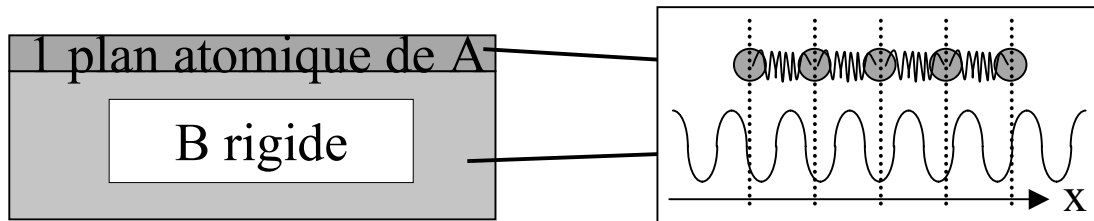
**Surface (110)
du vanadium**



**Conséquence :
conduit à des
formes
"allongées"**

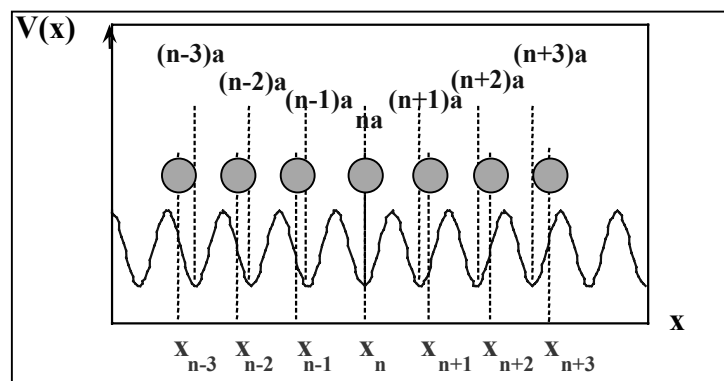
Physique de la croissance

Et l'arrangement atomique de A/B ? Modèle de Frank - Van der Merwe



B paramètre b, infiniment rigide
A paramètre a en massif

A tiré au minima des puits : $V = \frac{1}{2}W \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{b} \right)$
et tiré pour avoir a entre voisins $\frac{1}{2}k(x-a)^2$



$$E_{tot} = \frac{1}{2}W \sum_{n=0}^{N-1} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi x_n}{b} \right) \right) + \frac{1}{2}K \sum_{n=0}^{N-1} (x_n - x_{n-1} - a)^2$$

Physique de la croissance

Modèle de Frank - Van der Merwe

on pose ξ_n tel que $x_n = b(n + \xi_n)$ d'où :

$$E_{tot} = \frac{W}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \left[(1 - \cos 2\pi \xi_n) + 2l_o^2 (\xi_n - \xi_{n-1} - f)^2 \right]$$

$$l_o = Kb^2/2W$$

$f = (a-b)/b$ désaccord paramétrique entre A et B

On minimise et on pose $\Delta^2 \xi_n = \xi_{n+1} - 2\xi_n + \xi_{n-1}$:

$$\Delta^2 \xi_n = \frac{\pi}{2l_o^2} \sin 2\pi \xi_n$$

A priori toujours 2 solutions :

$\xi_n = 0$ pour tout n.

A adopte le paramètre l

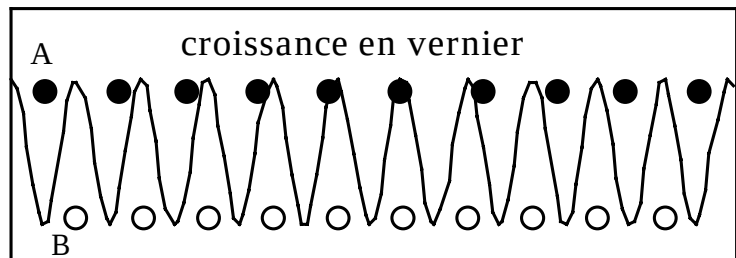
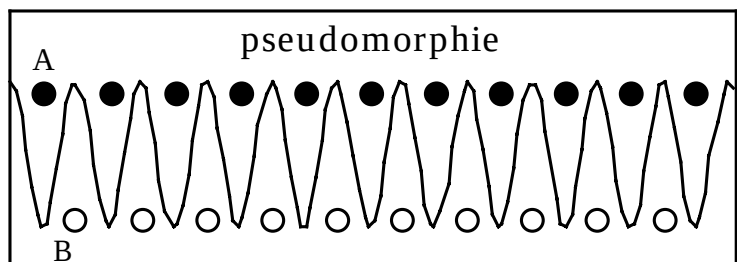
pseudomorphie

localisation

Numérisation

croissance en vernier

délocalisation



Physique de la croissance

Modèle de Frank - Van der Merwe

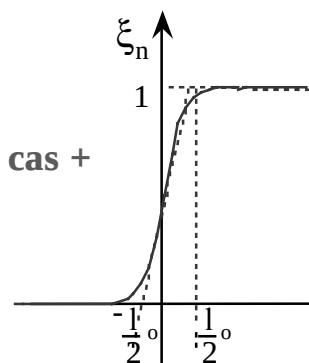
Cas particulier des faibles déformations :

$$\Delta^2 \xi_n \approx \frac{d^2 \xi_n}{dn^2} = \frac{\pi}{2l_o^2} \sin 2\pi \xi_n$$

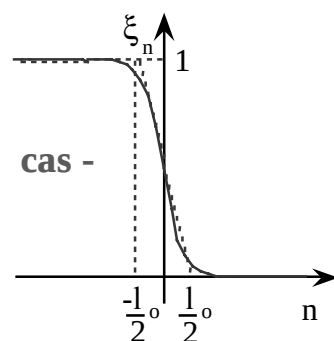
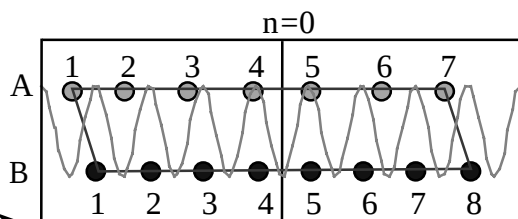
1ère intégration

$$\frac{d\xi_n}{dn} = \pm \frac{1}{ql_o} \sqrt{1 - q^2 \cos^2 \pi \xi_n} \quad \frac{1}{q^2} = 1 + l_o^2 \left(\frac{d\xi_n}{dn} \right)^2_{\xi_n=0}$$

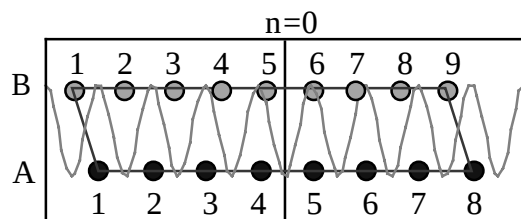
Cas particulier $q=1$: $\xi_n = \frac{2}{\pi} \arctg \left(\exp \pm \frac{\pi n}{l_o} \right)$



On perd un atome de A / B



On gagne un atome de A / B



Dislocation

l_o étendue
de la disloc

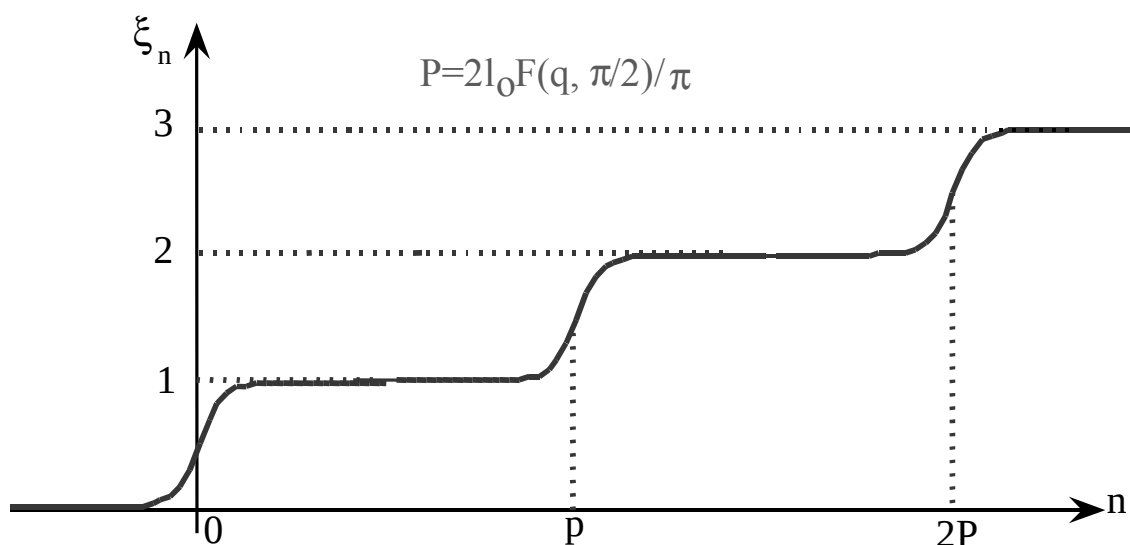
qq
distances
atomiques

Physique de la croissance

Modèle de Frank - Van der Merwe

Cas général $q > 1$

réseau de dislocations



**Conclusion toujours 2 solutions :
pseudomorphie ou relaxation
laquelle est la plus stable ?**

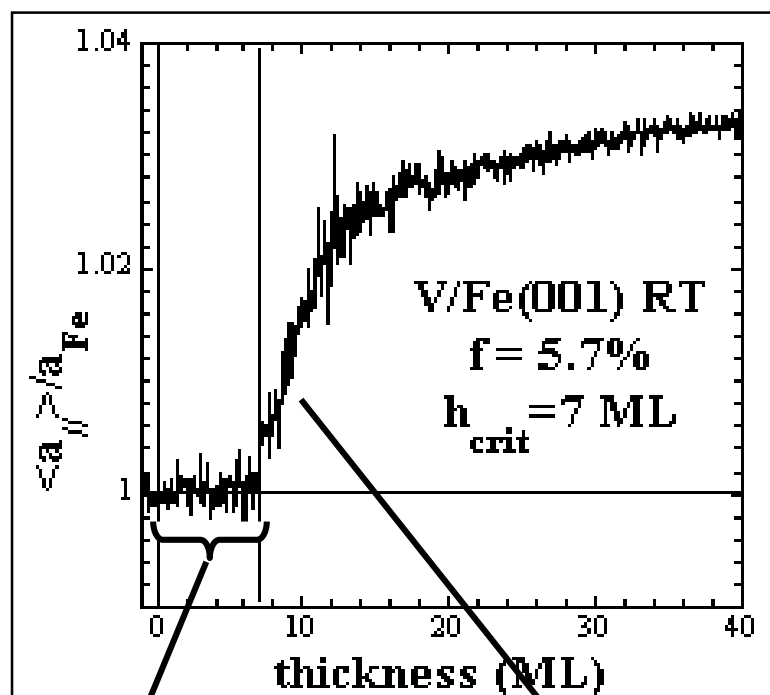
Celle la moins coûteuse en énergie

**énergie élastique augmente avec épaisseur $\Rightarrow$
épaisseur critique, passage de pseudomorphie
à relaxation plastique**

Physique de la croissance

Modèle FM : Est-ce que ça marche ???

**épaisseur critique :
mesure du paramètre dans le plan (diffraction d'e⁻)**



Pseudomorphie

Relaxation plastique

**Semi-conducteur : f petit 0.1 à 2%
 h_c jusqu'à plusieurs centaines de nm**

Métaux

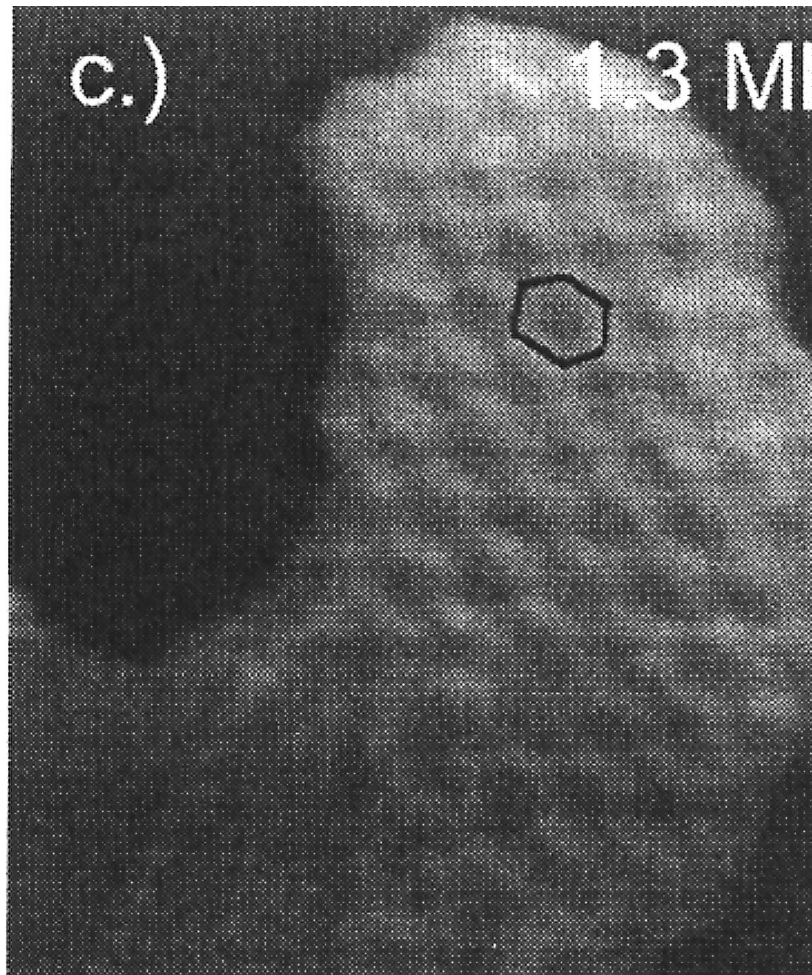
**h_c toujours petit : qq plans atomiques
(barrière à la création de disloc faible)**

Physique de la croissance

Modèle FM : Est-ce que ça marche ???

Réseau de dislocations

Fe/Mo(110) $f=-8.7\%$



from Malzbender, Surf. Sci. 1998

Physique de la croissance

A adopte-t-il toujours le réseau de B ?

Si A interagit peu avec B

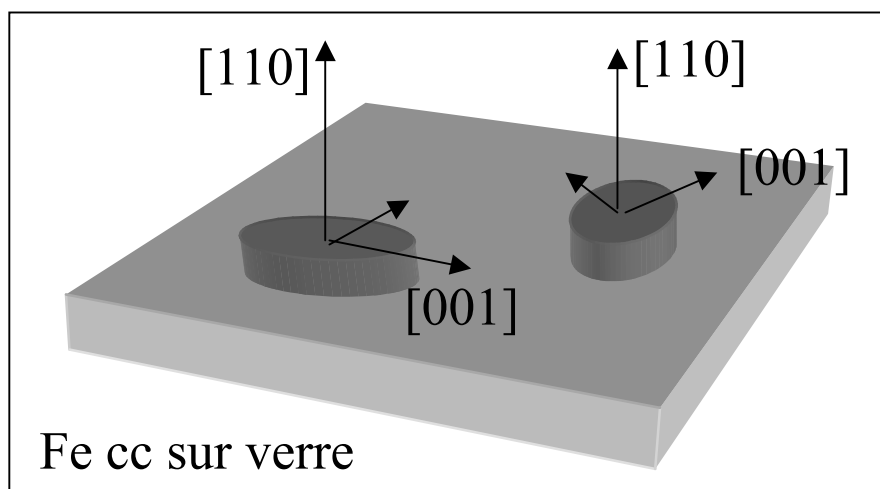
modèle de FM : W faible, alors délocalisation

En fait, c'est la minimisation de l'énergie, et donc de l'énergie de surface qui l'emporte

**⇒ plan cristallo de plus faible énergie de surface
= plan dense**

Exemple : dépôts sur substrat de verre

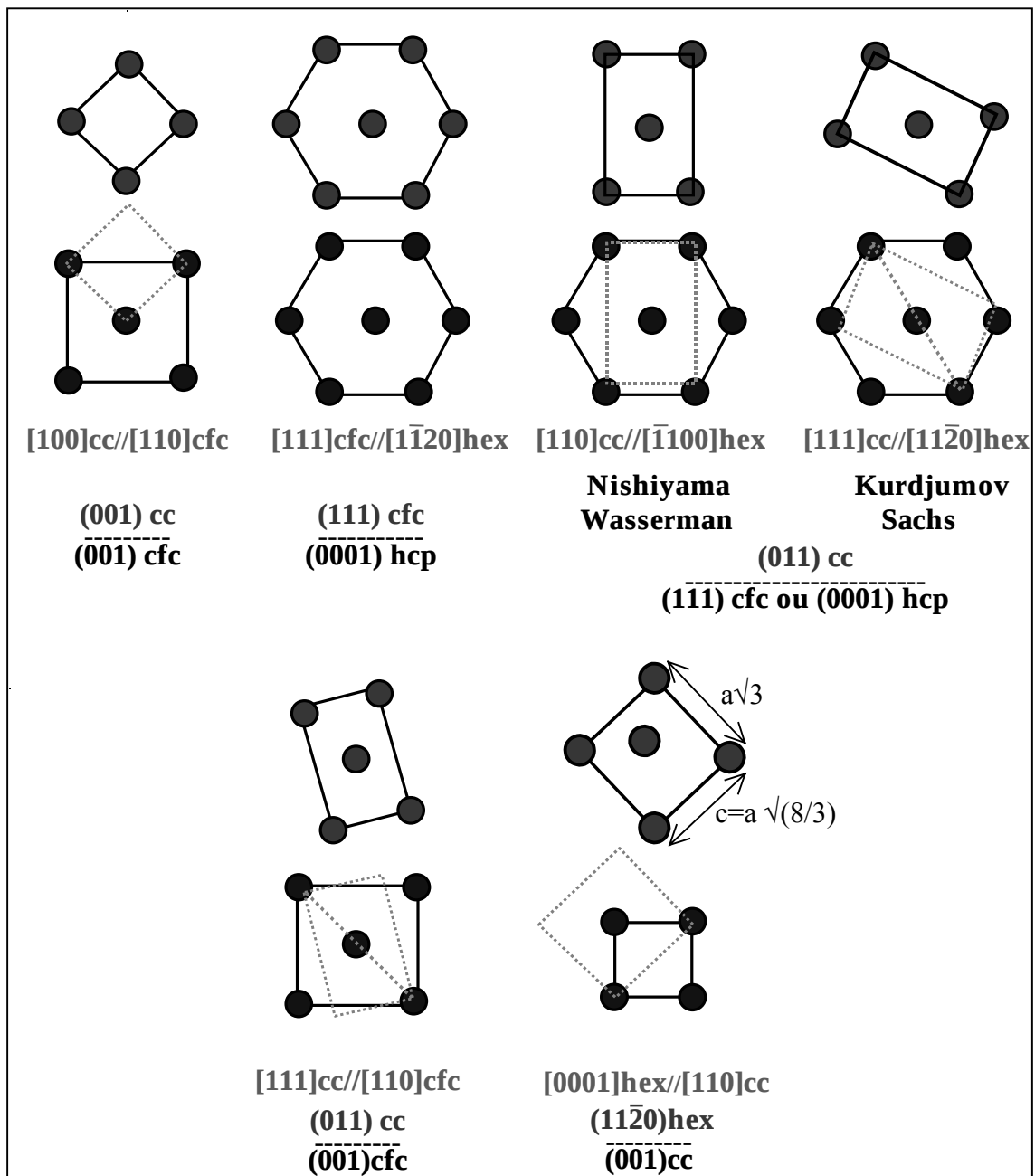
**dépôts texturés avec plan dense en surface
structure cc→(110), cfc(111), hcp(0001)**



Physique de la croissance

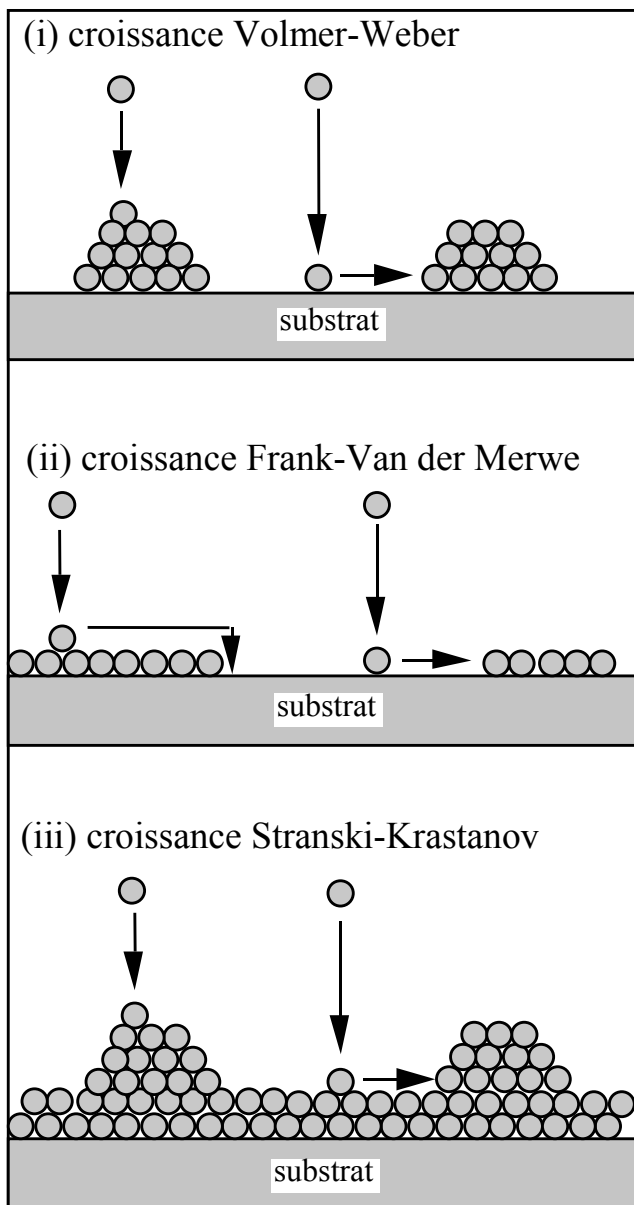
Comment s'arrange le réseau de A sur B ?

Si A interagit beaucoup avec B : épitaxie



Physique de la croissance

**FM impose une nucléation 2D.
en réalité ? modes de croissance**



Croissance en îlots 3D

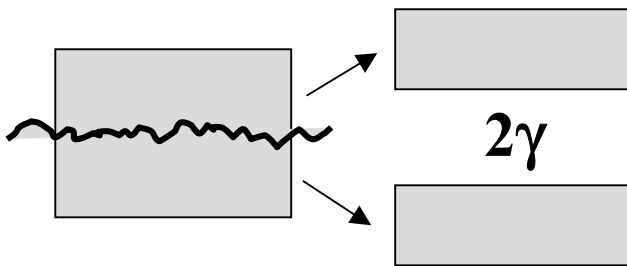
Croissance couche par couche, 2D

**Croissance d'abord 2D
puis 3D**

**Pourquoi ? Minimisation de l'énergie, avec
énergie de surface et d'interface, contrainte**

Physique de la croissance

Qu'est ce que l'énergie de surface ?



Pour créer une surface, il faut fournir de l'énergie :
 γ énergie / unité surface

Travail fourni pour agrandir la surface de dA
pas de déformation élastique, N/A constant :

$$dW = \gamma dA$$

avec déformation élastique, N/A non constant :

$$dW = g dA = \left(\gamma + A \left. \frac{\partial \gamma}{\partial A} \right|_{\mu, T} \right) dA$$

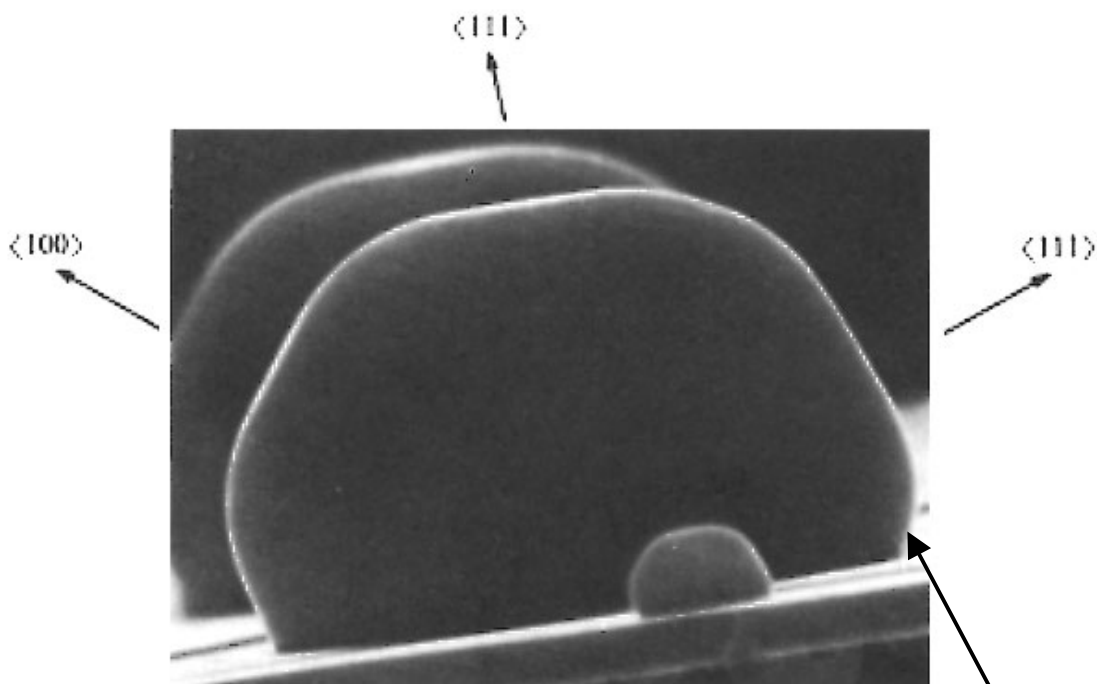
γ dépend du plan cristallo. Plus le plan est dense, plus γ est faible (modèle de liaisons coupées)

Physique de la croissance

Influence sur la forme des îlots 3D (équilibre) ?

**Le moteur est toujours le même
minimiser l'énergie du système, donc de la surface
Comment ? Développer des faces denses**

Pb cfc déposé sur graphite (Heyraud et Métois)

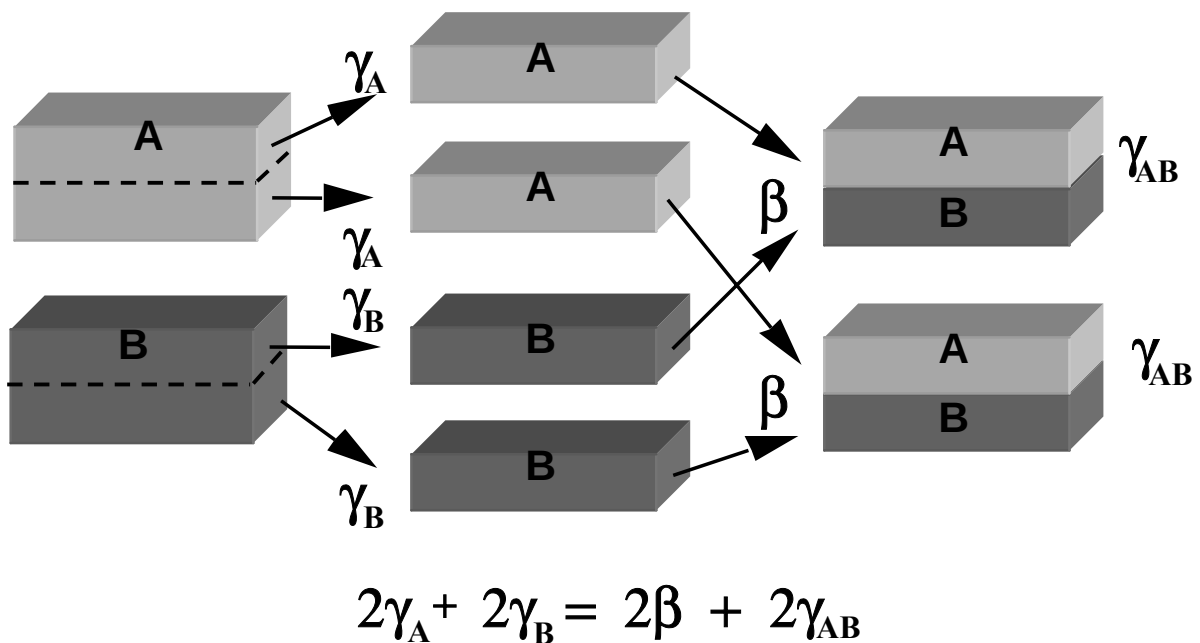


**Croissance en plan dense (111)
apparition de facettes (111) et (100)**

Remarque : angle de mouillage ?

Physique de la croissance

Relation entre adhésion et énergie de surface : formule de Dupré



γ_A énergie de surface de A (idem pour B)

γ_{AB} énergie d'interface AB

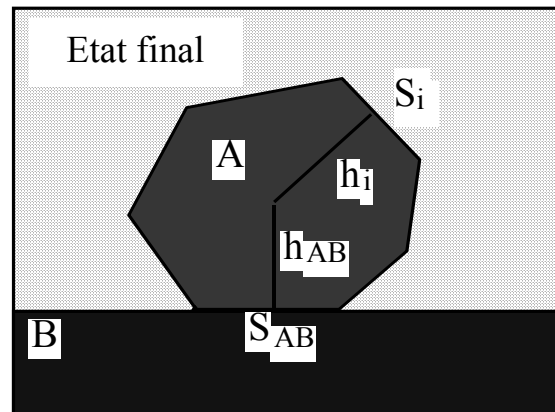
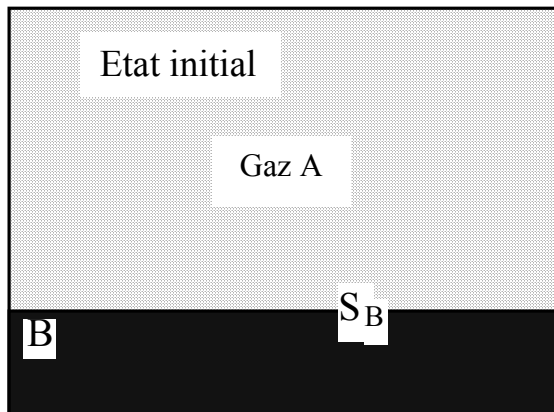
β énergie d'adhésion

Il y a adhésion si β est positif

(β négatif = gain d'énergie en décollant la couche donc pas adhésion)

Physique de la croissance

Formules de Wulf généralisées



$$\Delta G = -n\Delta\mu + \sum_i \gamma_i S_i + (\gamma_{AB} - \gamma_B) S_{AB}$$

$\Delta\mu$ différence de potentiel chimique gaz-solide

$n=V/v$ nombre d'atomes de A dans le noyau

$d(\Delta G)$ doit être nul d'où

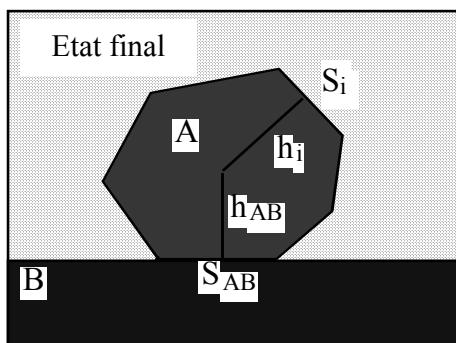
$$-\frac{dV}{v}\Delta\mu + \sum_i \gamma_i dS_i + (\gamma_{AB} - \gamma_B) dS_{AB} = 0$$

Or $dV = \frac{1}{2} \sum_i h_i dS_i$

$$\sum_i \left(\gamma_i - \frac{h_i \Delta\mu}{2v} \right) dS_i + \left(\gamma_{AB} - \gamma_B - \frac{h_{AB} \Delta\mu}{2v} \right) dS_{AB} = 0$$

Physique de la croissance

Formules de Wulf généralisées



$$\frac{\Delta\mu}{2\nu} = \frac{\gamma_i}{h_i} = \frac{\gamma_{AB} - \gamma_B}{h_{AB}} = \frac{\gamma_A - \beta}{h_{AB}}$$

$\beta \leq 0$, nucléation en phase gazeuse

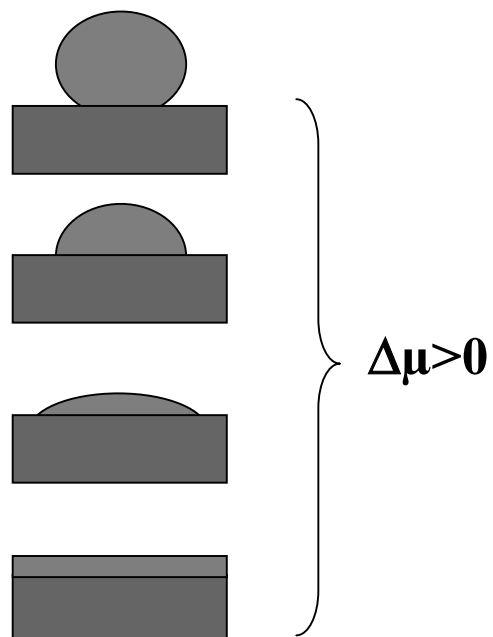
$\beta > 0$, nucléation en surface, $h_{AB} < h_A$

si $\beta < \gamma_A$ alors $h_{AB} > 0$

si $\beta = \gamma_A$ alors $h_{AB} = 0$

si $\gamma_A < \beta < 2\gamma_A$, $h_{AB} < 0$

si $\beta > 2\gamma_A$ alors $h_{AB} \rightarrow -h_A$

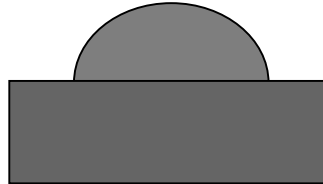


critère de Bauer: $\gamma_{AB} + \gamma_A - \gamma_B < 0$ croissance 2D

*Remarque : n'explique pas le mode
Stranski-Krastanov 2D $\rightarrow$ 3D*

Physique de la croissance

Taille critique des noyaux 3D



On refait le bilan en énergie, en faisant apparaître n le nombre d'atomes dans l'îlot : en 3D

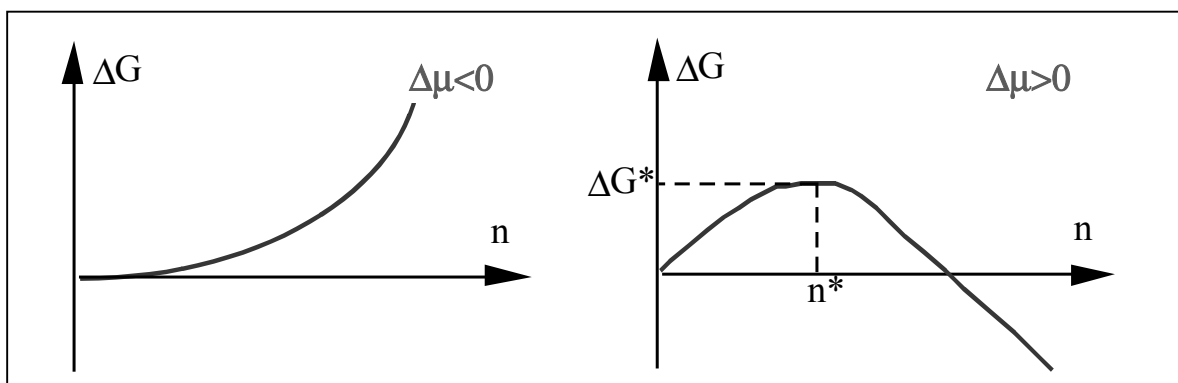
$$\Delta G_{3D} = -n\Delta\mu + n^{\frac{2}{3}}X$$

avec

$$X = \sum_i \gamma_i c_i + c_{AB}(\gamma_{AB} - \gamma_B)$$

Minimisation de l'énergie conduit à : $n_{3D}^* = \left(\frac{2X}{3\Delta\mu} \right)^3$

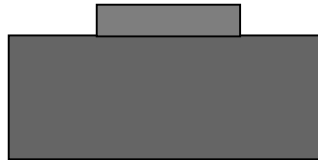
On retrouve $\Delta\mu > 0$ pour condensation



Barrière à la nucléation : noyau critique

Physique de la croissance

Taille critique des noyaux 2D



$$\beta > 2\gamma_A$$

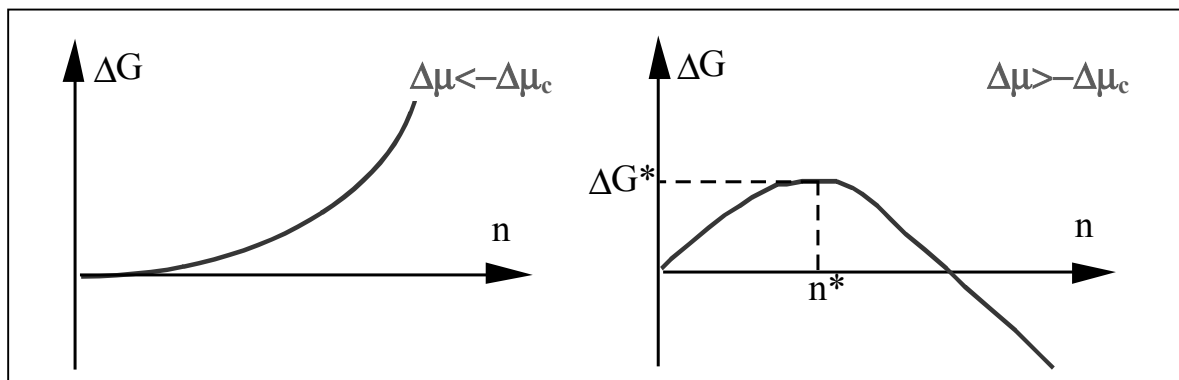
Il faut alors prendre en compte l'énergie de lisière δ , idem énergie de surface mais pour un bord

$$\begin{aligned}\Delta G_{2D} &= -n\Delta\mu + na^2(\gamma_A + \gamma_{AB} - \gamma_B) + Y\sqrt{n} \\ &= -n(\Delta\mu + \Delta\mu_c) + Y\sqrt{n}\end{aligned}$$

avec $X = \sum_i \delta_i l_i$ et $\Delta\mu_c = a^2(\beta - 2\gamma_A) > 0$

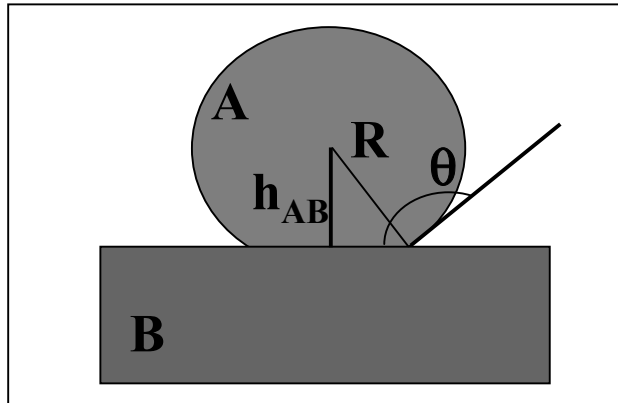
minimisation de l'énergie : $n_{2D}^* = \frac{Y^2}{4(\Delta\mu + \Delta\mu_c)^2}$

Cette fois $\Delta\mu > -\Delta\mu_c$ pour condensation sous-saturation possible



Physique de la croissance

Angle de mouillage : formule d'Young



A partir des formules de Wulf,
on trouve la formule d'Young

$$\sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{h_{AB}}{R} \qquad \frac{\gamma_A}{R} = \frac{\gamma_{AB} - \gamma_B}{h_{AB}}$$

$$\cos \theta = \frac{\gamma_B - \gamma_{AB}}{\gamma_A}$$

On retrouve le critère de Bauer si $\cos \theta =$ ou > 1

$\gamma_{AB} + \gamma_A - \gamma_B < 0$ croissance 2D

Physique de la croissance

Rôle de la contrainte sur la croissance

On reprend le bilan énergétique précédent, en rajoutant un terme de contrainte élastique des îlots

$$\Delta G = -n\Delta\mu + \sum_i \gamma_i S_i + W_{\text{élastique}}$$

Difficulté : inclure des termes en $\partial\gamma/\partial S_i$
(travail de formation des surfaces et interfaces)

calcul complexe dont les résultats sont :

$\beta \leq 2\gamma_A$ **croissance 3D comme avant**
 mais

$\beta \geq 2\gamma_A$ **croissance 2D si contrainte pas trop grande**
passage 2D→3D lorsque l'énergie élastique emmagasinée
devient trop grande

Explication : relaxation de contraintes en bord d'îlots 3D

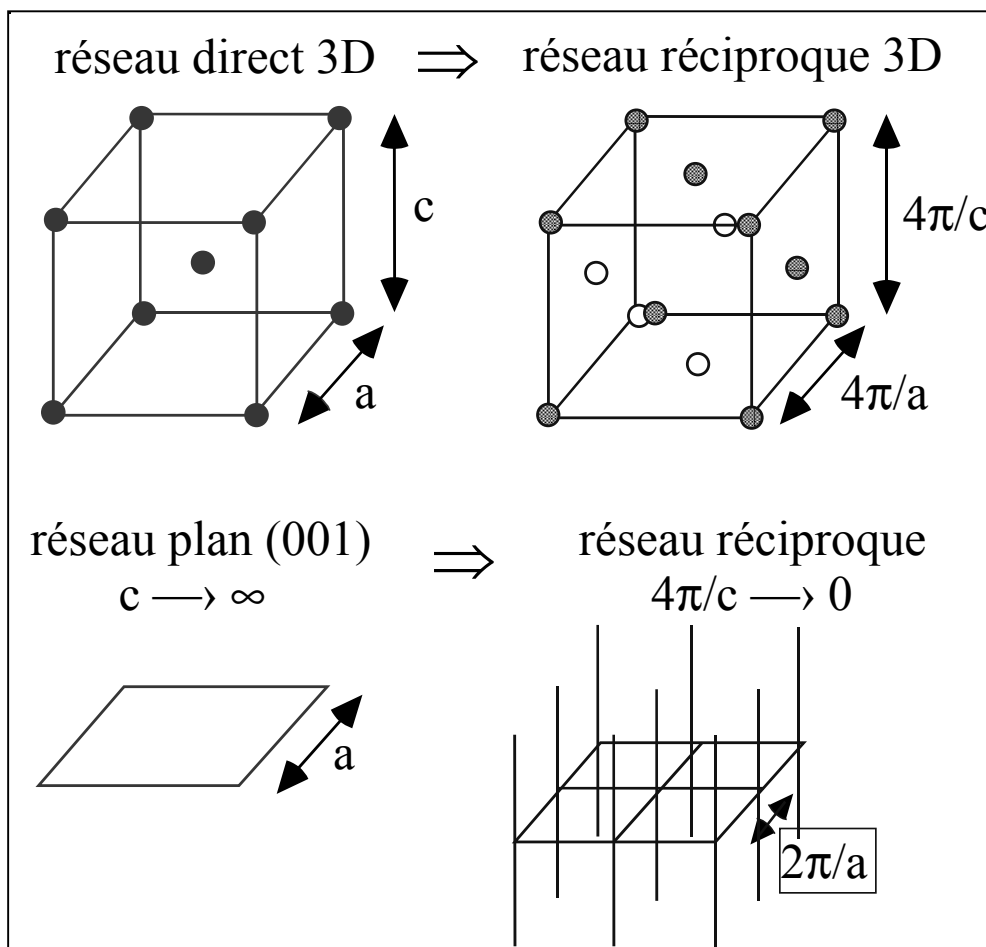
Ainsi, la contrainte permet d'expliquer le
mode de croissance Straski-Krastanov

Physique de la croissance

Films minces : croissance 2D souhaitable

Comment savoir si la croissance est 2D ?

Dans le cas de l'épitaxie, diffraction d'électrons en incidence rasante



Physique de la croissance

Comment savoir si la croissance est 2D ?

RHEED : Reflection High Energy Electron Diffraction

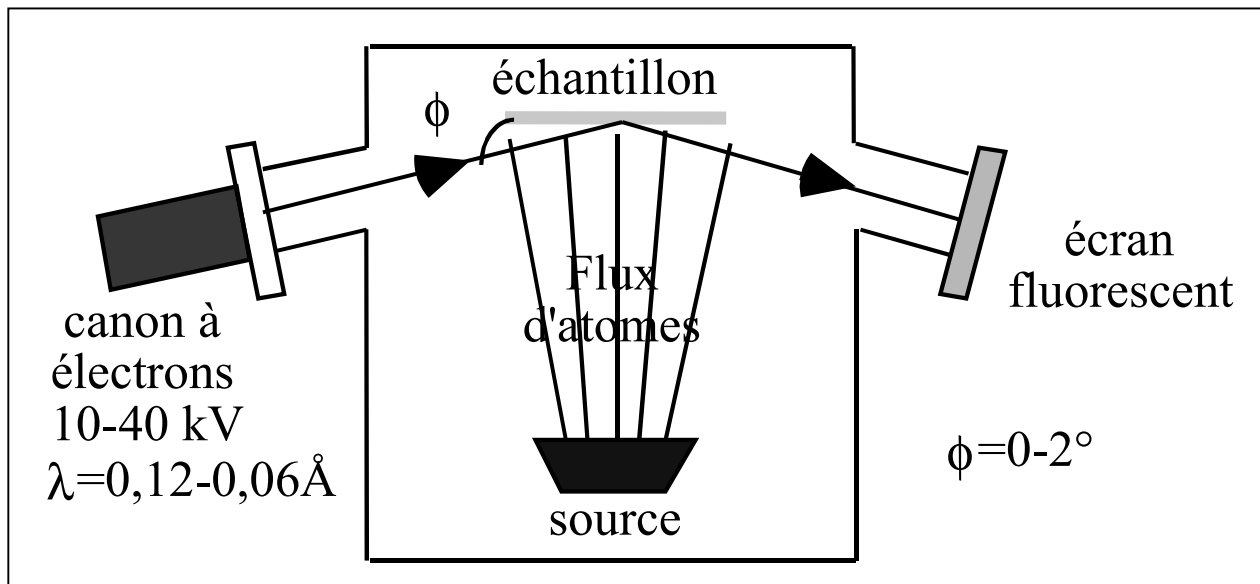
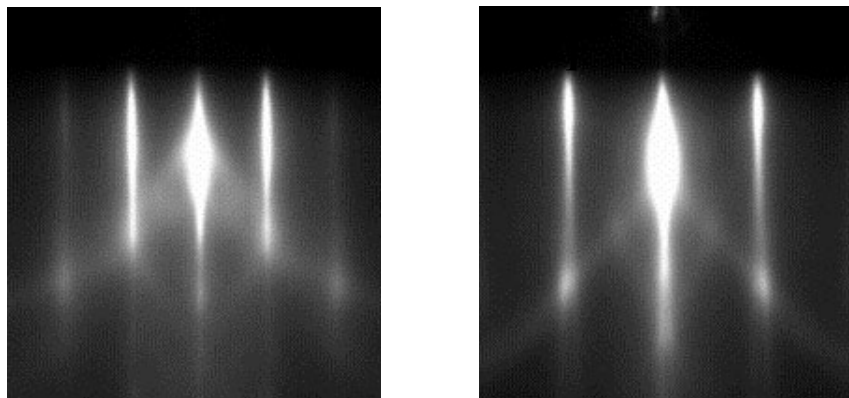
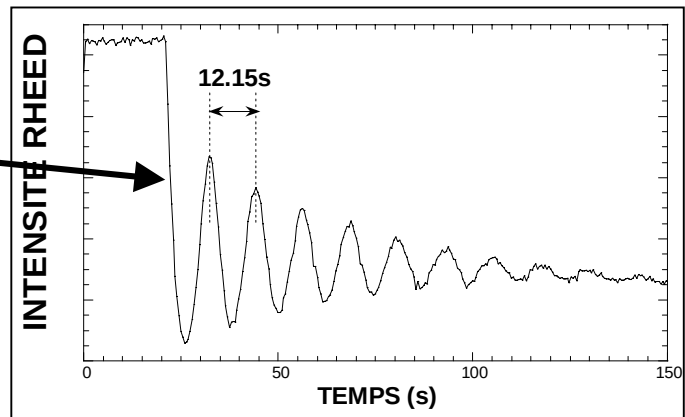
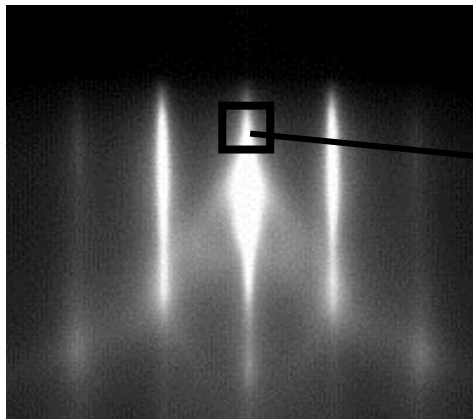


Image de diffraction : réseau carré

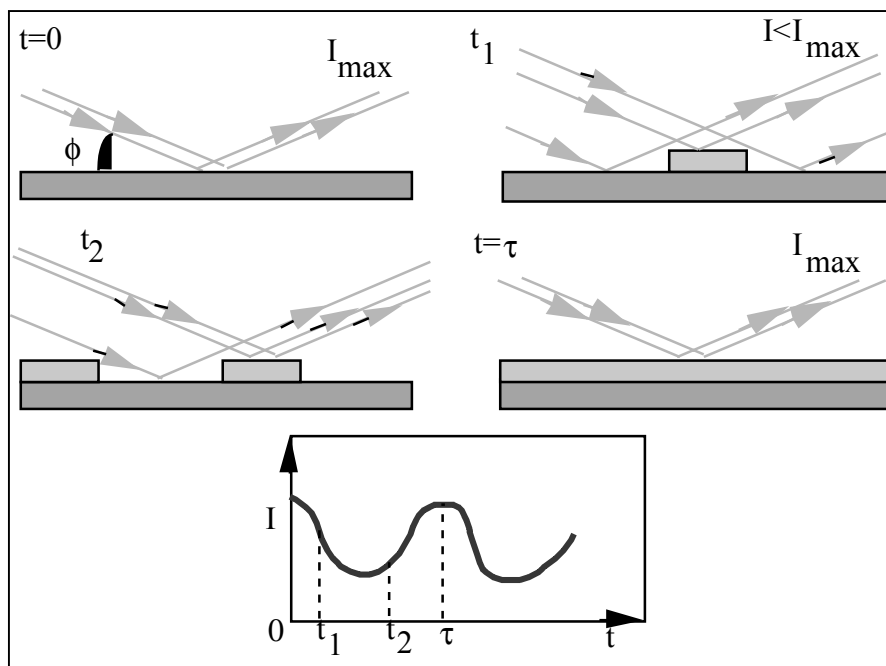


Physique de la croissance

Les oscillations de RHEED: suivi pendant la croissance de l'intensité



Période = temps de complétion d'un plan at.
Oscillations uniquement si croissance 2D
explication : phénomène d'interférence

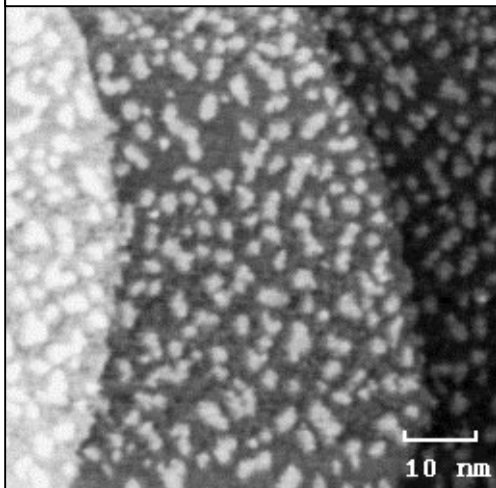


Physique de la croissance

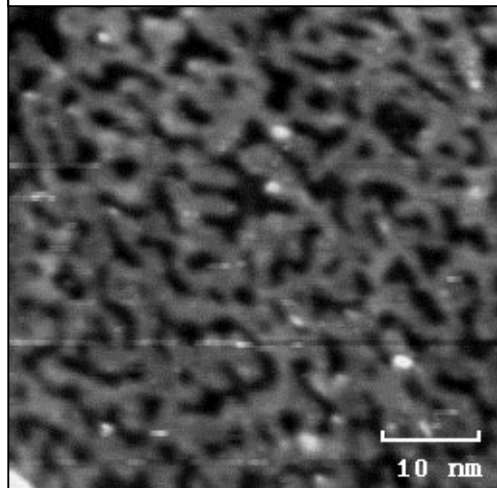
**Autre méthode :
microscopie à effet tunnel (STM)**

Mn/Fe(001) à l'ambiante : croissance 2D

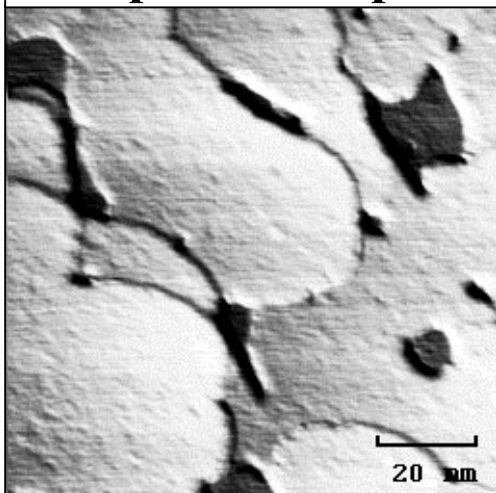
**0.25 monocouche
îlots 2D**



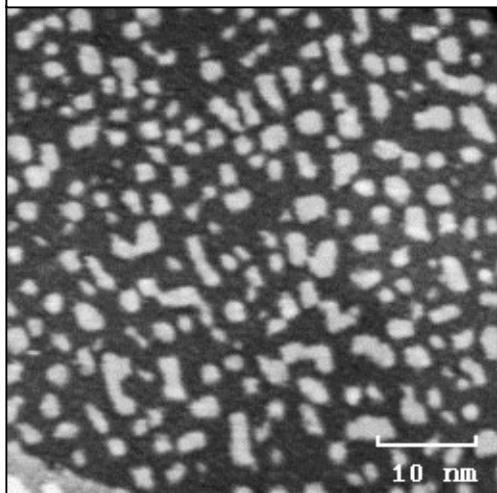
**0.5 monocouche
coalescence îlots**



**1 monocouche
complétion du plan**

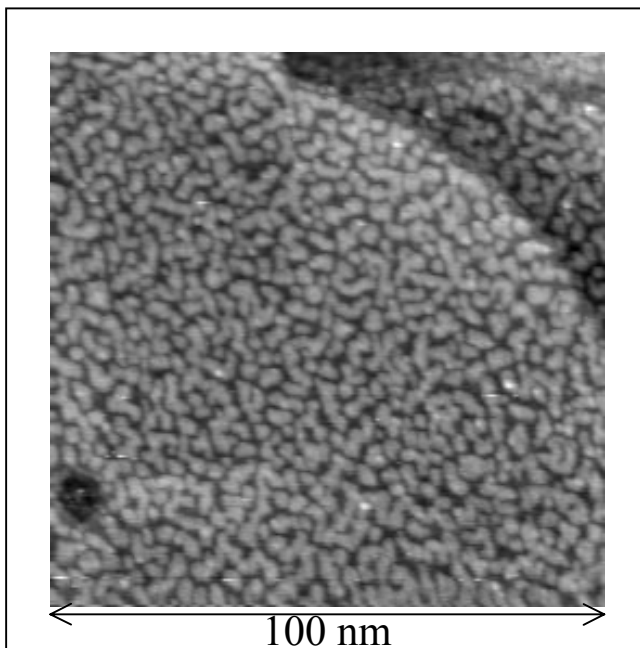


**1.3 monocouche
nouveau îlots 2D**

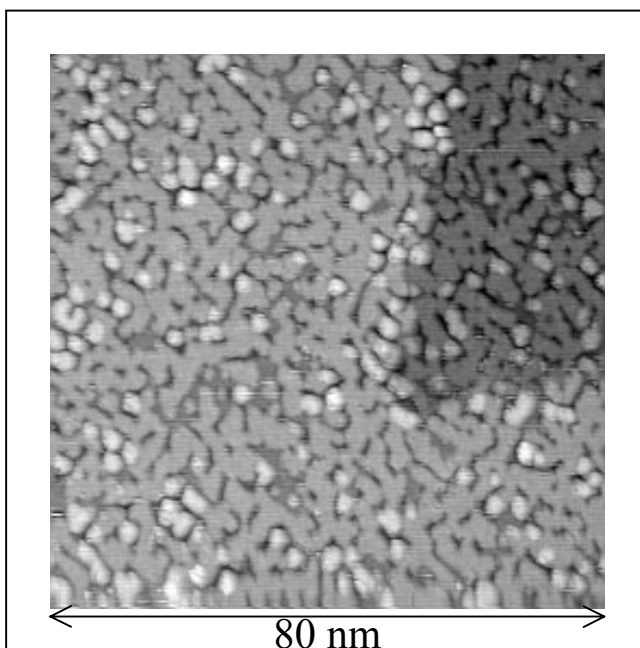


Physique de la croissance

Ni / Fe(001) à 300K : passage 2D-3D



**À 0.5 mc
déposée, un
seul plan
atomique
pousse**



**Si on continue
la croissance,
la 2ème couche
commence à
croître avant
que la 1ère soit
terminée**

**Sans doute lié à la
contrainte, mais
encore beaucoup
d'inconnu**

Physique de la croissance

Auto-organisation

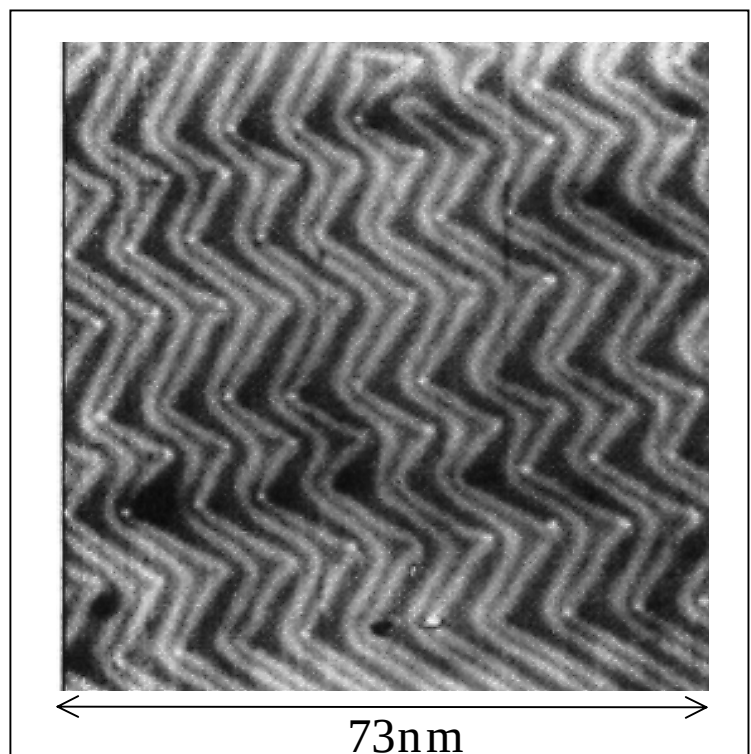
diffusion de surface mécanisme
aléatoire, nucléation "désordonnée"

Comment faire pour "forcer" la
nucléation à des endroits précis ?

On peut utiliser les
déformations non
uniformes sur la
surface

Structure en chevron
Au(111)

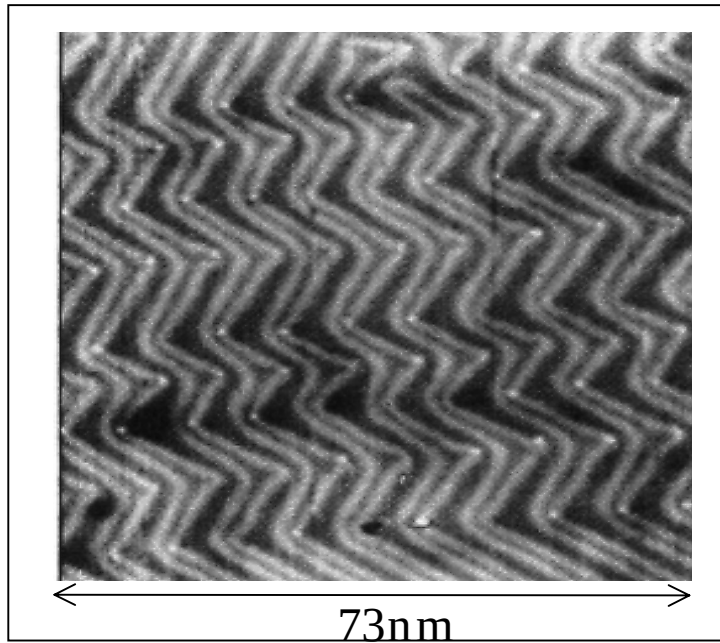
Défauts d'empilement
hcp / cfc



from Voigtländer, PRB 1991

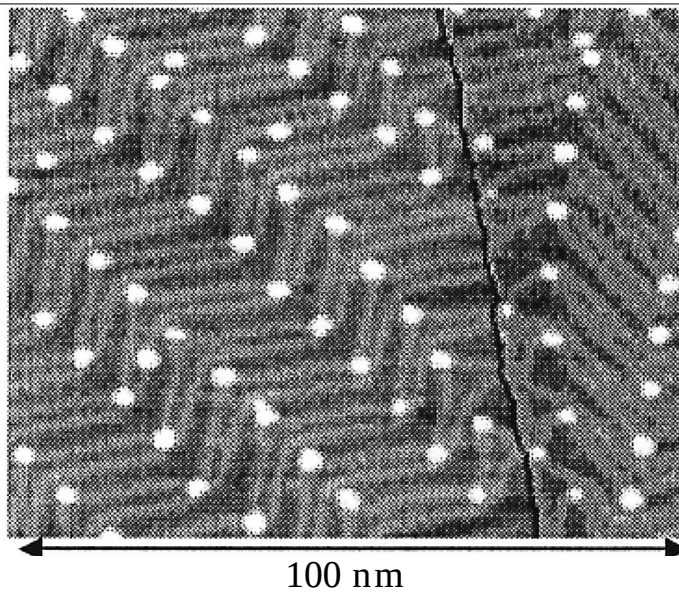
Physique de la croissance

Auto-organisation



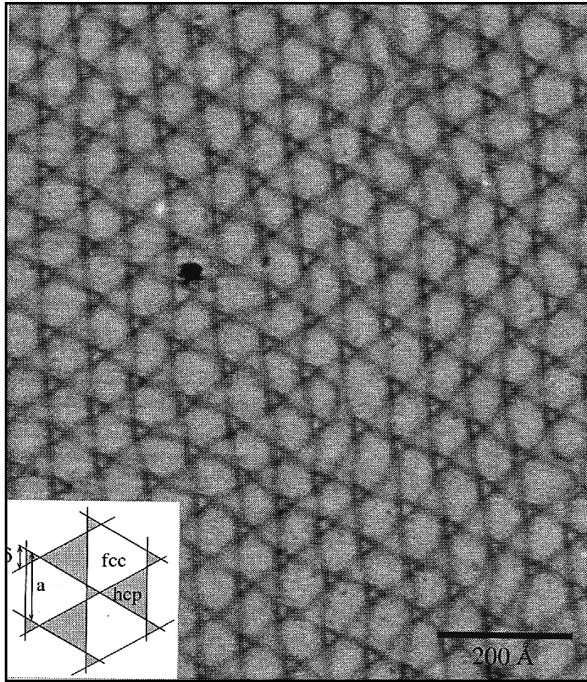
from Voigtländer, PRB 1991

0.01 ML Co / Au(111) at RT



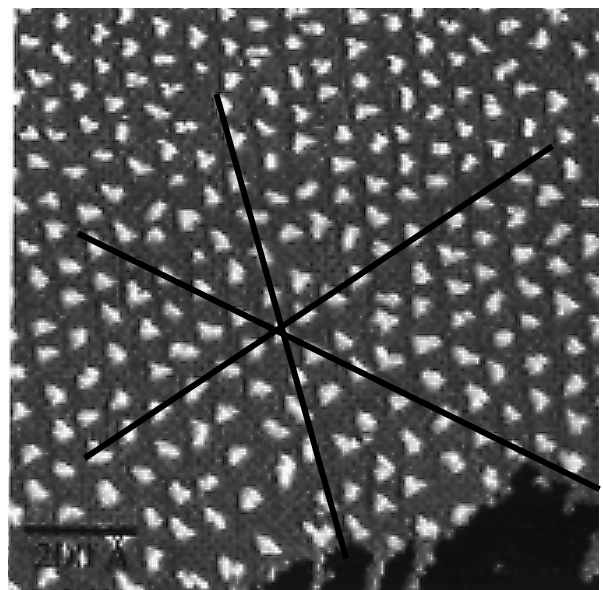
Physique de la croissance

Auto-organisation



2ML Ag/Pt(111)
réseau de
dislocations
empilement hcp/fcc

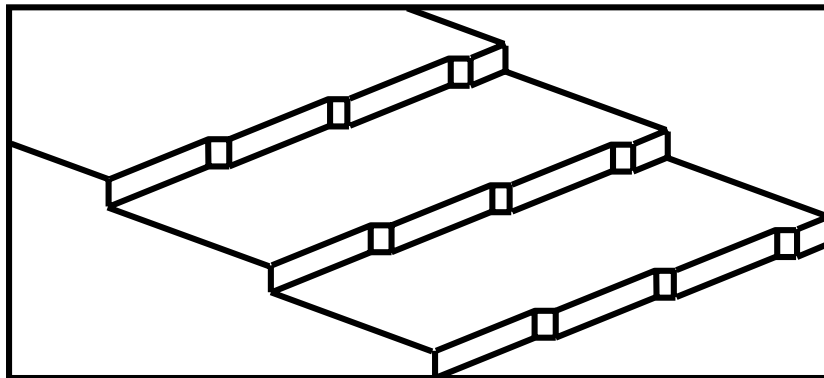
0.1 ML Ag sur
2MC Ag /Pt(111)
Giovannini, PhD 2000



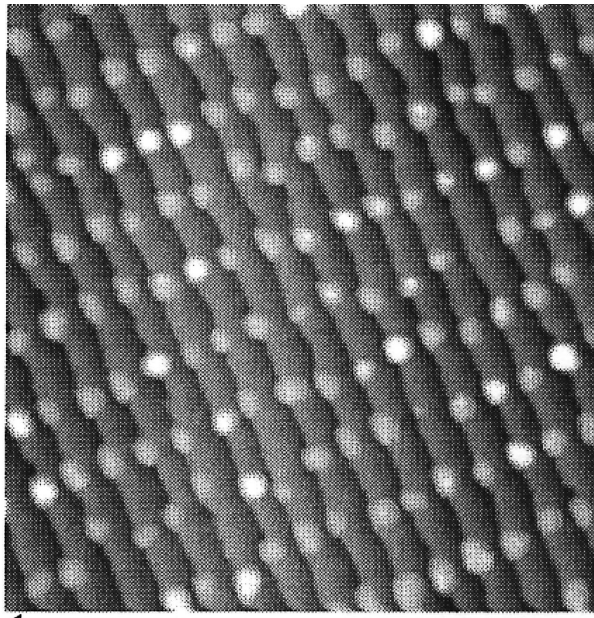
Physique de la croissance

Auto-organisation

Utilisation de surfaces vicinales



0.2 ML Co/Au(788) 130K



60 nm

From Repain, Europhys. Lett. 2002

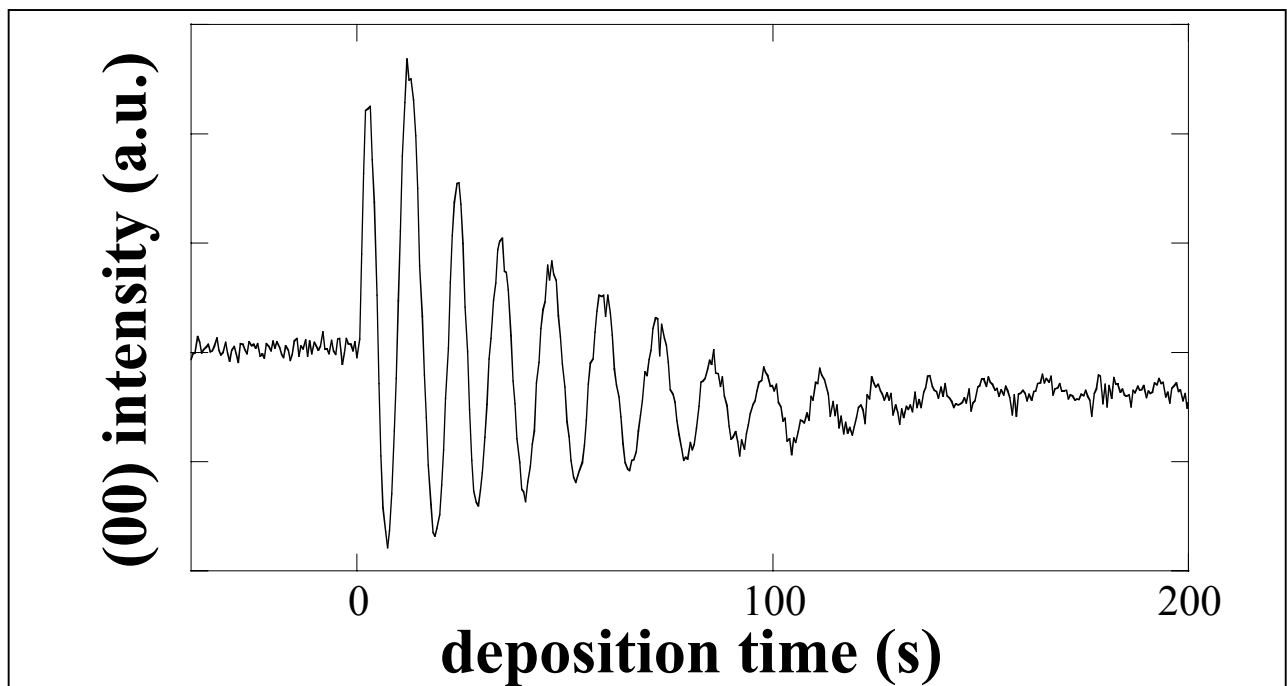
Exemple : jonctions tunnel

Croissance de la barrière

L'énergie de surface des oxydes est beaucoup plus faible que celle des métaux $\Rightarrow$ croissance 2D en général

**MAIS DESACCORD PARAMETRIQUE
PAS TROP GRAND, SINON 3D**

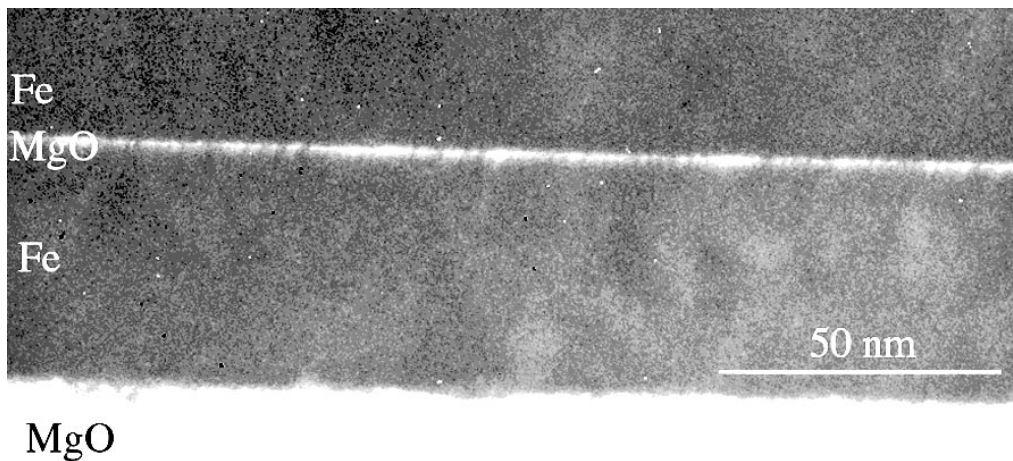
**Exemples : MgO sur Fe, V, Mo (001)
oscillations de RHEED**



Exemple : jonctions tunnel

Croissance de la barrière

MgO/Fe(001) :
barrière continue sur de grande
distance



From Popova, APL2002

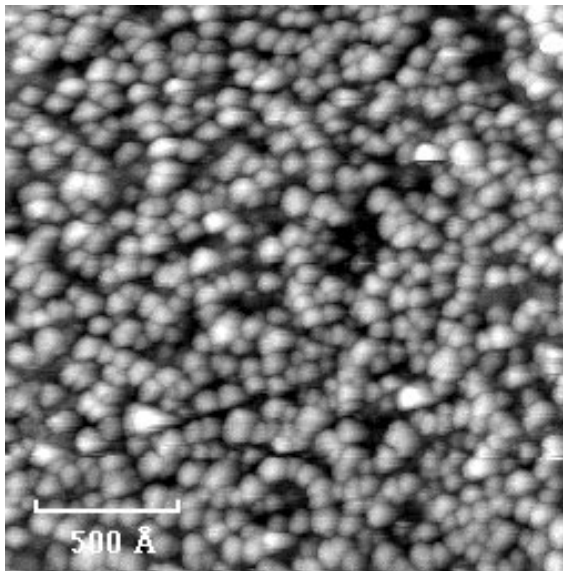
Epitaxie et interface abrupte



Exemple : jonctions tunnel

Croissance de la barrière

**Mais ce n'est pas toujours le cas :
MgO/NiMnSb (001) croissance 3D**



**image STM
1 nm MgO
sur NiMnSb
à 800K**

Solution :

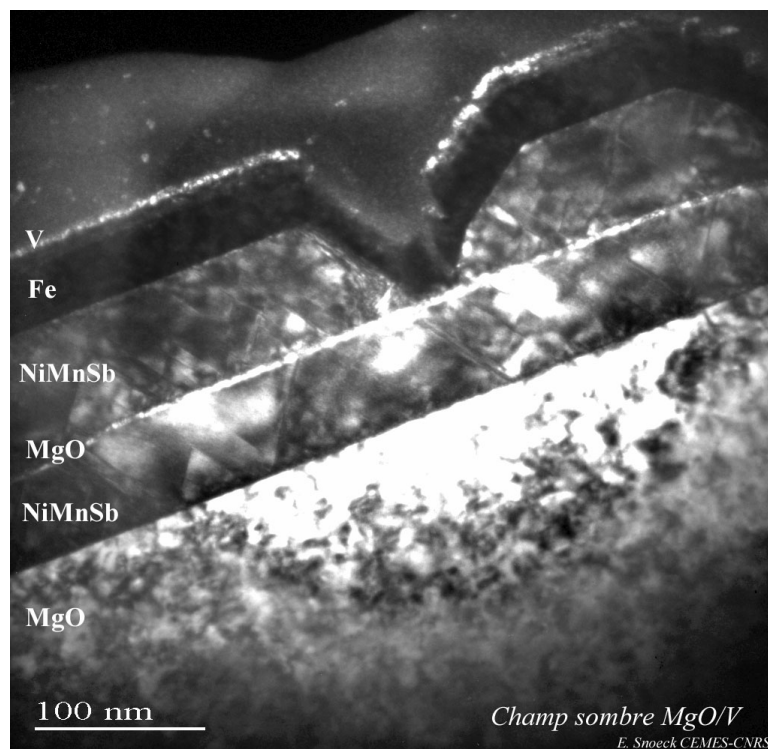
**dépôt à basse température (grande densité d'îlots)
épaisseur suffisante pour percolation des îlots**

Exemple : jonctions tunnel

Dépôt de la 2ème électrode

**PROBLEME : oxyde 2D sur métaux,
d'où métaux en général 3D sur oxyde**

Formation d'îlots pas forcément coalescés



Solution :

**dépôt à basse température (grande densité d'îlots)
épaisseur suffisante pour percolation des îlots**

Exemple : jonctions tunnel



Problème de la très faible épaisseur de la barrière...

Sur une pleine plaque, les 2 électrodes ne sont pas isolées, il existe de nombreux "trous" dans la barrière

Pour mesurer une caractéristique tunnel, il faut donc diminuer les tailles latéralement

⇒ LITHOGRAPHIE

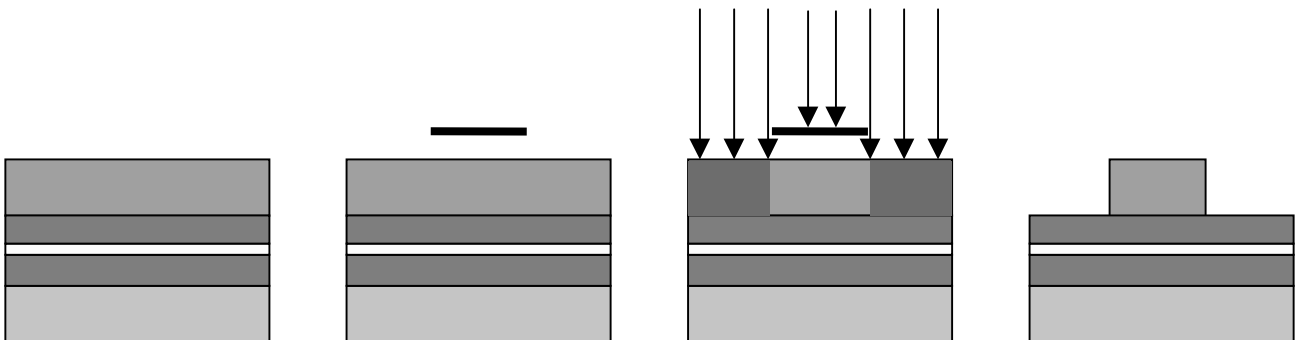
Principe de la lithographie

Techniques de la microélectronique lithographie optique

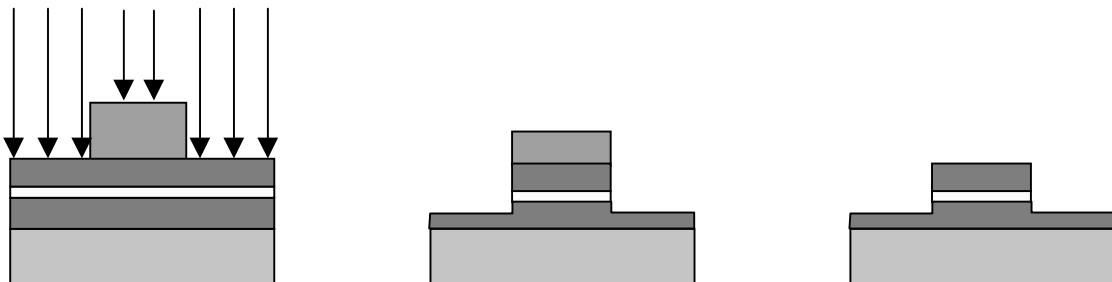


Échantillon à
lithographier

Dépôt de résine (polymère), masquage, insolation, gravure



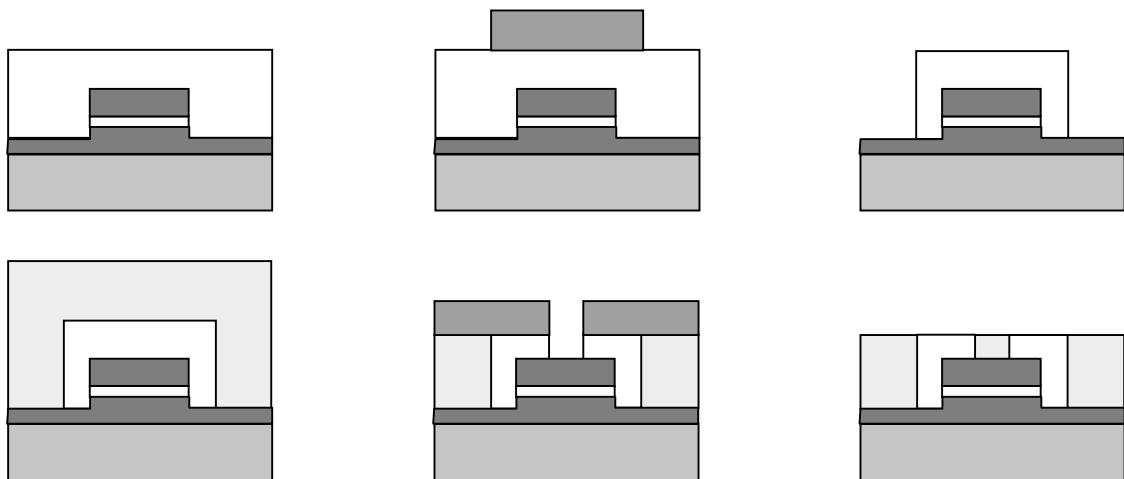
Gravure physique ou chimique, élimination résine



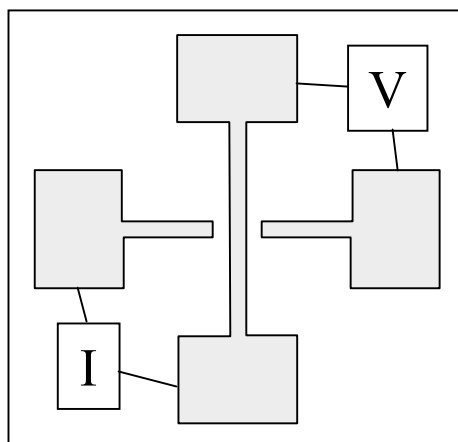
Principe de la lithographie

Lithographie optique

Dépôt d'isolant, résine, insolation,
ouverture et dépôt des contacts



Vue de dessus



Principe de la lithographie



Performances

**Lithographie optique : μm
nécessite des barrières de qq nm
continues sur 1000nm !!**

**Lithographie électronique : $< 100\text{nm}$
beaucoup plus de chance
d'avoir une barrière continue**

**Principe : utiliser les électrons
pour graver**

Conclusions



Avant de fabriquer des objets nanométriques, il faut faire des dépôts en couches minces

Nécessaire de connaître la physico-chimie de la croissance, car on ne peut pas tout faire a priori

Il n'y a pas de technique de dépôts meilleures que d'autres : chacune apporte des solutions à des problèmes variés

Lithographie très complexe, encore beaucoup de travail pour maîtriser ces techniques sur des dépôts hybrides