

## Soutenance de thèse

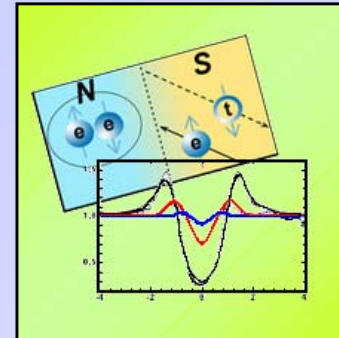
Le 8 octobre 2004



***Etude de la cohérence quantique dans les systèmes supraconducteur - métal normal par microscopie et spectroscopie à effet tunnel.***

présentée par Walter Escoffier

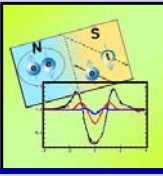
► ***L'effet de proximité***



# L'EFFET DE PROXIMITE

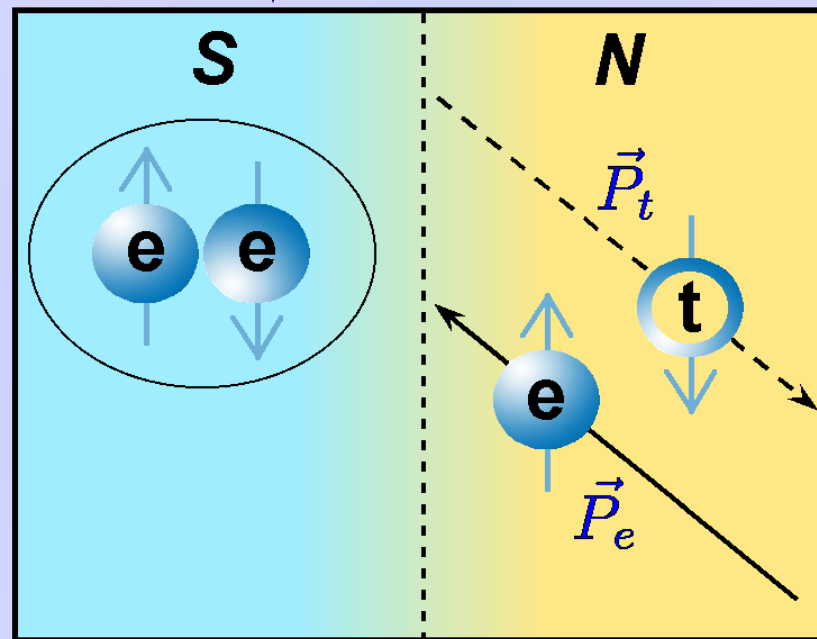
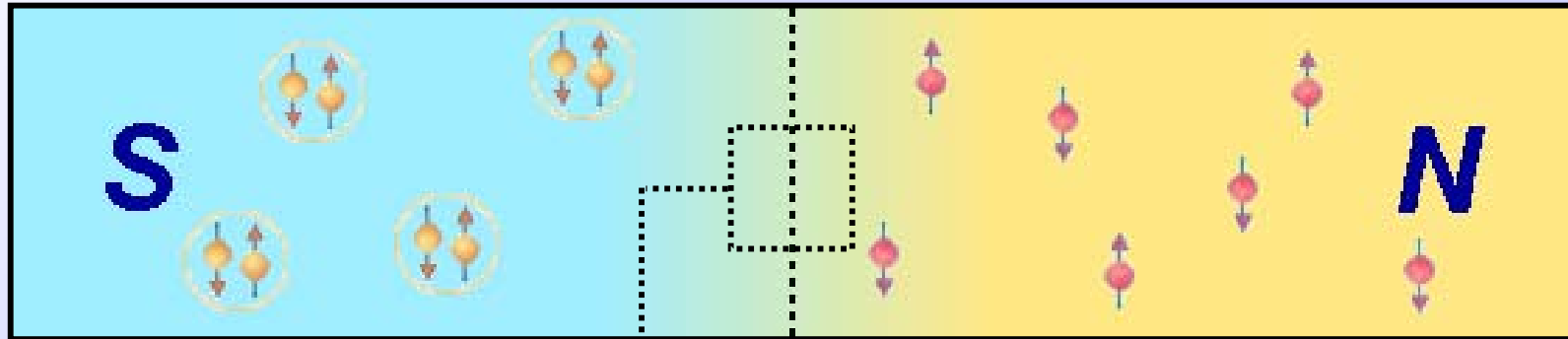
L'effet de proximité

● La réflexion d'Andreev



Métal  
supraconducteur

Métal  
normal

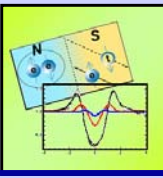


*La réflexion d'Andreev*

# DECOHERENCE DANS LE METAL NORMAL

L'effet de proximité

● Décohérence



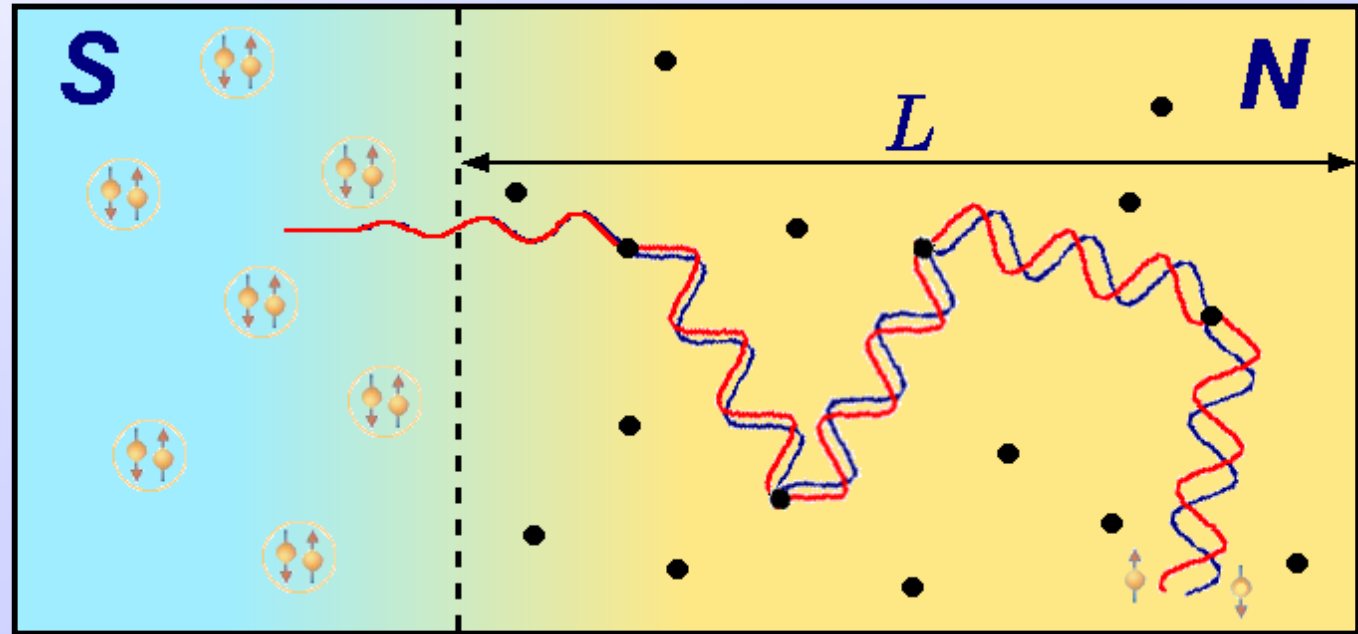
si  $E - E_F = \epsilon \neq 0$  :

Différence des vecteurs d'onde  $k_e$  et  $k_t$  :

$$k_e - k_t = k_F \cdot \frac{\epsilon}{E_F}$$



**DEPHASAGE**



Longueur de l'effet de proximité

Autres sources de décohérence

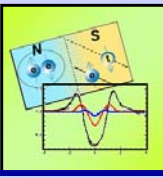
● Cas balistique  $L_{\phi(\epsilon)}^{bal} \approx \frac{\hbar v_F}{\epsilon}$

● Cas diffusif  $L_{\phi(\epsilon)}^{dif} \approx \sqrt{\frac{\hbar D_n}{\epsilon}}$

● Chocs inélastiques

● Interactions électroniques ...

Nous supposons :  $L_{\phi} > L$



## Équation d'Usadel (1D)

$$\frac{\hbar D_n}{2} \left( \frac{\partial^2 \theta(x, \epsilon)}{\partial x^2} \right) + \Delta(x) \cos(\theta(x, \epsilon)) = [-i\epsilon + \Gamma_{in} + 2\Gamma_{sf} \cos(\theta(x, \epsilon))] \sin(\theta(x, \epsilon))$$

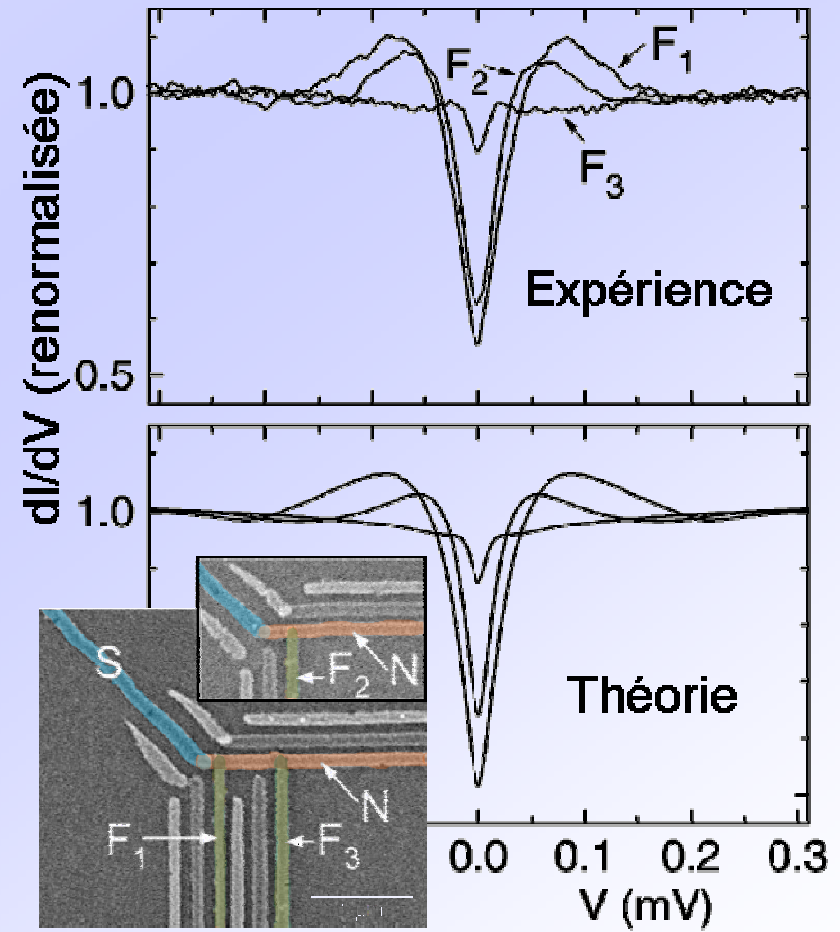
$\theta(x, \epsilon)$	Angle complexe d'appariement
$\Delta(x)$	Paramètre d'ordre
$\epsilon$	Energie
$D_n$	Coefficient de diffusion
$\Gamma_{in}$	Taux de diffusion inélastique
$\Gamma_{sf}$	Taux de diffusion spin-flip

### Densité d'états locale

$$\rho(x, \epsilon) \propto \Re[\cos(\theta(x, \epsilon))]$$

### Conditions aux limites

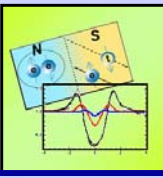
$$\theta_S = \text{Arctg} \left( \frac{i\Delta}{\epsilon + i\Gamma} \right), \quad \theta_N = 0$$



*S. Gueron & al. Phys. Rev. Lett. 77, 3025 (1996)*

*M. Vinet & al. Phys. Rev. B 63, 165420 (2001)*

*N. Moussy & al. Europhys. Lett. 55, 861 (2001)*



## Équation d'Usadel (1D)

$$\frac{\hbar D_n}{2} \left( \frac{\partial^2 \theta(x, \epsilon)}{\partial x^2} \right) + \Delta(x) \cos(\theta(x, \epsilon)) = [-i\epsilon + \Gamma_{in} + 2\Gamma_{sf} \cos(\theta(x, \epsilon))] \sin(\theta(x, \epsilon))$$

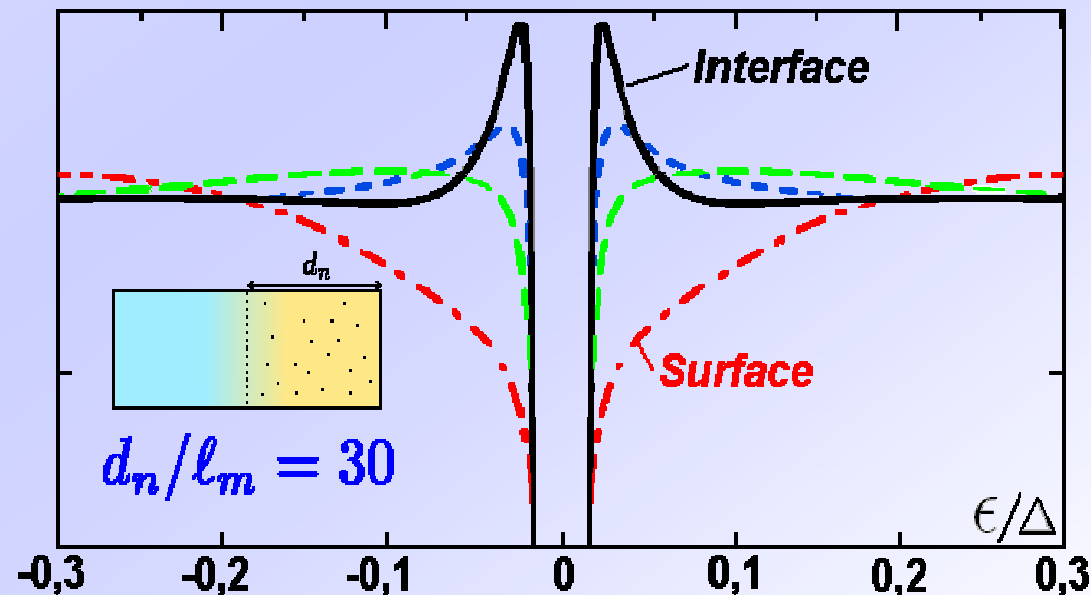
- $\theta(x, \epsilon)$  Angle complexe d'appariement
- $\Delta(x)$  Paramètre d'ordre
- $\epsilon$  Energie
- $D_n$  Coefficient de diffusion
- $\Gamma_{in}$  Taux de diffusion inélastique
- $\Gamma_{sf}$  Taux de diffusion spin-flip

### Densité d'états locale

$$\rho(x, \epsilon) \propto \Re[\cos(\theta(x, \epsilon))]$$

### Conditions aux limites

$$\theta_S = \text{Arctg} \left( \frac{i\Delta}{\epsilon + i\Gamma} \right), \quad \left. \frac{\partial \theta(x, \epsilon)}{\partial x} \right|_{d_n} = 0$$

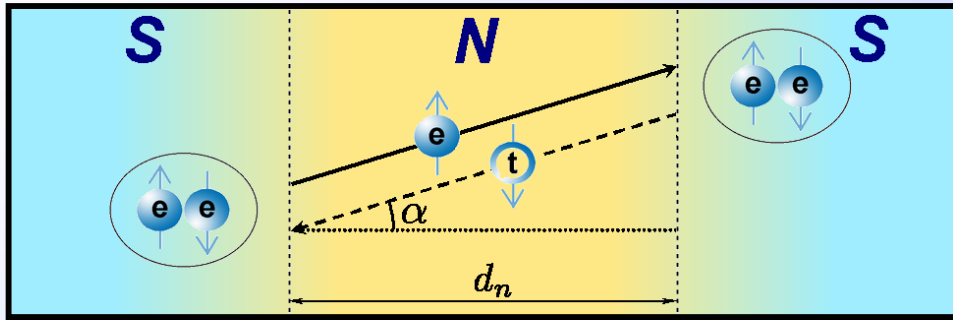
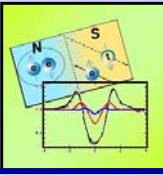


*S. Pilgram & al. Phys. Rev. B 62, 12462 (2000)*

*W. Belzig & al. Phys. Rev B 54, 9443 (1996)*

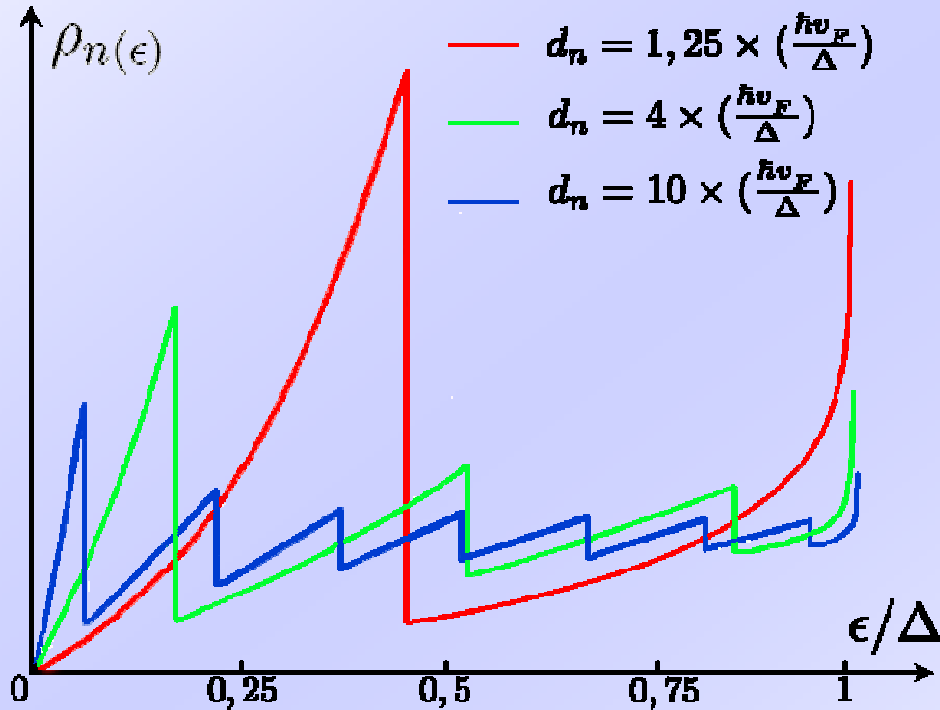
### MINI-GAP

$$E_{mg} = 0,78 \times \frac{\hbar D_n}{d_n^2}$$



## États liés de De Gennes S<sup>t</sup> James

$$\frac{\epsilon d_n}{\hbar v_f} = \left[ n\pi + \text{Arcos} \left( \frac{\epsilon}{\Delta} \right) \right] \times \cos \alpha$$

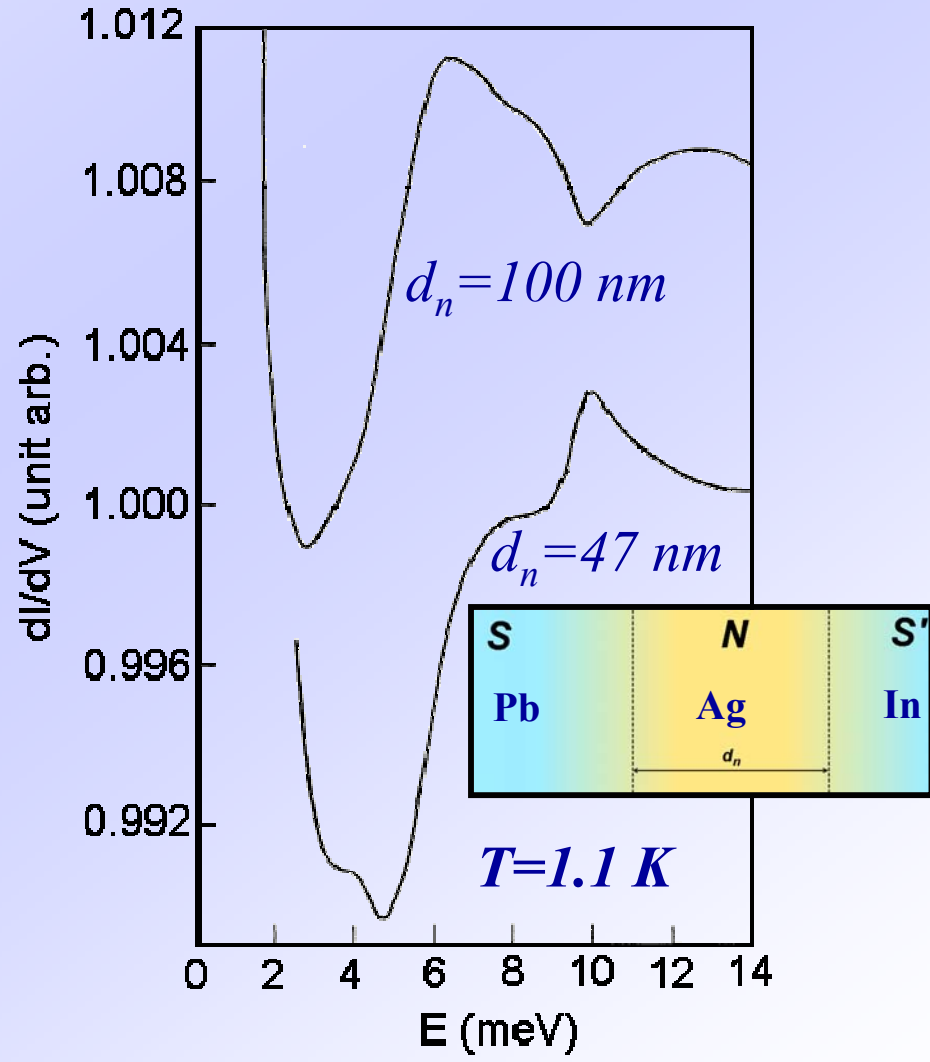
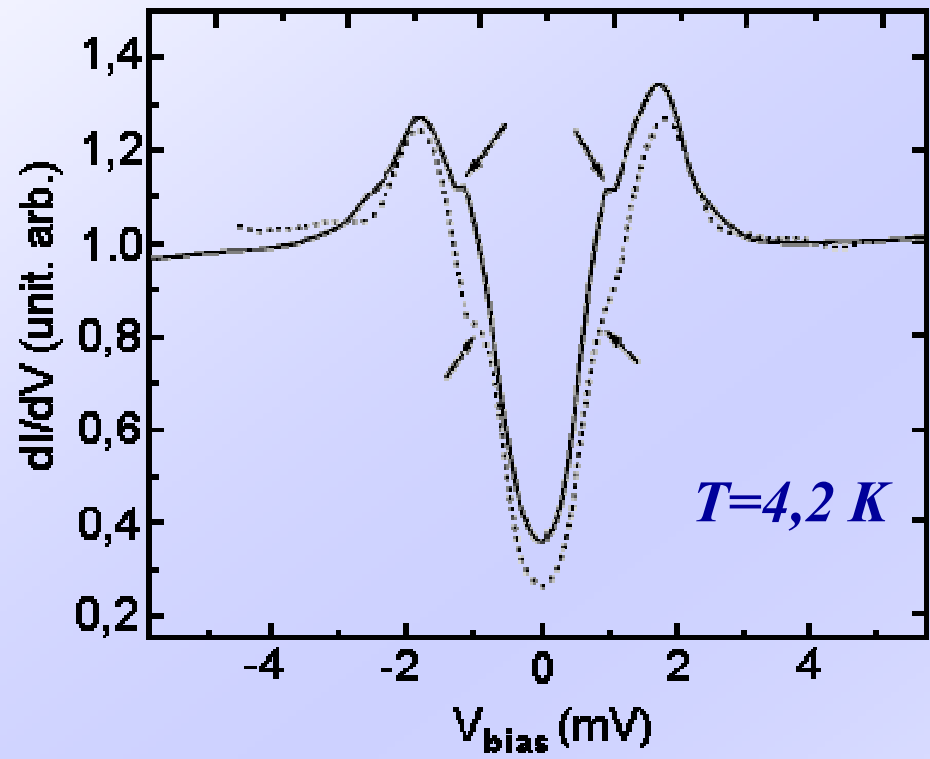
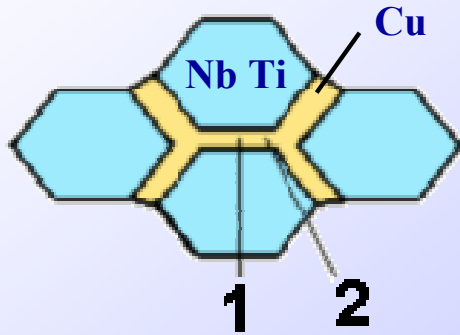
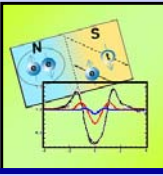


- Intégration sur  $\alpha$  (toutes les trajectoires)
- Densité d'états en dents de scie pour  $\epsilon < \Delta$
- Pas de gap

# EFFETS BALISTIQUES

L'effet de proximité

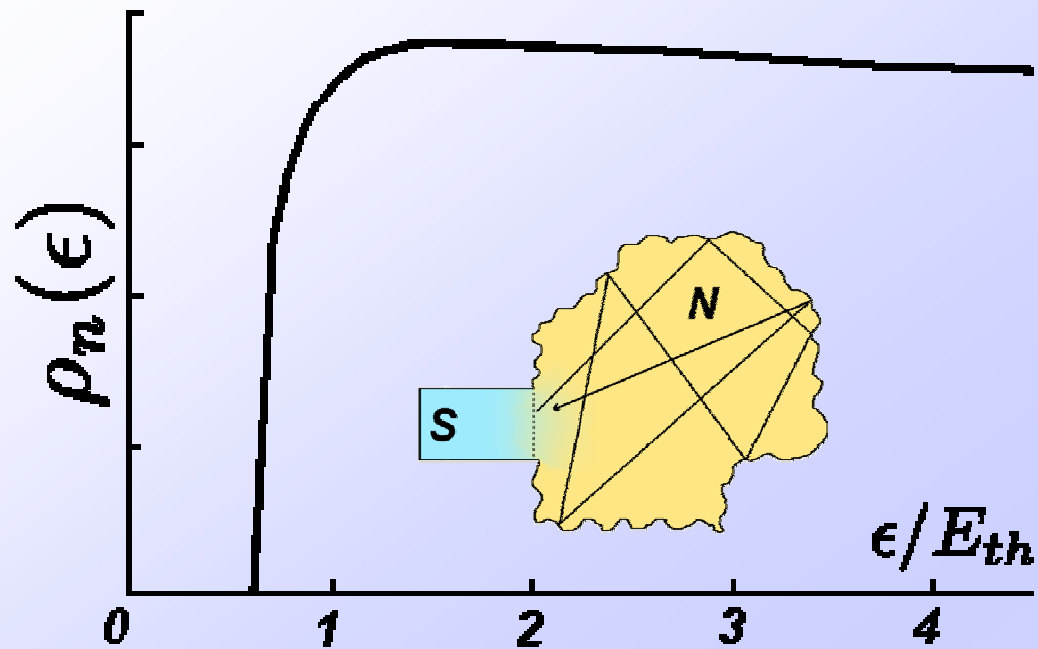
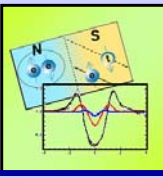
● Limite balistique



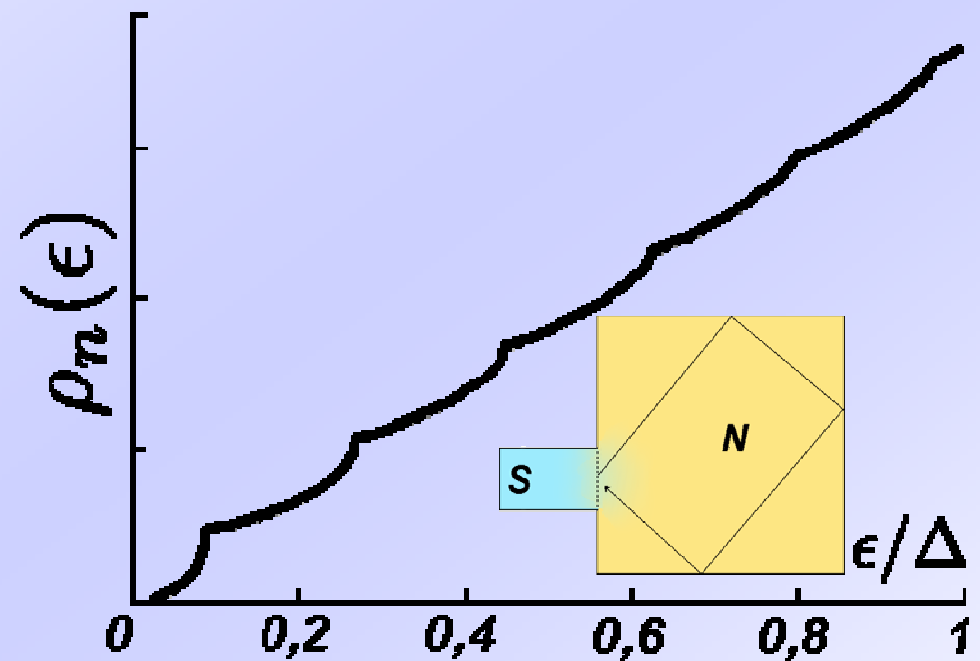
Y. Levi & al. Phys. Rev. B 69, 15128 (1998)

J.M. Rowell & al. Phys. Rev. Lett. 16, 453 (1966)  
 W.J. Tomash & al. Phys. Rev. Lett. 15, 672 (1965)  
 W.J. Tomash & al. Phys. Rev. Lett. 16, 16 (1966)





W. Ihra & al. *Eur. Phys. J. B* 21, 425 (2001)



J. Cserti & al. *Phys. Rev. B* 66, 064528 (2002)

### Dynamique chaotique

- MINI-GAP

$$E_{mg} \propto \hbar / \tau_n$$

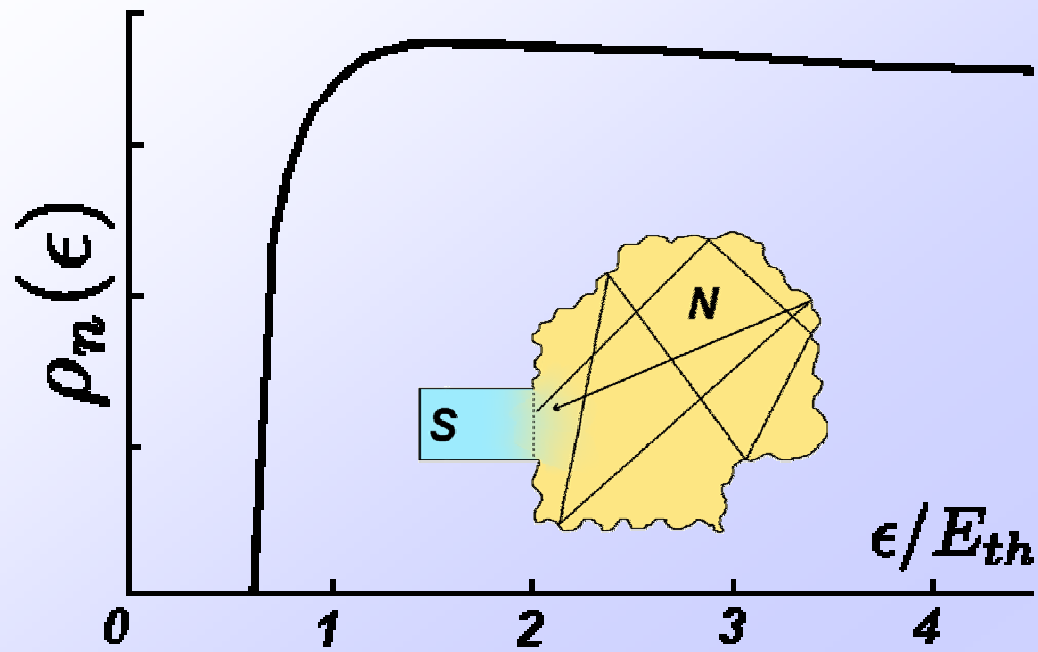
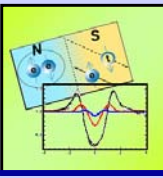
### Dynamique intégrable

- Pas de MINI-GAP
- Pics dans la densité d'états

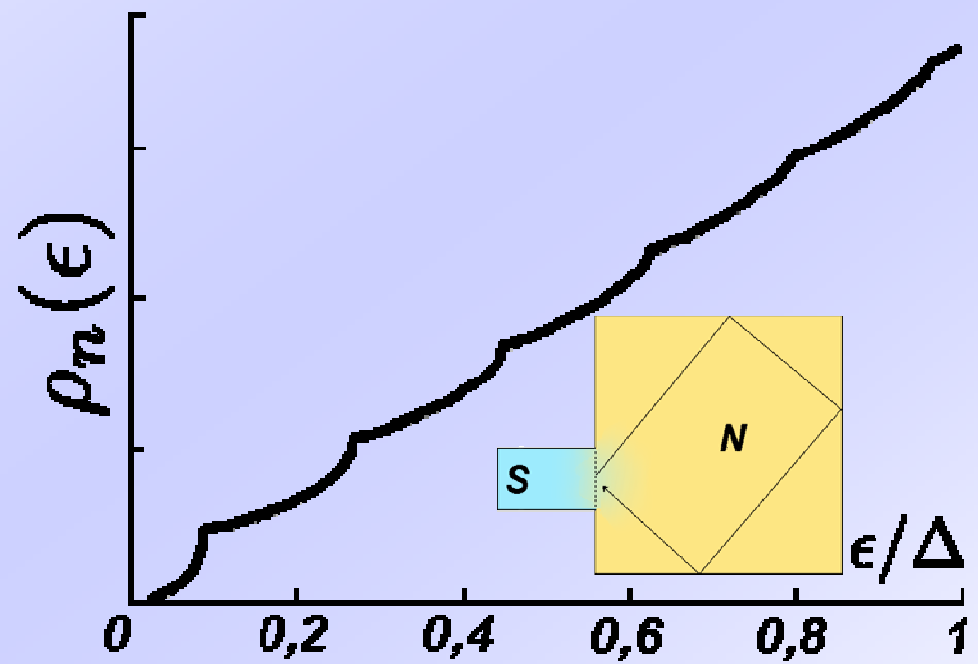
# BILLARDS D'ANDREEV

L'effet de proximité

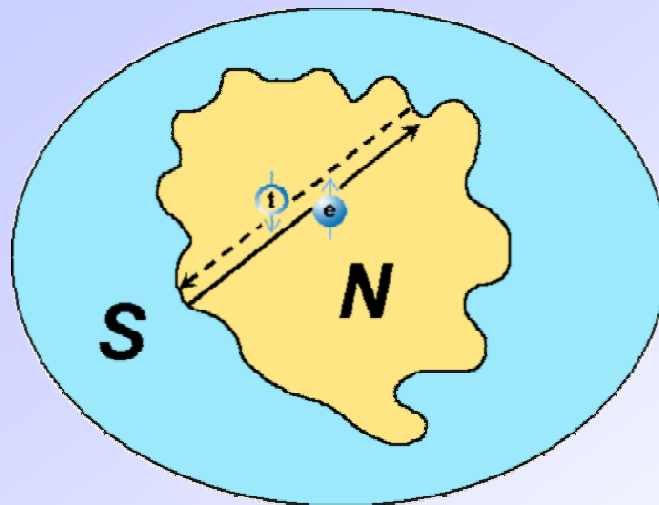
● Billards d'Andreev



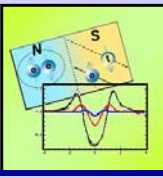
*W. Ihra & al. Eur. Phys. J. B 21, 425 (2001)*



*J. Cserti & al. Phys. Rev. B 66, 064528 (2002)*



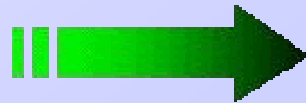
*I. Adagideli & al. Phys. Rev. B 65, 201306 (2002)*



*Les propriétés spectrales des systèmes dépendent de la probabilité qu'a une paire d'Andreev de revenir à son point d'origine après avoir parcouru une distance  $L$  dans le métal normal.*

**Systemes diffusifs**

**Billards chaotiques**



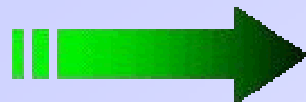
● Les trajectoires longues ( $\epsilon \ll E_F$ ) ne contribuent plus à la densité d'états



**MINI-GAP**

**Systemes balistiques**

**Billards intégrables**



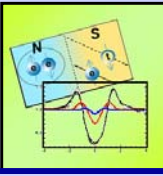
● Toutes les trajectoires contribuent à la densité d'états, certaines sont privilégiées



**PAS de MINI-GAP**



**Etats résonnants**



Systemes diffusifs

vs

Systemes balistiques

● Gap, mini-gap, pas de gap ?

● Présence d'états résonants ?

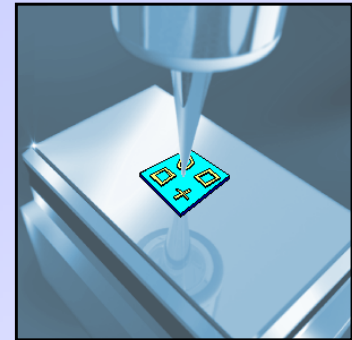
● Influence de la géométrie ?

▶ Dispositif expérimental

▶ Résultats préliminaires pour les nano-structures lithographiées

▶ Systemes désordonnés et supraconductivité inhomogène

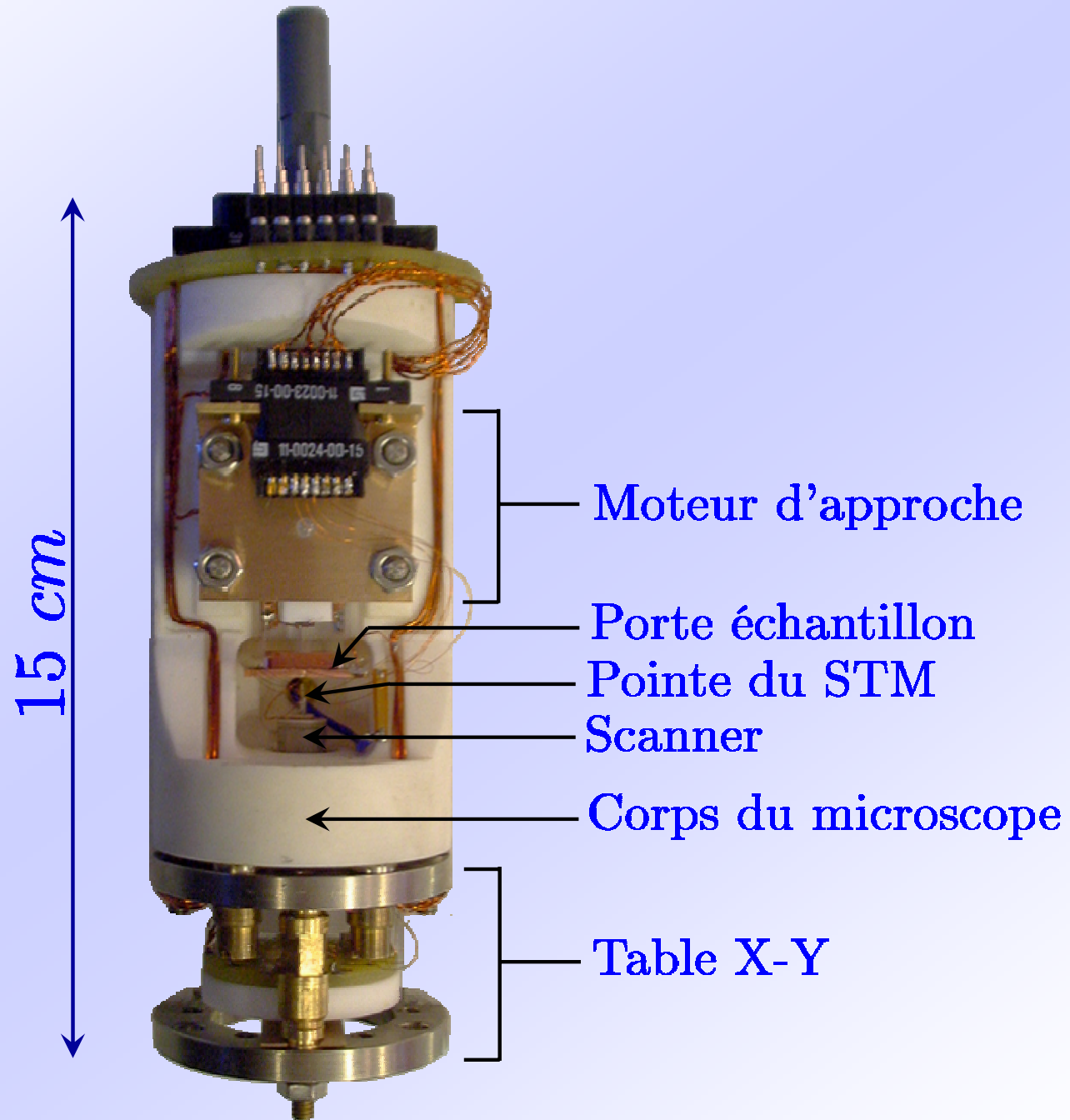
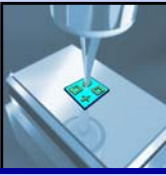
▶ ***Dispositif expérimental***



# MICROSCOPE à EFFET TUNNEL

Dispositif expérimental

● Microscope à effet tunnel

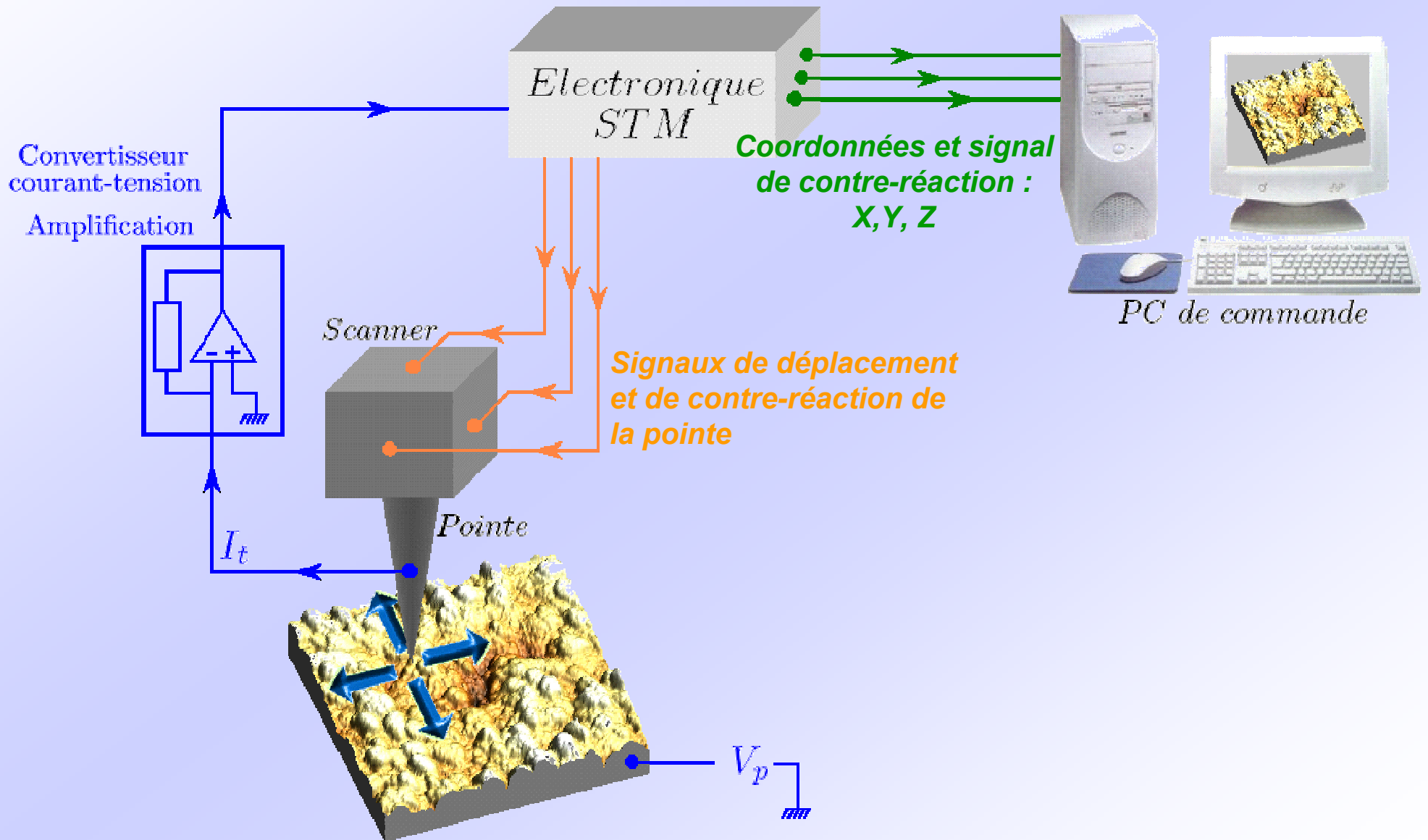
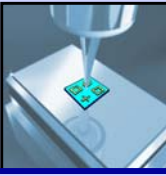


# FONCTIONNEMENT DU STM

## Mode Imagerie

Dispositif expérimental

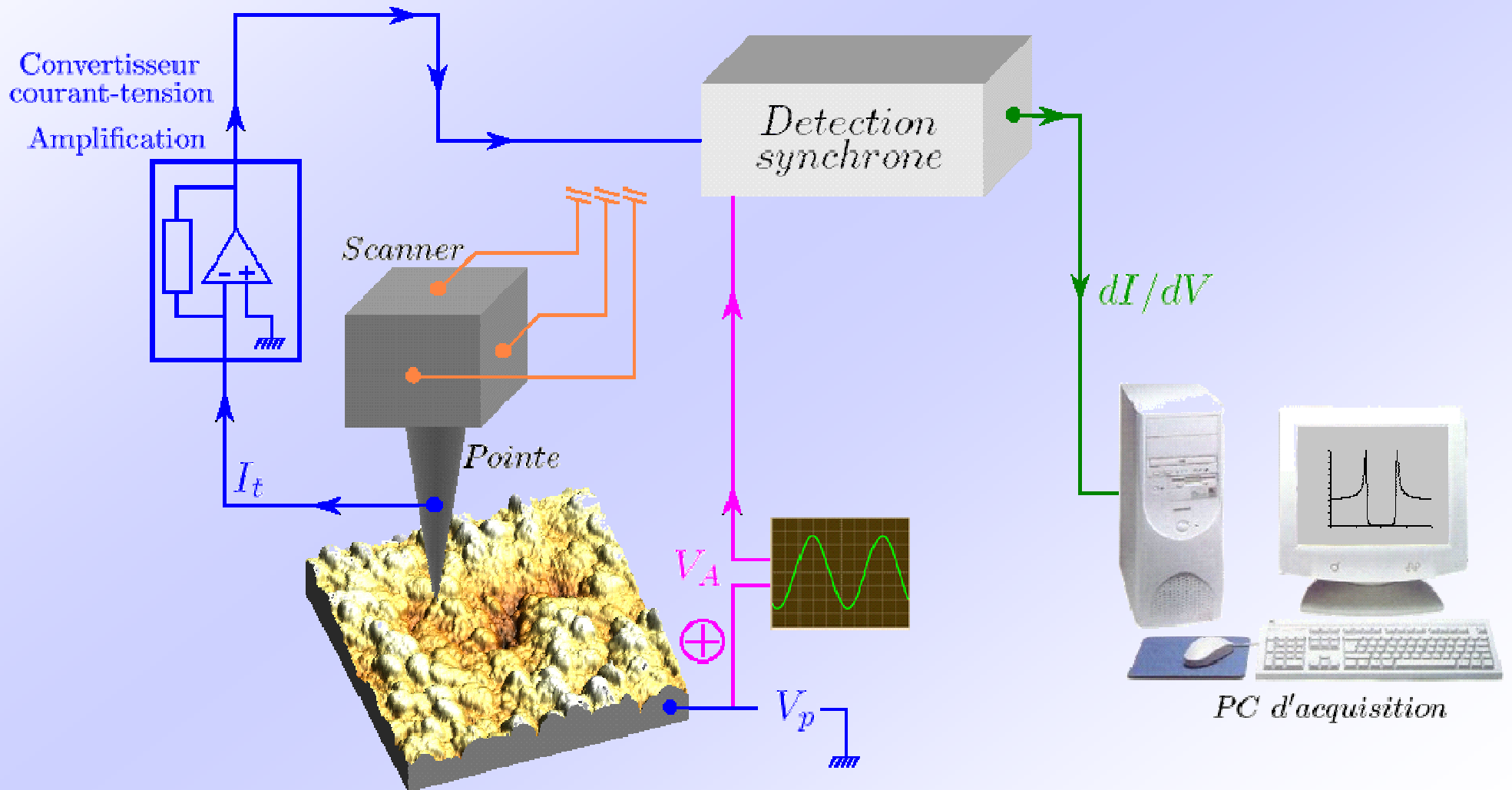
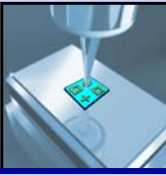
● Principe de fonctionnement



# FONCTIONNEMENT DU STM Mode Spectroscopie

Dispositif expérimental

● Principe de fonctionnement



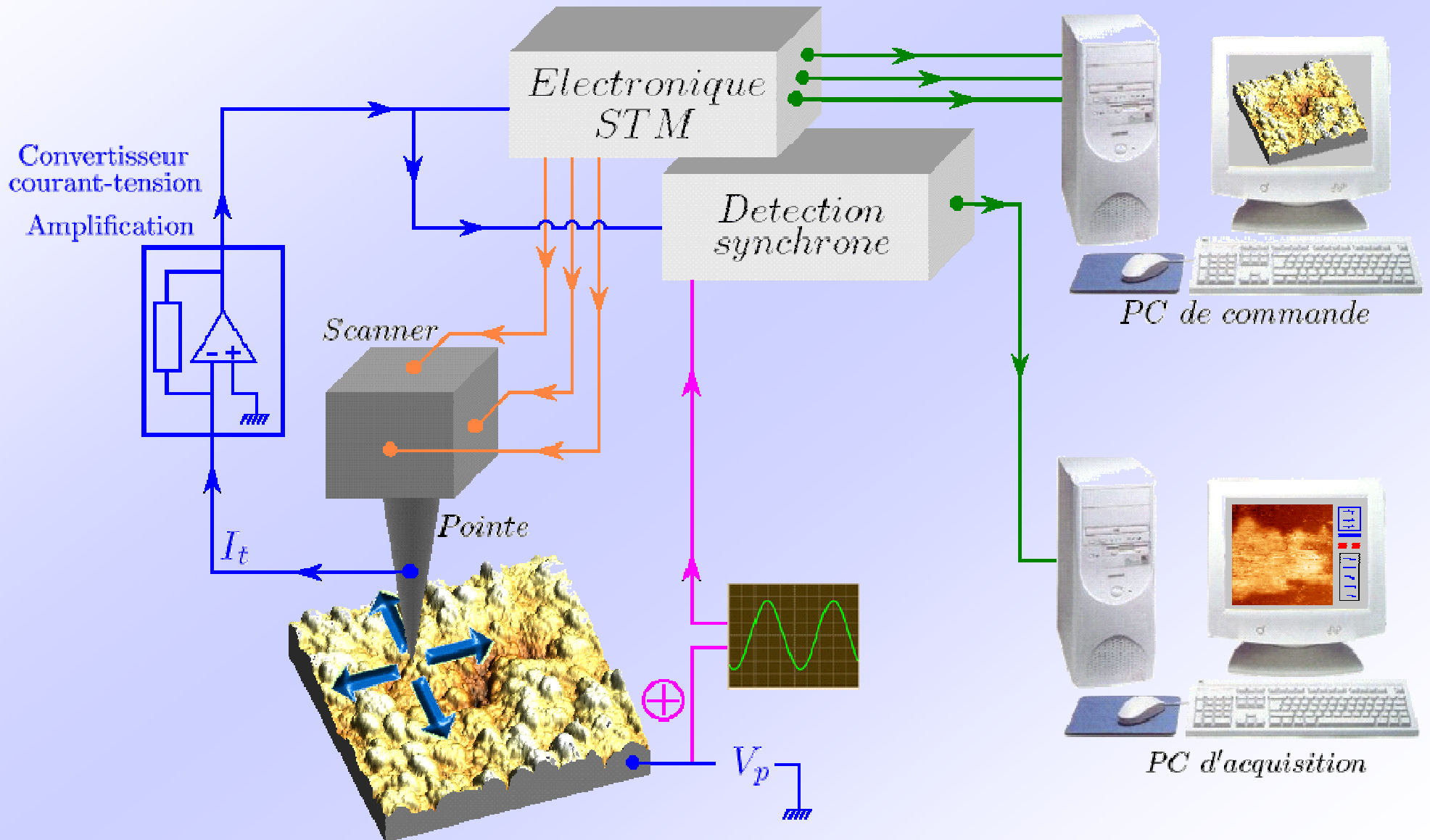
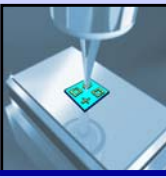


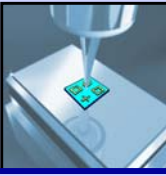
# FONCTIONNEMENT DU STM

## Mode Imagerie et spectroscopie

Dispositif expérimental

● Principe de fonctionnement



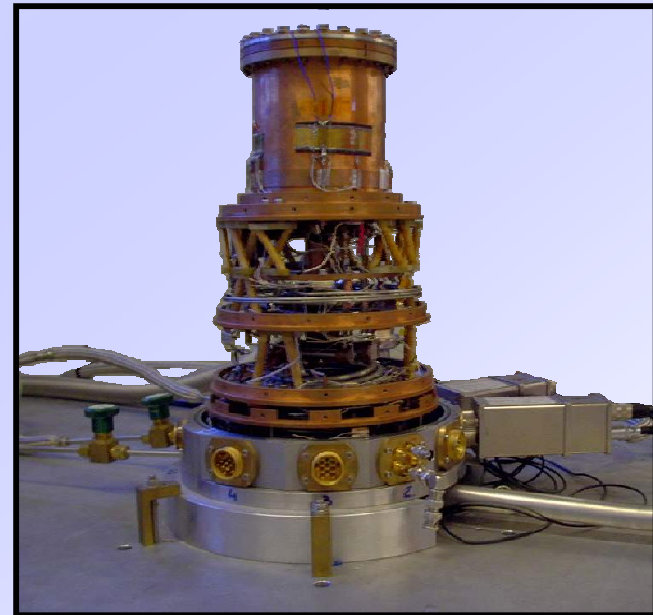


## **Cryostat « $^4\text{He}$ pompé » (1.6 K)**

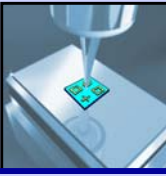


- Temps de refroidissement : 2h
- Résolution éner. théorique: 500  $\mu\text{eV}$
- Pas de champ magnétique

## **Cryostat « Sionludi » (100 mK)**

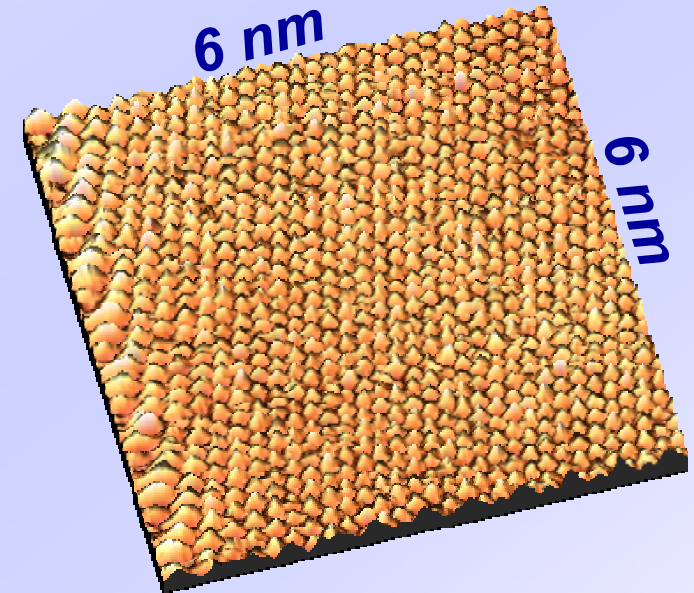


- Temps de refroidissement : 1 nuit
- Résolution éner. théorique : 30  $\mu\text{eV}$
- Champ magnétique : 0.25 T/A



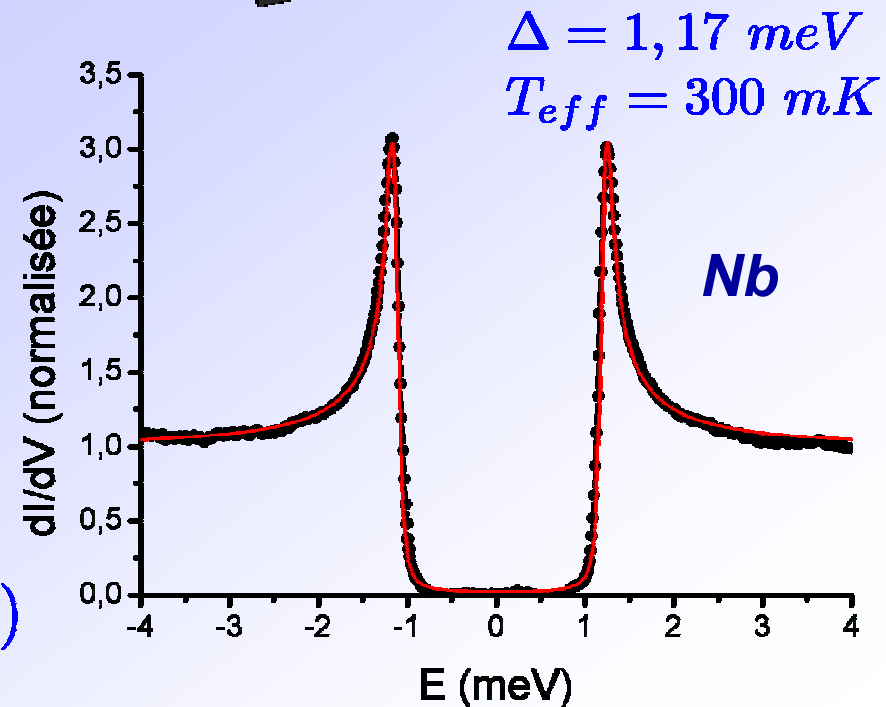
## Performances d'imagerie

- Balayage maximum à 300 K :  $30 \times 30 \mu\text{m}^2$
- Balayage maximum à 100 mK :  $3 \times 3 \mu\text{m}^2$
- Résolution atomique (graphite)
- Table XY – déplacement sur  $2 \times 2 \text{mm}^2$

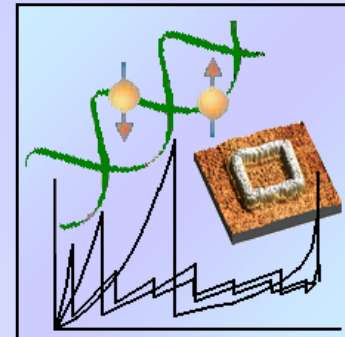


## Performances spectroscopiques

- Résolution en tension :  $\approx 10 \mu\text{V}$
- Bruit convertisseur :  $\approx 1,3 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Moyennage des spectres
- Résolution effective :  $90 \mu\text{eV}$  (300mK)



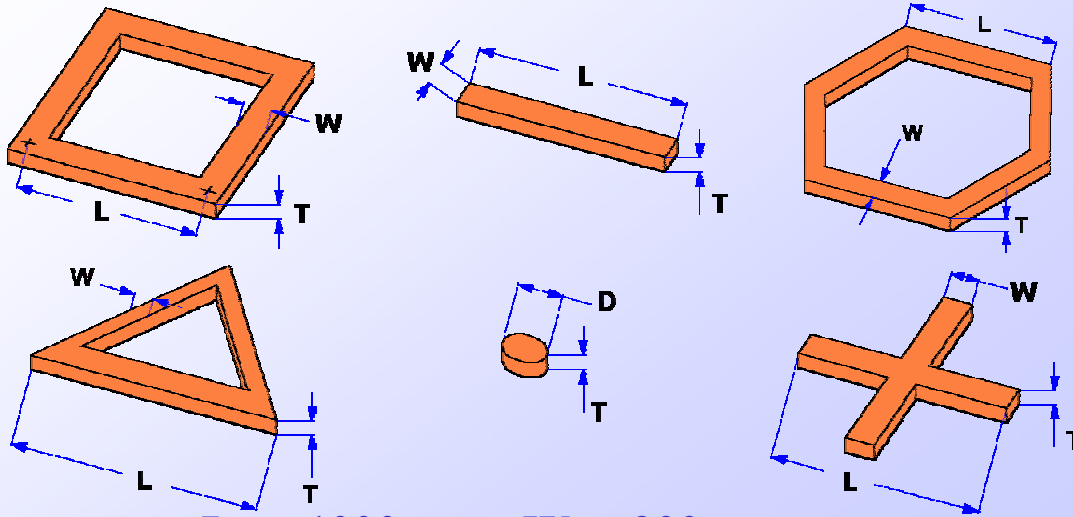
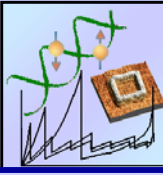
▶ ***Nano-structures N-S***



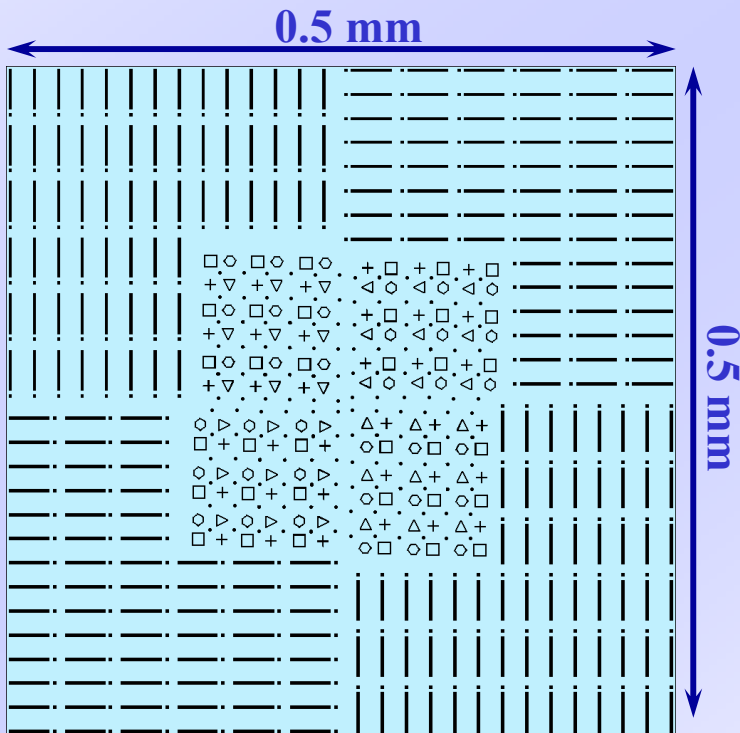
# FABRICATION DES ECHANTILLONS

Nanostructures N-S

● Fabrication des échantillons

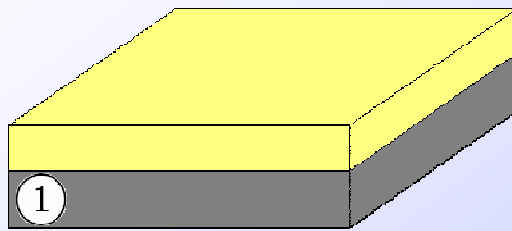
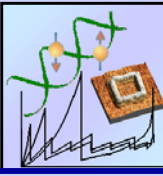


$L \approx 1000 \text{ nm}$     $W \approx 200 \text{ nm}$   
 $D \approx 200 \text{ nm}$     $T \approx 15 \text{ nm}$

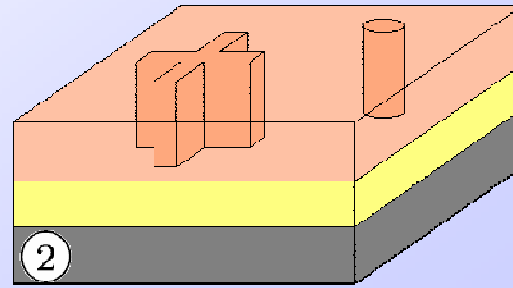


- Propreté de la surface
- Supraconductivité en surface non détériorée
- Interface S-N propre
- Motifs de métal normal les plus précis possible  
↳ litho. Électronique
- Faible rugosité

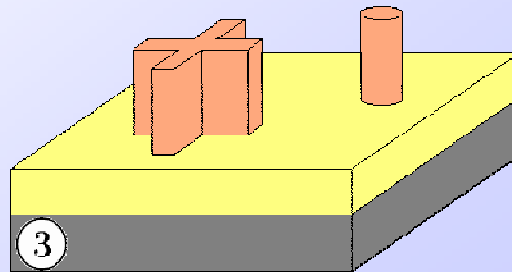
# PROCEDE DE SALLE BLANCHE



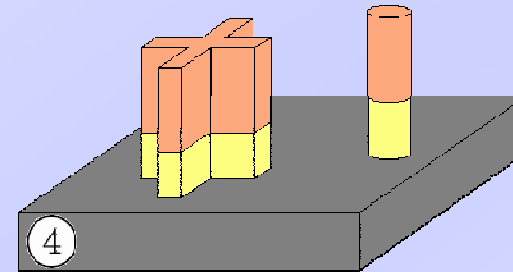
① Dépôt couche N (Au)



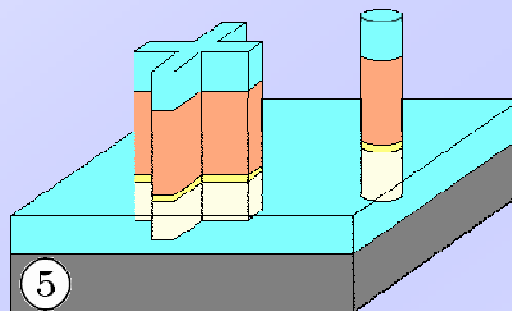
② Insolation de la résine



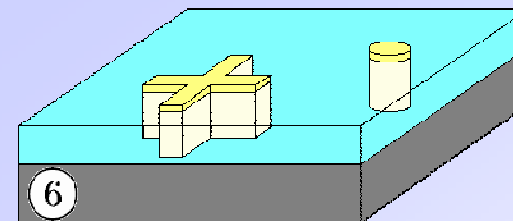
③ Développement



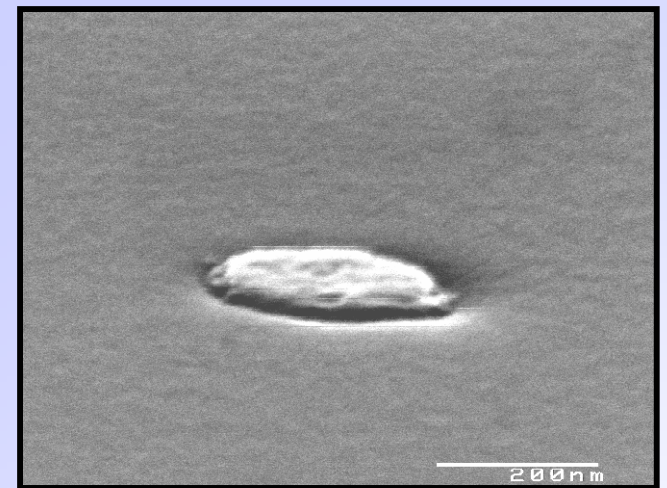
④ Gravure



⑤ Dépôt couche S (Nb)



⑥ Nettoyage



*Motif en or (N) enterré dans du niobium (S)*

# ETUDE à 100 mK

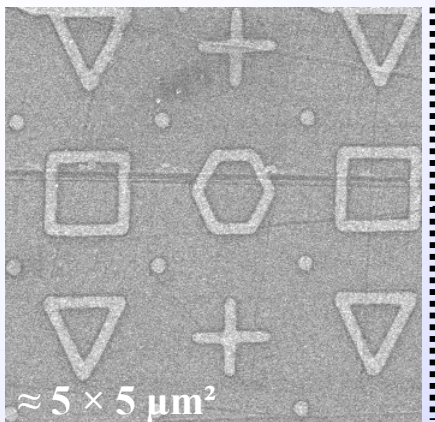
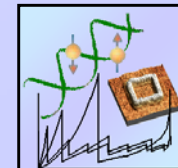


Image MEB

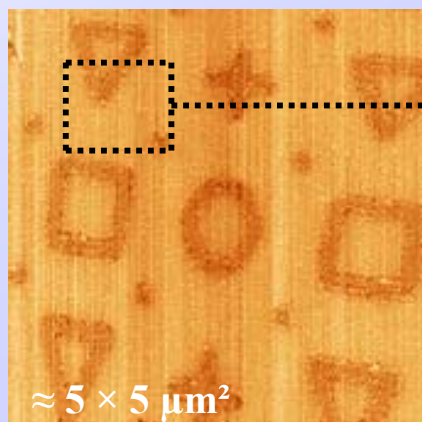


Image STM  
300 K

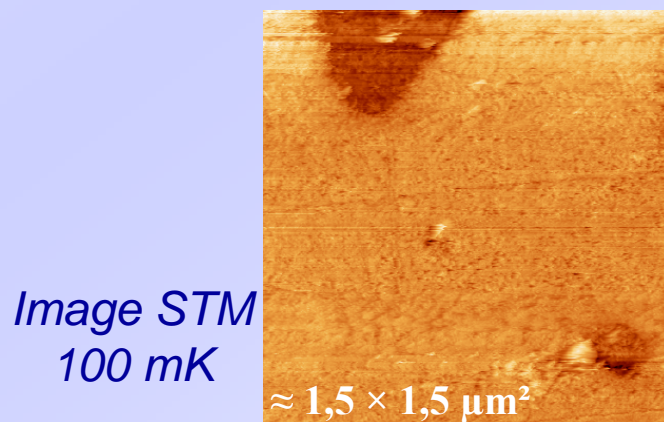
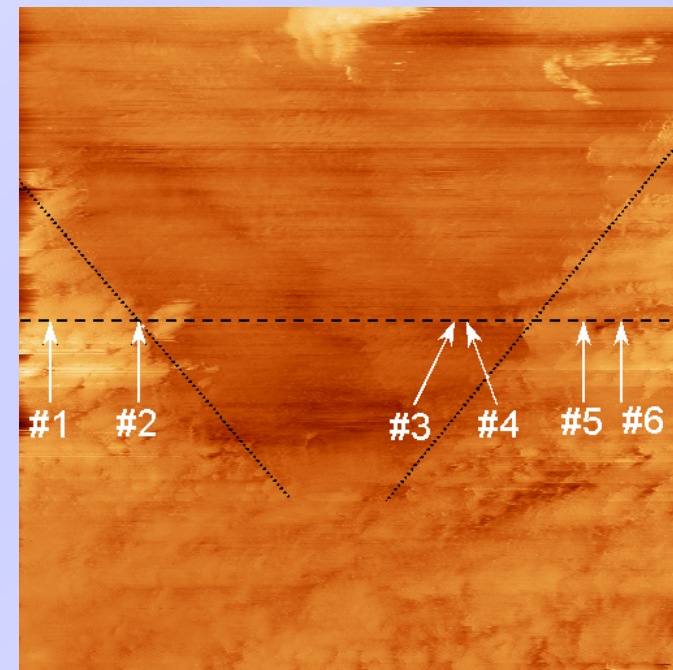
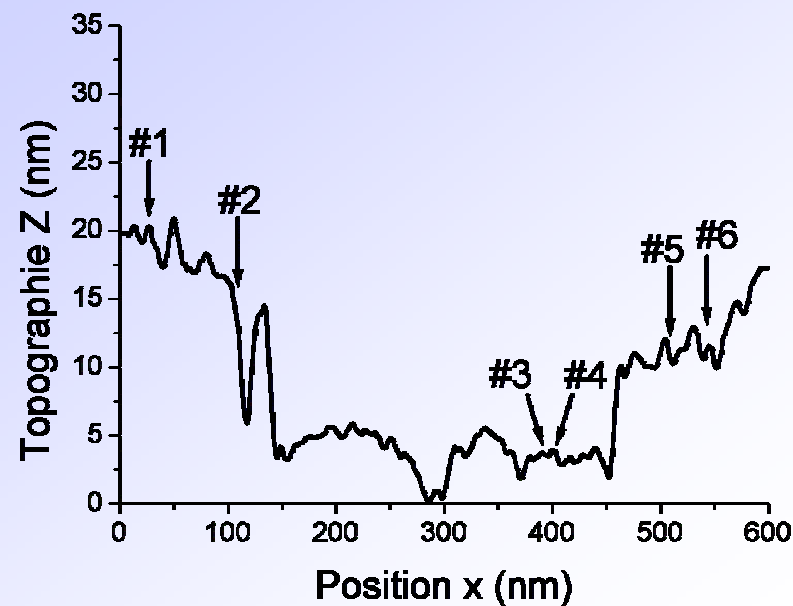


Image STM  
100 mK



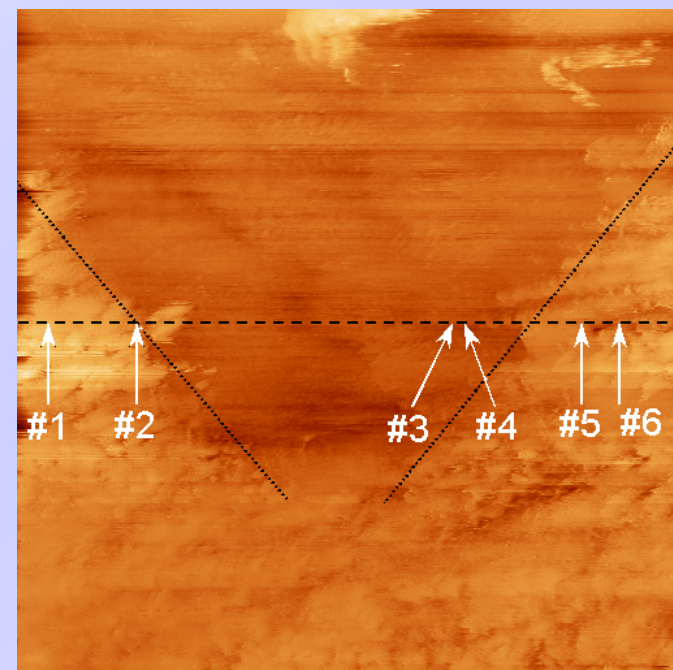
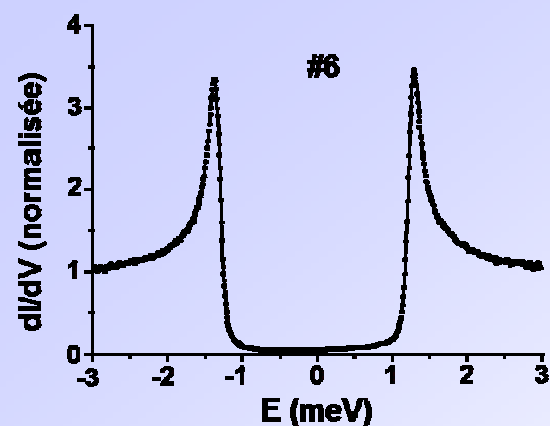
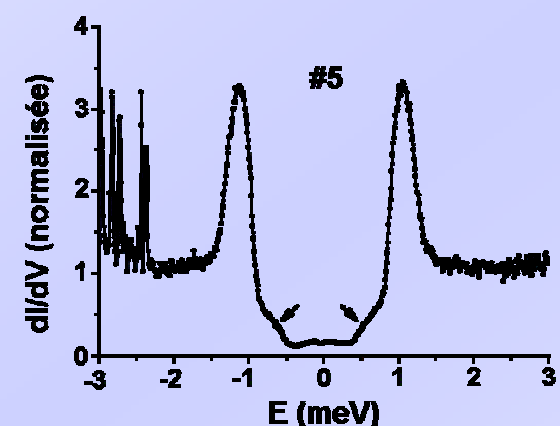
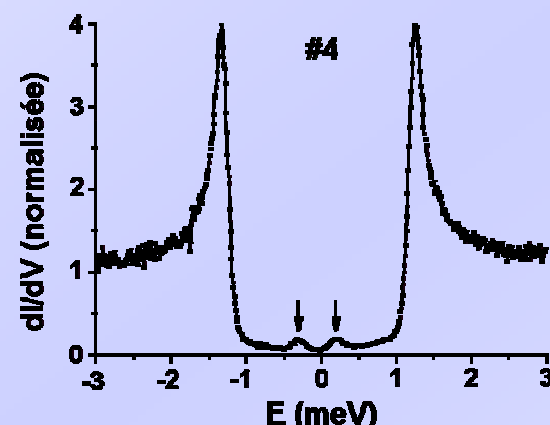
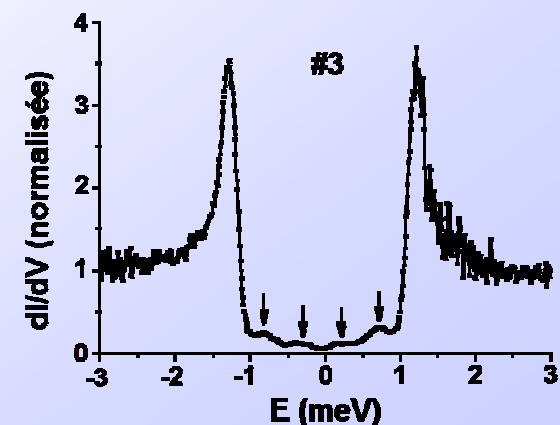
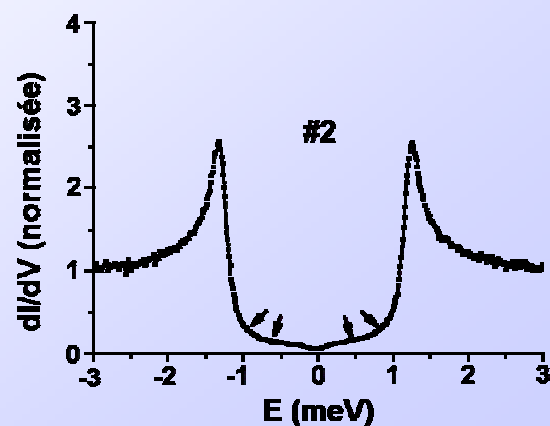
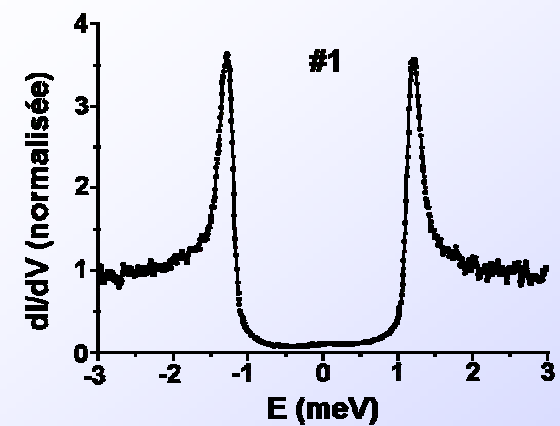
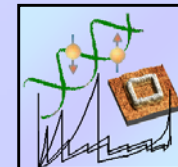
600 X 600 nm<sup>2</sup>



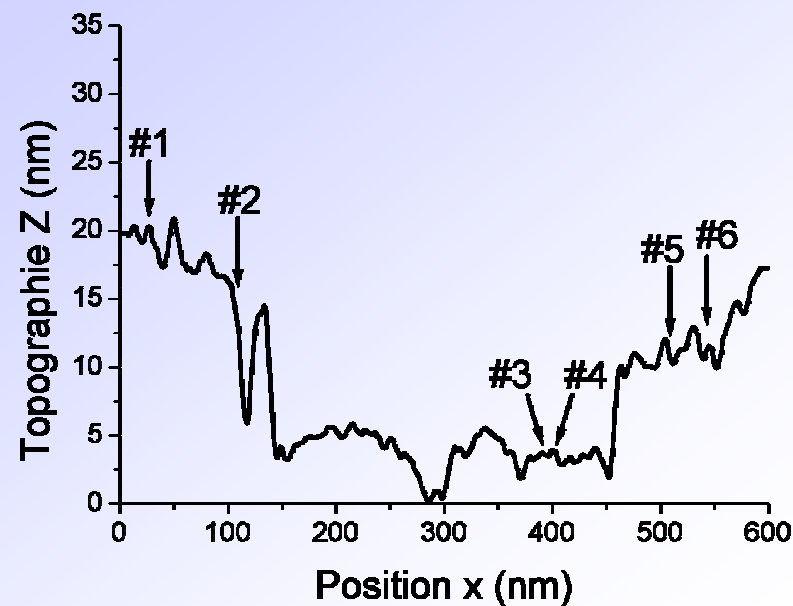
# ETUDE à 100 mK

Nanostructures N-S

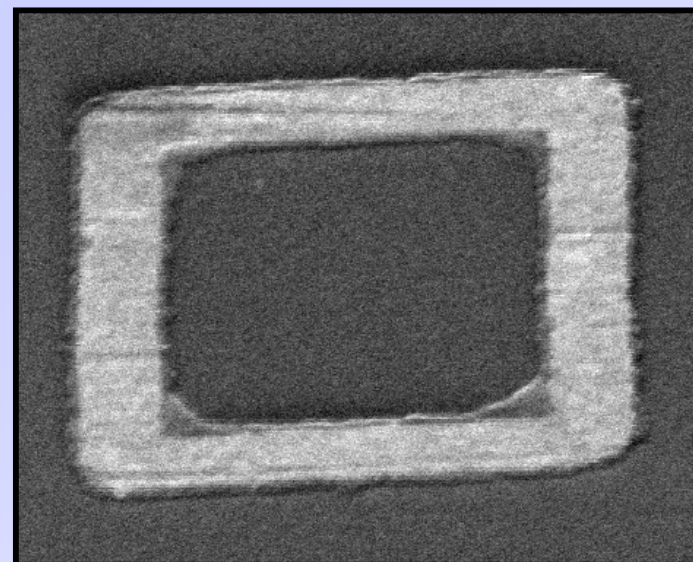
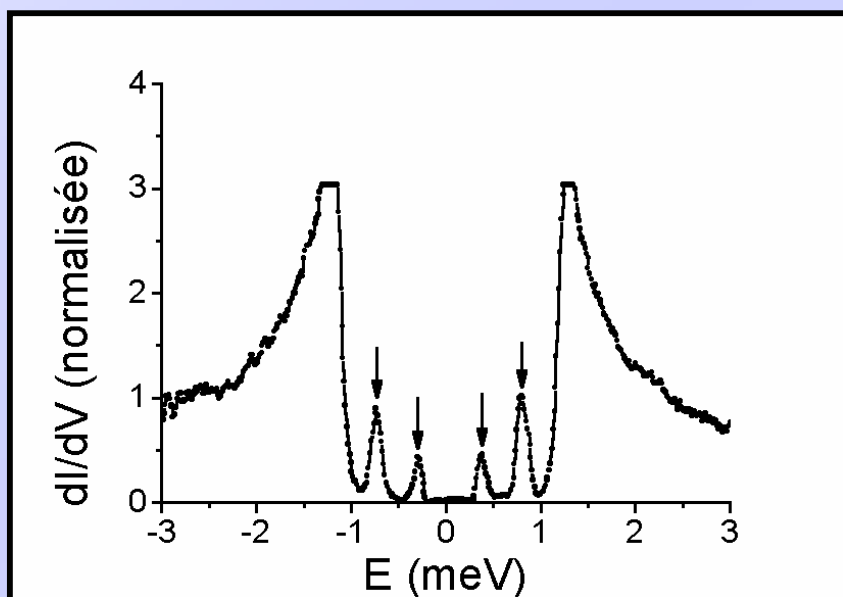
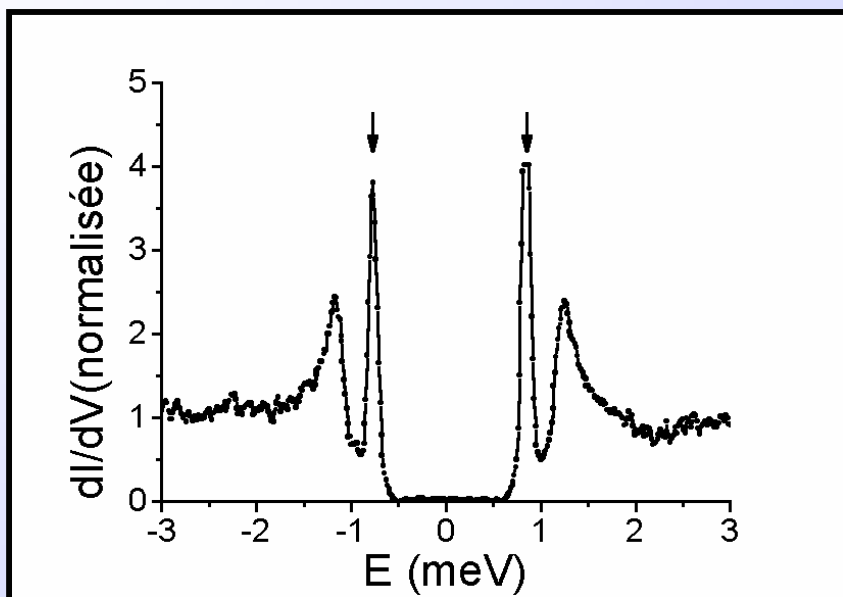
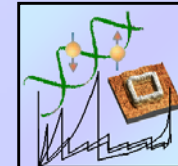
● Étude STM et résultats



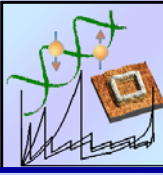
600 X 600 nm<sup>2</sup>







# ORIGINE DES PICS



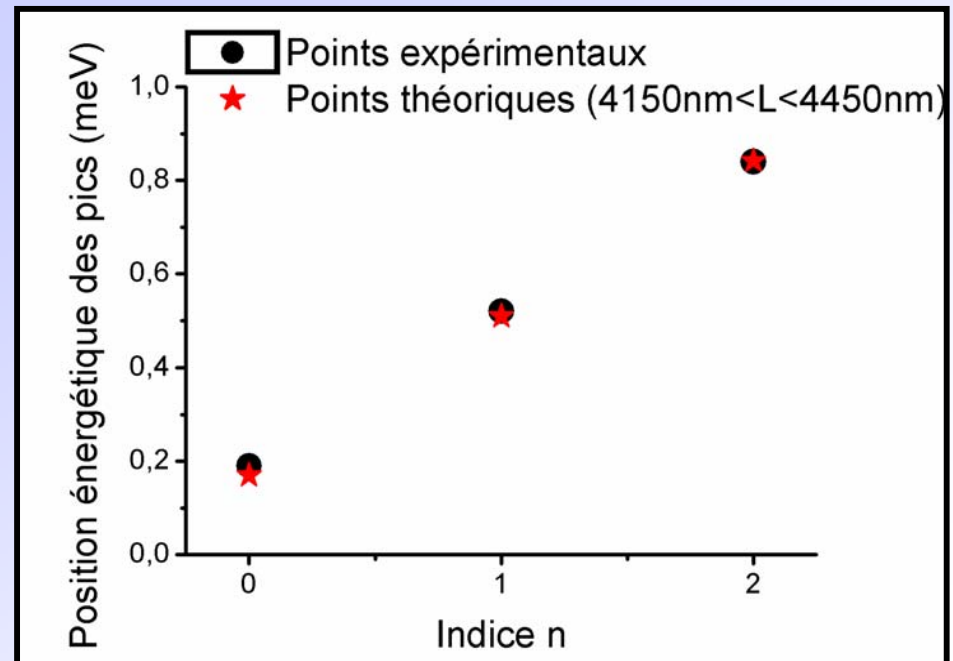
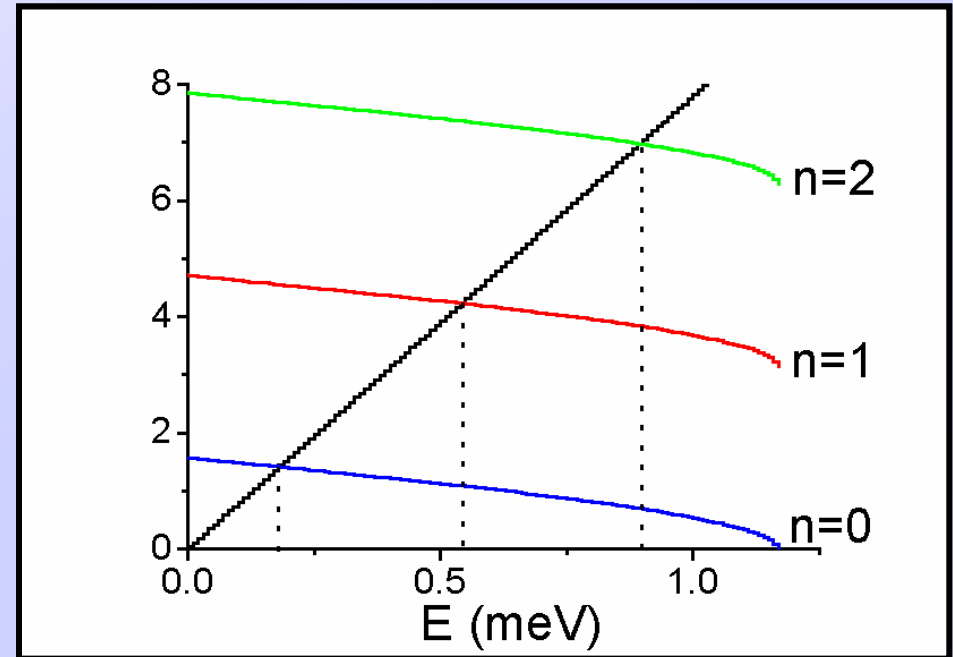
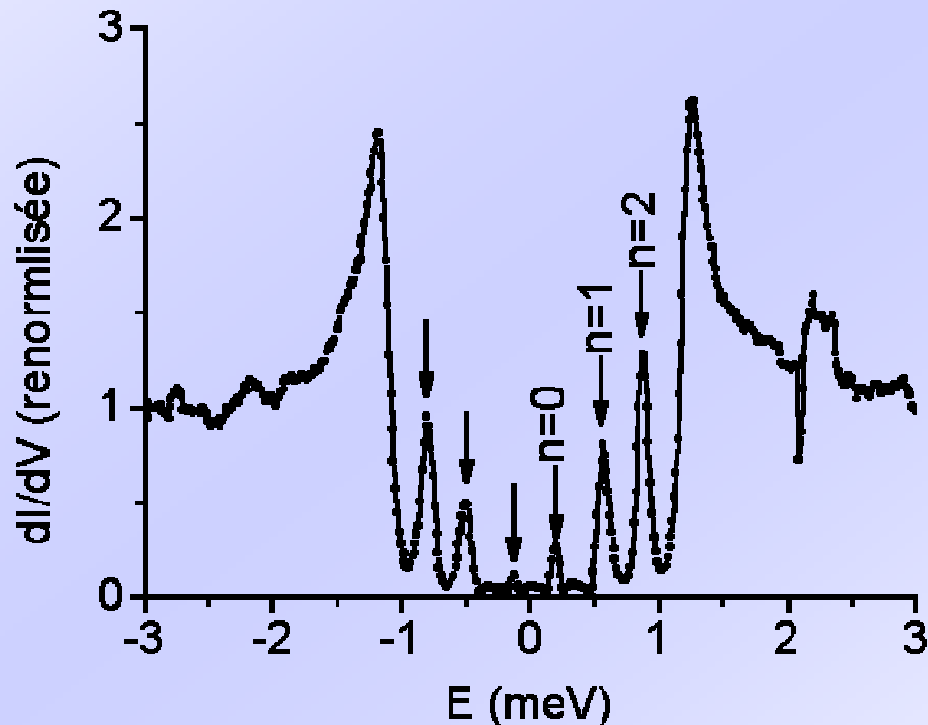
Condition de quantification  
de De Gennes S<sup>t</sup> James ( $\alpha=0$ )

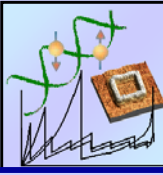
Deux paramètres ajustables :  $d_N$  et  $v_F$

$$\frac{\epsilon d_N}{\hbar v_F} = \left[ n\pi + \text{Arcos} \left( \frac{\epsilon}{\Delta} \right) \right]$$

Courbe noire, en  
fonction de  $d_N$ .

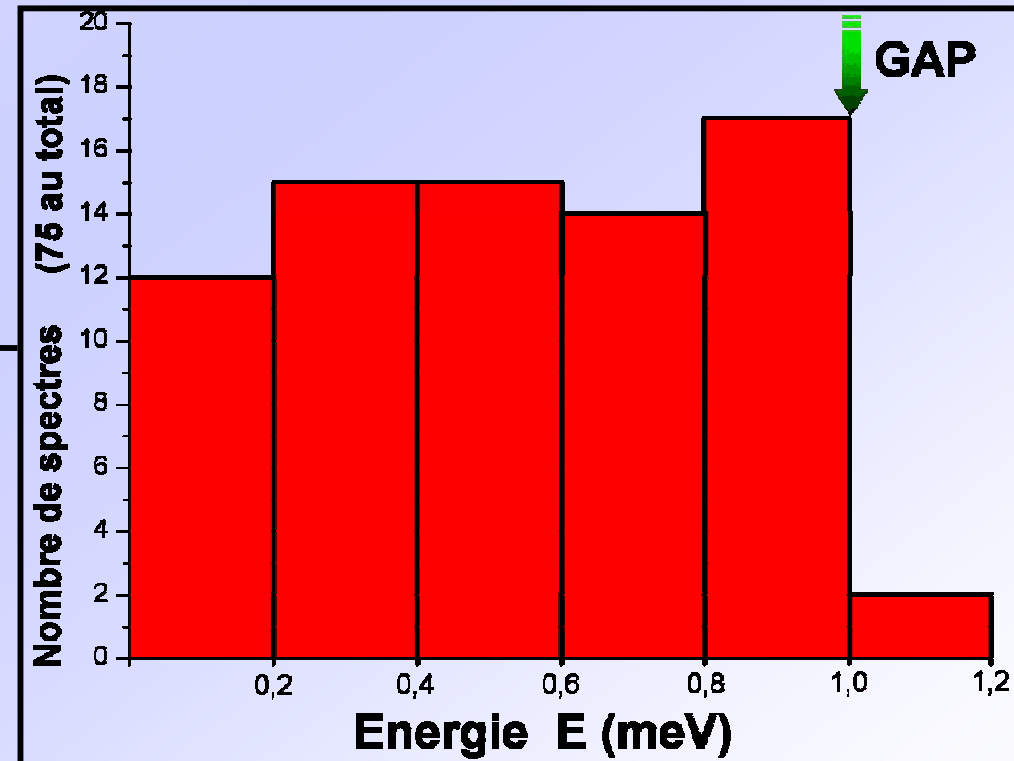
Courbes bleu,  
rouge et verte.

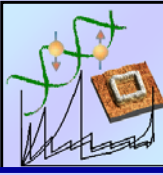




## États liés de Gennes St James ?

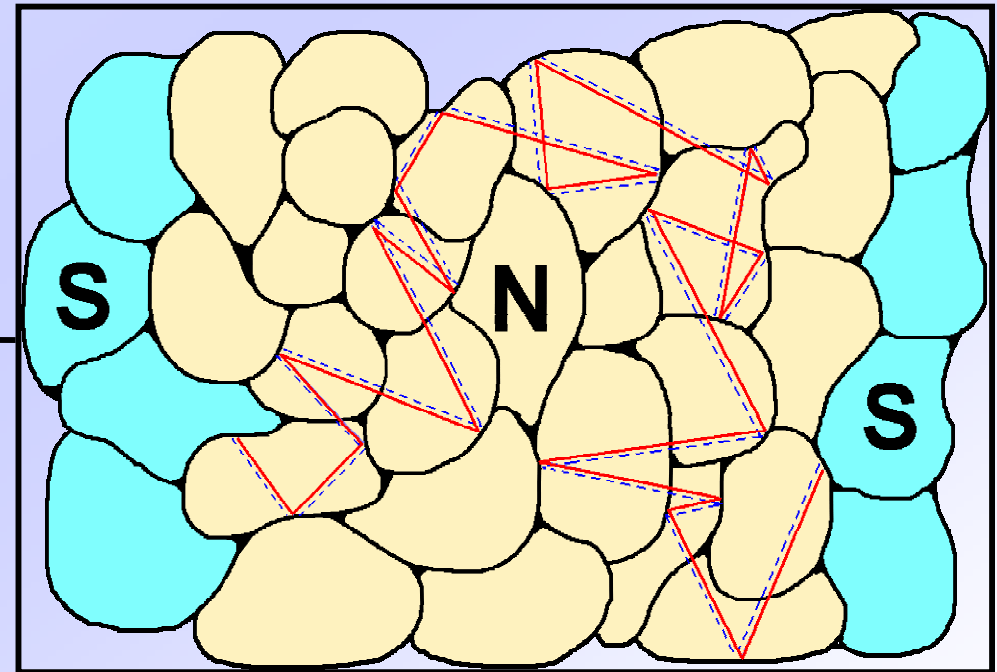
- Symétrie des pics par rapport au niveau de Fermi
- Espacement des pics conforme au modèle de De-Gennes St James
- Observation des pics à basse température seulement.
- Position énergétique (presque) toujours inférieure au gap
- Longueur  $d_n$  des trajectoires trop grande ?
- États résonants très localisés ?



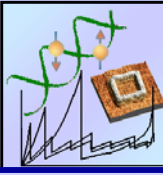


## États liés de Gennes St James ?

- Symétrie des pics par rapport au niveau de Fermi
- Espacement des pics conforme au modèle de De-Gennes St James
- Observation des pics à basse température seulement.
- Position énergétique (presque) toujours inférieure au gap
- Longueur  $d_n$  des trajectoires trop grande ?
- États résonants très localisés ?

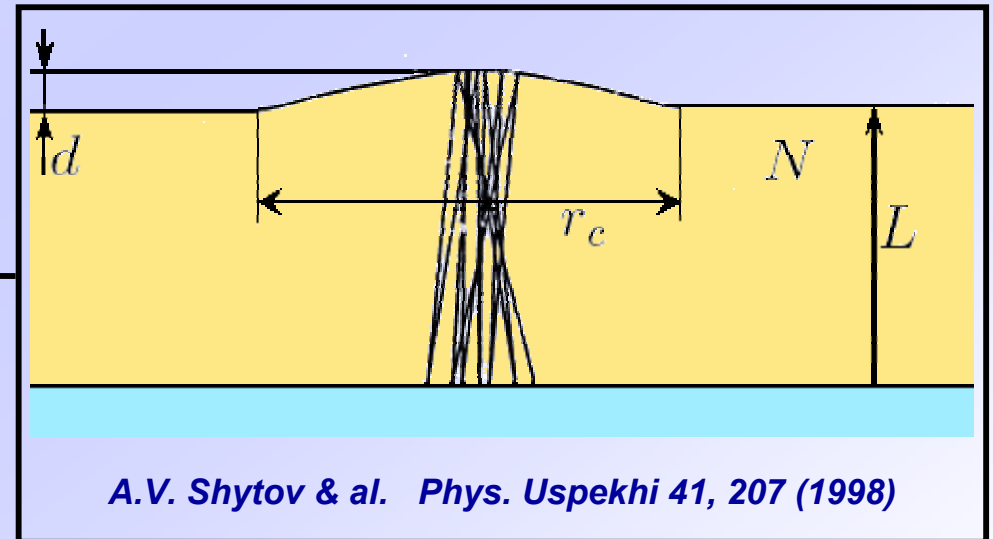


**Régime quasi-balistique**



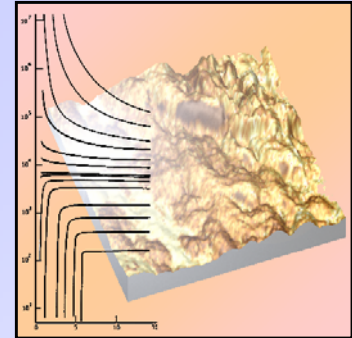
## États liés de Gennes St James ?

- Symétrie des pics par rapport au niveau de Fermi
- Espacement des pics conforme au modèle de De-Gennes St James
- Observation des pics à basse température seulement.
- Position énergétique (presque) toujours inférieure au gap
- Longueur  $d_n$  des trajectoires trop grande ?
- États résonants très localisés ?



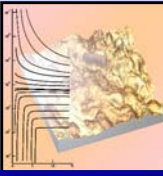


# ***Supraconductivité inhomogène***



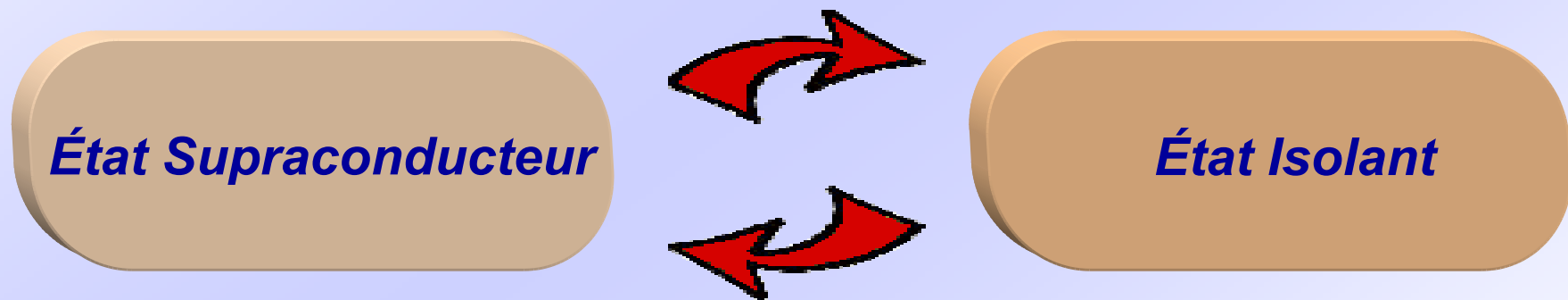
# TRANSITION SUPRACONDUCTEUR - ISOLANT

Supraconductivité inhomogène  
● Transition supraconducteur-isolant

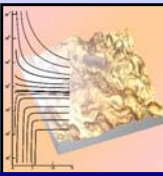


*Une transition de phase quantique a lieu à température nulle. Elle survient lorsque le système change brutalement d'état, dès qu'un paramètre de son Hamiltonien a atteint une valeur critique.*

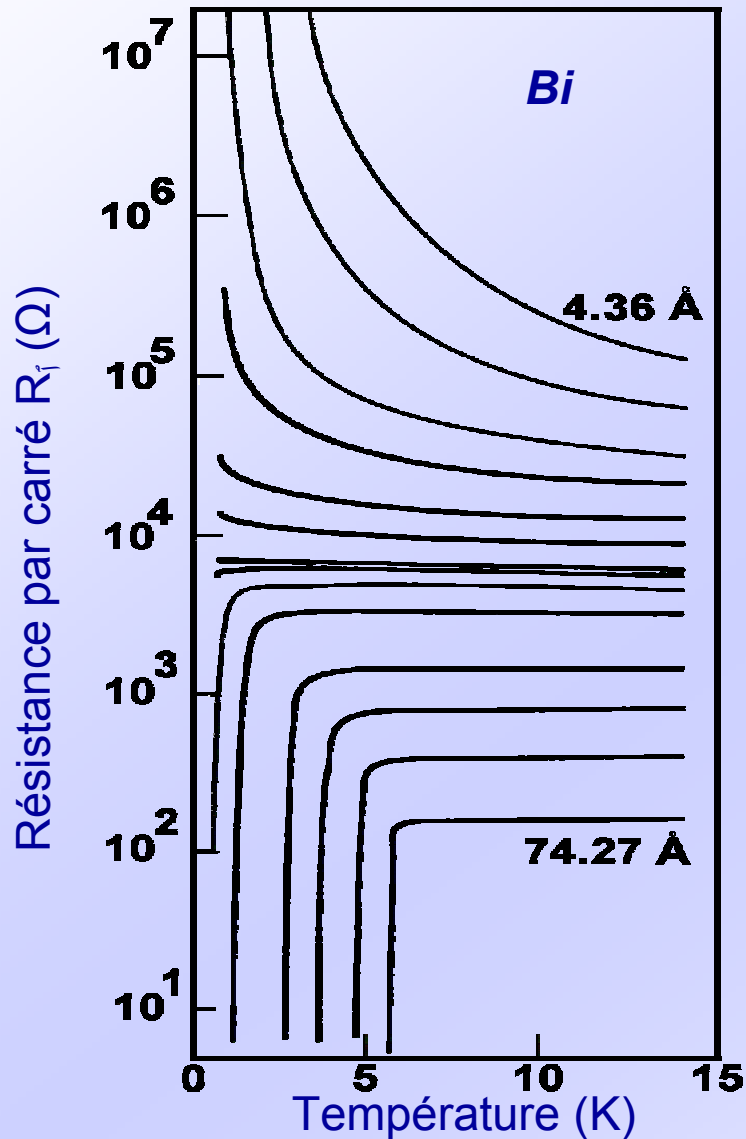
## Films minces supraconducteurs



- Épaisseur du film
- Désordre
- Champ magnétique

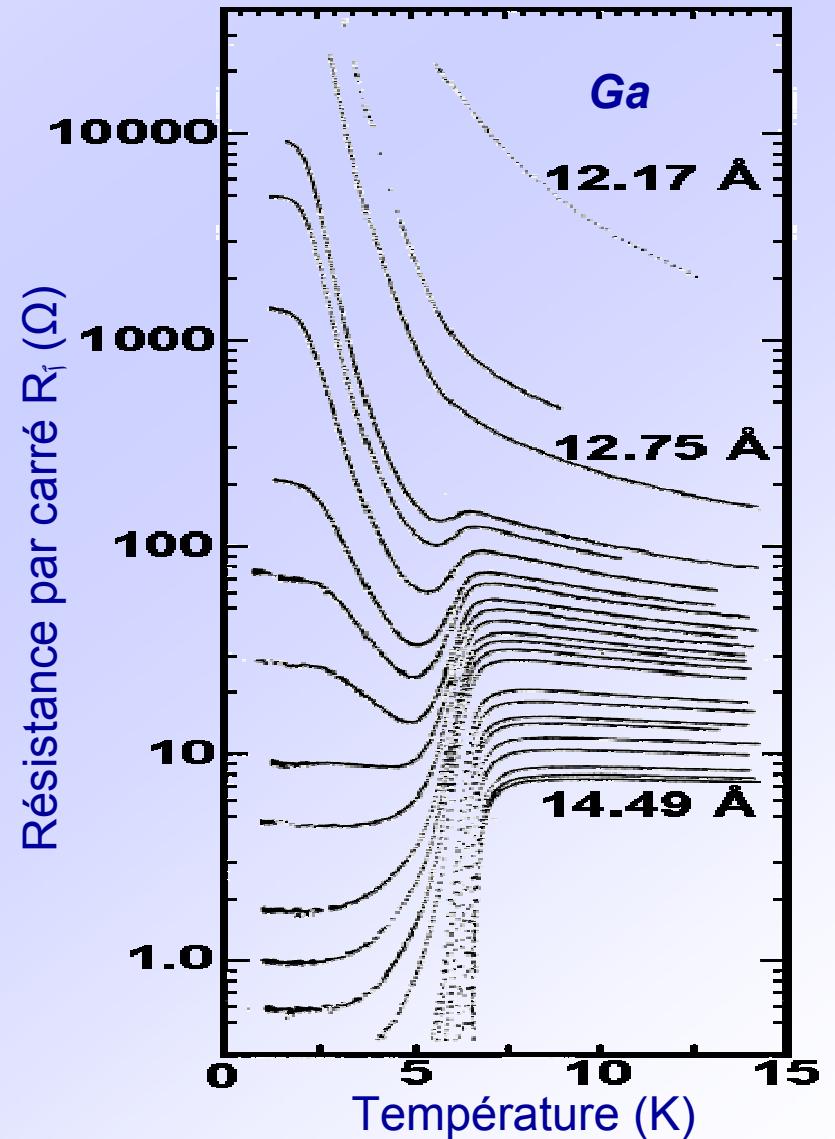


## Films désordonnés homogènes



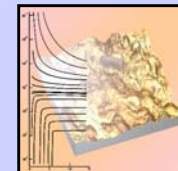
D.B. Haviland & al. *Phys. Rev. Lett.* 62, 2180 (1989)

## Films désordonnés granulaires



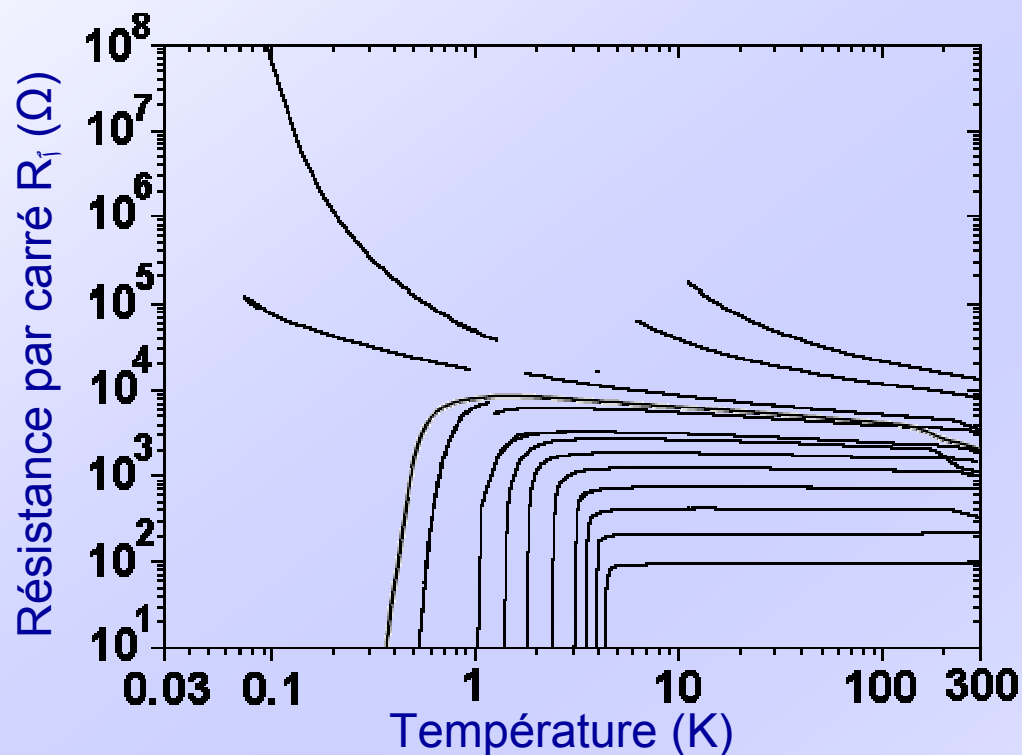
H.M. Jaeger & al. *Phys. Rev. B* 34, 4920 (1986)



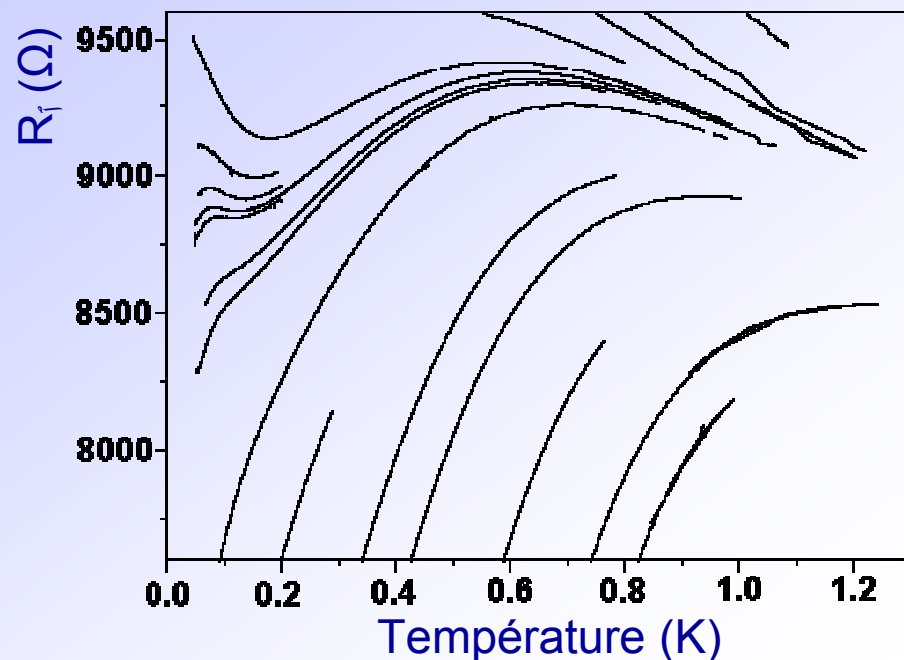
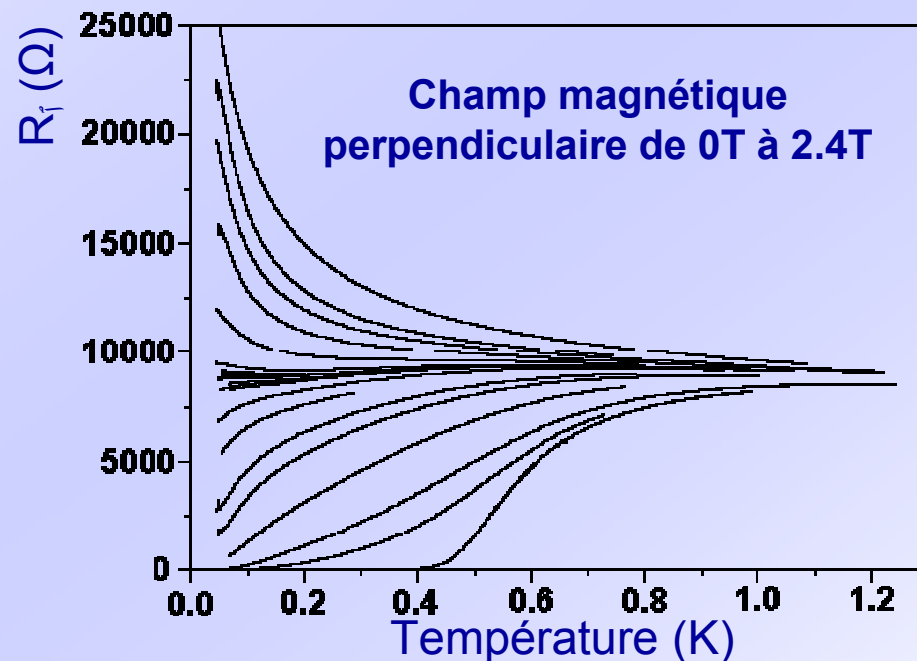


### Films minces - $\text{TiN}_\delta$

Résistance par carré :  $8 \Omega < R_i < 10^4 \Omega$



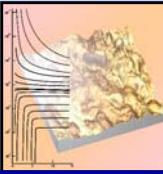
*N. Hadacek, M. Sanquer & J.C. Villégier  
Phys. Rev. B 69, 024505, 2004*



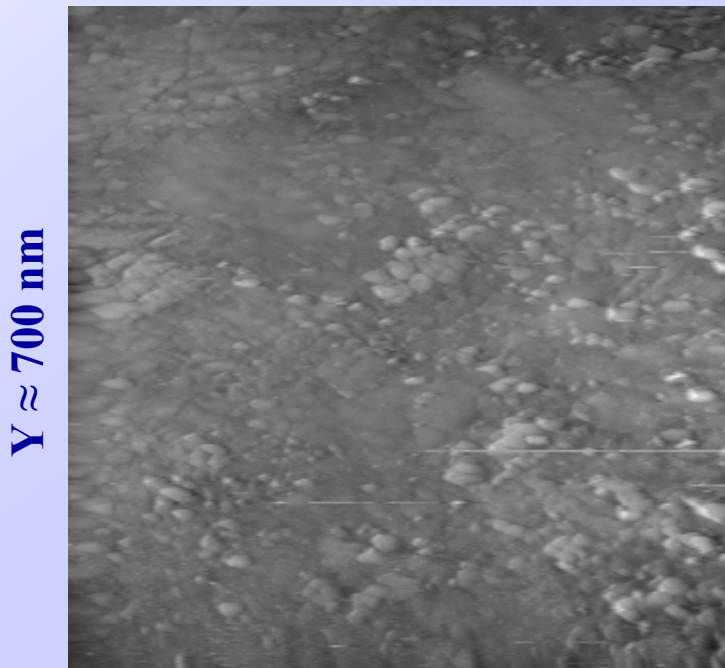
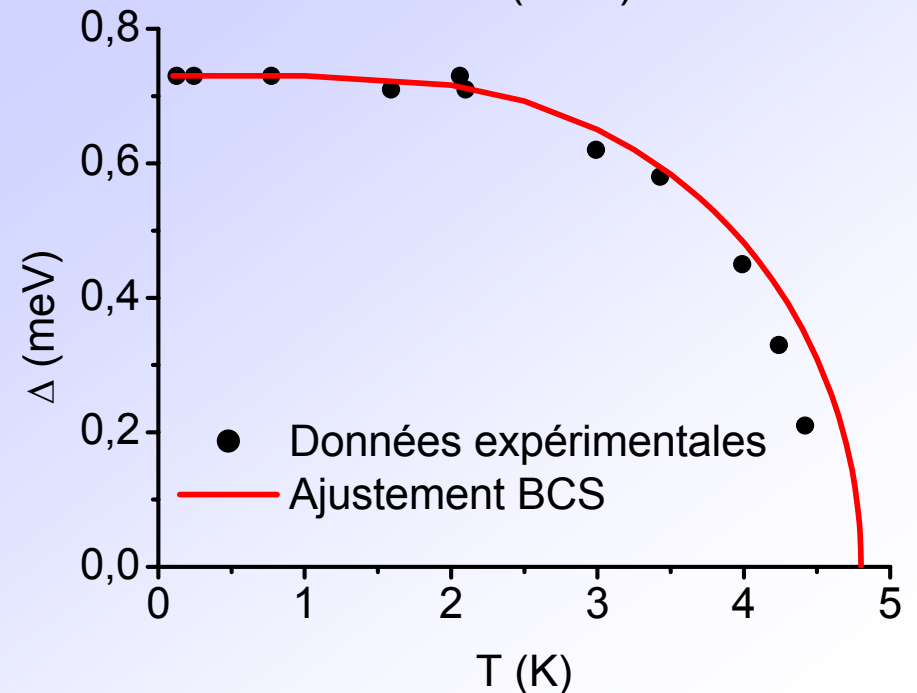
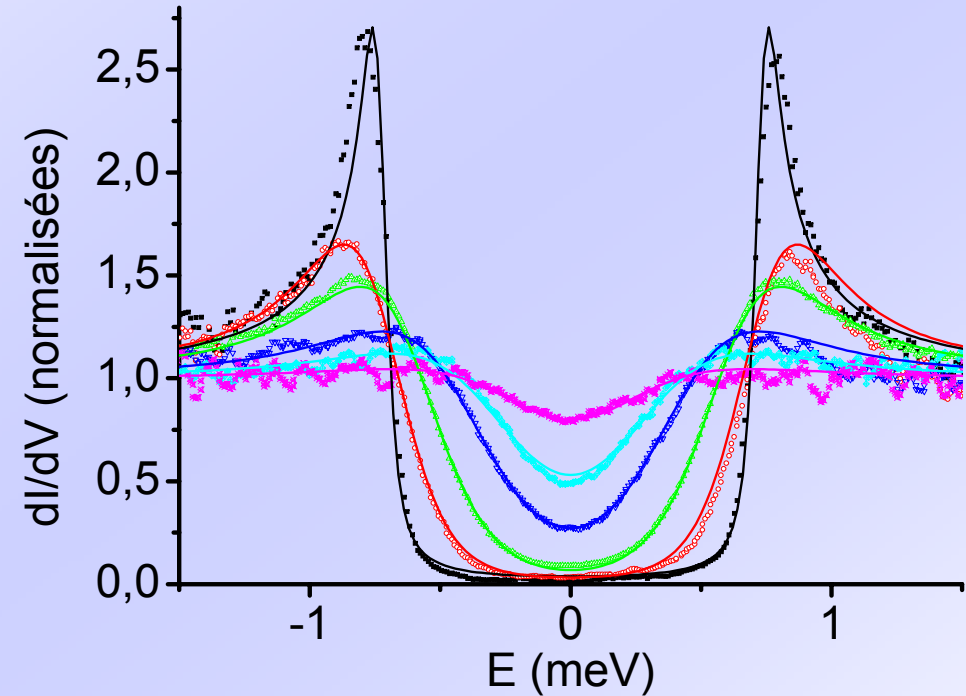
# FILM DESORDONNE EPAIS

## Supraconductivité inhomogène

● Films minces de nitrure de titane



- Gap supraconducteur : 0.73 meV
- Température de transition : 4.60 K
- Longueur de cohérence  $\approx 6$  nm
- Libre parcours moyen  $\approx 4$  à 6 nm
- Résistance par carré : 27  $\Omega$
- Épaisseur : 900 Å
- Structure granulaire (dia.  $\approx 20$  nm)



Y  $\approx 700$  nm

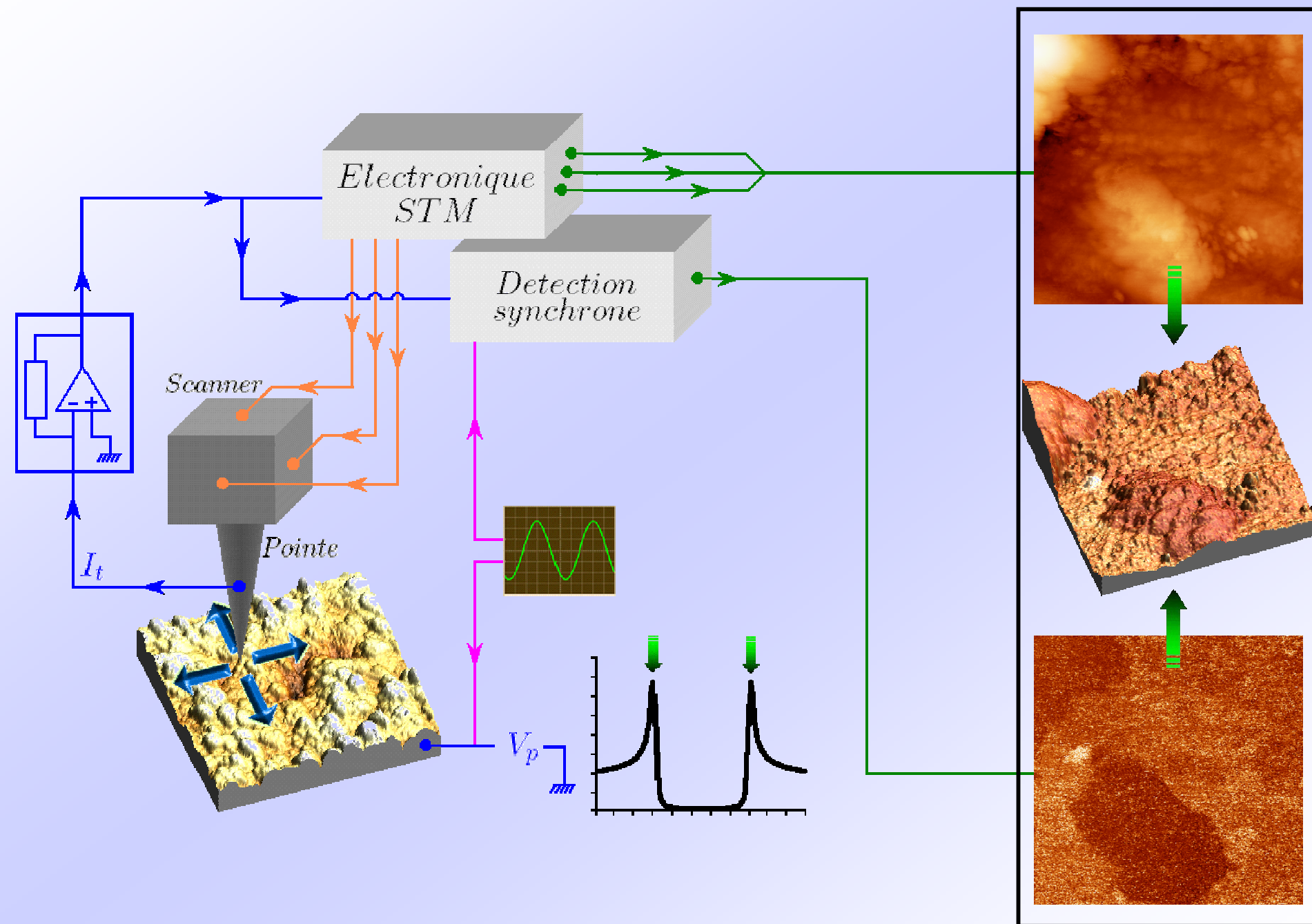
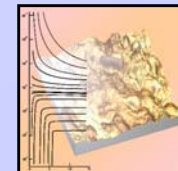
X  $\approx 700$  nm

Z  $\approx 2$  nm  
T = 293K

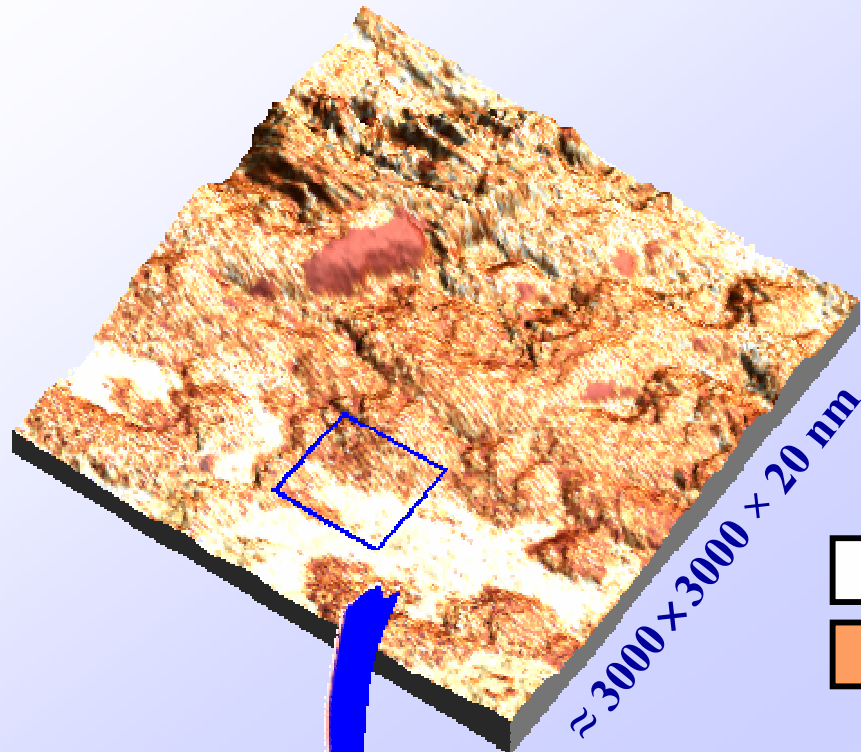
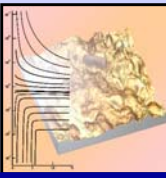
# FUSION DES IMAGES

Supraconductivité inhomogène



● Étude STM et résultats



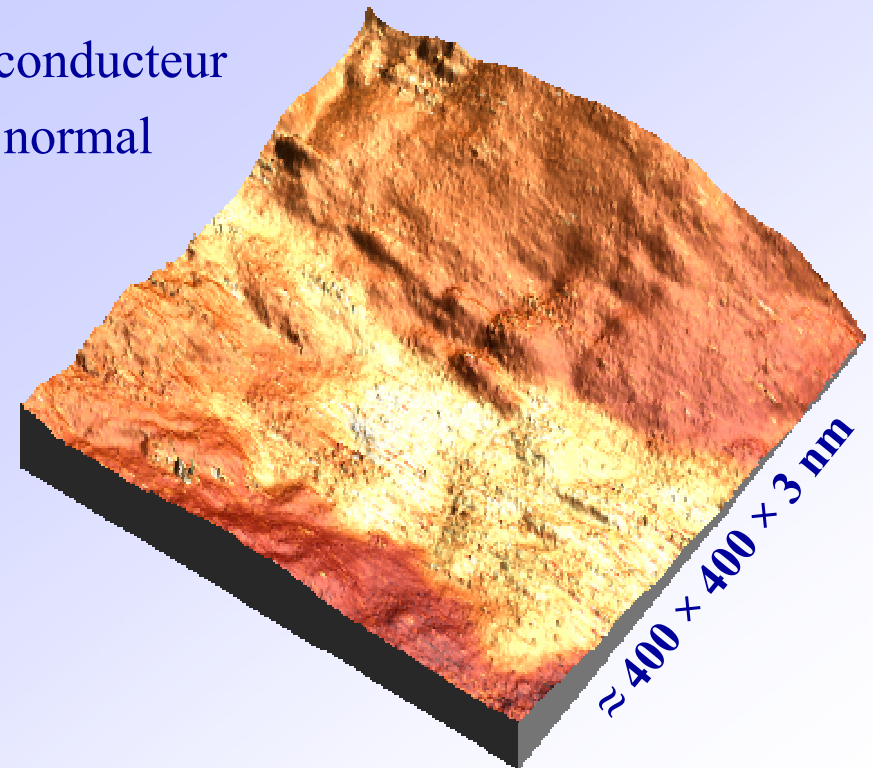
# ZONES NORMALES ET SUPRA.



$\approx 3000 \times 3000 \times 20$  nm

  $\Rightarrow$  supraconducteur  
  $\Rightarrow$  métal normal

ZOOM



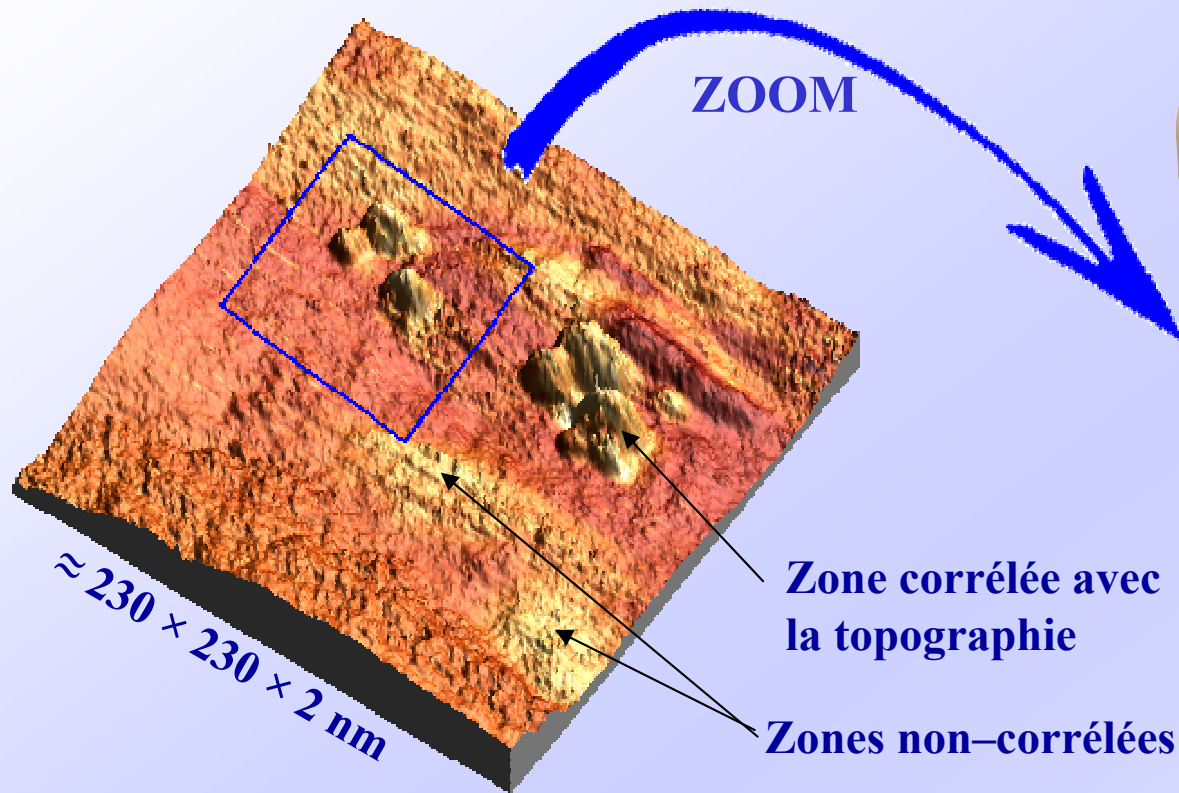
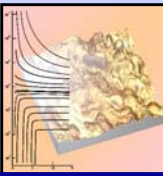
$\approx 400 \times 400 \times 3$  nm

- Des régions normales et supraconductrices apparaissent naturellement à basse température.

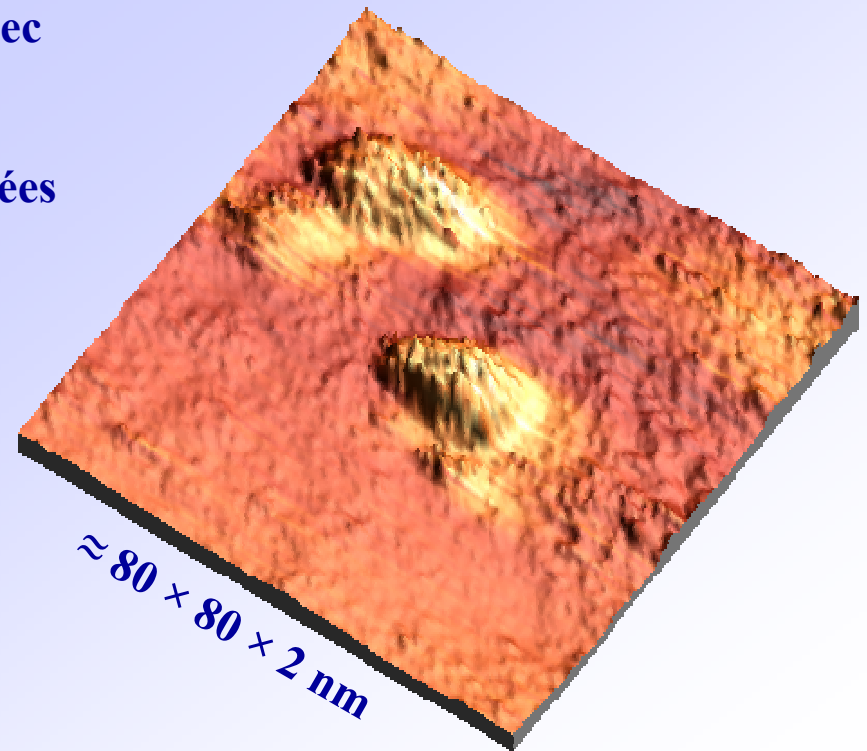
# ZONES NORMALES ET SUPRA.

Supraconductivité inhomogène

● Étude STM et résultats



- $\text{TiN} : R_D = 27 \Omega$
- Température : 100 mK

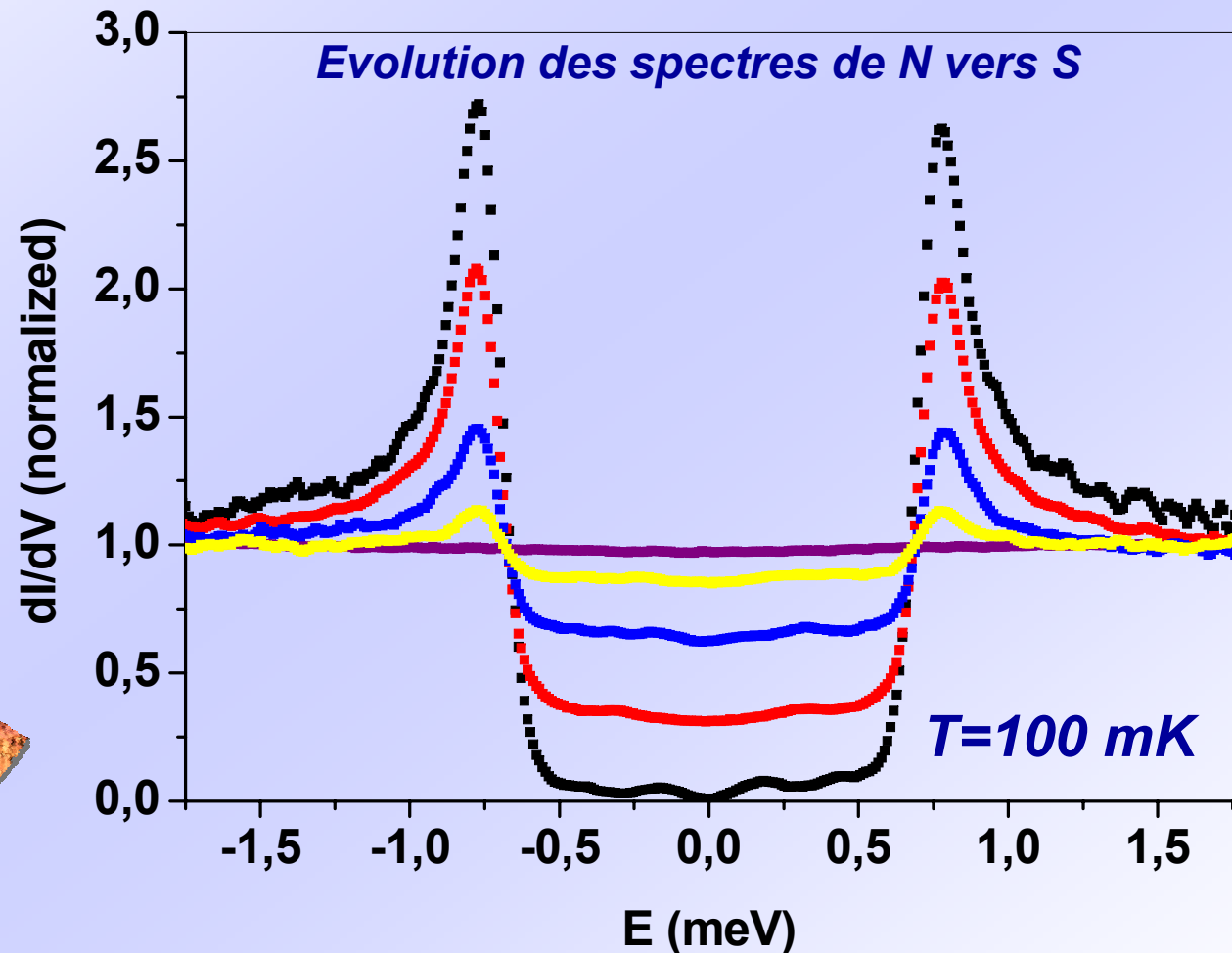
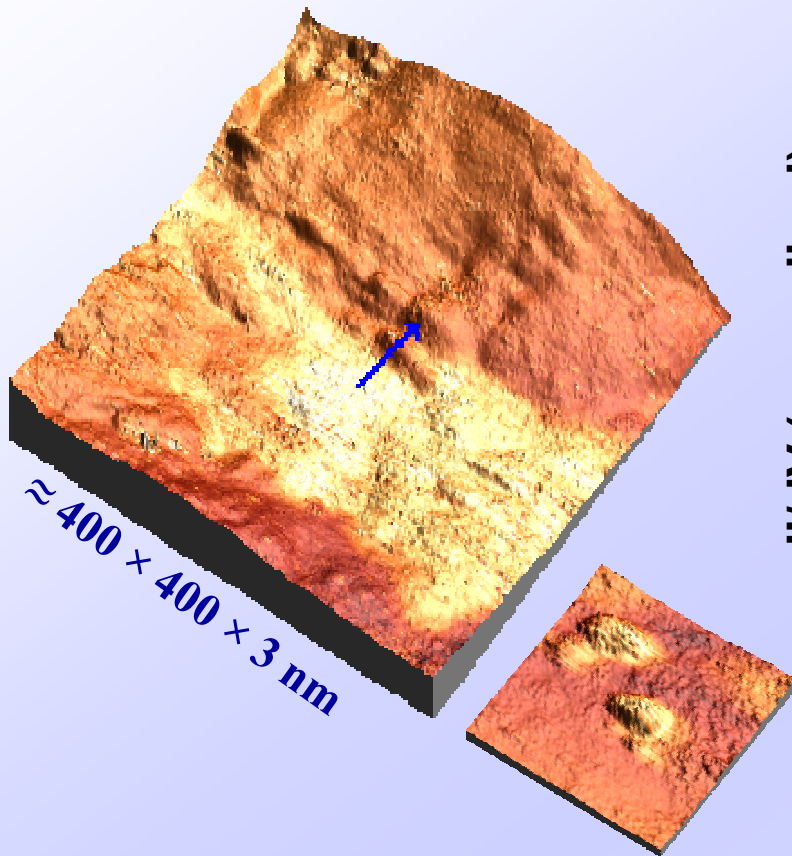
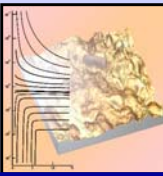


- Des grains supraconducteurs isolés ( $d \approx 20 \text{ nm}$ ) dépassent de la surface.
- Dans les grains, le gap supraconducteur est égal à sa valeur « bulk ».

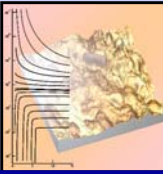
# EVOLUTION DES SPECTRES

Supraconductivité inhomogène

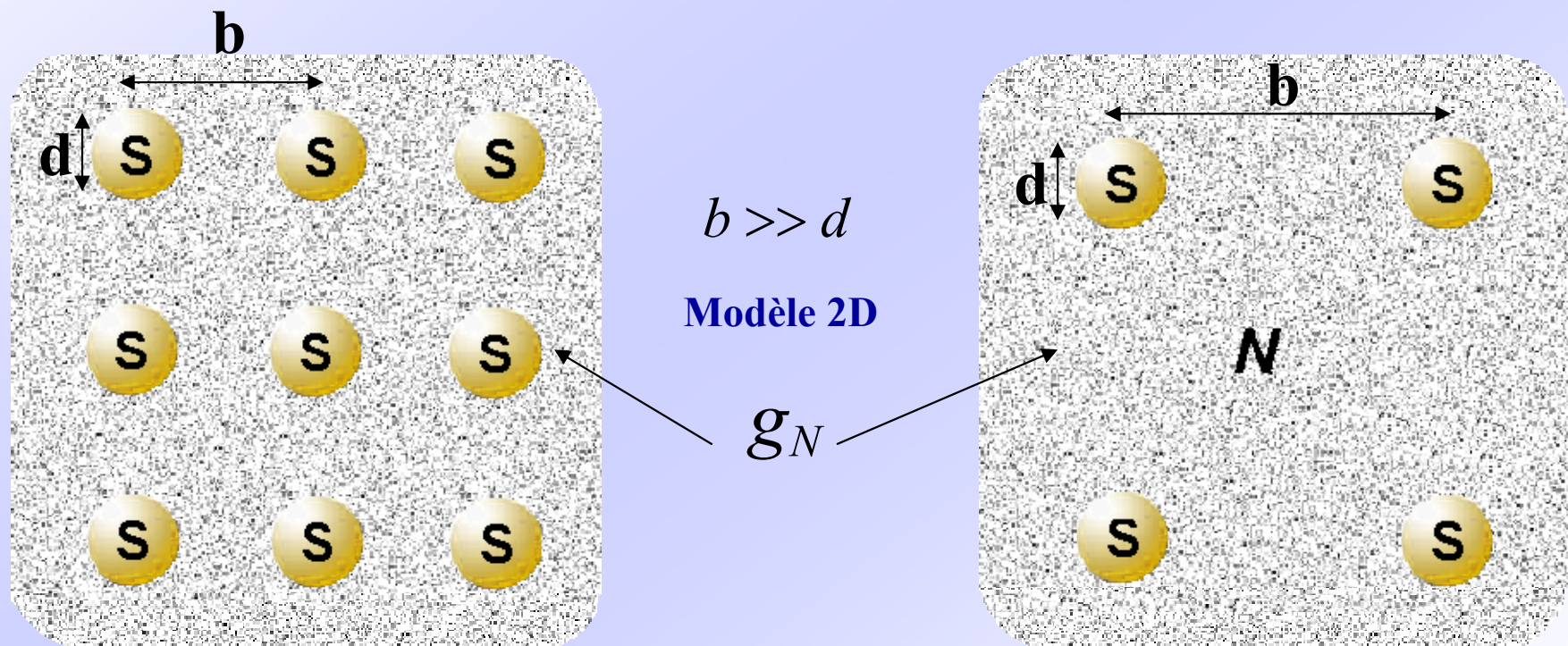
● Étude STM et résultats



- Le gap  $\Delta$  est le même dans toutes les régions supraconductrices.
- Les pics de la densité d'états locale restent à énergie constante  $E \approx \pm\Delta$  en franchissant l'interface SN : le potentiel de paire ne diminue pas.

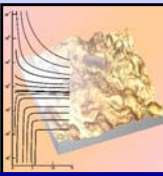


*Un système d'îlots supraconducteurs entourés d'une matrice normale*



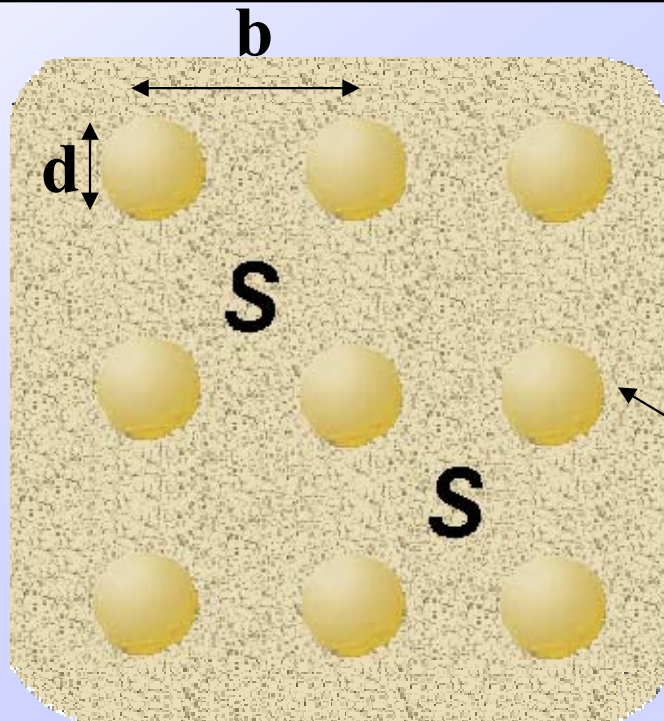
*M.V. Feigel'man & al. Phys. Rev. Lett. 86 (2001)*

*B. Spivak & al. Phys. Rev. B 64 (2001)*



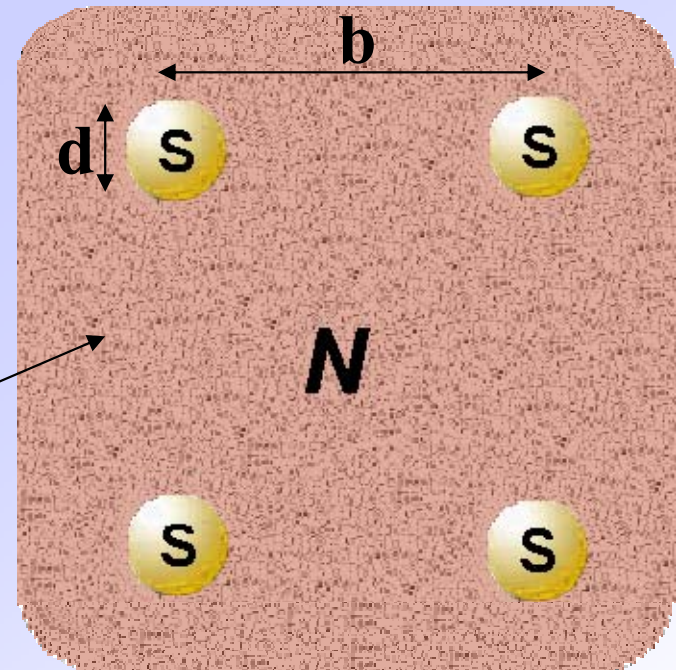
## Un système d'îlots supraconducteurs entourés d'une matrice normale

Cohérence de phase globale  
État supraconducteur macroscopique



$$g_N > g_c(b, d)$$

Les fluctuations quantiques rendent l'état  
supra. macroscopique instable



$$g_N < g_c(b, d)$$

$b \gg d$   
Modèle 2D

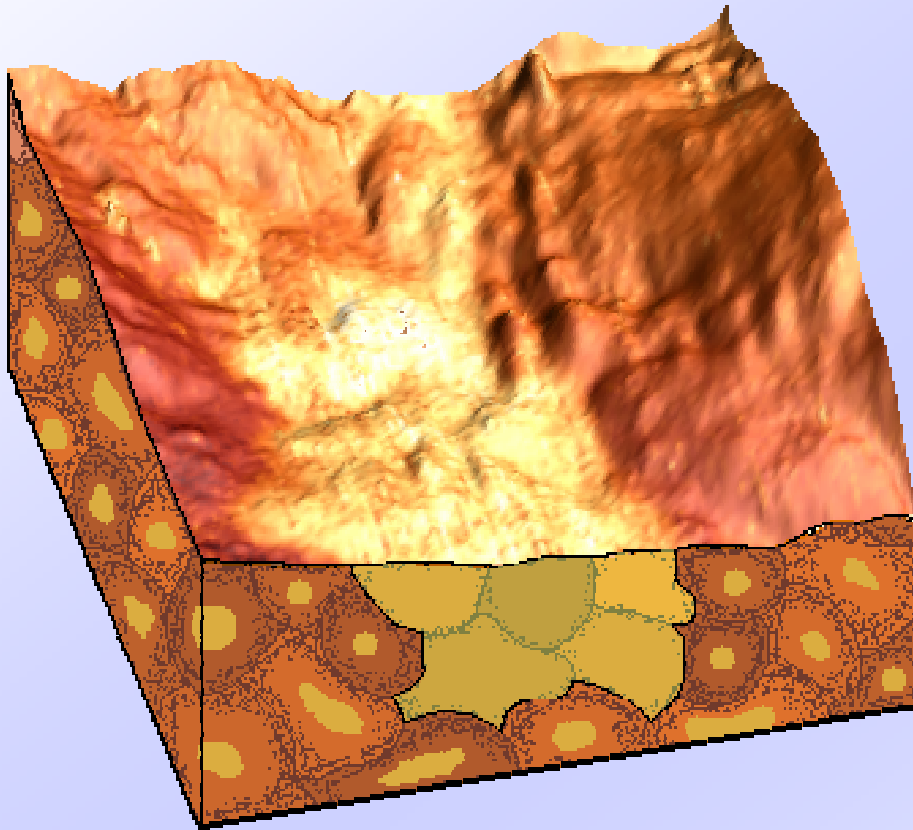
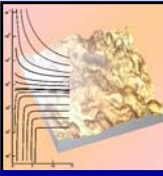
$g_N$



# SCENARIO POSSIBLE

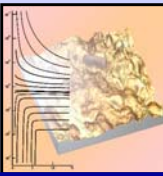
Supraconductivité inhomogène

● Étude STM et résultats



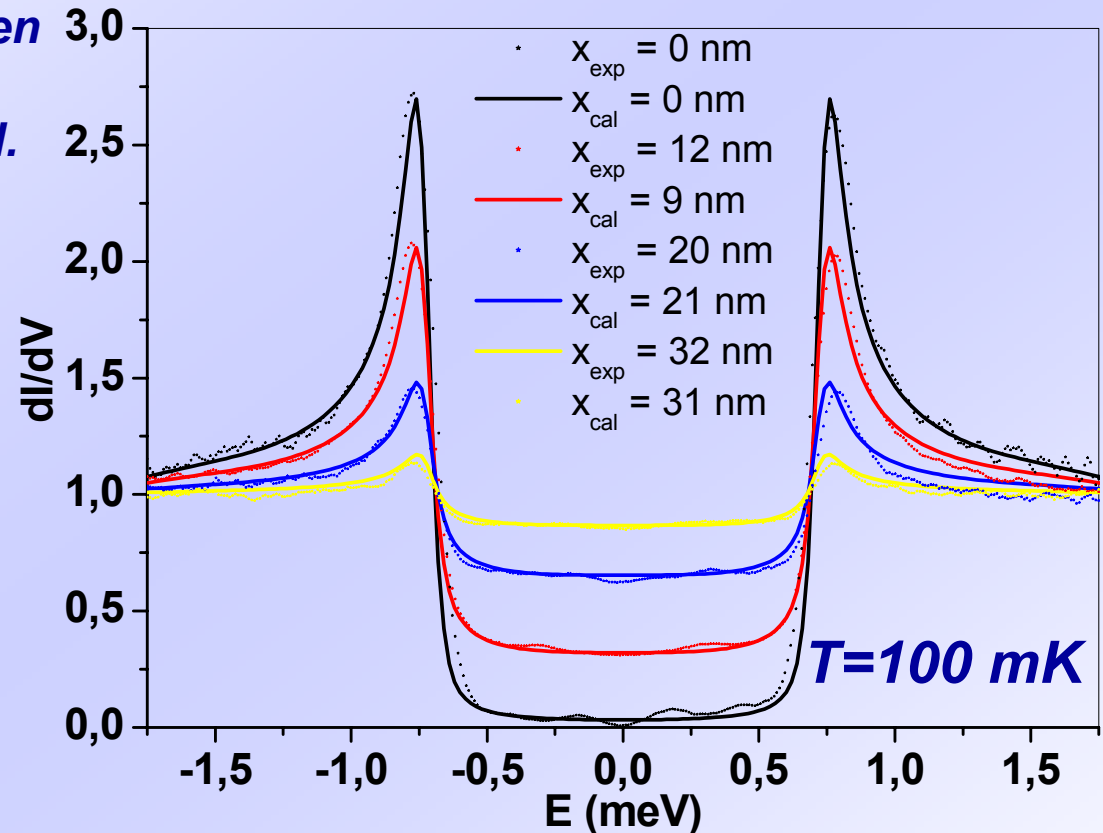
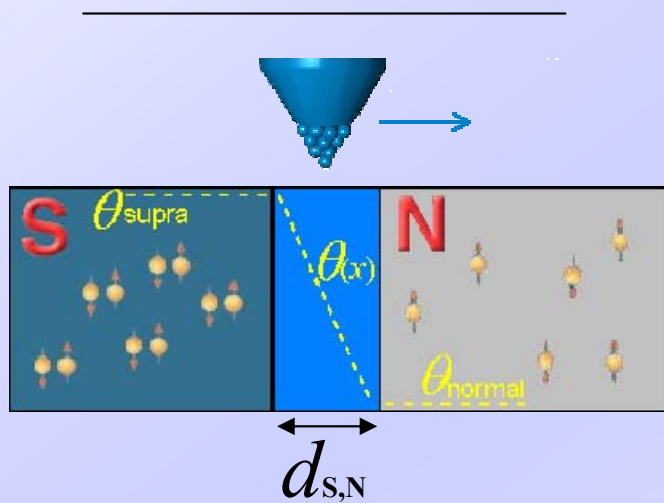
- *TiN granulaire*
- *Les lacunes de titane s'accumulent aux joints de grains, faisant varier spatialement  $g(r)$ .*
- *Les fluctuations quantiques, à l'échelle mésoscopique, rend la supraconductivité instable et des zones N ou S apparaissent spontanément avec un gap  $\Delta$  unique.*

# EQUATION PHENOMENOLOGIQUE



L'équation d'Usadel de type champ moyen utilisant l'angle  $\theta(x)$  est incapable de reproduire cet effet de proximité anormal.

- La limite diffusive est-elle valable dans TiN ? ( $\xi \approx 6\text{nm}$ ,  $l_m \approx 4-6\text{nm}$ )
- Les fluctuations quantiques modifient l'effet de proximité usuel.

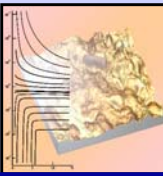


Équation phénoménologique sans paramètres ajustables :

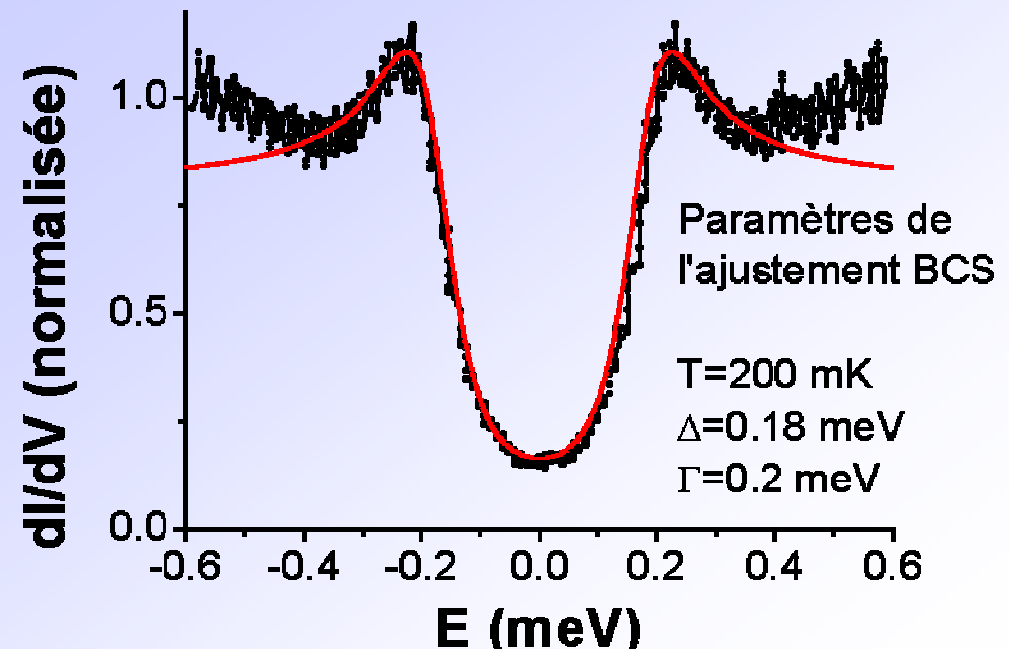
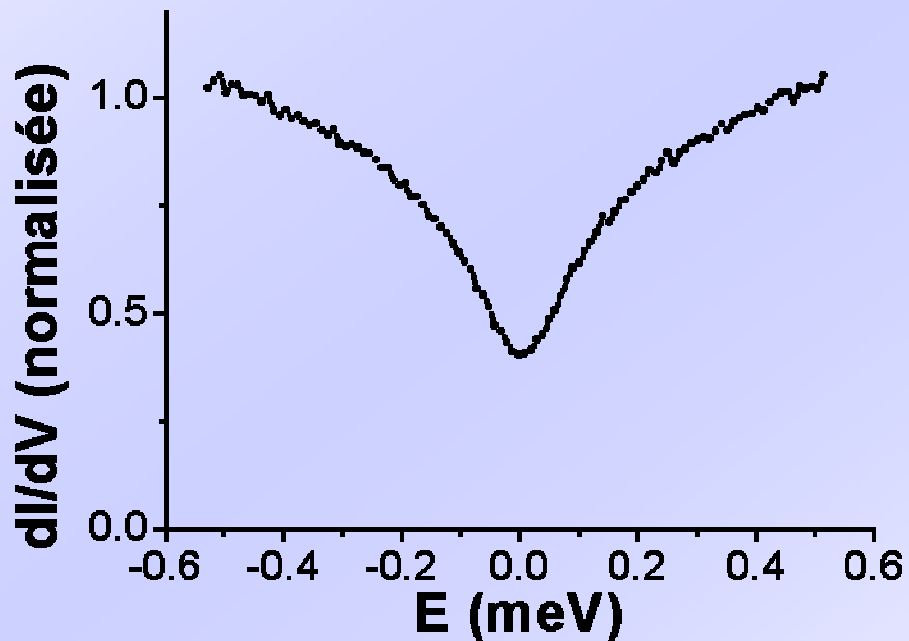
$$\theta(x, \epsilon) = \theta_S \times \left( \frac{d_{sn} - x}{d_{sn}} \right)$$

$$v_{(x)} = v_0 \Re [\cos \theta_{(x)}]$$

$$\theta_S = \arctg \left( \frac{i\Delta}{E+i\Gamma} \right) \quad \theta_N = 0$$



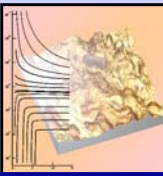
- *Gap supraconducteur : 0.18 meV*
- *Température de transition : 400 mK*
- *Libre parcours moyen  $\approx 7,8$  Å*
- *Résistance par carré à 300 K : 2000  $\Omega$*
- *Résistance par carré à 1.2 K : 8400  $\Omega$*
- *Épaisseur : < 10 nm*



# FILM PROCHE DE LA TRANSITION

Supraconductivité inhomogène

● Étude STM et résultats



- Gap supraconducteur : 0.18 meV
- Température de transition : 400 mK
- Libre parcours moyen  $\approx 7,8$  Å
- Résistance par carré à 300 K : 2000  $\Omega$
- Résistance par carré à 1.2 K : 8400  $\Omega$
- Épaisseur : < 10 nm

A faible dimension, les interactions électroniques modifient la densité d'états

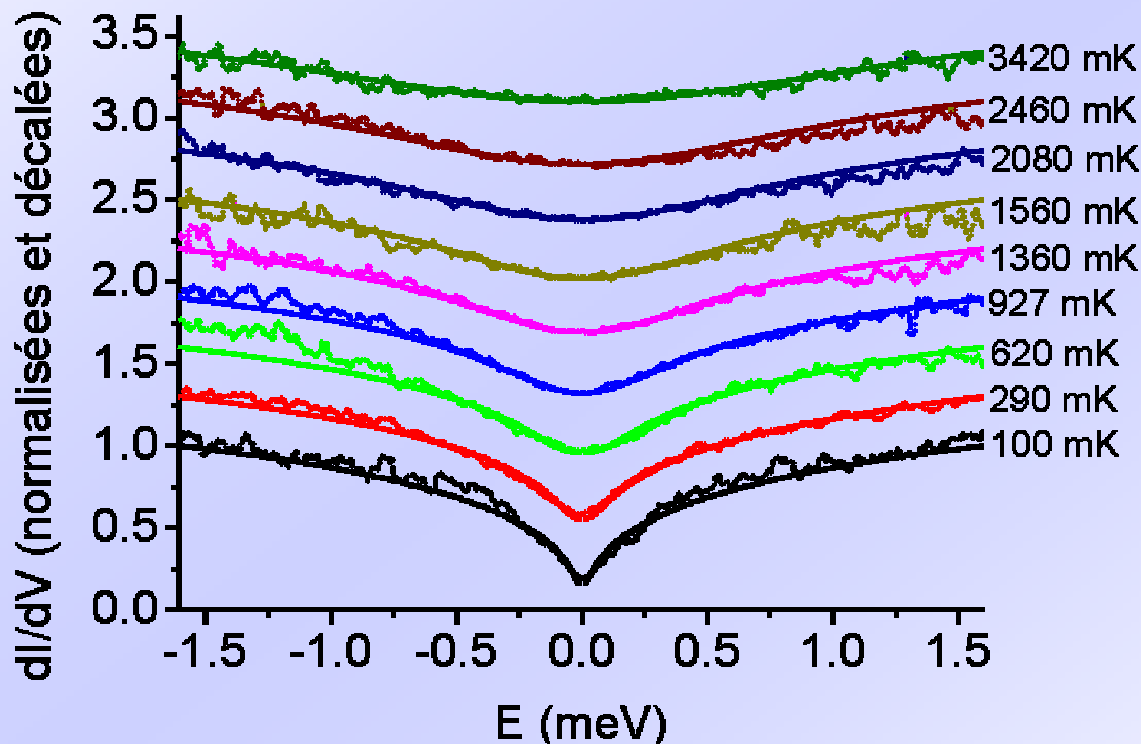
↪ Anomalie à faible tension

*B. Altshuler & al. Phys. Rev. Lett. 44, 1288 (1980)*  
*L. Bartosh & P. Kopietz Eur. Phys. J. B 28, 29 (2002)*

Vitesse de Fermi :  $v_F = 4,3 \cdot 10^5$  m/s  
Libre parcours moyen :  $\ell_m = 7,8$  Å  
Libre temps moyen :  $\tau_0 = 1,8 \cdot 10^{-15}$  s  
Resistivite :  $\rho_0 = 1.1$  m $\Omega$ .cm

Paramètre ajustable :  
Temps d'interaction  
électron-électron

$$\tau_1 = 3 \times 10^{-16} \text{ s}$$



 ***CONCLUSION***

# CONCLUSION

---

## ▶ *Supraconductivité inhomogène -TiN*

- *Film désordonné homogène ou granulaire ?*
- *Evolution atypique de la DOS :  $\theta_{(x,\epsilon)} = \theta_S \times \left( \frac{d_{sn} - x}{d_{sn}} \right)$*

## ▶ *Nano-structures N-S*

- *Elaboration d'un procédé de fabrication des échantillons*
- *Pics de résonance dans la densité d'états locale*



***Maison des Magistère  
(en face en sortant...)***