

Échelles dopées sous champ magnétique

Guillaume ROUX

Laboratoire de physique théorique, IRSAMC

Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007 PAGE 1

Plan

- **Pourquoi étudier les échelles dopées?**
 - composés et expériences
 - modélisation et méthodes théoriques
 - physique RVB et échange cyclique

- **Effet Zeeman (spin)**
 - propriétés magnétiques
 - propriétés supraconductrices

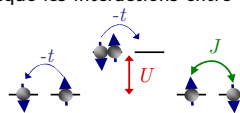
- **Effet orbital (charge)**
 - diagrammes de phase en interaction faible et forte
 - propriétés de courant
 - susceptibilité à champ nul et phases commensurables

Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007 PAGE 2


La physique du solide à une dimension

- Systèmes **fortement corrélés** lorsque les interactions entre électrons sont très grandes.
Modèle de Hubbard :

Isolant de Mott $J = 4t^2/U$



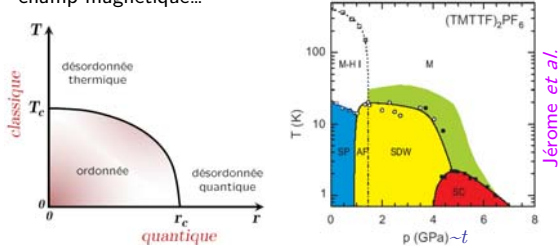
- À une dimension, les **effets collectifs** sont dominants. Les propriétés sortent du cadre de la théorie du **liquide de Fermi** : liquide de Luttinger.



Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007 PAGE 3

Transition de phase à température nulle

- **Transition de phase quantique** : r = la pression, le dopage, le champ magnétique...

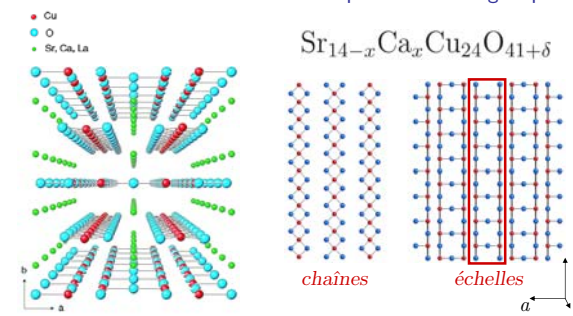


- À une dimension, les **fluctuations quantiques** sont très importantes (Mermin-Wagner) : **compétition** entre différents ordres et possibilité de **phases exotiques**.

Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007 PAGE 4

Expériences sur SCCO : structure

- Un supraconducteur non conventionnel quasi-unidimensionnel et fortement corrélé. Cousin des cuprates et des organiques.



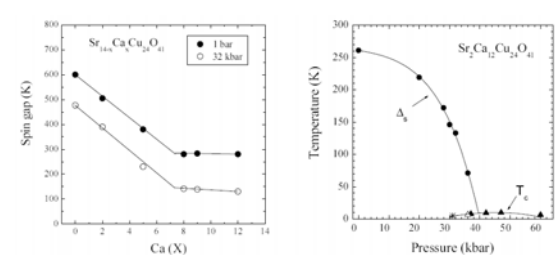
$Sr_{14-x}Ca_xCu_{24}O_{41+\delta}$

chaînes échelles

Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007 PAGE 5

Supraconductivité de SCCO

- **Gap de spin** et **dôme supraconducteur** avec la substitution et la pression d'après des mesures de RMN.



Jérôme et al. (2002)

Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007 PAGE 6

Supraconducteur sous champ magnétique

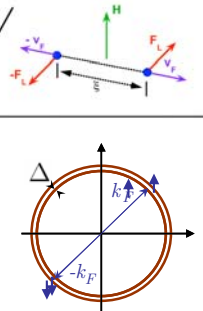
- Champs critiques:
 - Effet orbital (résultat BCS)

$$H_{c2} \approx \frac{\Phi_0}{\xi^2} \approx \frac{1}{2\hbar} \frac{\Delta^2}{v_F^2}$$

Gap supraconducteur

- Limite de Pauli (singulet)

$$E_{\text{Zeeman}} = E_{\text{cond.}}(H = 0)$$



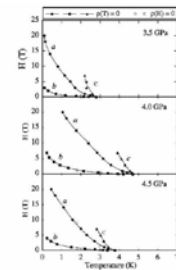
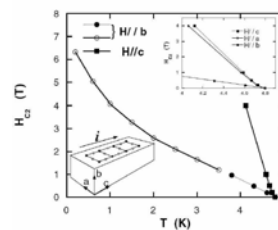
Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 7

Expériences sous champ magnétique

- Forte anisotropie du champ critique supraconducteur.
- Dépassement de la limite de Pauli, résultat BCS :

$$H_{\text{Pauli}} [\text{Tesla}] = 1.85 T_c [\text{Kelvin}]$$



Braithwaite *et al.* (2000)

Nakanishi *et al.* (2005)

Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 8

Modèles microscopiques pour les cuprates

- Modèle de Heisenberg pour les isolants de Mott

$$\mathcal{H} = \mathbf{J} \sum_{\langle ij \rangle} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j$$
 singulet triplet
- Modèle t-J : (limite fort couplage du modèle de Hubbard)

$$\mathcal{H} = -t \sum_{\langle ij \rangle, \sigma} \mathcal{P}_G [c_{i\sigma}^\dagger c_{j\sigma} + c_{j\sigma}^\dagger c_{i\sigma}] \mathcal{P}_G + \mathbf{J} \sum_{\langle ij \rangle} [\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j - \frac{1}{4} n_i n_j]$$
 kinetic term magnetic term

Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 9

Méthodes théoriques pour les systèmes 1D

- Bosonisation :** analytique, théorie de basse énergie. Permet de calculer les diagrammes de phase en **couplage faible** et les corrélations.
- Diagonalisation exacte :** numérique, permet de calculer la plupart des observables mais reste limitée à de petits systèmes $N_{\text{sites}} \approx 32$.
- Groupe de renormalisation de la matrice densité (DMRG) :** numérique, méthode variationnelle dans un **espace de Hilbert réduit**. Algorithme fondé sur des idées de renormalisation dans l'espace réel (utilisation des **conditions aux bords ouvertes**). Convergence contrôlée par le poids rejeté.

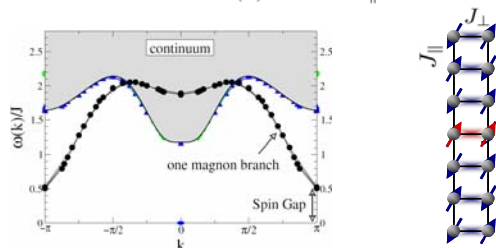
Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 10

Échelles non dopées : un liquide de spin

- Les corrélations de spin sont à courte portée :

$$\langle \mathbf{S}(0) \cdot \mathbf{S}(r) \rangle \propto (-1)^r e^{-r/\xi}, \quad \xi \propto \frac{1}{\Delta}$$
 Gap de spin
- Dispersion du magnon : $\omega(k) = J_\perp + J_\parallel \cos k + \dots$



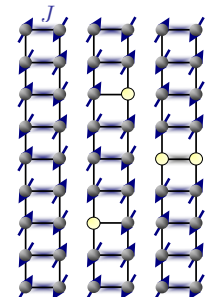
Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 11

Mécanisme d'appariement dans les échelles

- Similaire au **mécanisme RVB** proposé par Anderson dans le contexte des cuprates. Symétrie **d-wave** du paramètre d'ordre. **Dagotto et Rice (1997)**

- L'appariement est associé à la présence d'un **gap de spin**.
- La nature de l'état supraconducteur dans SSCO n'est pas clairement établie.
- Intérêt des **expériences sous champ magnétique**.

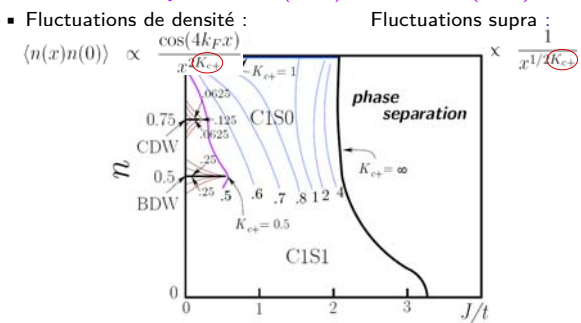


Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 12

Diagramme de phase du modèle t-J

- Compétition entre phases onde de densité de charge et supraconductrice. Hayward *et al.* (1995), White *et al.* (2002).

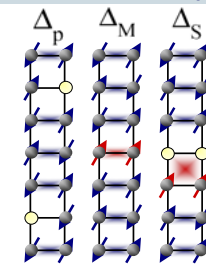
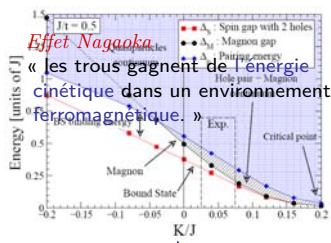


Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 13

Excitations élémentaires dans une échelle dopée

- Briser une paire de Cooper
- Magnon « libre »
- Etat lié magnon-paire de trous :

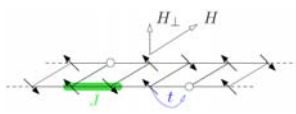


L'échange cyclique K détruit le gap de spin, l'état lié et l'état RVB supraconducteur

Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 14

Effet Zeeman



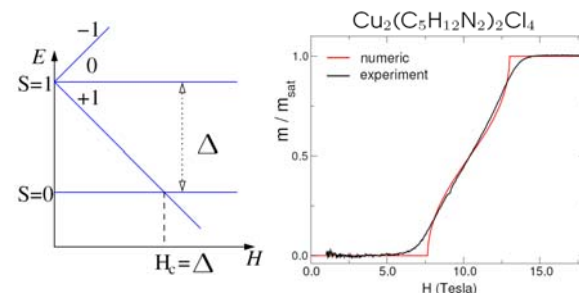
$$\mathcal{H} = \underbrace{-t \sum_{\langle ij \rangle, \sigma} \mathcal{P}_G [c_{i\sigma}^\dagger c_{j\sigma} + c_{j\sigma}^\dagger c_{i\sigma}] \mathcal{P}_G}_{\text{kinetic term}} + \underbrace{J \sum_{\langle ij \rangle} [\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j - \frac{1}{4} n_i n_j]}_{\text{magnetic term}} - \underbrace{g\mu_B \sum_i \mathbf{H} \cdot \mathbf{S}_i}_{\text{Zeeman effect}}$$

Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 15

Courbe d'aimantation d'une échelle isolante

- Levée de dégénérescence par effet Zeeman et comparaison entre expérience et calcul numérique. Hayward *et al.* (1996)

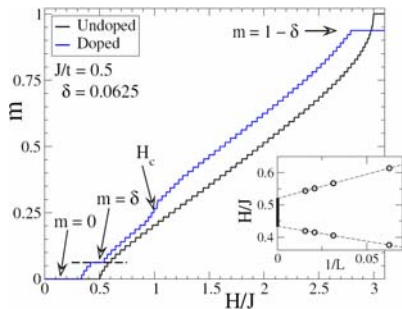


Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 16

Courbe d'aimantation d'une échelle dopée

- Plateau d'aimantation contrôlé par le dopage à $m = \delta$.
- Champ critique supraconducteur H_c au point singulier.

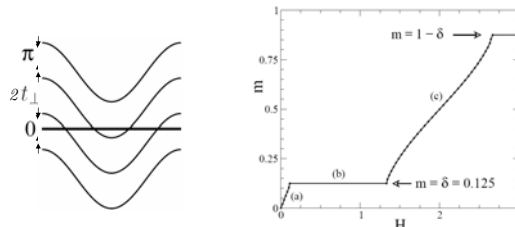


Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 17

Plateau irrationnel : interprétation de bandes

- Sans interaction, un plateau est possible si $t_{\perp} > t_{\parallel}(1 - \cos \pi n)$



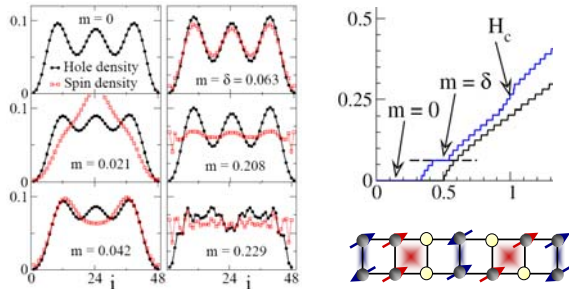
- Pour des échelles isotropes : seuls des plateaux ouverts par les interactions peuvent exister. Ils correspondent à l'ouverture d'un gap dans les bandes des électrons up dû aux processus de umklapp. Cabra *et al.* (2002)

Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 18

Plateau irrationnel : phénoménologie

- État lié entre les magnons et les paires de trous.

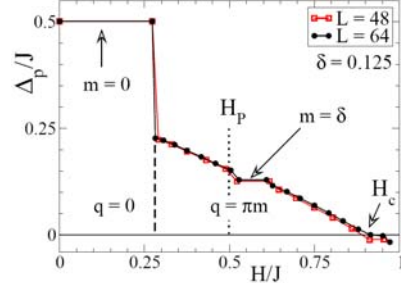


Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 19

Dépassement de la limite de Pauli

- Énergie d'appariement et calcul de H_c .
- Limite de Pauli calculée numériquement : $\Delta_p(0) - 2 \times \frac{1}{2} H_P = 0$

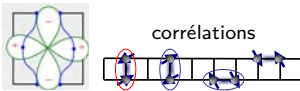


Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

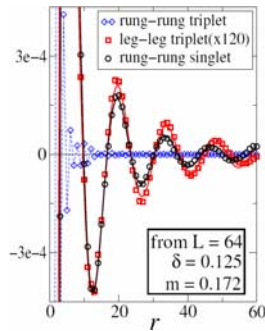
PAGE 20

Fluctuations supraconductrices

- Structure *d-wave* du canal singulet :



- Oscillations dans les corrélations supraconductrices (phase FFLO).
- Émergence de corrélations dans les canaux triplets à fort champ.

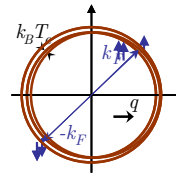


Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 21

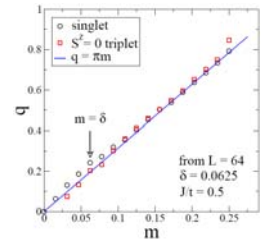
Mécanisme FFLO pour supraconducteur singulet

- Supraconductivité inhomogène : les paires de Cooper ont un moment non nul q . Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (1964)



- Dans les échelles, pourvu que les vitesses de Fermi soient égales :

$$q = k_{F,0}^{\uparrow} - k_{F,0}^{\downarrow} = \pi m$$

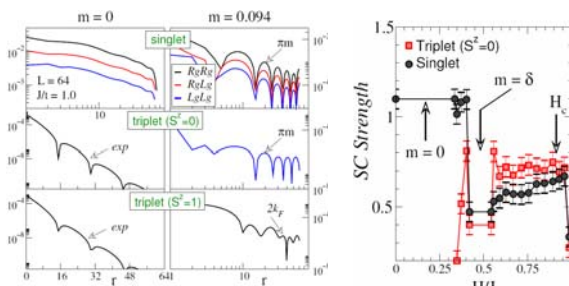


Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 22

Émergence des canaux triplets

- Les fluctuations de spin sont responsables de l'appariement et sont fortement affectées par le champ magnétique.

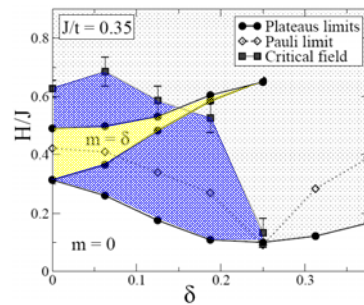


Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 23

Diagramme de phase avec effet Zeeman

- Larges régions avec plateaux d'aimantation contrôlés par le dopage et avec phase FFLO.

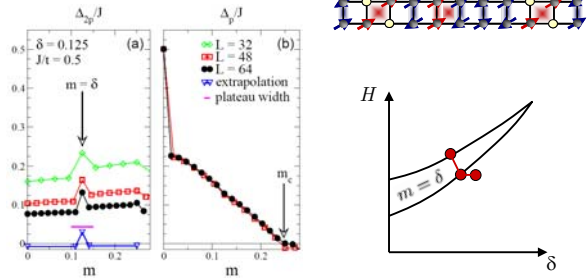


Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 24

Nature de la phase plateau

- Gap à deux particules fini... mais phase **métallique**.
 $\Delta_{2p} = E(n_h + 2, S^z) + E(n_h - 2, S^z) - 2E(n_h, S^z)$

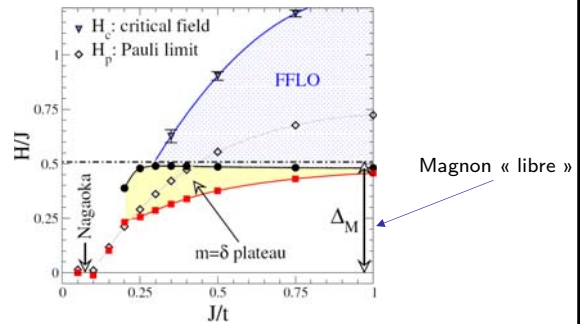


Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 25

Effet de J/t sur la largeur des phases

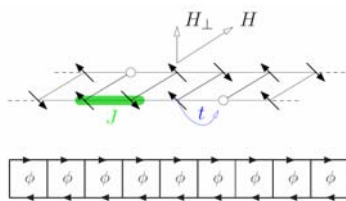
- Confirme la phénoménologie de l'effet Nagaoka.



Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 26

Effet orbital



Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 27

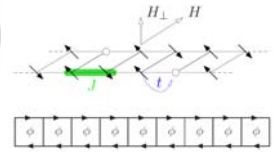
Effet orbital : choix de jauge

- Le flux est introduit via la **substitution de Peierls**, analogue à l'effet Aharonov-Bohm :

$$\psi(\mathbf{r}') = \psi(\mathbf{r}) \exp\left(\frac{i}{\hbar} \int_{\mathbf{r}}^{\mathbf{r}'} \mathbf{A}(s) \cdot d\mathbf{s}\right)$$

- Flux par plaquette :

$$\phi = \frac{e}{\hbar} \oint_{\square} \mathbf{A}(x) \cdot d\mathbf{x} = \frac{e}{\hbar} H_{\perp} a^2$$



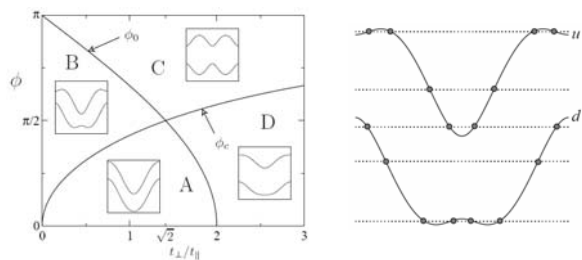
- La partie cinétique de l'hamiltonien s'écrit alors : $\phi \in [0, \pi]$
- $$\mathcal{H}_t = -t_{\parallel} \sum_{i,\sigma} [e^{i\phi/2} c_{i+1,\sigma,1}^{\dagger} c_{i,\sigma,1} + h.c.] - t_{\perp} \sum_{i,\sigma} [e^{-i\phi/2} c_{i+1,\sigma,2}^{\dagger} c_{i,\sigma,2} + h.c.] - t_{\perp} \sum_{i,\sigma} [c_{i,\sigma,2}^{\dagger} c_{i,\sigma,1} + h.c.]$$

Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 28

Évolution de la structure de bande avec le flux

- Apparition d'un double puits.
- 2 ou 4 points de Fermi suivant le flux et le remplissage.



Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 29

Diagramme de phase en couplage faible

- D'après les résultats de **Balents et Fisher (1996)** ($U \ll t$):

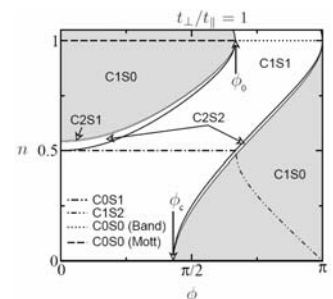
Si 2 points de Fermi :

phase C1S1,
liquide de Luttinger.

Si 4 points de Fermi :

phase C1S0,
liquide de Luther-Emery.

- Réentrance de la phase C1S0 à fort champ.

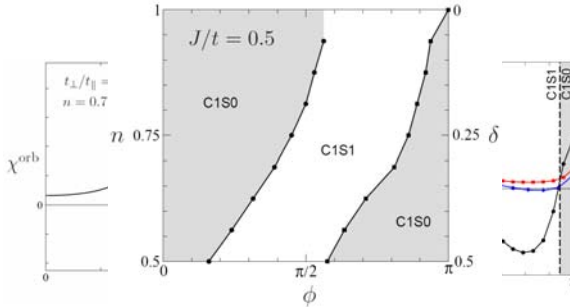


Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 30

Limite de couplage fort : modèle t-J

- On utilise les zéros de la **susceptibilité orbitale** pour calculer les frontières des phases :

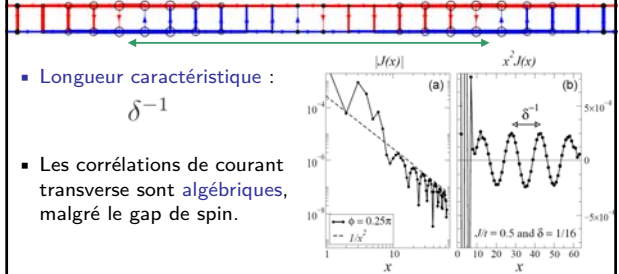


Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 31

Fluctuations de courant à faible champ

- En l'absence de champ : les fluctuations de courant transverse sont à courte portée. **White et al. (2001)** mais...phases OAF dans un modèle de Hubbard étendu. **Schollwöck et al. (2003)**
- Le champ brise la symétrie de réflexion entre les chaînes.

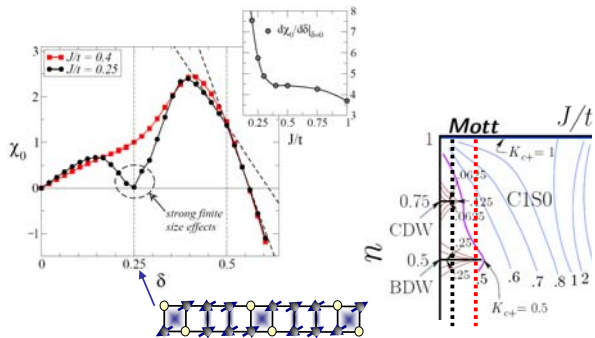


Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 32

Susceptibilité à champ nul

- Elle sonde la nature des **phases commensurables** à faible J/t.

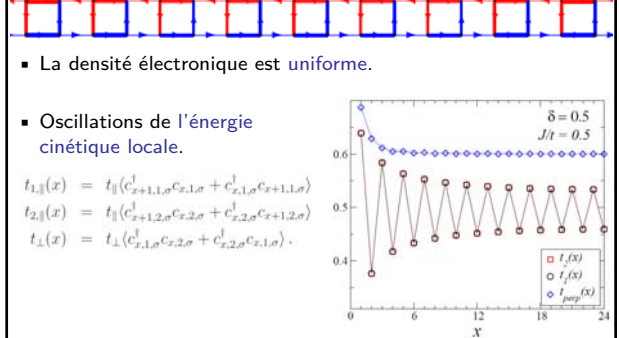


Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 33

Onde de densité de liens au quart remplissage

- Orbitales locales sur les plaquettes :



Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 34

Conclusions

- Effet Zeeman :**
 - Plateaux d'aimantation contrôlés par le dopage.
 - Phase FFLO et dépassement de la limite de Pauli.
 - Émergence des canaux triplets à fort champ.
- Effet orbital :**
 - Transitions dues à l'évolution de la structure de bandes.
 - Émergence de fluctuations de courant.
 - La susceptibilité à champ nul permet de sonder les phases commensurables.
 - Mise en évidence d'une phase onde de densité de liens au quart remplissage.

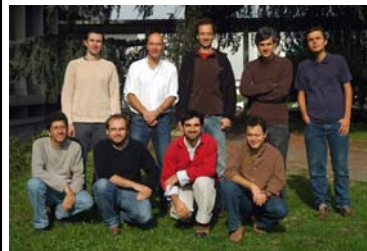
■ *Merci pour votre attention!*

Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 35

Remerciements ☺

- Groupe FFC



Steve White (Irvine)



Edmond Orignac (Lyon)



- Ainsi que les membres du laboratoire et de l'IRSAMC!

Soutenance de thèse, jeudi 12 juillet 2007

PAGE 36