

# Ordre magnétique dans la phase de pseudogap des $SHT_c$



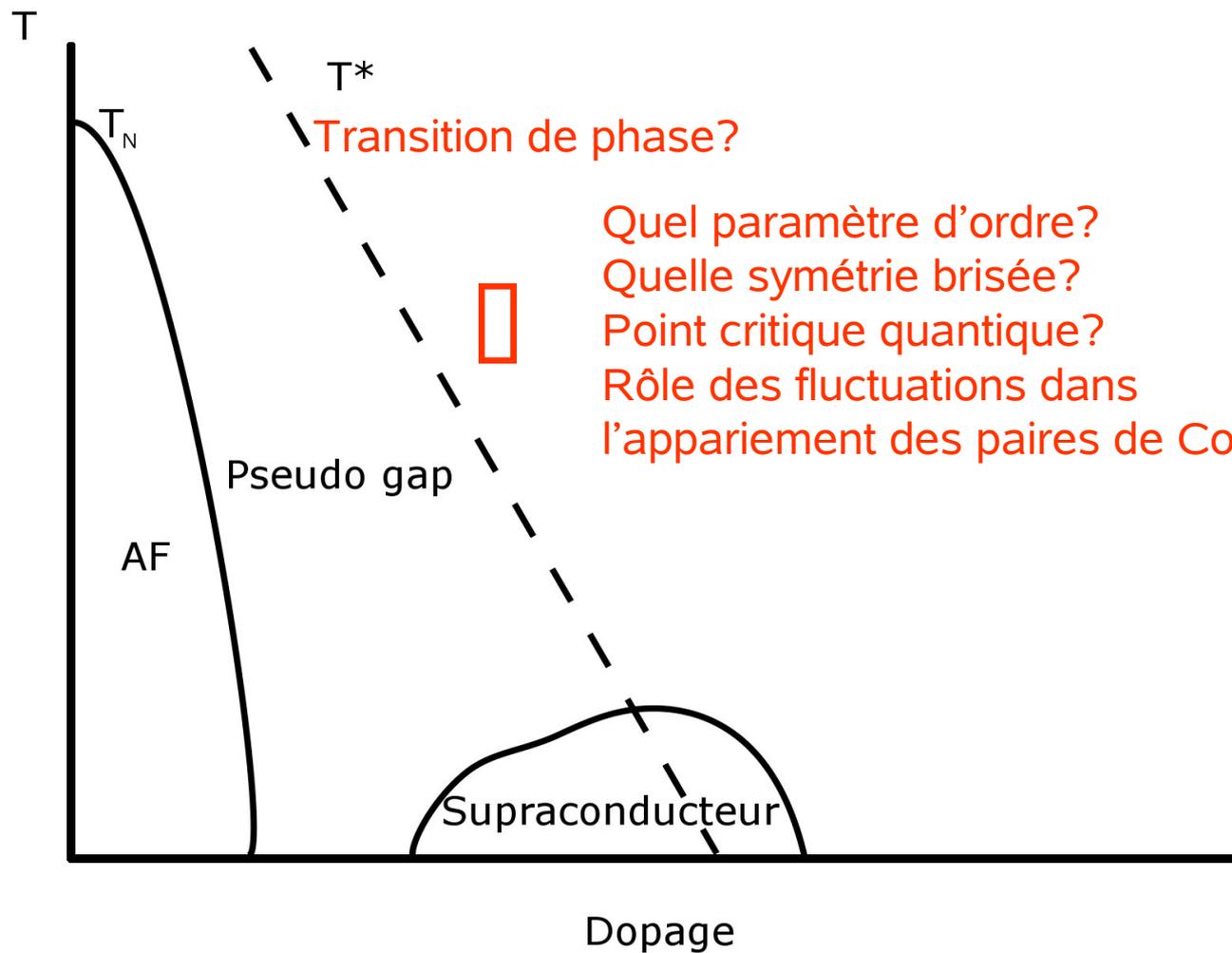
Victor Balédent

Laboratoire Léon Brillouin

CEA/Saclay

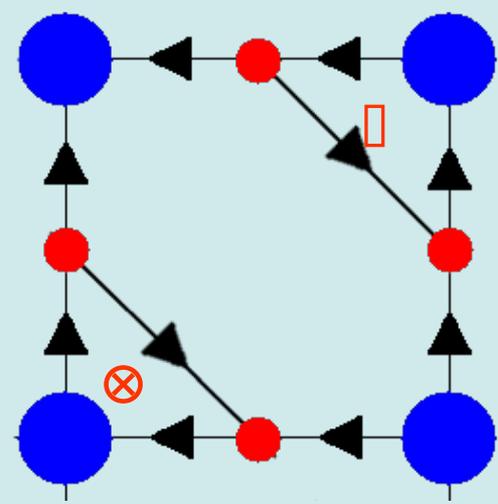


- P. Bourges, Y. Sidis, S. Pailhès, B. Fauqué (**LLB Saclay**)
- H.A. Mook (**Oak Ridge National Lab.** , *Oak Ridge* )
- M. Greven, Y. Li (**Stanford University**, *Stanford*)
- J. Mesot, N. Christensen (**PSI**, *Villigen*)



Transition de phase?

- Quel paramètre d'ordre?
- Quelle symétrie brisée?
- Point critique quantique?
- Rôle des fluctuations dans l'appariement des paires de Cooper?



Phase CC- $\theta_{\parallel}$

2 boucles de courants  
circulant en opposition de phase

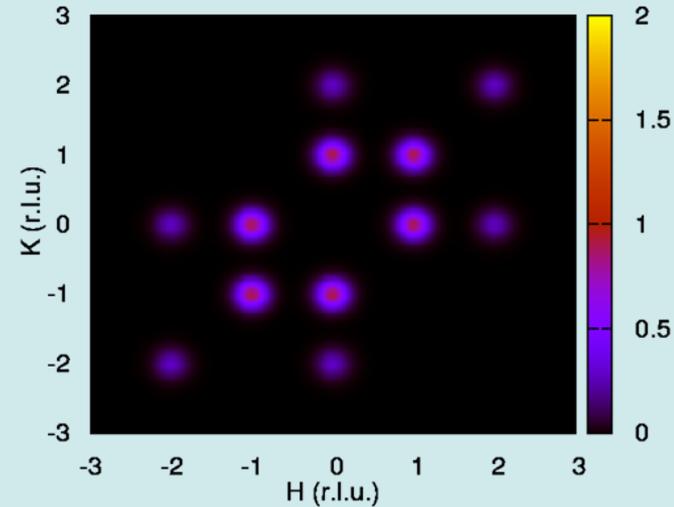
2 moments orbitaux opposés  
par maille élémentaire,  
perpendiculaires aux plans  $\text{CuO}_2$

C.M. Varma, **PRB 73**, 155113 (2006)

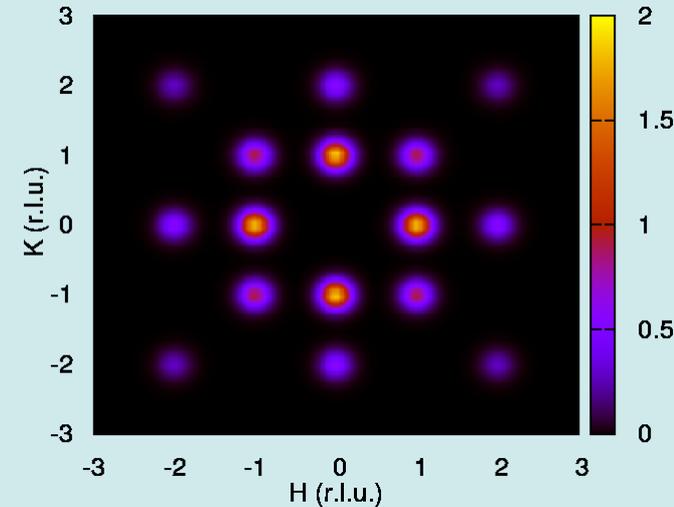
Pas d'intensité  
magnétique en  
 $(H,K)=(0,0)$

Brisure de l'invariance  
par renversement du  
temps

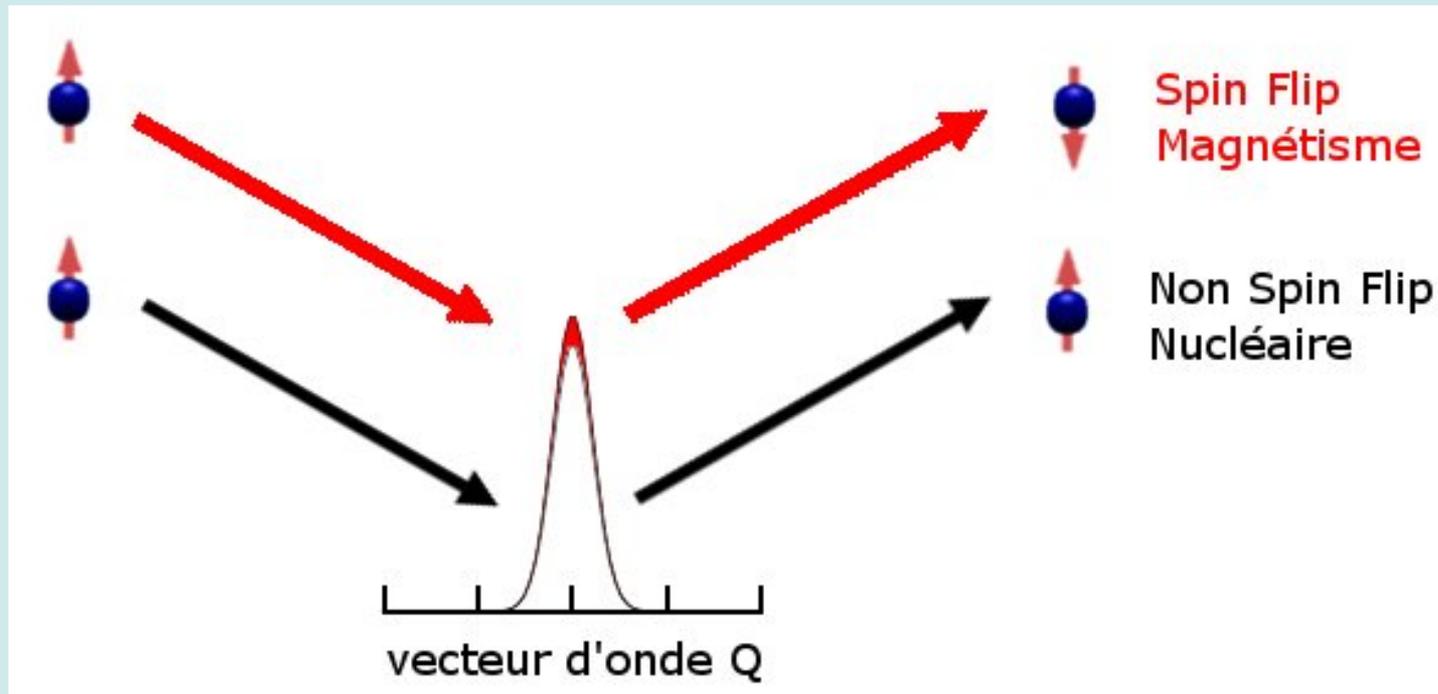
Intensité magnétique sur les pics de Bragg  
nucléaires ( $H, K$  entiers) : la symétrie par  
translation du réseau est conservée.



2 domaines  
à  $90^\circ$

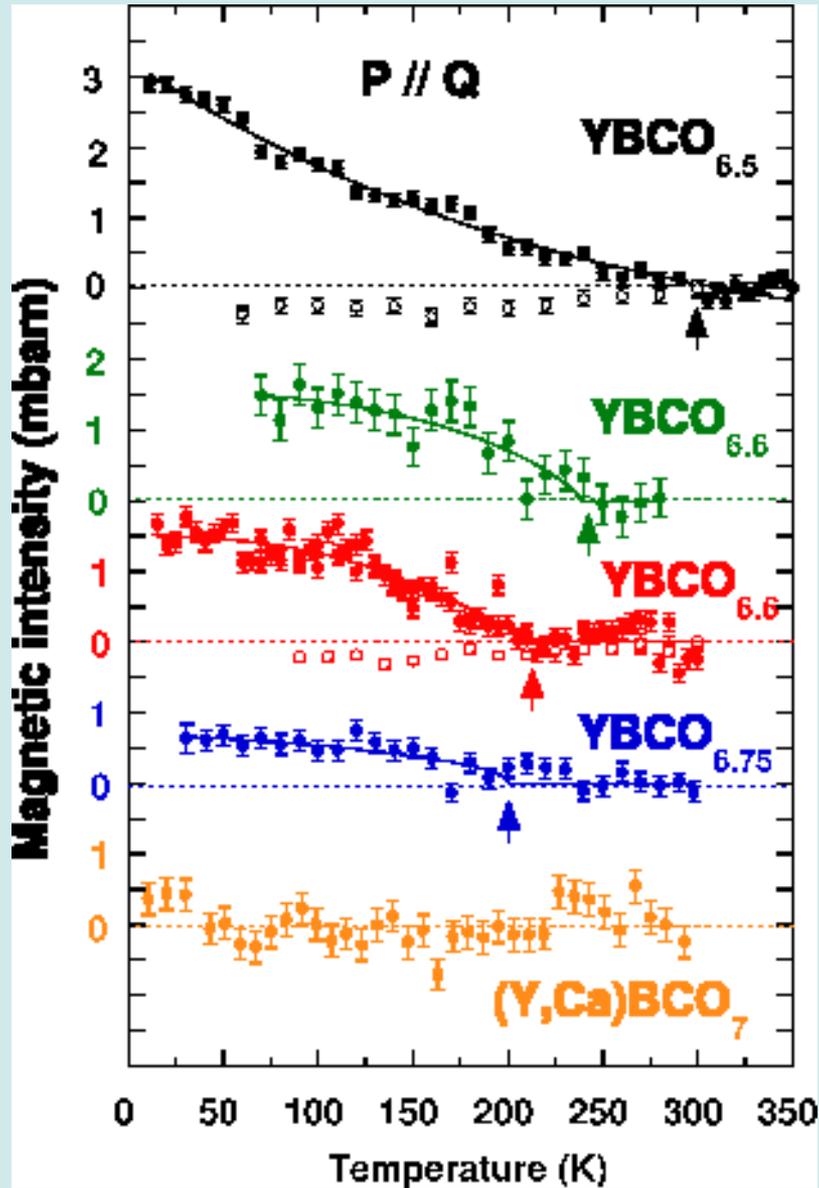


## Nécessité des neutrons polarisés:



- Les neutrons sont sensibles aux composantes magnétiques perpendiculaires au vecteur d'onde  $Q$
- L'intensité Spin Flip est sensible aux composantes magnétiques perpendiculaires à la polarisation des neutrons  $P$

L'intensité Spin Flip est maximale lorsque  $P \parallel Q$



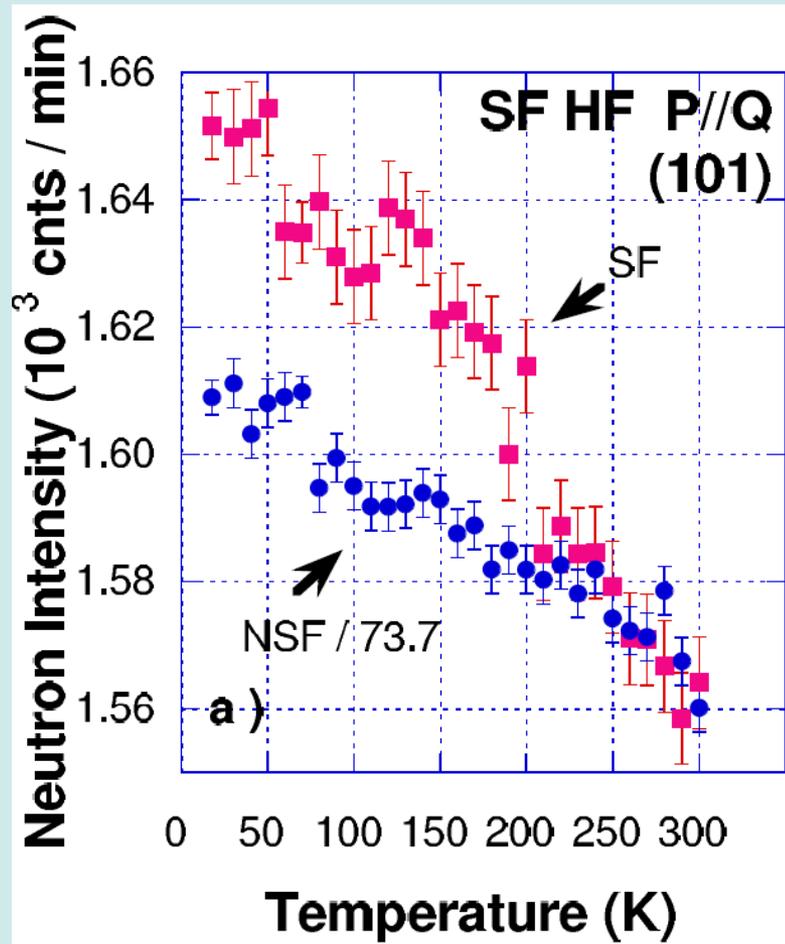
Dans  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  :

Mesure sur le pic de Bragg (0,1,1):

- apparition d'un signal dans le canal SF à basse température ( $T < T_{\text{mag}}$ ) pour  $0.55 < x < 0.75$ .

- $T_{\text{mag}}$  correspond à la température d'ouverture du pseudogap.

- Absence de signal en (0,0,1)

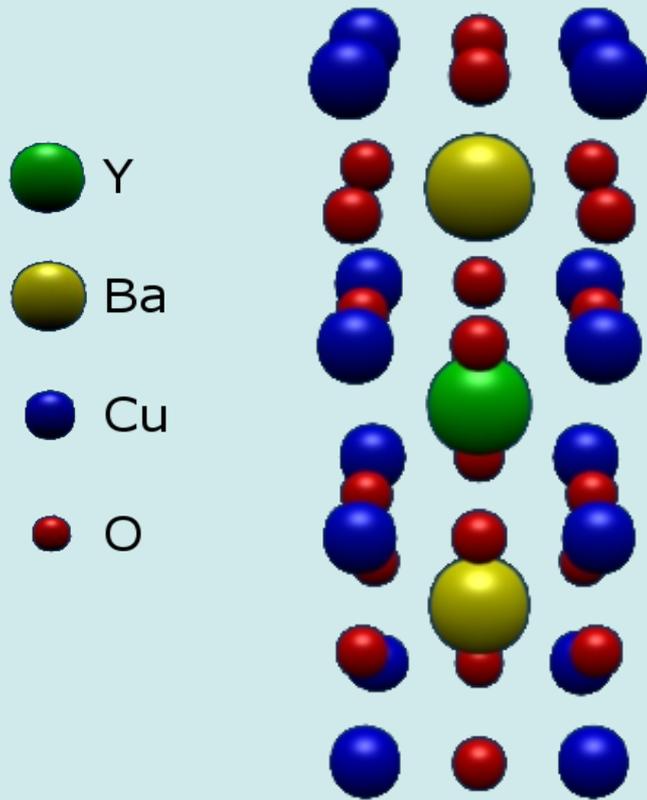


Résultat confirmé dans un échantillon de grande qualité ( $T_c=63\text{K}$   $m=25\text{g}$ )

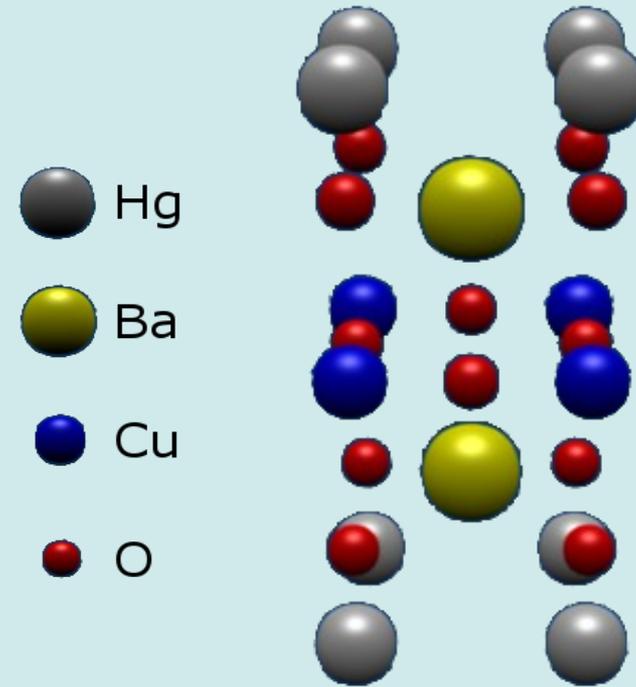
Estimation du moment à  $0.1 \mu_B$  en  $Q=(1,0,1)$  compatible avec les mesure précédentes.

Signal compatible avec la symétrie de la phase  $CC-\theta_{||}$ , mais l'analyse de polarisation montre un moment à  $45^\circ$  des plans  $\text{CuO}_2$ .

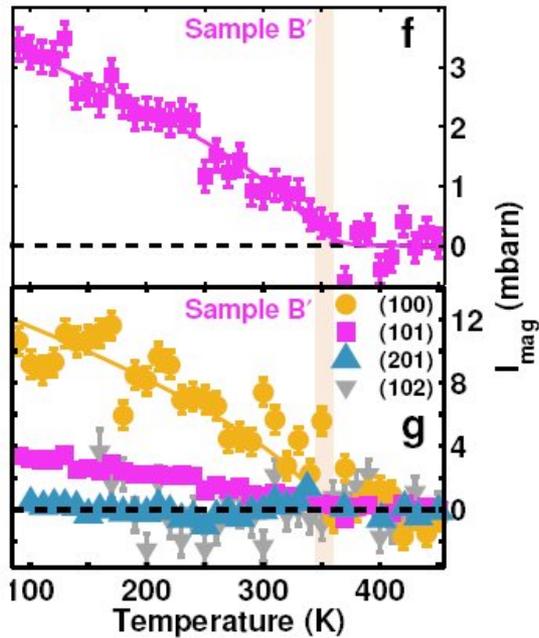
H.A. Mook & al., PRB 78, 020506R (2008)



- $T_{\text{Cmax}} = 93\text{K}$
- Maille orthorombique
- 2 plans  $\text{CuO}_2$  par maille
- Cu au milieu d'une pyramide



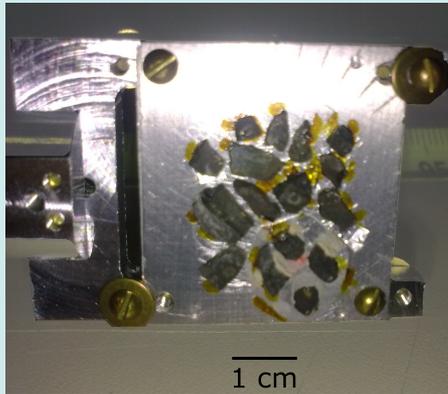
- $T_{\text{Cmax}} = 98\text{K}$
- Maille tétragonale
- 1 plans  $\text{CuO}_2$  par maille
- Cu au milieu d'un octaèdre



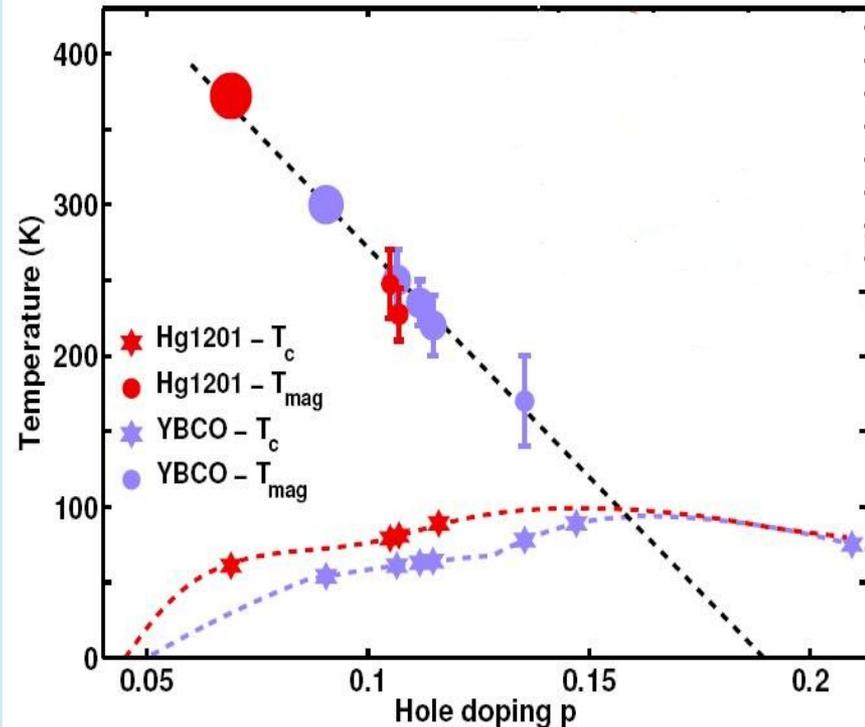
- Estimation du moment à  $0.2 \mu_B$  en  $Q=(1,0,1)$   
 ( $T_C=61K$ )

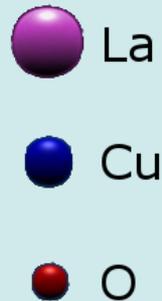
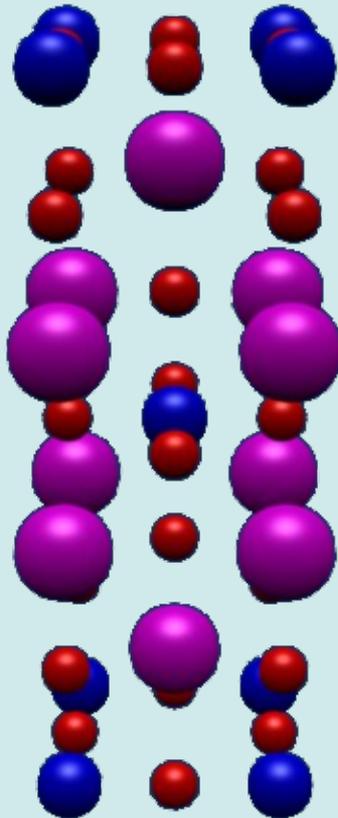
Y. Li & al., *Nature* 455 372 (2008)

- Décroissance rapide à grand  $|Q|$

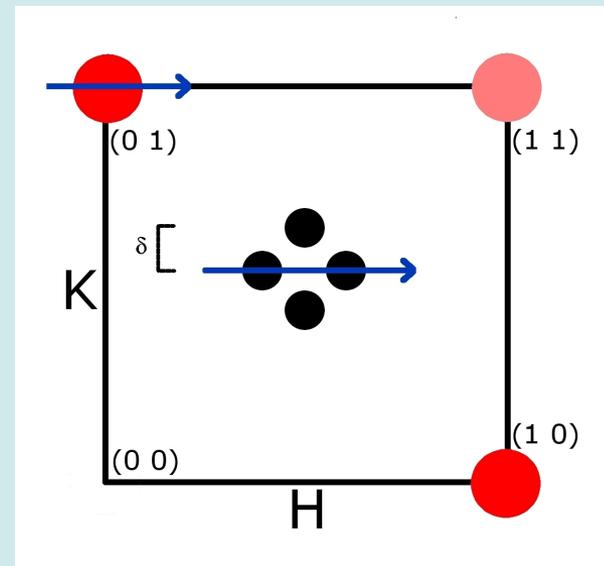


- Les données des deux familles de composés reproduisent le diagramme de phase générique des cuprates





$T_{\text{Cmax}} = 35\text{K}$



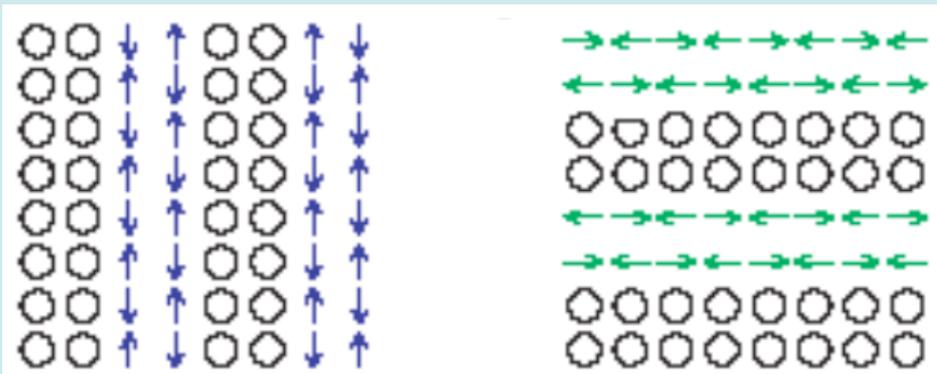
- Alternance de lignes de charges et de lignes de spins AF

- Stripes statiques dans les composés parents  $\text{La}_{2x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$  et  $\text{La}_{16x}\text{Nd}_{04}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$

Tranquada & al., *Nature* 375 561 (1995)

- Fluctuations magnétiques incommensurables à basse énergie autour de  $Q=(0.5 \pm \delta, 0.5)$  et  $(0.5, 0.5 \pm \delta)$

- Brise l'invariance par translation



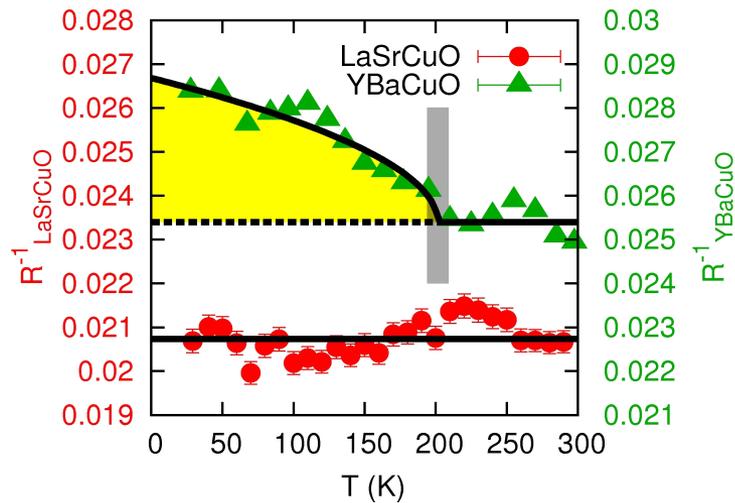


**Echantillon  
sous dopé**

$$x=0.08$$

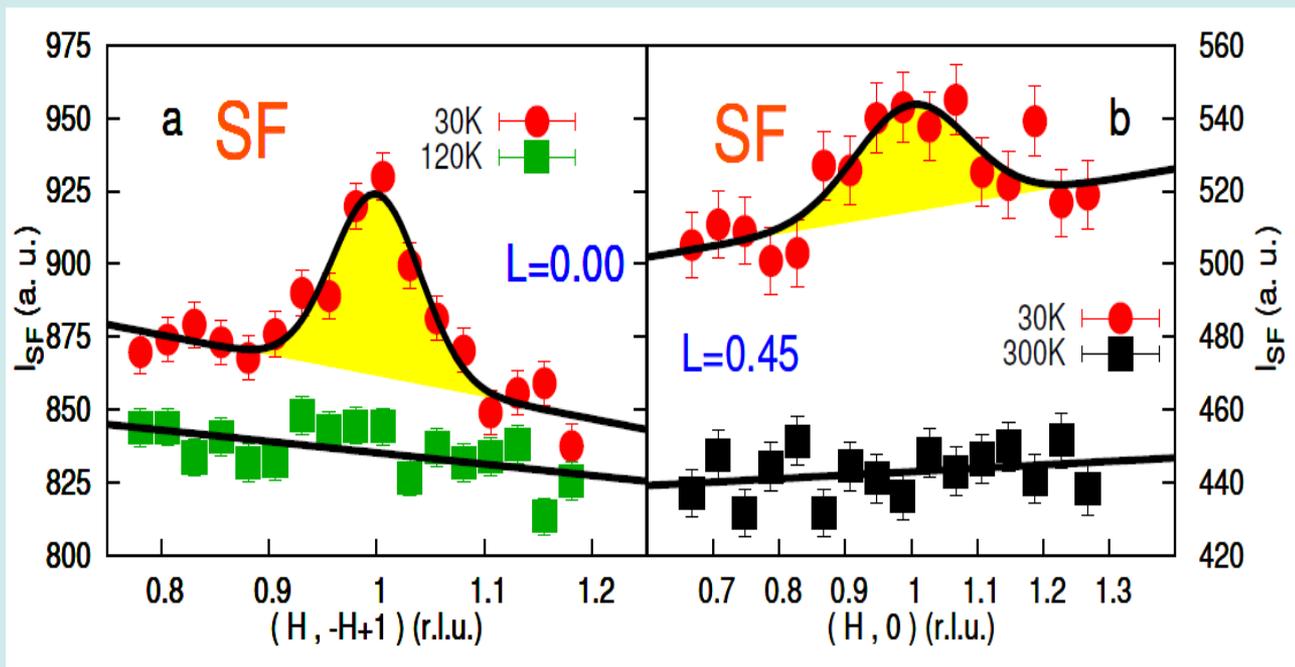
$$T_c = 25\text{K}$$

$$m=7\text{g}$$



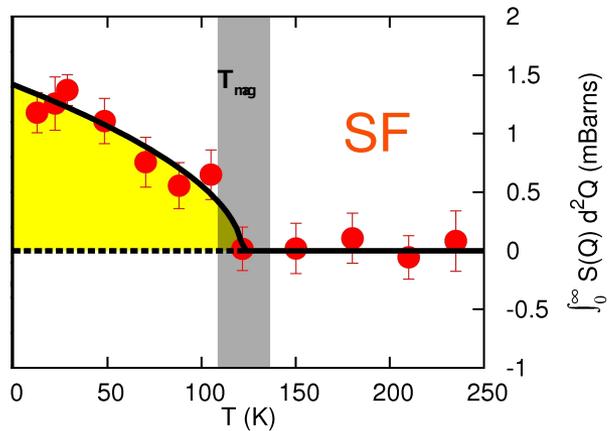
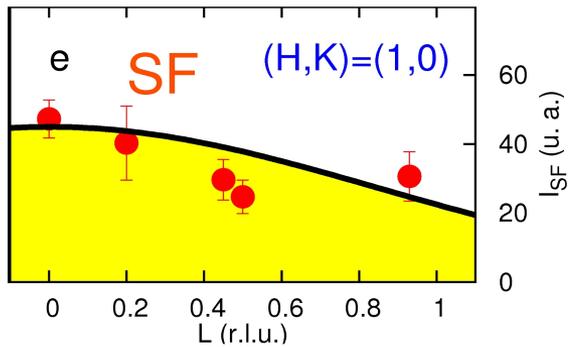
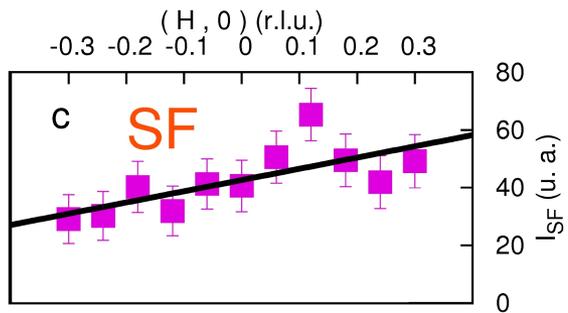
- Absence d'ordre à longue portée dans  $\text{La}_{2x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$

### Ordre à courte distance?



$\xi_{\text{dagger}(1,1)} = 11 \pm 2 \text{ \AA} \sim 3 \text{ mailles}$

$\xi_{\text{ae}(1,0)} = 8 \pm 3 \text{ \AA} \sim 2 \text{ mailles}$



- Absence de signal en  $(H, K) = (0, 0)$

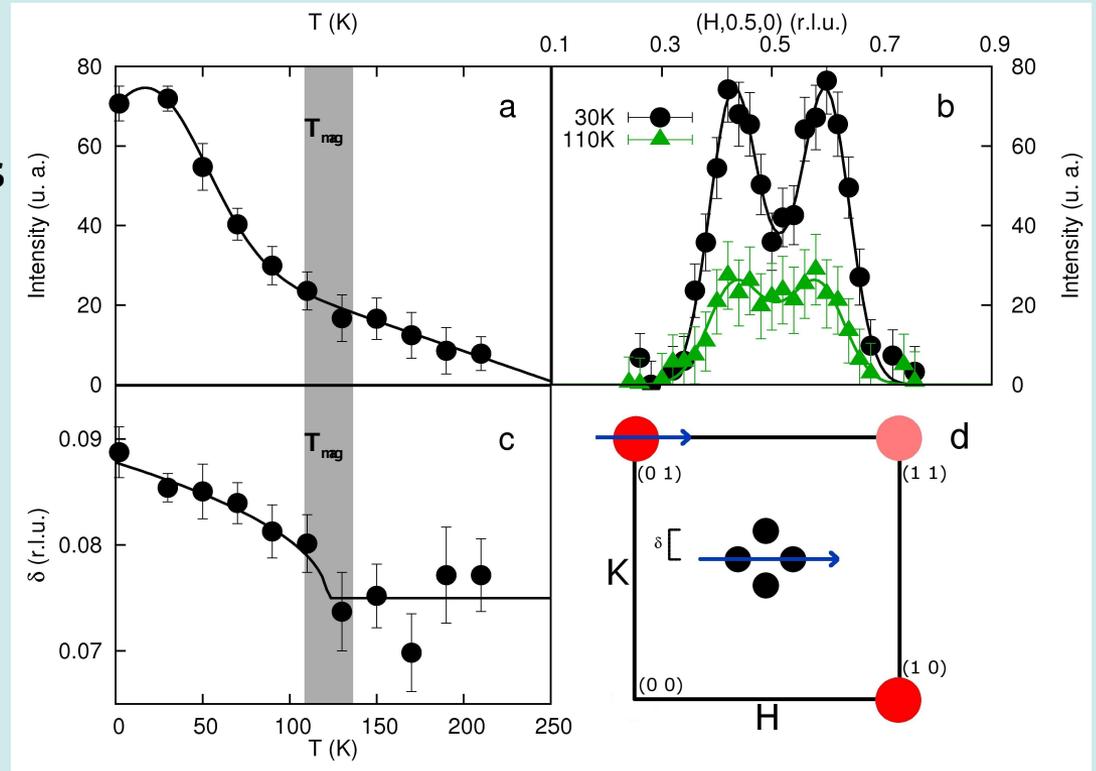
- Ordre bidimensionnel: peu de corrélations suivant l'axe  $c$ .

-  $T_{mag} \sim 110K$  inférieur à  $T^*$

**QUID DES FLUCTUATIONS INCOMMENSURABLES?**

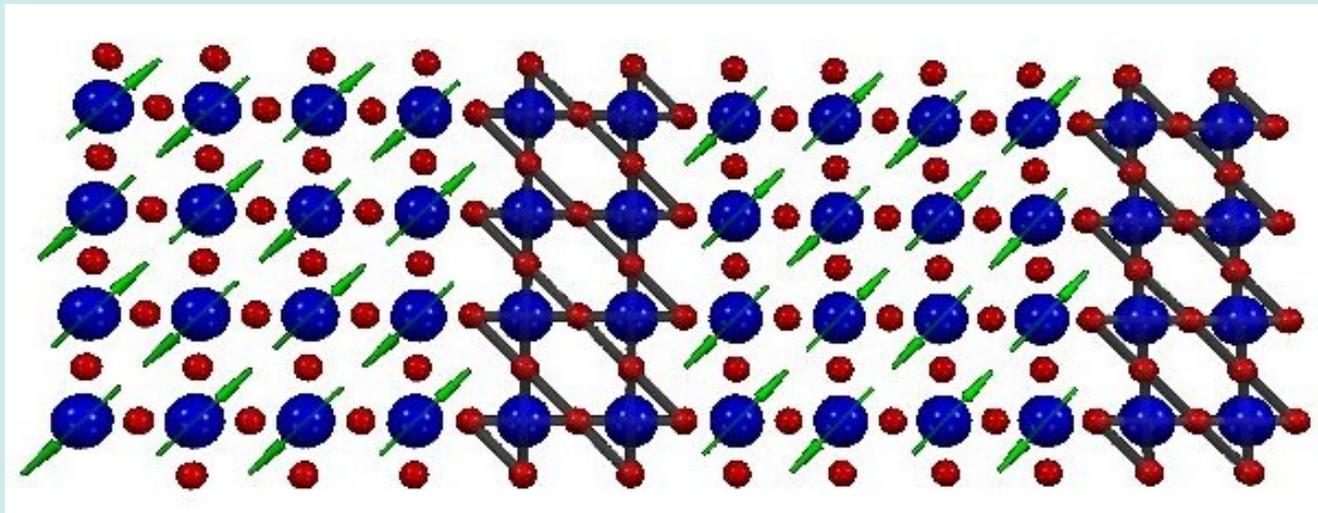
- Augmentation de l'intensité des fluctuations incommensurables en dessous de 110K

- Evolution du paramètre  $\delta$  comme un paramètre d'ordre au dessus de 110K



Les deux phases interagissent entre elles...

Une image possible pour la coexistence des 2 phases



Zone AF

Zone de  
charges

# En conclusion...

- Il existe un paramètre d'ordre magnétique traduisant une vraie transition de phase à  $T_{\text{mag}} = T^*$ .
- La symétrie par renversement du temps est donc brisée.
- Cet ordre est universel:
  - 3D et longue portée dans  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ ,  $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+x}$
  - 2D et courte portée dans  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ .
- Cet ordre implique au moins 2 moments magnétiques par maille élémentaire. Il est compatible avec la symétrie de la phase  $\text{CC-}\theta_{\parallel}$ .
- repose la question du rôle des oxygènes.

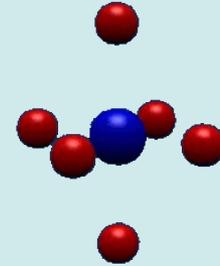
# En conclusion...

- Origine de l'angle de  $\sim 45^\circ$  entre les moments et les plans  $\text{CuO}_2$ ?

Boucles de courants passant par les oxygènes apicaux?

La physique n'est pas confinée aux plans  $\text{CuO}_2$ ?

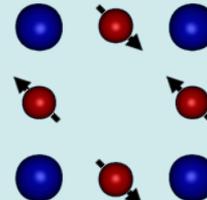
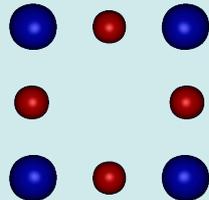
Weber & al., *PRL* **102**, 017005 (2009)



Couplage spin-orbite?

V. Aji & al., *PRB* **75** 224511 (2006)

- La nature des moments magnétiques reste inconnu: moments orbitaux ou moments de spins?



- La nature de l'interaction de cette phase avec les fluctuations incommensurables dans le composé  $\text{La}_{2x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  reste une question ouverte.

