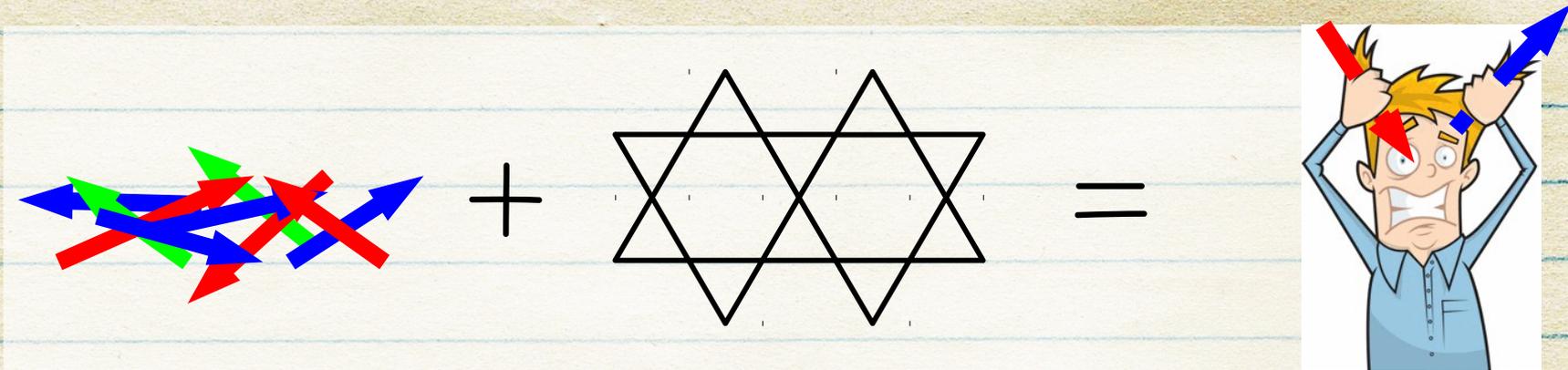


Introduction au magnétisme frustré



Julien ROBERT

LLB, CEA/CNRS, Saclay

GDR MICO - Grenoble - Mai 2014

Principales sources :

- *Introduction to frustrated magnetism*, Springer (2011)
cf. cours introductifs : J. T. Chalker, C. Lhuillier, G. Misguich
- *The Coulomb phases in frustrated systems*, C. Henley (2009)
- *Quantum spin liquids*, F. Mila, Eur. J. Phys. (2000)
- *Geometrical frustration*, R. Moessner & A. P. Ramirez, Physics Today (2006)
- *Cours sur la frustration magnétique*, B. Canals (1927)

Plan du cours

(1) Concepts de base, aspects statistiques : 30'

- degré de frustration,
- dégénérescence, entropie, ...

(2) Glaces/liquides de spins (semi-)classiques : 30'

- corrélations, dynamique
- **Ordre par le désordre** : l'exemple du réseau kagome

(3) Liquides, glaces et cristaux quantiques : 30'

- lien de valence, Intrication
- Corrélations, paramètres d'ordre, excitations élémentaires

(4) sonder le magnétisme frustré (expérimentalement, numériquement, et théoriquement)

Plan du cours

(1) Concepts de base, aspects statistiques : 30'

- degré de frustration,
- dégénérescence, entropie, ...

(2) Glaces/liquides de spins (semi-)classiques : 30'

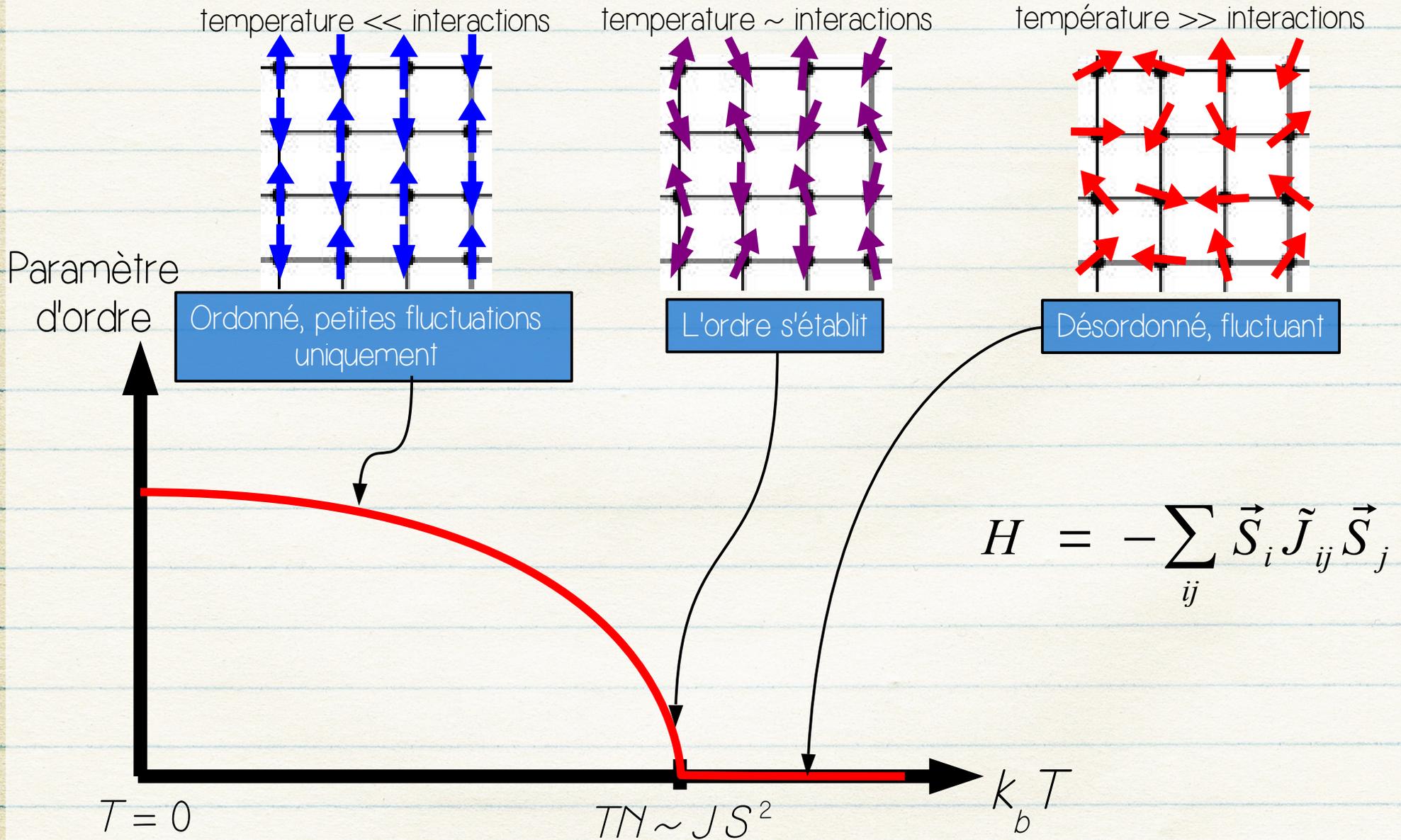
- corrélations, dynamique
- **Ordre par le désordre** : l'exemple du réseau kagome

(3) Liquides, glaces et cristaux quantiques : 30'

- lien de valence, Intrication
- Corrélations, paramètres d'ordre, excitations élémentaires

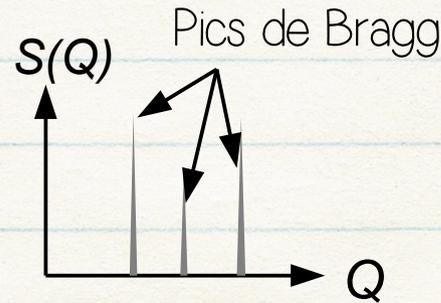
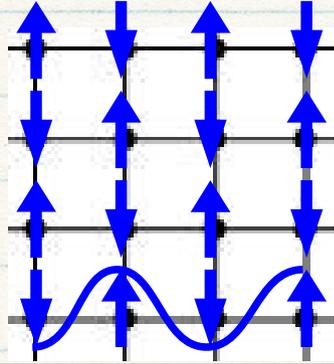
(4) sonder le magnétisme frustré (expérimentalement, numériquement, et théoriquement)

Rappels : Hamiltonien de Heisenberg, ordre magnétique



Rappels : ordre magnétique, qu'est ce que ça implique?

température \ll interactions



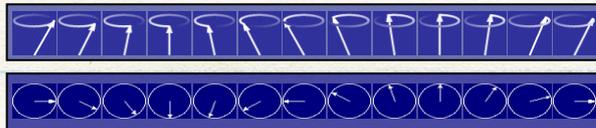
Ordonné, petites fluctuations uniquement

Symétries brisées :

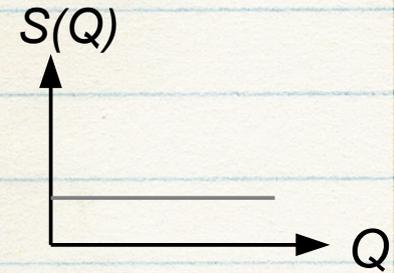
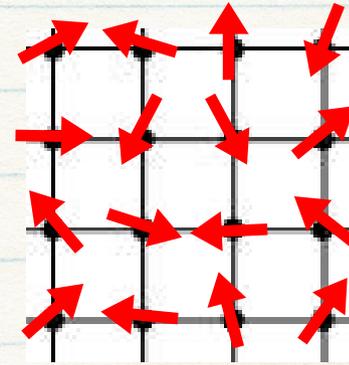
- translation : modulation
- rotation : $\langle S_i \rangle \neq 0$
- renversement du temps

Corrélations : $\langle S_i \cdot S_j \rangle = \pm S^2$

Excitations :



température \gg interactions



Désordonné, fluctuant

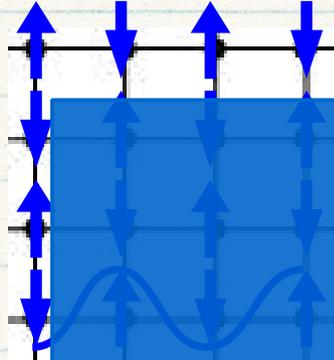
Symétries brisées :

- aucune

Corrélations : $\langle S_i \cdot S_j \rangle = \delta_{ij}$

Rappels : ordre magnétique, qu'est ce que ça implique?

température \ll interactions



température \gg interactions



$S(Q)$ Pics de Bragg

Peut-on aller plus loin?
Situations intermédiaires?

Ordonné, petites fluctuations uniquement

Désordonné, fluctuant

Symétrie

- État fondamental ne brisant pas de symétries?
- translation : modulation
- rotation : $\langle S_i \cdot S_j \rangle = 0$
- renversement

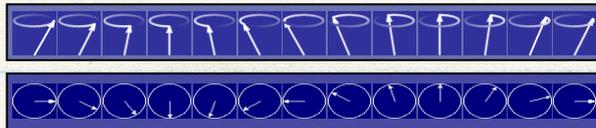
Corrélations

$$\langle S_i \cdot S_j \rangle = \pm S^2$$

Corrélations

$$\langle S_i \cdot S_j \rangle = \delta_{ij}$$

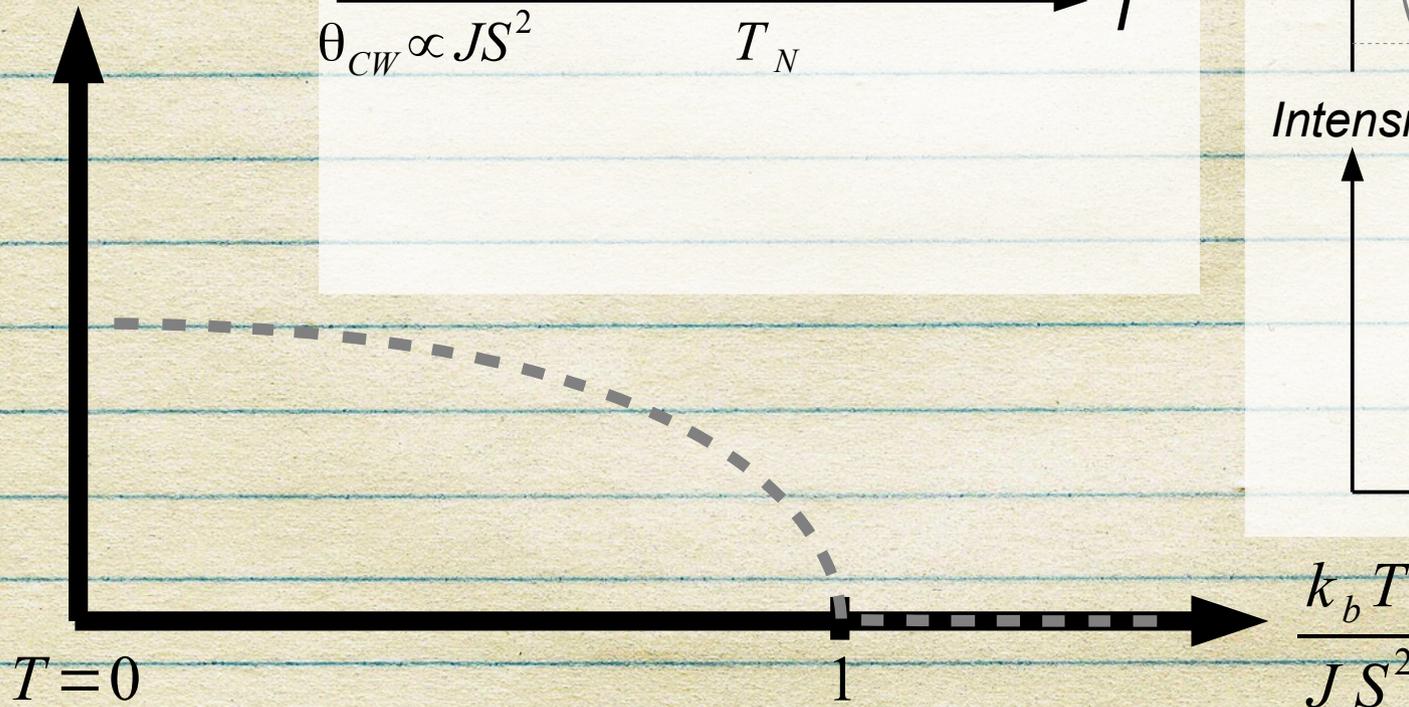
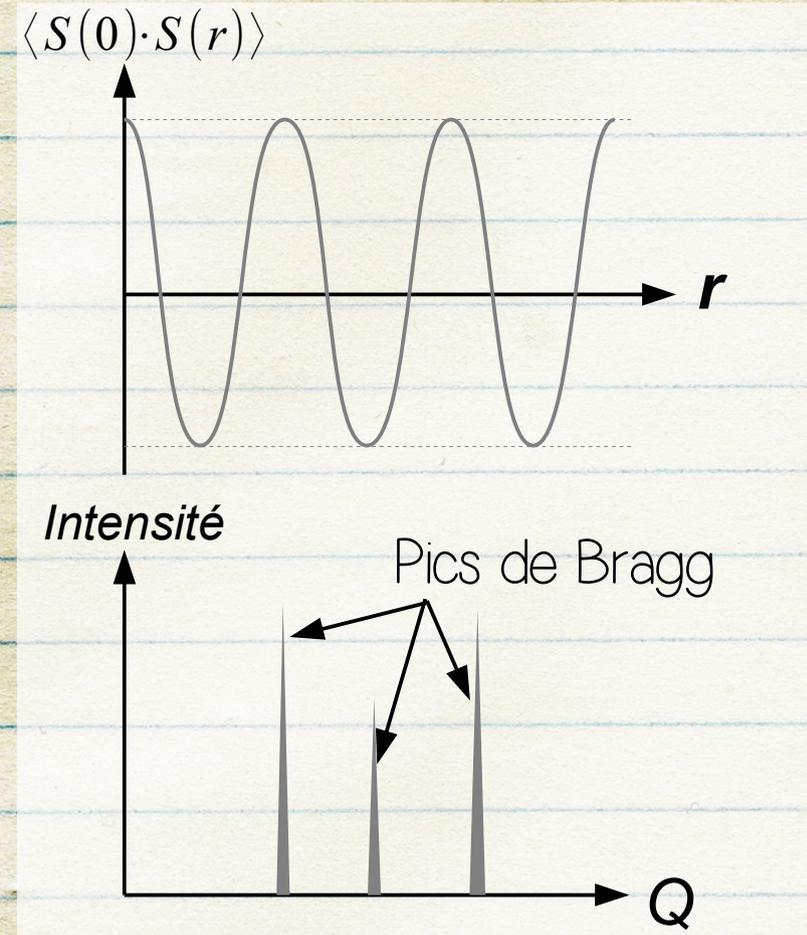
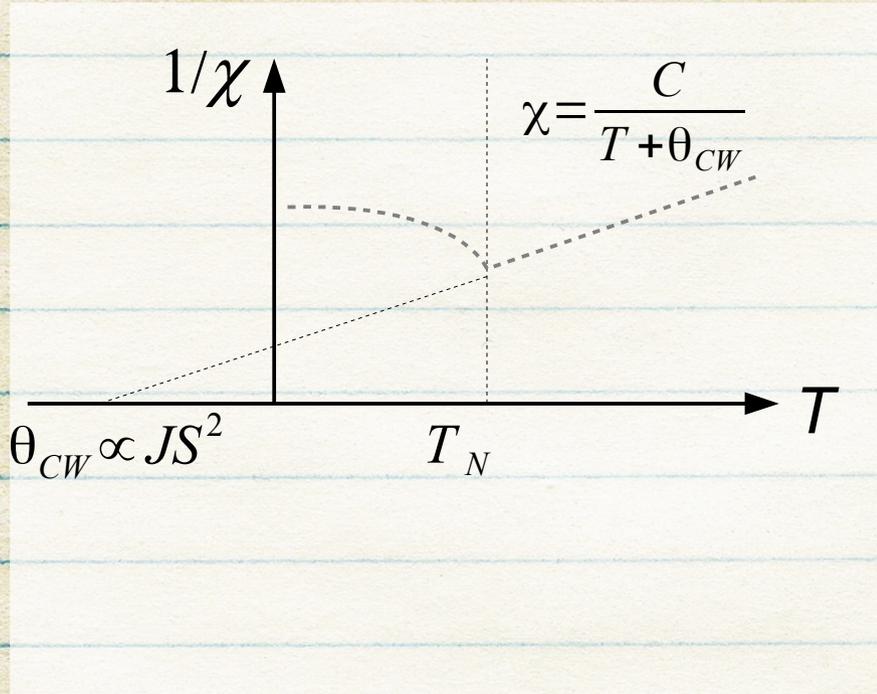
Excitations :



Empêcher l'apparition d'un ordre magnétique de Néel? Comment?

Effets de dimension, désordre structural/verres, **frustration**

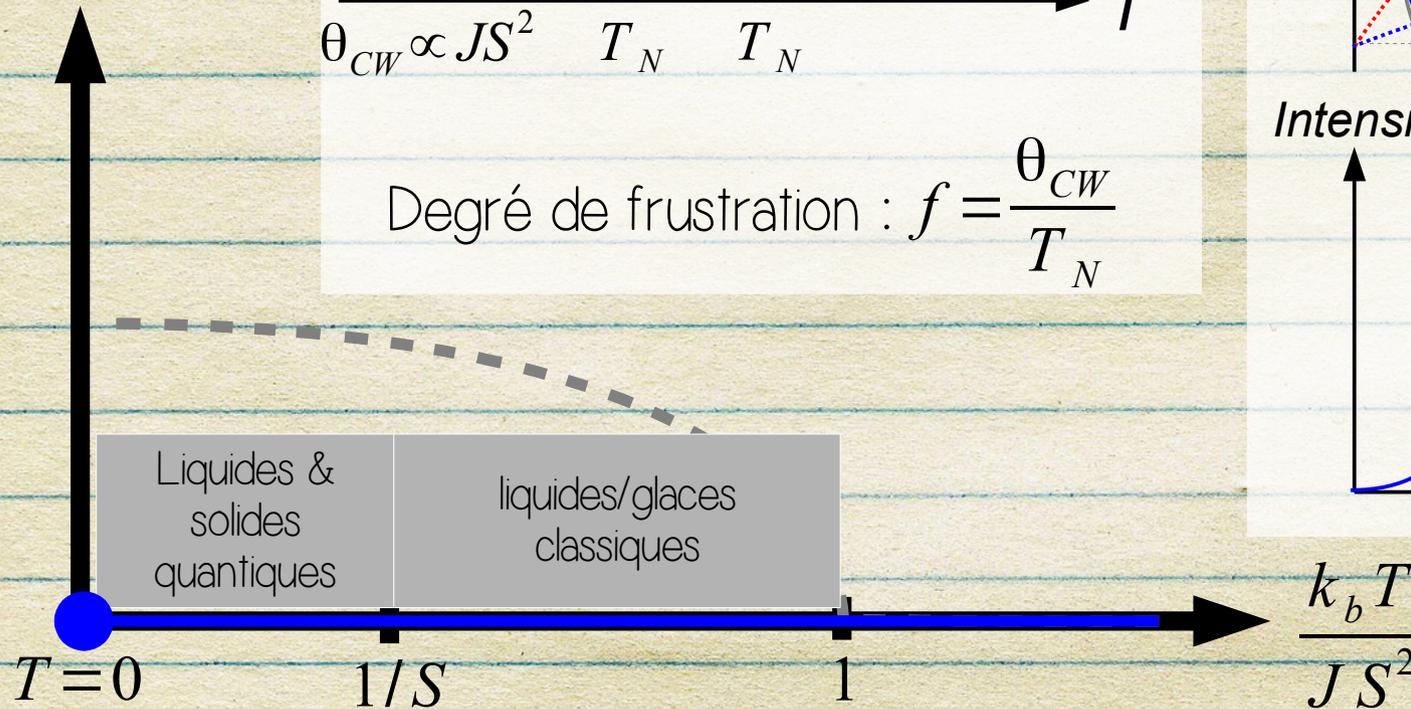
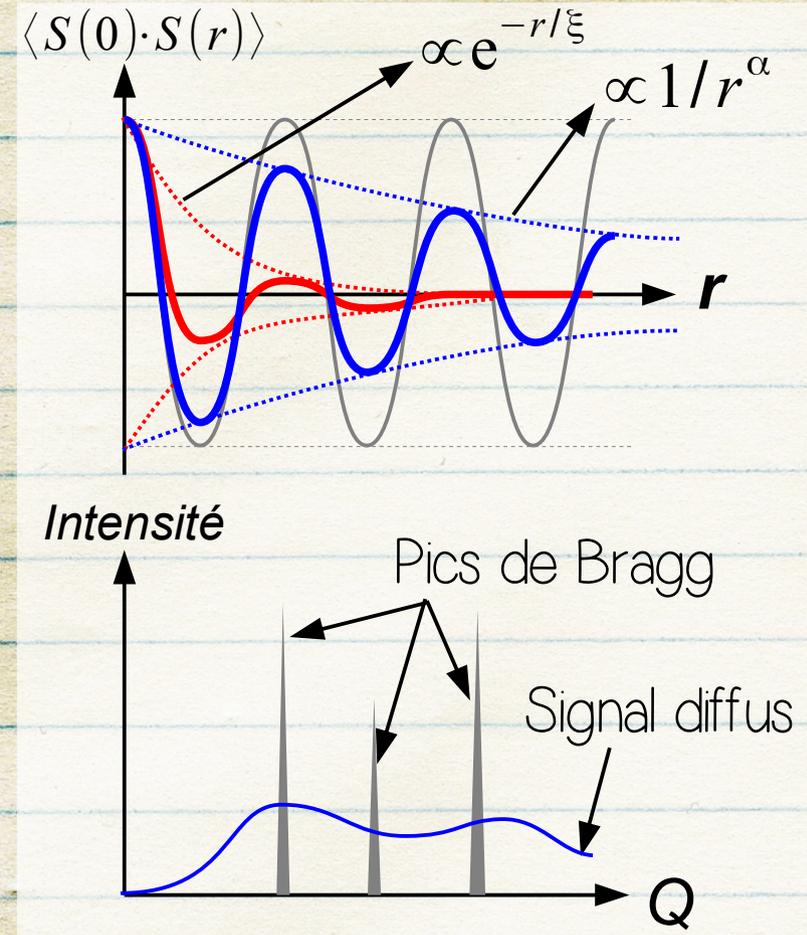
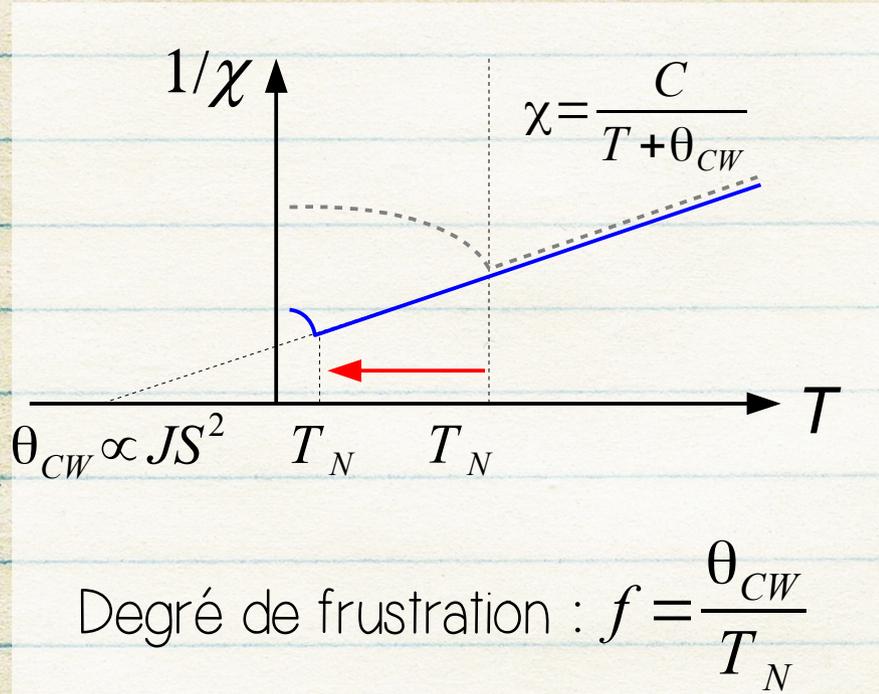
Param.
d'ordre



Empêcher l'apparition d'un ordre magnétique de Néel? Comment?

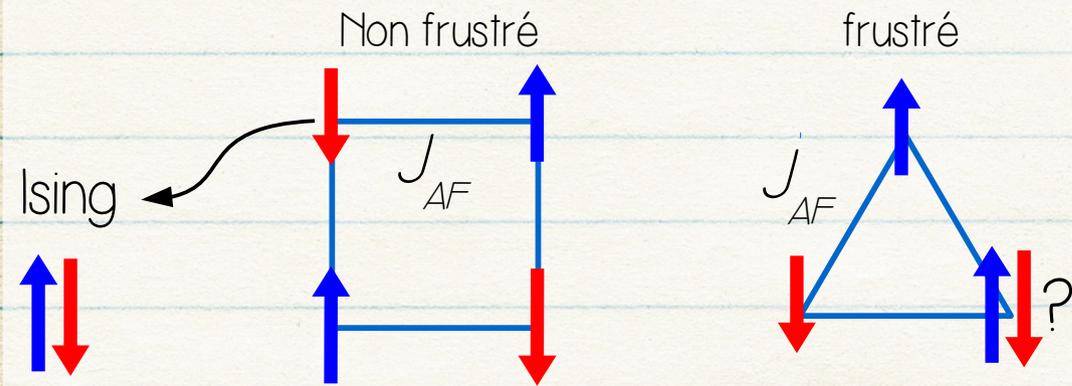
Effets de dimension, désordre structural/verres, **frustration**

Param.
d'ordre



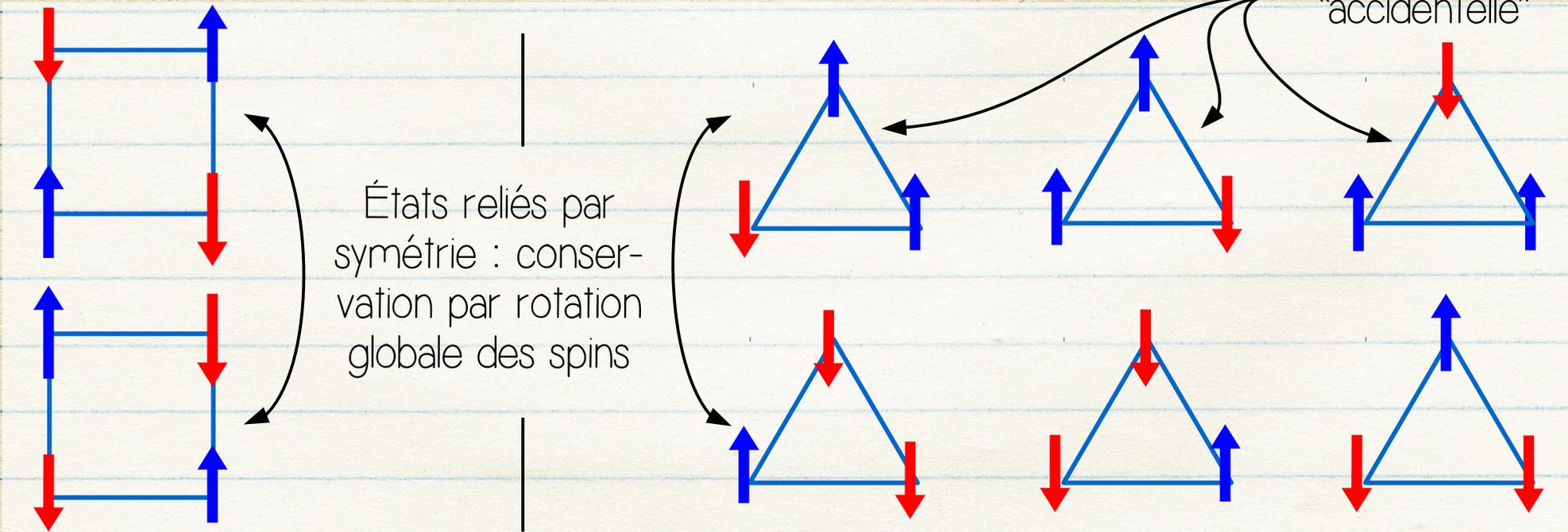
Frustration : concepts de base, motivations

► l'exemple le plus simple : spins Ising sur un triangle



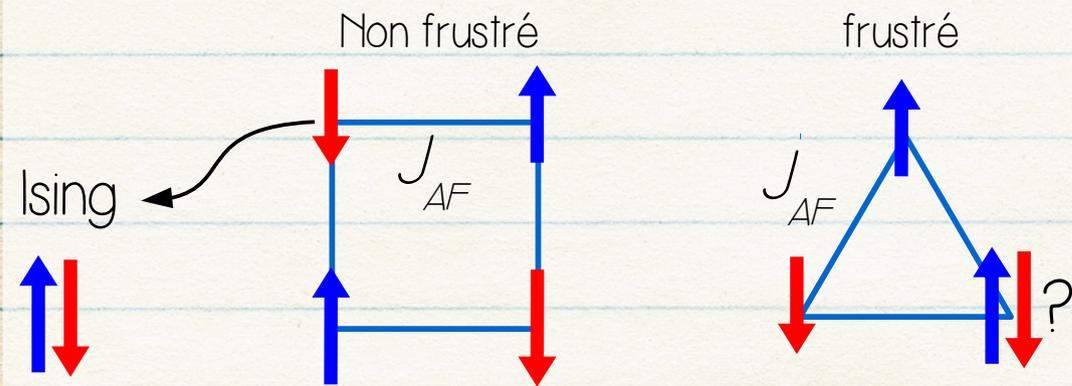
Toutes les interactions ne peuvent pas être satisfaites simultanément

► Dégénérescence : plusieurs états minimisent l'énergie



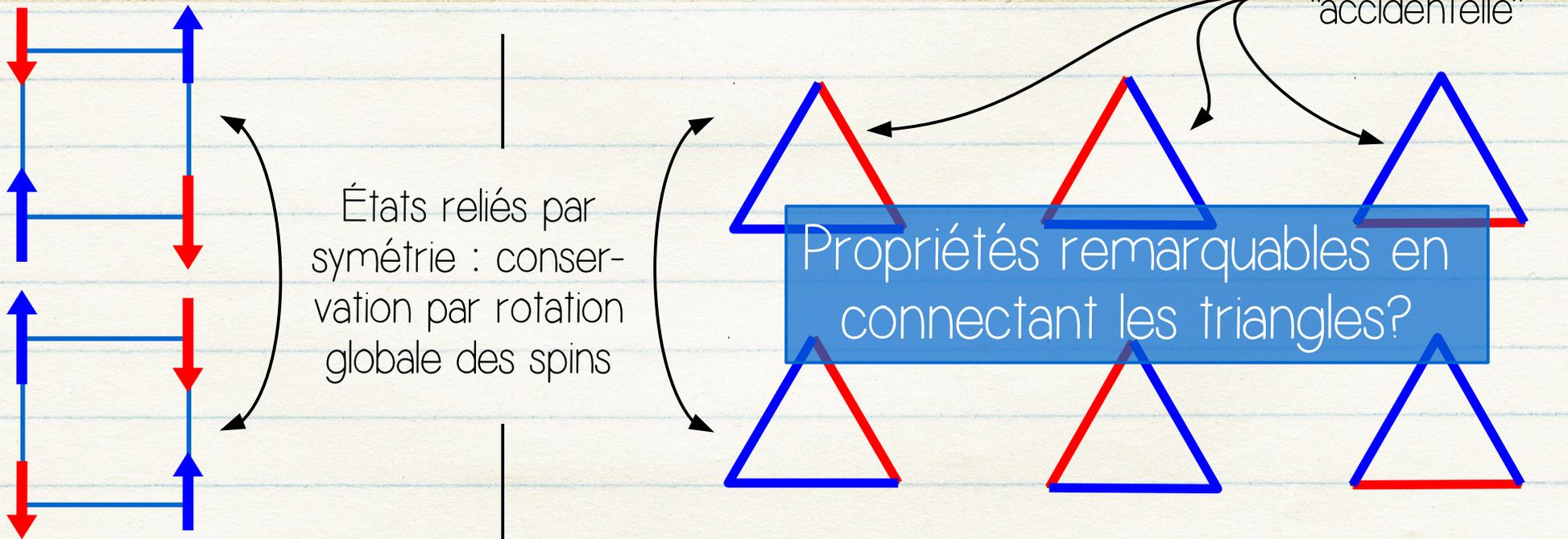
Frustration : concepts de base, motivations

- l'exemple le plus simple : spins Ising sur un triangle

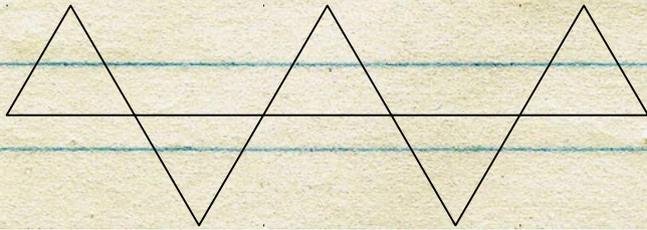


Toutes les interactions ne peuvent pas être satisfaites simultanément

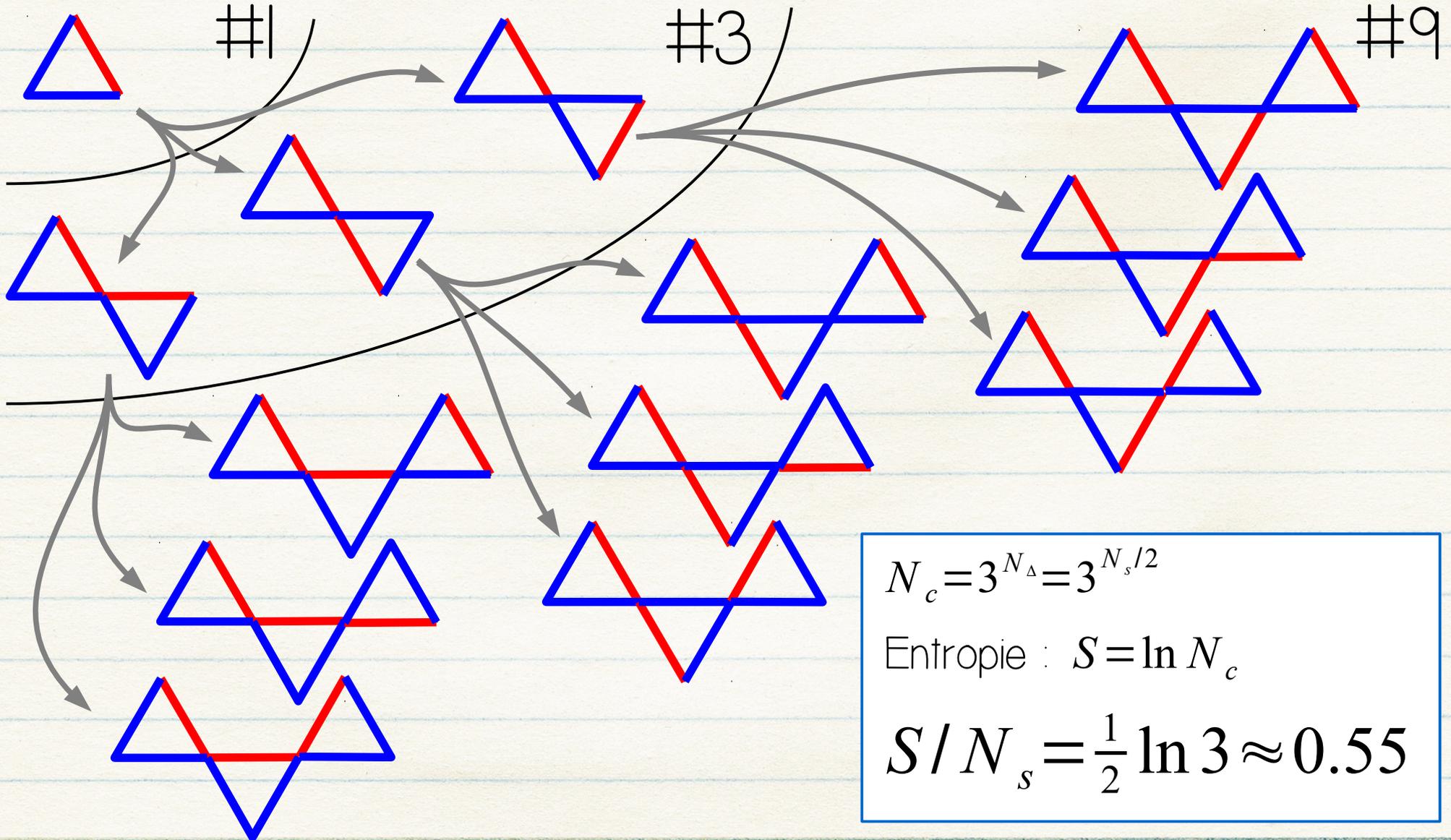
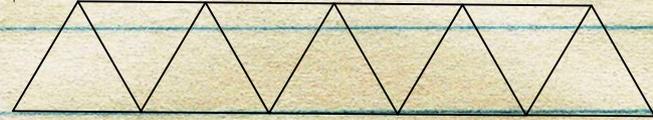
- Dégénérescence : plusieurs états minimisent l'énergie



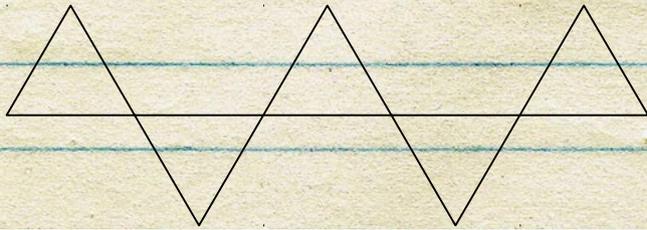
Quelques exemples : rôle des contraintes locales



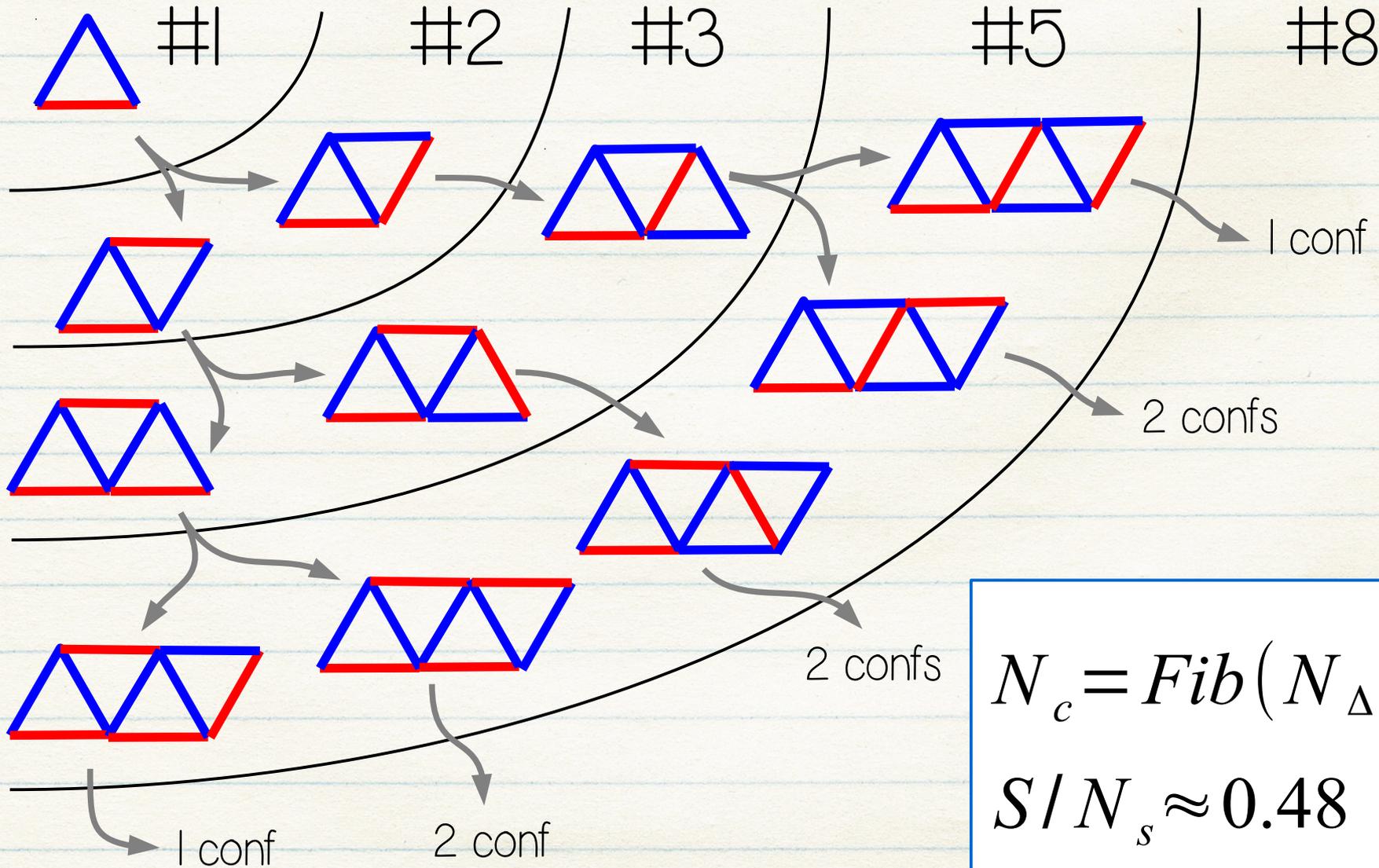
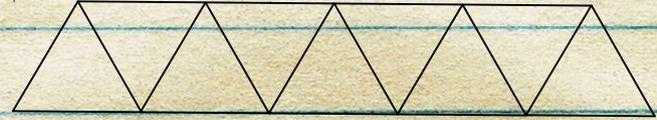
vs.



Quelques exemples : rôle des contraintes locales



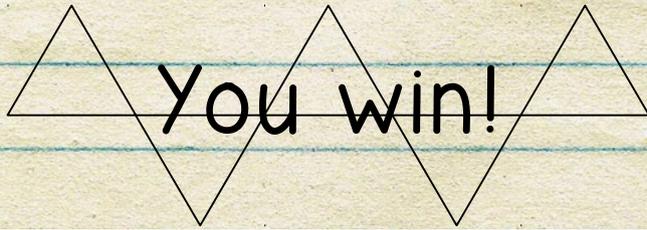
vs.



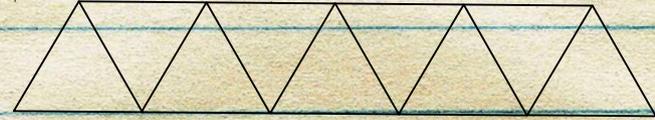
$$N_c = Fib(N_\Delta) \rightarrow \frac{\varphi^{N_s}}{\sqrt{5}}$$

$$S/N_s \approx 0.48$$

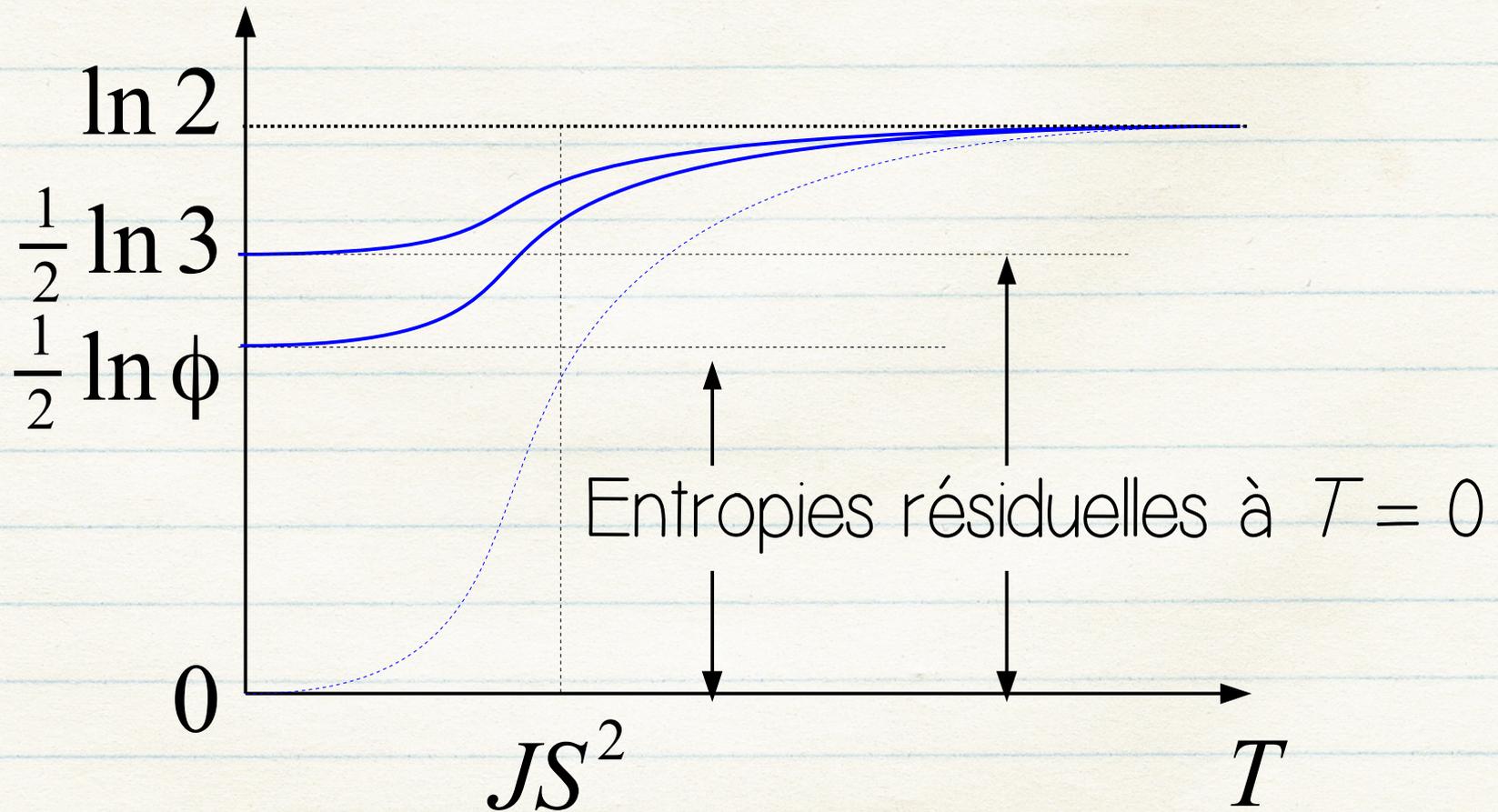
Quelques exemples : rôle des contraintes locales



VS.

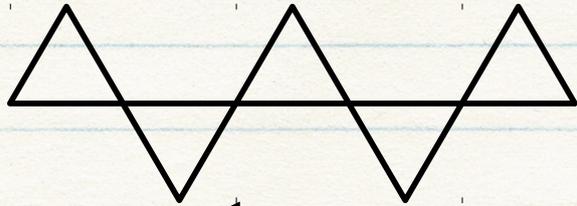


Entropie / spins

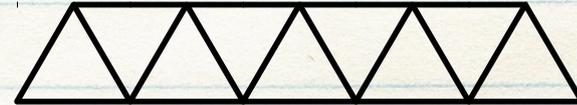


Quelques exemples : rôle de la dimension

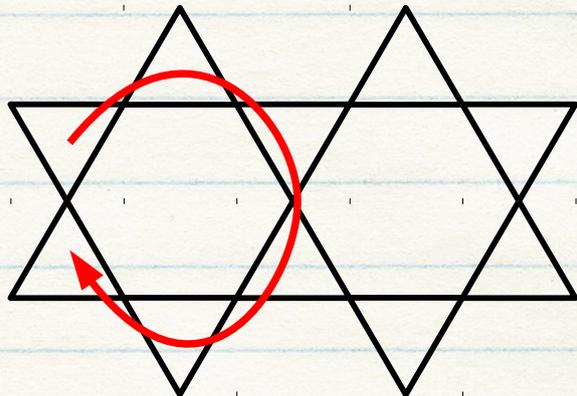
contraintes supplémentaires à 2D



$$S/N_s = \frac{1}{2} \ln 3 \approx 0.55$$

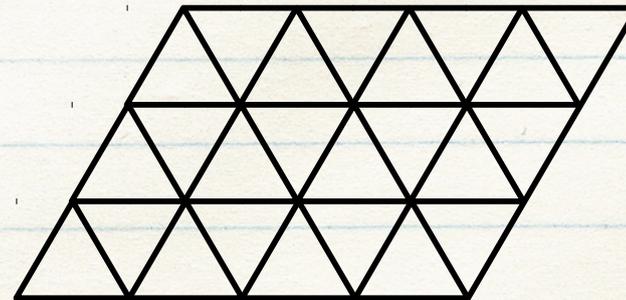


$$S/N_s = \frac{1}{2} \ln \phi \approx 0.48$$



$$S/N_s \approx 0.5$$

Kanô & Naya 1953



$$S/N_s \approx 0.32$$

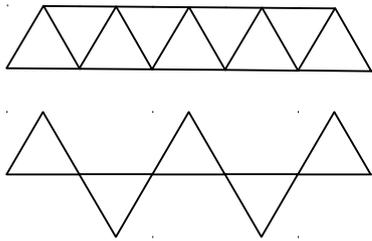
Wannier, 1950

La dimension joue un rôle!
La connectivité joue un rôle!
Quoi d'autre?

Les paramètres importants

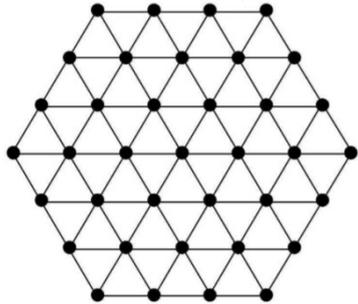
Géométrie : brique élémentaire, connectivité, dimension, ...

échelles triang



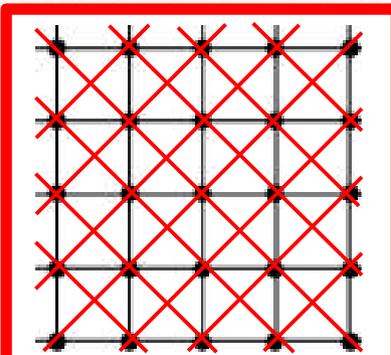
CuGeO3, ...

κ -(BEDT-TTF)2Cu2(CN)3, Delafossites, ...



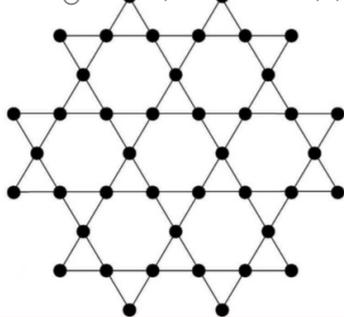
triangulaire

carré J1-J2



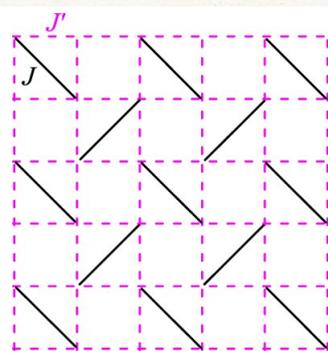
(CuCl)LaNb2O7? ...

herbertsmithite, Kapellasite, Vesignieite, Jarosites, ...



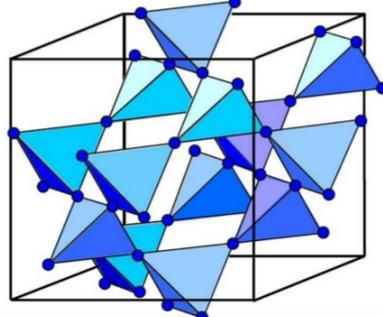
kagome

Shastry-Sutherland



SrCu2(BO3)2, RB4

R2T2O7, spinels



pyrochlore

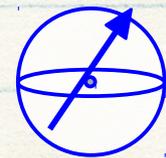
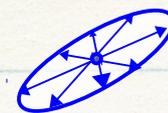
Interactions

$$H = - \sum_{ij} S_i \tilde{J}_{ij} S_j$$

tenseur d'échange

Dimension du spin

Ising XY Heisenberg ...



Taille du spin

$$S = 1/2, 1, 3/2, \dots, \infty$$

autre : deg. de lib. orbitaux, syst. itinérants, couplage spin-réseau, désordre structural (verres) ...

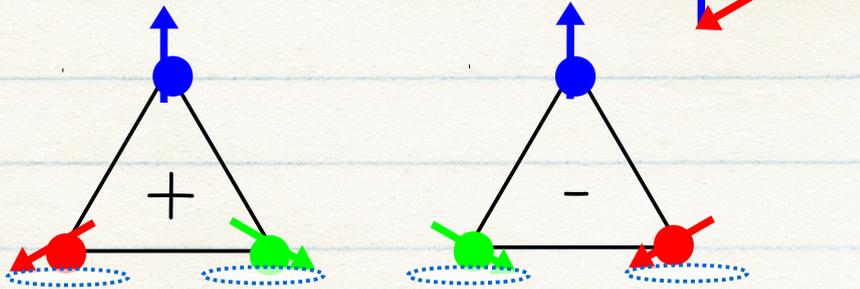
Quelques exemples : rôle de la dimension du spin

Spins XY : degrés de liberté continus

$$H = -J(S_1 \cdot S_2 + S_2 \cdot S_3 + S_3 \cdot S_1)$$
$$= -\frac{J}{2} L_\Delta^2 + cte$$

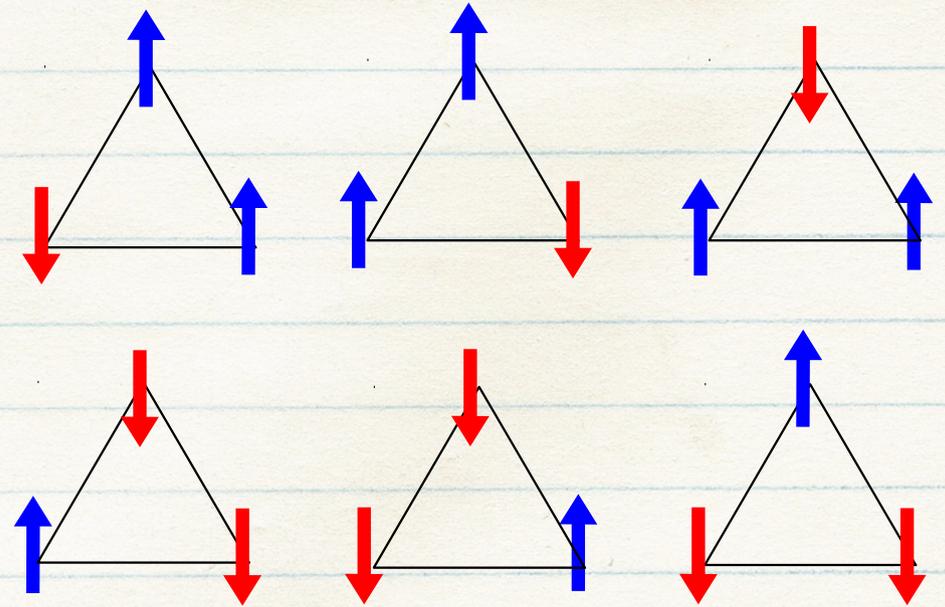
avec $L_\Delta = S_1 + S_2 + S_3$

E minimum pour $L_\Delta = 0$



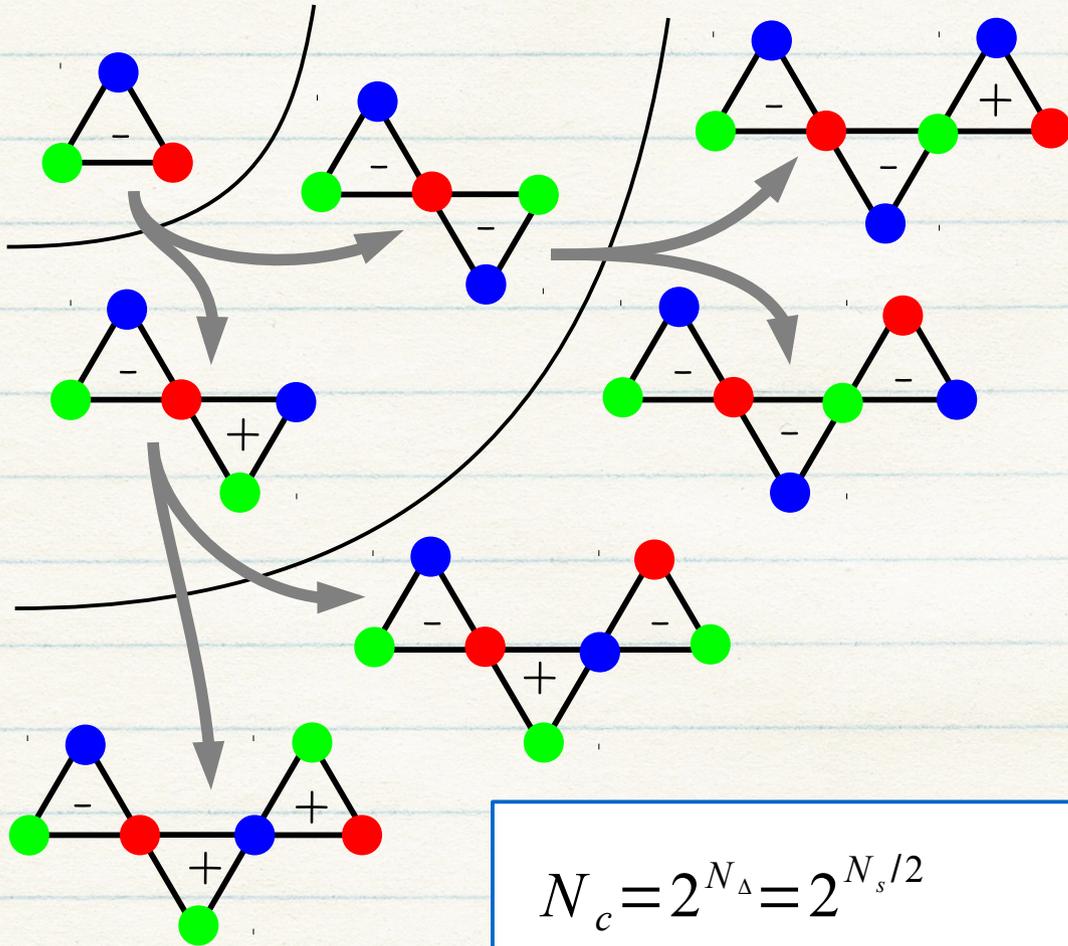
si Heisenberg : modes "girouettes"

Spins Ising : degrés de liberté discrets



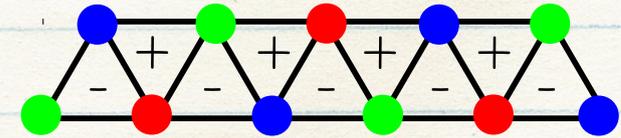
Le type d'états stabilisé dépend (évidemment) de la nature du spin

Quelques exemples : rôle de la dimension du spin



$$N_c = 2^{N_\Delta} = 2^{N_s/2}$$

$$S/N_s = \frac{1}{2} \ln 2 \approx 0.35$$

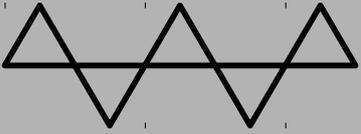
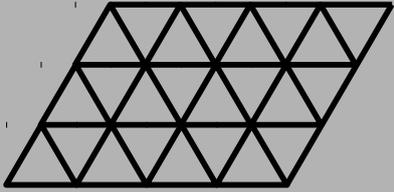
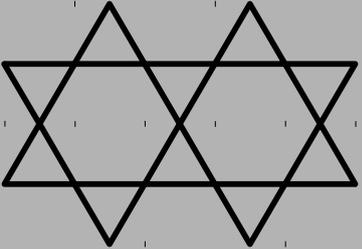


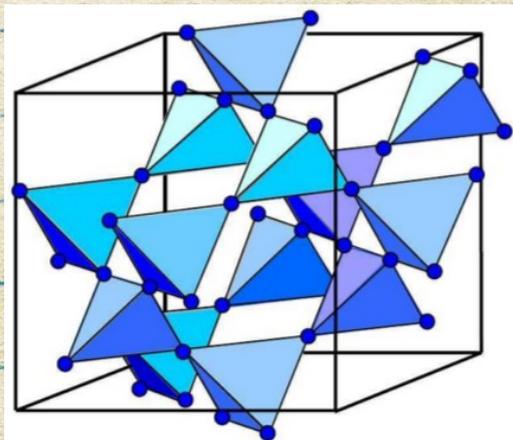
Forte contrainte locale
 \Rightarrow plus le choix de la
 chiralité

$$N_c = 1$$

$$S/N_s = 0$$

“Compter” les états avec des degrés de liberté de spin continus

Entropie résiduelle à $T = 0$				
Ising	~ 0.48	~ 0.55	~ 0.32 Wannier, 1950	~ 0.5 Kanô & Naya 1953
XY	0	~ 0.35	0	~ 0.126 Huse & Rutenberg 1993



Corrélations?
Excitations?

Plan du cours

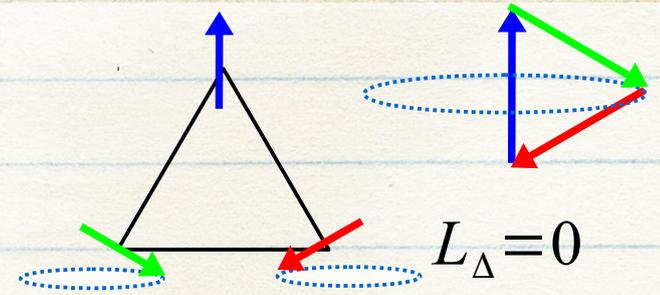
- (1) Concepts de base, aspects statistiques : 30'
- degré de frustration,
 - dégénérescence, entropie, ...
- (2) Glaces/liquides de spins (semi-)classiques : 30'
- corrélations, dynamique
 - **Ordre par le désordre** : l'exemple du réseau kagome
- (3) Liquides, glaces et cristaux quantiques : 30'
- lien de valence, Intrication
 - Corrélations, paramètres d'ordre, excitations élémentaires
- (4) sonder le magnétisme frustré (expérimentalement, numériquement, et théoriquement)

Réseaux pyrochlores : liquides et glaces de spin ("phases de Coulomb")

Contrainte locale

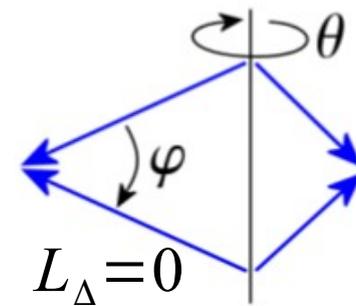
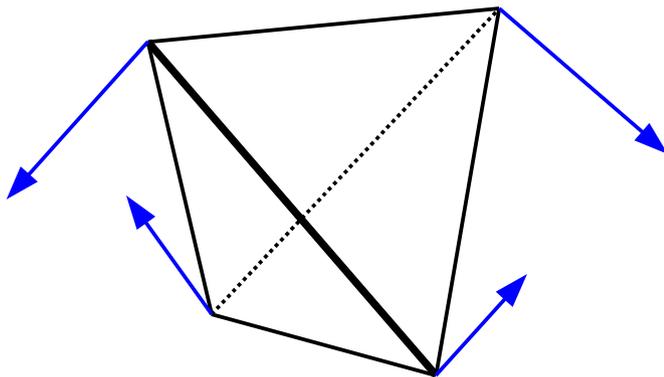
$$H = -J \sum_{\langle ij \rangle} S_i \cdot S_j = -\frac{J}{2} \sum_{\Delta} L_{\Delta}^2$$

$$L_{\Delta} = \sum_{i \in \Delta} S_i$$



Exemple I : liquide de spin

- Brique élémentaire: tétraèdre
- Interactions : AFM
- Spins : Heisenberg (deg. de lib. continus)



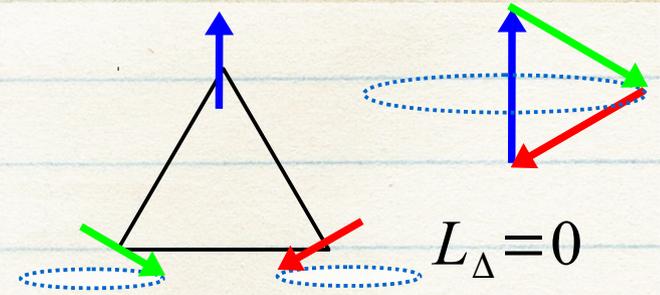
dégénérescence continue

Réseaux pyrochlores : liquides et glaces de spin ("phases de Coulomb")

Contrainte locale

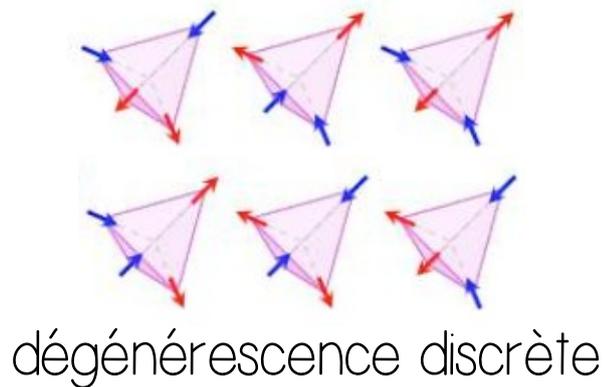
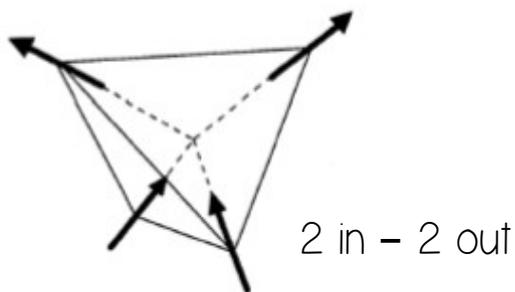
$$H = -J \sum_{\langle ij \rangle} S_i \cdot S_j = -\frac{J}{2} \sum_{\Delta} L_{\Delta}^2$$

$$L_{\Delta} = \sum_{i \in \Delta} S_i$$



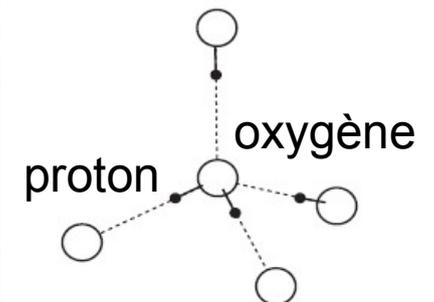
Exemple 2 : glace de spin

- Brique élémentaire: tétraèdre
- Interactions : FM
- Spins : Ising // **[111]** (deg. de lib. discret)



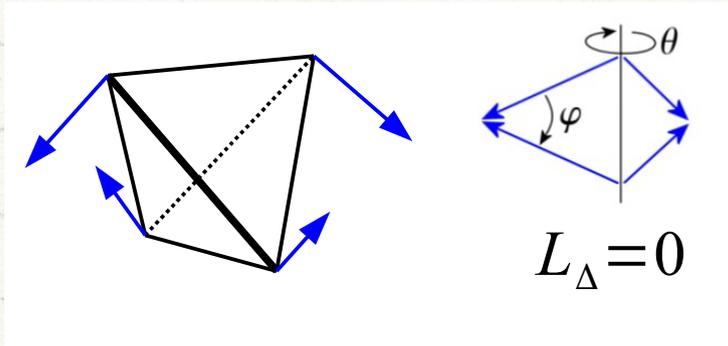
Pourquoi glace?

Glace d'eau
"2 close - 2 far"



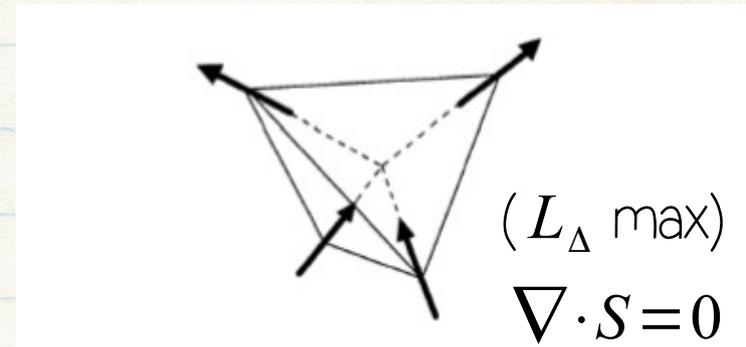
Réseaux pyrochlores : liquides et glaces de spin ("phases de Coulomb")

liquide de spin
AFM + Heisenberg



dégénérescence continue

glace de spin
FM + Ising



dégénérescence discrète

Corrélations?
Excitations?

$\nabla \cdot B = 0$ Loi de Gauss

Glace de spin : $B = S$
Liquide de spin : $\nabla \cdot B_{\alpha} = L_{\Delta}^{\alpha}$

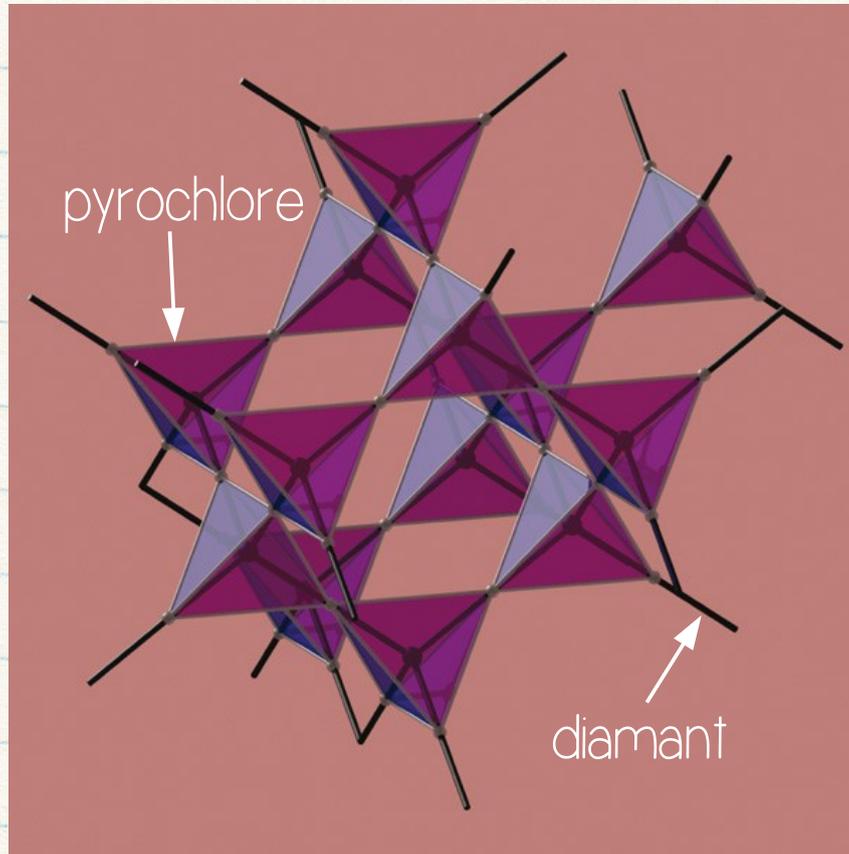
“Analogie” magnétostatique

- ✓ Mapper le problème spin \leftrightarrow flux
- Passer à la limite continue : $S_i \leftrightarrow \mathbf{S}(\mathbf{r})$
- Vérifier $\text{div } \nabla \cdot \mathbf{S}(\mathbf{r}) = 0$ et $F \propto \mathbf{S}(\mathbf{r})^2$
- Calculer les corrélations

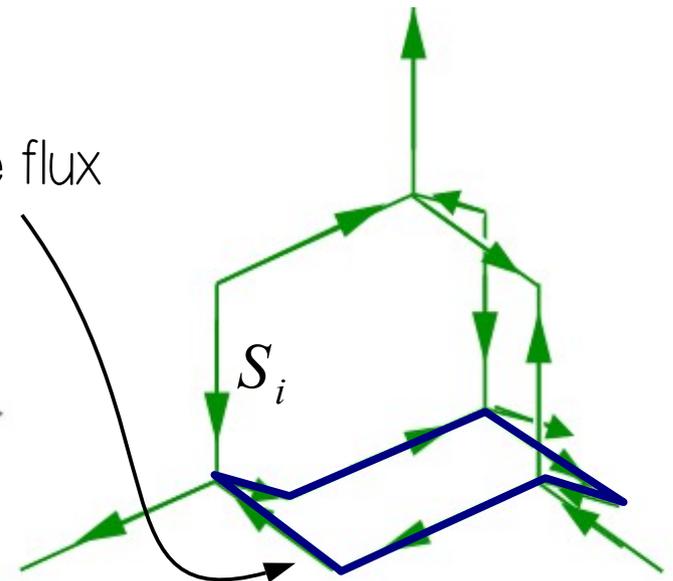
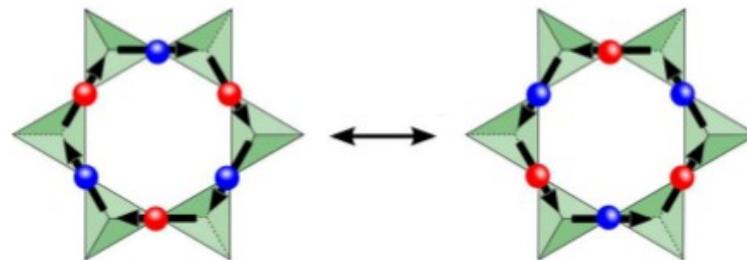
- les spins “vivent” sur les **liens** connectant les centres des tétraèdres
- **contrainte locale** : 2 flux entrant et 2 sortant

$$\nabla \cdot \mathbf{S} = 0$$

$$\mathbf{S} = \sum_i \mathbf{S}_i$$

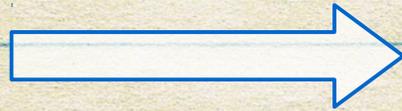
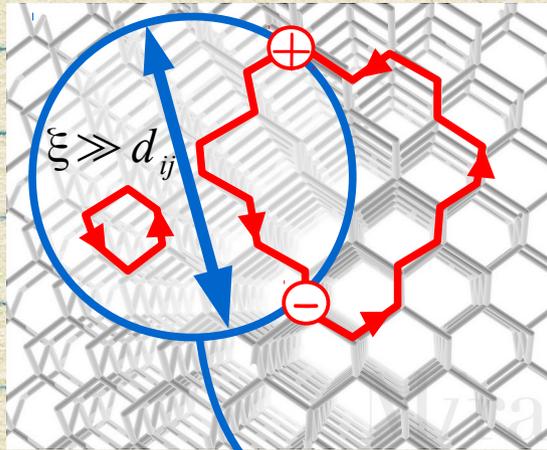


boucles de flux



"Analogie" magnétostatique

- ✓ Mapper le problème spin \leftrightarrow flux
- ✓ Passer à la limite continue : $S_i \leftrightarrow S(r)$
- ✓ Vérifier $\text{div } \nabla \cdot S(r) = 0$ et $F \propto S(r)^2$
- Calculer les corrélations



$$S(r) = \sum_i S_i$$



Règle de divergence nulle :

$$\nabla \cdot S(r) = 0$$

- si état "liquide" ($S(r)$ suffisamment indépendants les uns des autres) :

$$p(S) \propto \exp(-K S^2)$$

distribution de probabilité gaussienne de S_{tot}

$$F \propto S^2$$

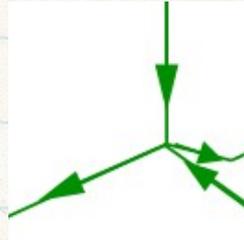
- calcul de valeurs moyennes :

$$\langle A(S) \rangle = \frac{\int dS A(S) p(S)}{\int dS p(S)}$$

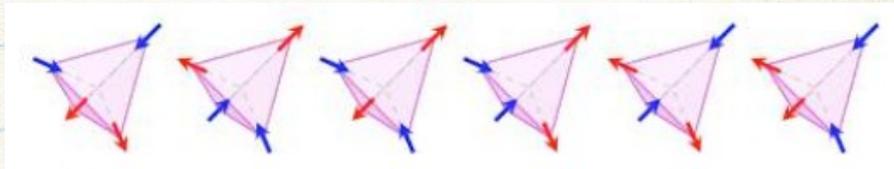
"Analogie" magnétostatique

- ✓ Mapper le problème spin \leftrightarrow flux
- ✓ Passer à la limite continue : $S_i \leftrightarrow S(\mathbf{r})$
- ✓ Vérifier $\text{div } \nabla \cdot S(\mathbf{r}) = 0$ et $E \propto S(\mathbf{r})^2$
- ✓ Calculer les corrélations

Une contrainte locale forte (autant de flux entrant que de flux sortant) ...

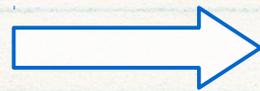


... ne menant pas à un ordre à longue portée



\Rightarrow chaque composante de spins peut se mapper par un pb de flux parcourant les liens du réseau parent, tel que (passage à la limite continue) :

$$E \propto S(\mathbf{r})^2$$
$$\nabla \cdot S(\mathbf{r}) = 0$$



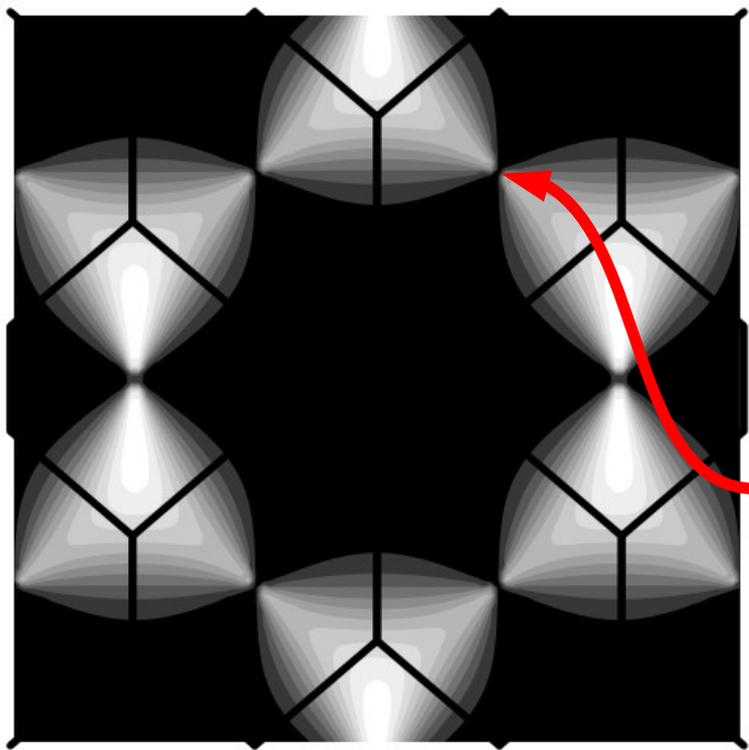
$$\langle S_\mu(0) S_\nu(r) \rangle \propto \frac{1}{r^3} (\delta_{\mu\nu} - 3(\hat{r}_\mu \cdot \hat{r}_\nu))$$

\Rightarrow longueur de corrélation $\rightarrow \infty$

Conséquences

Espace réciproque : T.F. des corrélations spin-spin

liquide de spin (AFM + Heisenberg)

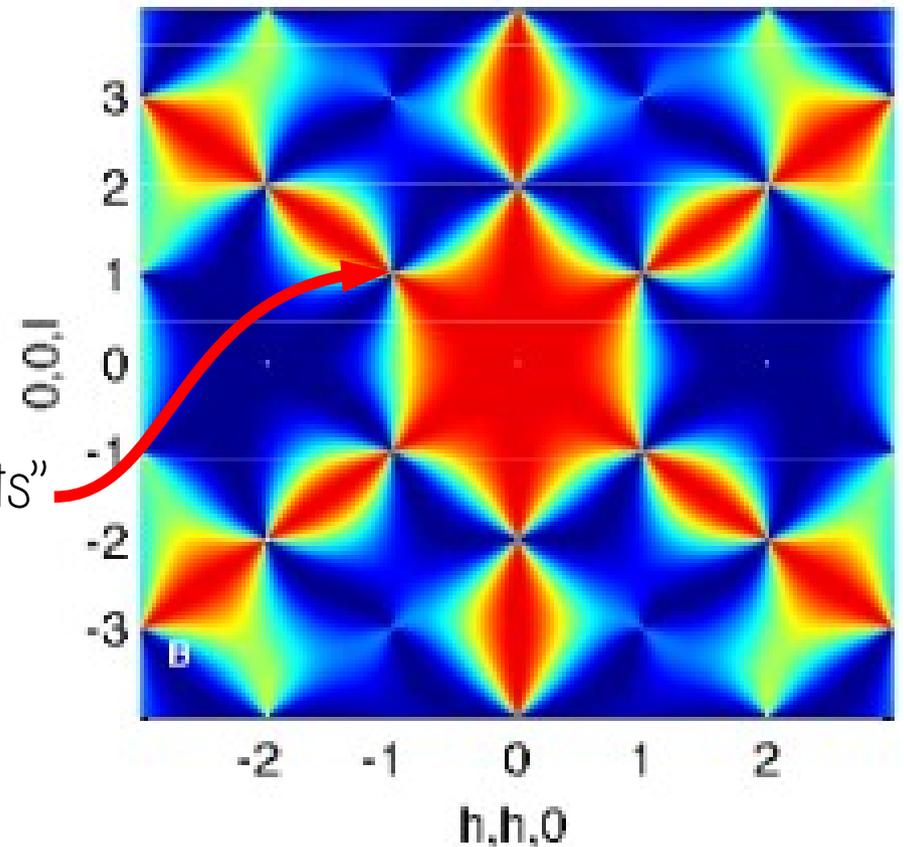


"Pinch points"

$$\text{Si } T > 0 : \langle S(0)S(r) \rangle \propto \frac{1}{r^3} e^{-r/\xi}$$

Garanin & Canals, PRB 1998

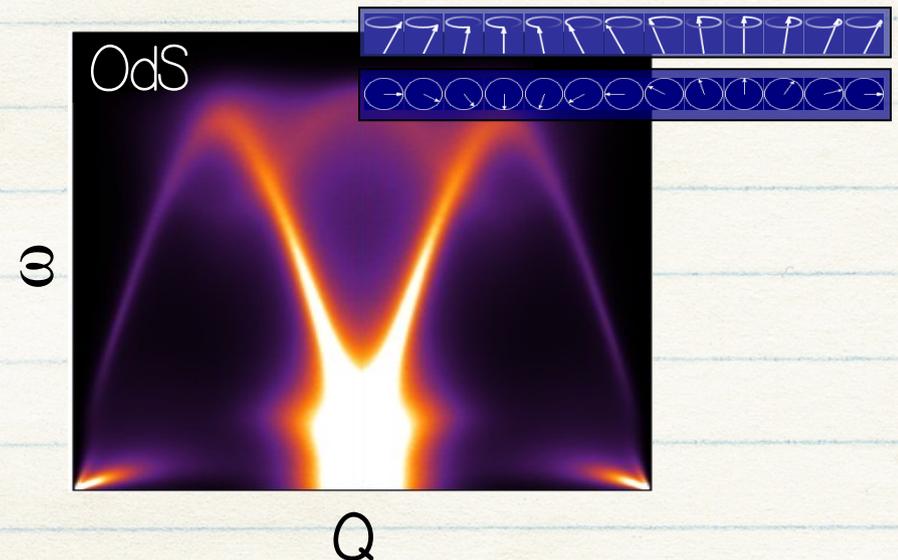
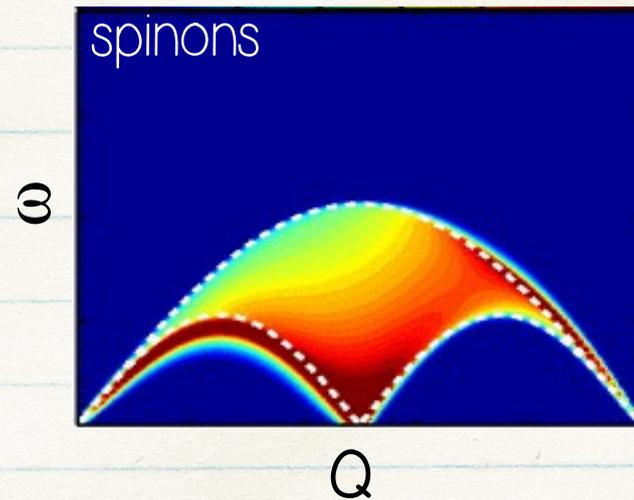
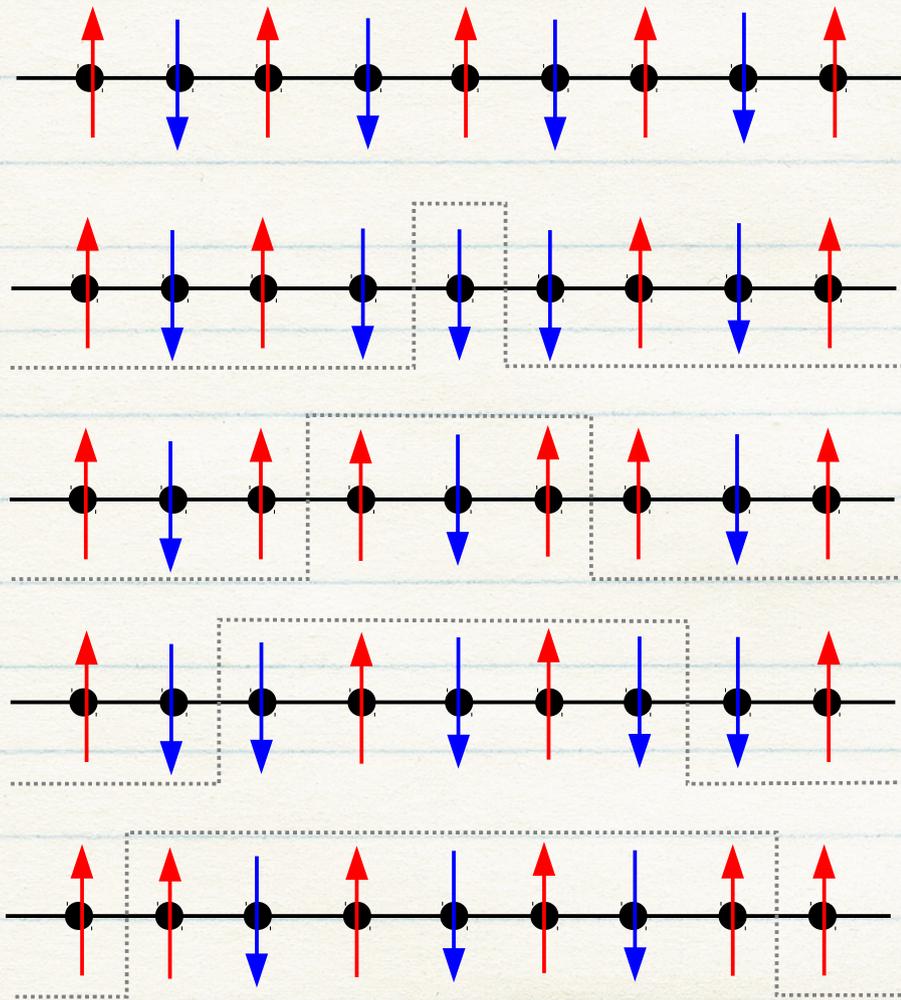
glace de spin (FM + aniso. Ising)



Henley PRB 2005

Conséquences : excitations élémentaires

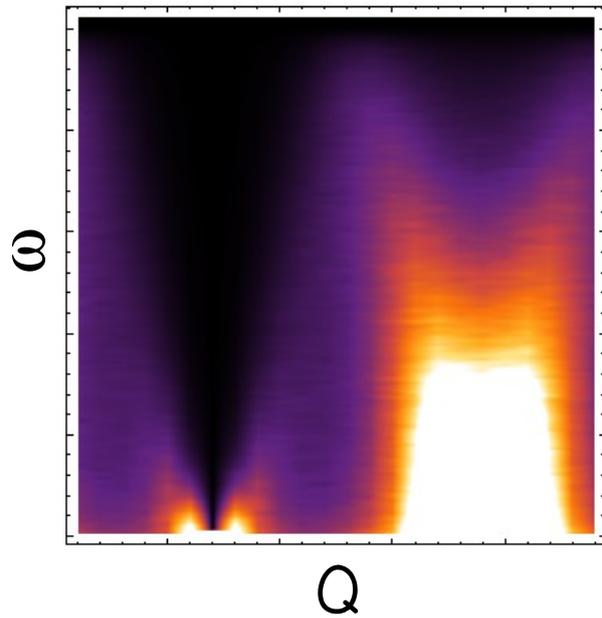
Des excitations fractionnaires : les spinons



Conséquences : excitations élémentaires

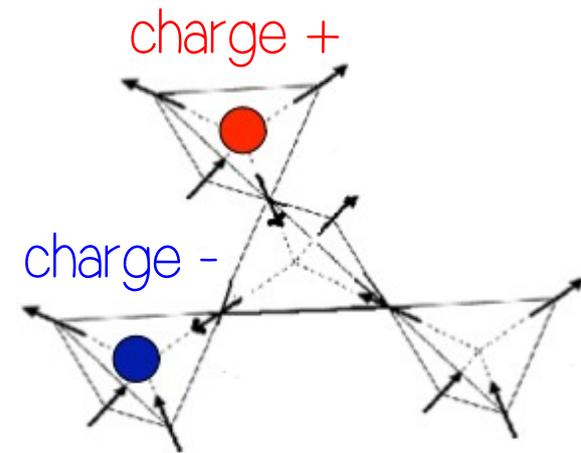
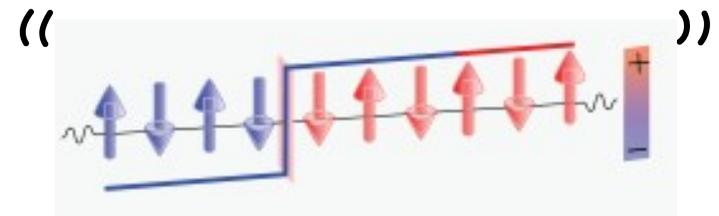
'Spinons' ("monopoles magnétiques")

liquide de spin (AFM + Heisenberg)



Très fluctuant

glace de spin (FM + aniso. Ising)

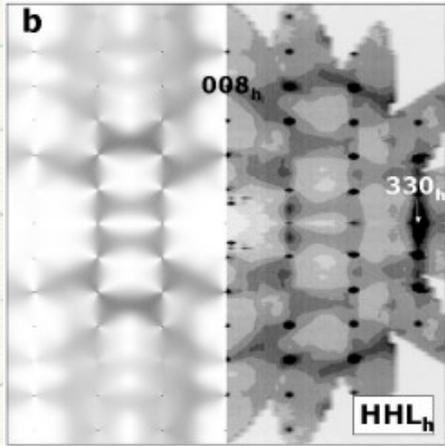


Excitations gappées

Très "figé"

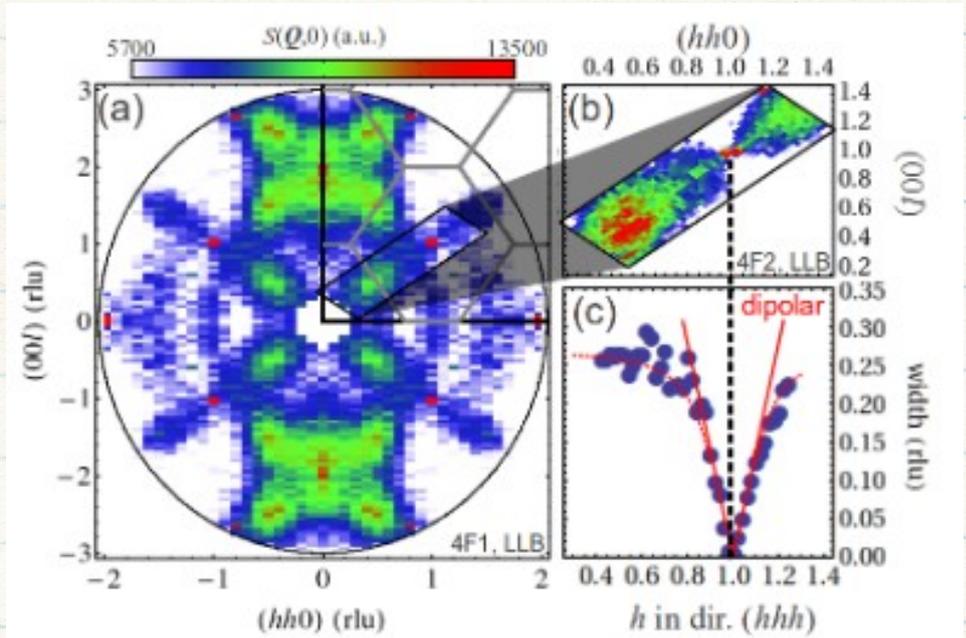
Hé mais sinon, pour de vrai, ca existe?

La glace d'eau lh (hexagonale)

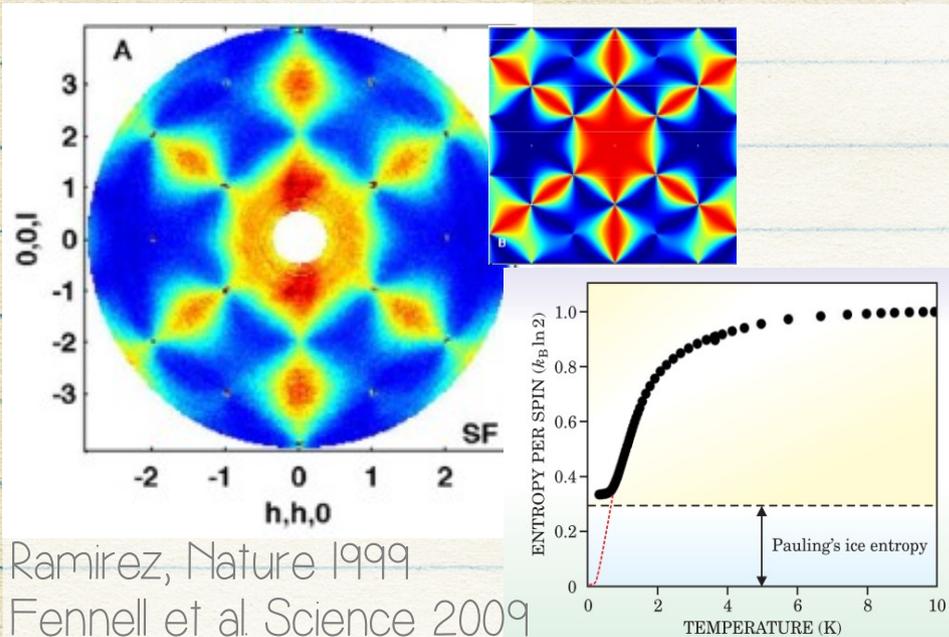


Wehinger, arXiv 2014

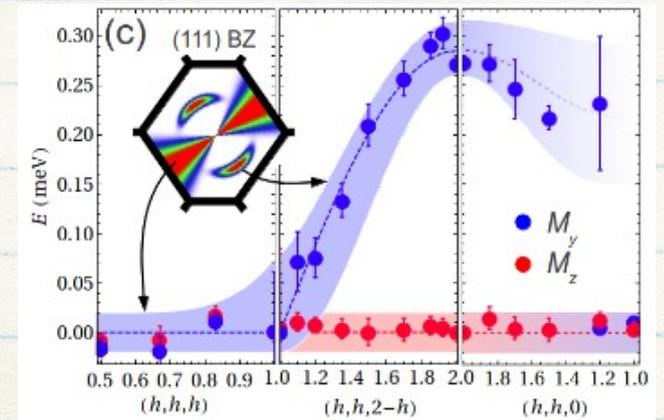
Tb₂Ti₂O₇ : glace, liquide, soft, quantique?...



Glace de spin : Ho₂Ti₂O₇, Dy₂Ti₂O₇



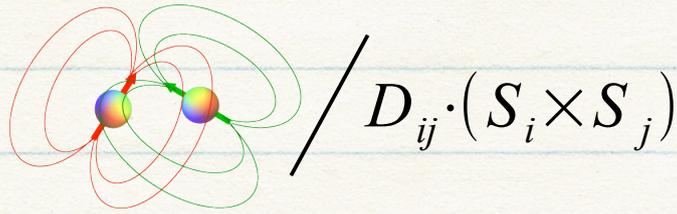
Ramirez, Nature 1999
Fennell et al. Science 2009



Guitteny et al, 2013
Fennell et al. PRL 2013

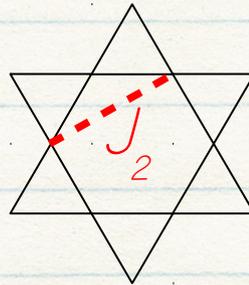
Branchons les fluctuations : ordre par le désordre

Dégénérescences "accidentelles" \Rightarrow fondamental fragile

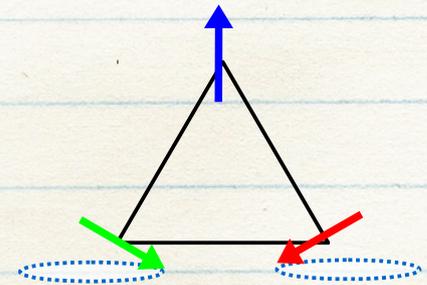


$$/ D_{ij} \cdot (S_i \times S_j)$$

Interactions anisotropes



Interactions 2nd voisins



fluctuations

Fluctuations : ordre par le désordre (J. Villain, J. de phys. 1980)

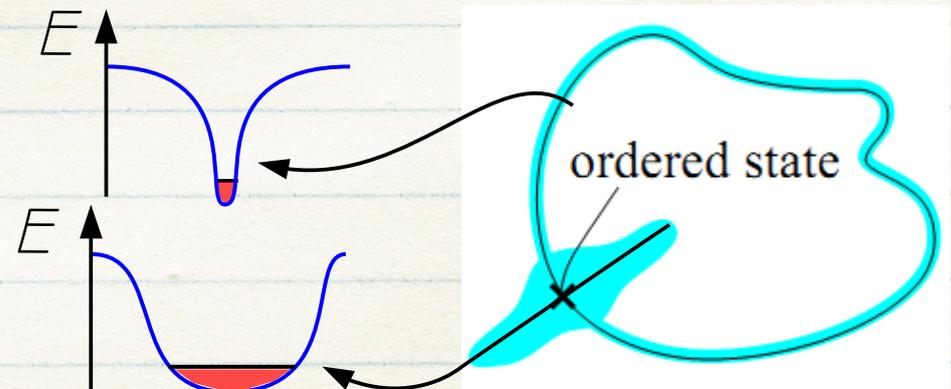
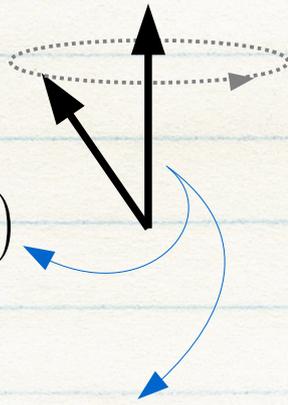
- $T > 0$ (classique) :

$$F(x) = E_0 - TS(x)$$

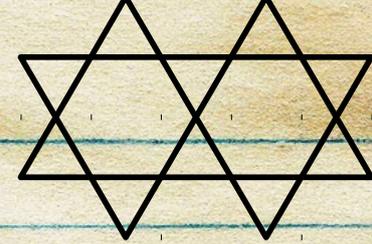
- $T = 0$ (semi-classique) :

$$E(x) = E_0 + \frac{1}{2} \sum_l \hbar \omega_l(x)$$

maintenant avant



Exemple : le réseau kagome AFM

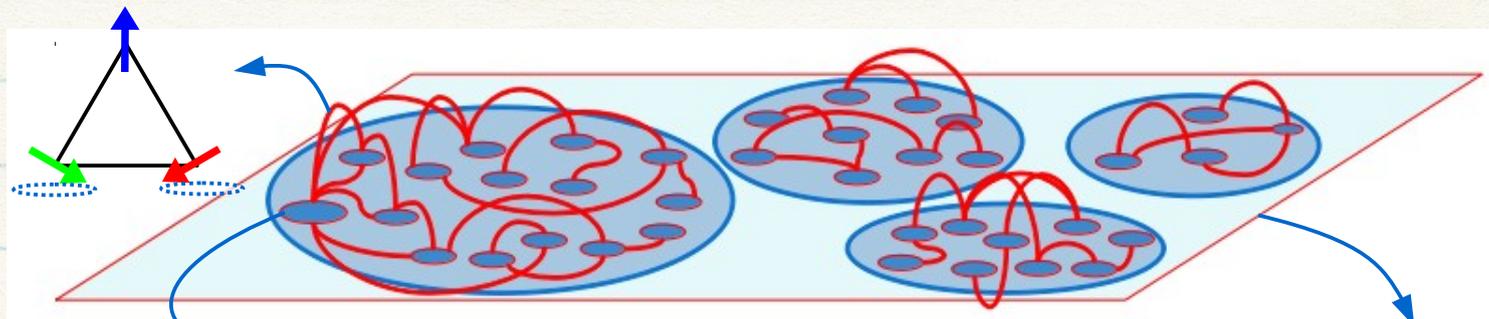
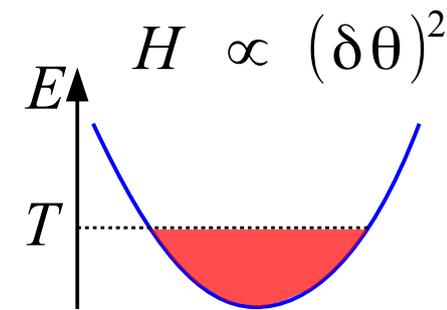
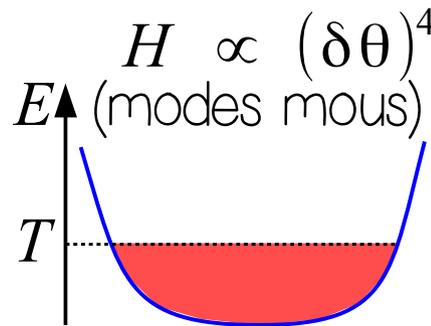
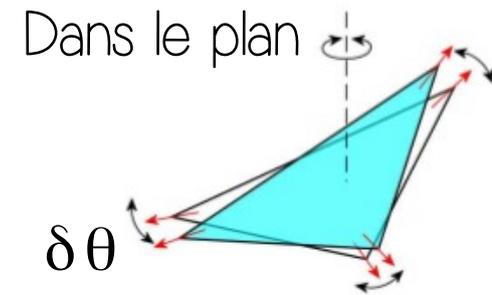
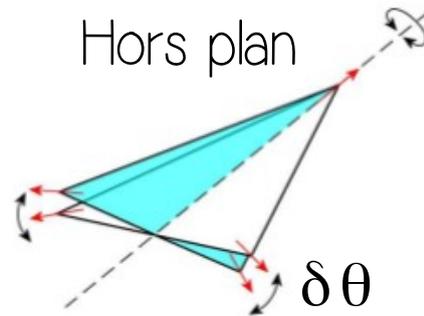
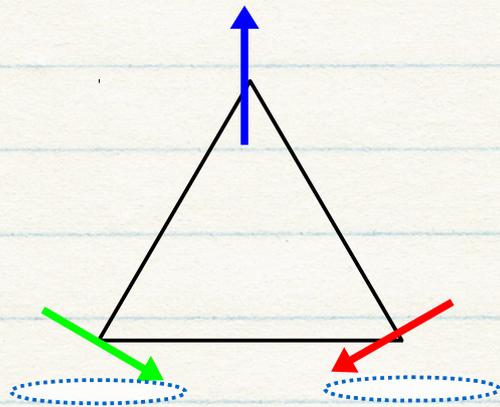


Ordre coplanaire dans le kagome AFM?

$$H = -\frac{J}{2} L_{\Delta}^2$$

$$L_{\Delta} = S_1 + S_2 + S_3$$

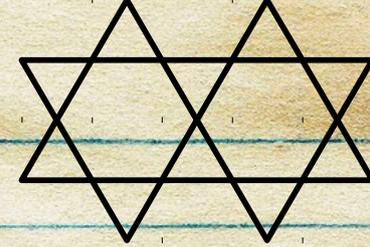
... + fluctuations :



Etats coplanaires

Espace fondamental

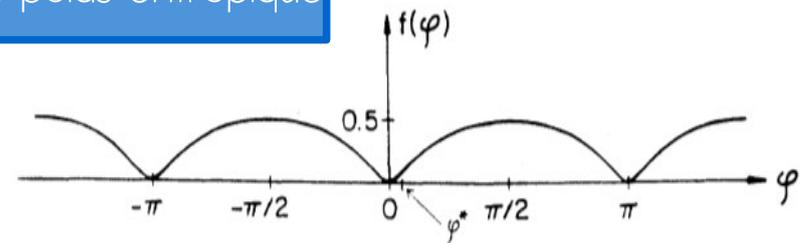
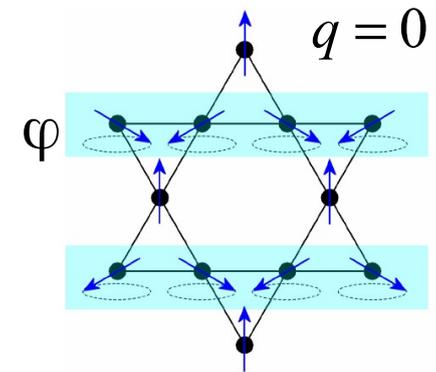
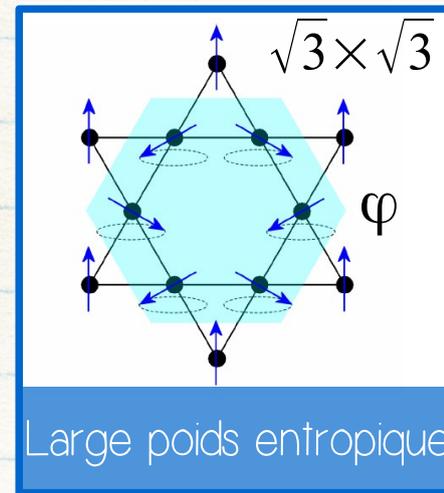
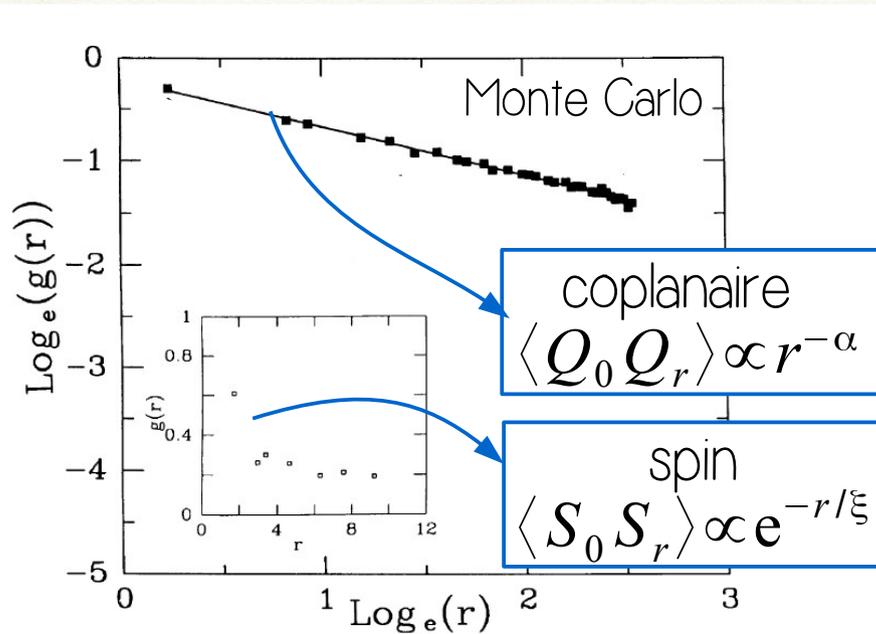
Exemple : le réseau kagome AFM



Ordre coplanaire : symétrie de rotation brisée à $T > 0$

approche classique : $F = E_0 - T S$

approche semi-classique : $E = E_0 + \frac{1}{2} \sum_l \hbar \omega_l$



Chalker PRL 1992, Zhitomirsky PRB 2008

Chubukov '92, Henley '93, Chandra '93, Cepas '11

Ordre $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$
 à longue portée
 à $T = 0$?

Huse & Rutenberg, PRB1992, Sachdev, PRB1992,
 Reimers, PRB 1993, Zhitomirsky 2008,
 Henley, PRB2009, Chern PRL2013

Réseaux géométriquement frustrés, $S = \infty$

$T = 0$

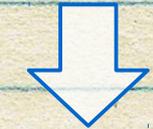
$1/S$

1

$\frac{k_b T}{J S^2}$

Liquides & solides
quantiques

liquides/glaces classiques



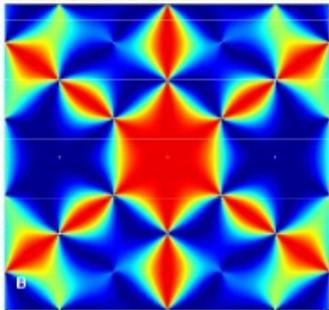
???



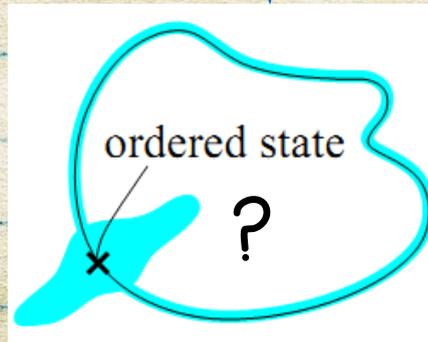
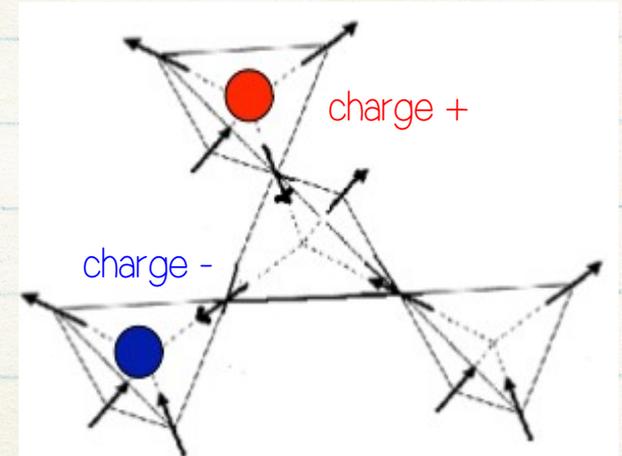
Infinité d'états de
plus basse énergie
 $S \propto N_s$

Statique

$$\langle S(0)S(r) \rangle \propto \frac{1}{r^3}$$
$$\Rightarrow \xi \rightarrow \infty$$



Dynamique



Plan du cours

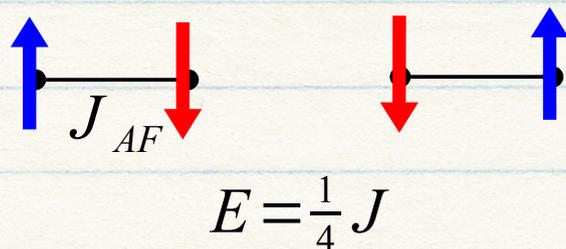
- (1) Concepts de base, aspects statistiques : 30'
- degré de frustration,
 - dégénérescence, entropie, ...
- (2) Glaces/liquides de spins (semi-)classiques : 30'
- corrélations, dynamique
 - **Ordre par le désordre** : l'exemple du réseau kagome
- (3) Liquides, glaces et cristaux quantiques : 30'
- lien de valence, Intrication
 - Corrélations, paramètres d'ordre, excitations élémentaires
- (4) sonder le magnétisme frustré (expérimentalement, numériquement, et théoriquement)

Aspects quantiques : le cas des spin 1/2

Liens de valence (VB) : coupler 2 spins 1/2

$$H = -J S_1 \cdot S_2$$

classique



quantique

$$\begin{aligned} |GS\rangle &= \begin{array}{c} \uparrow \\ \bullet \end{array} \text{---} \begin{array}{c} \downarrow \\ \bullet \end{array} + \begin{array}{c} \downarrow \\ \bullet \end{array} \text{---} \begin{array}{c} \uparrow \\ \bullet \end{array} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle) \equiv \text{---} \end{array}$$

Propriétés, intrication

Un état non magnétique (ne brise pas $SU(2)$)

$$\langle S_i \rangle = \langle GS | S_i | GS \rangle = 0$$

d'énergie

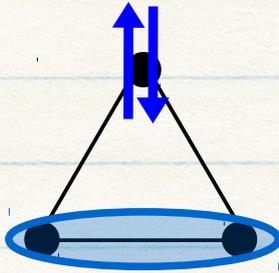
$$\langle GS | H | GS \rangle = \frac{3}{4} J$$

Intrication, pas d'équivalent classique

$$\cancel{|GS\rangle = |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle}$$

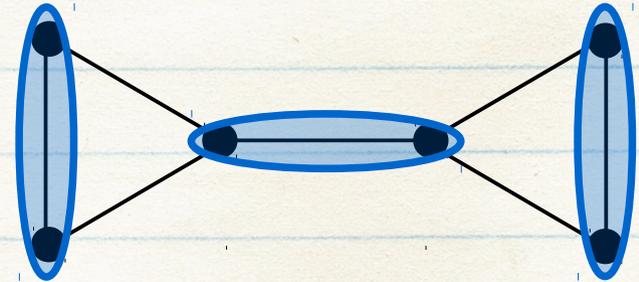
Dans quels cas peut-on s'attendre à ce type d'état?

Quelques exemples d'états fondamentaux des "clusters" simples

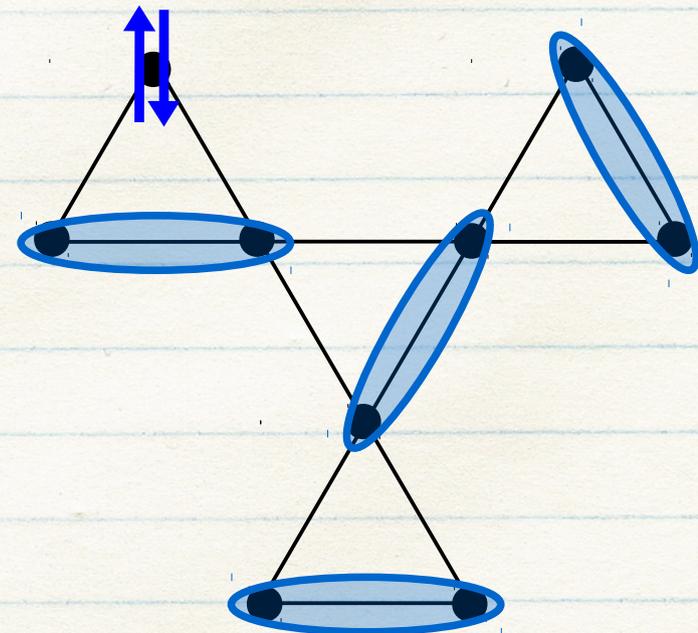


4 états fondamentaux

$$\begin{aligned} |\uparrow L\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}} (|\uparrow\uparrow\downarrow\rangle + \omega|\uparrow\downarrow\uparrow\rangle + \omega^{-1}|\downarrow\uparrow\uparrow\rangle) \\ |\downarrow L\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}} (|\downarrow\downarrow\uparrow\rangle + \omega|\downarrow\uparrow\downarrow\rangle + \omega^{-1}|\uparrow\downarrow\downarrow\rangle) \\ |\uparrow R\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}} (|\uparrow\uparrow\downarrow\rangle + \omega^{-1}|\uparrow\downarrow\uparrow\rangle + \omega|\downarrow\uparrow\uparrow\rangle) \\ |\downarrow R\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}} (|\downarrow\downarrow\uparrow\rangle + \omega^{-1}|\downarrow\uparrow\downarrow\rangle + \omega|\uparrow\downarrow\downarrow\rangle) \end{aligned}$$

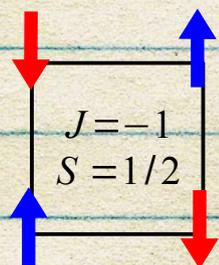


1 état fondamental unique

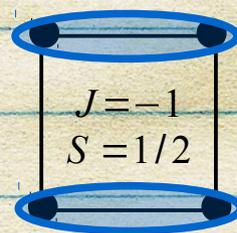


10 pavages états fondamentaux

Dans quels cas peut-on s'attendre à ce type d'état?

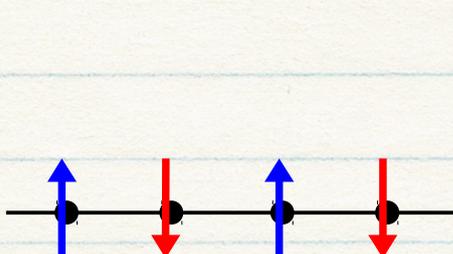


VS.

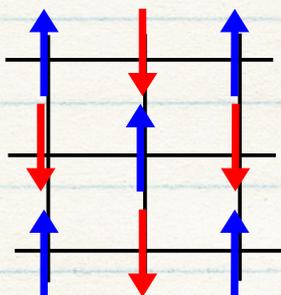


?

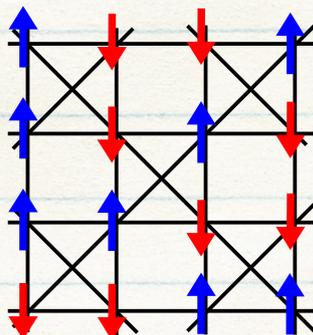
Comparaison grossière des énergies classique/quantique



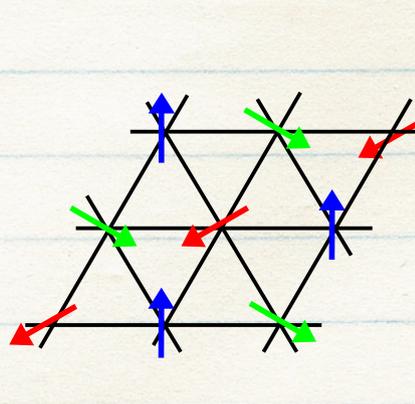
$$e_{cl} = -\frac{1}{4}$$



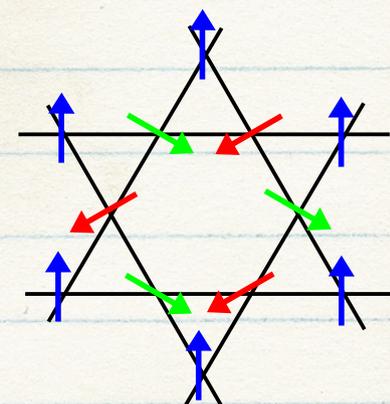
$$e_{cl} = -\frac{1}{2}$$



$$e_{cl} = -\frac{1}{4}$$

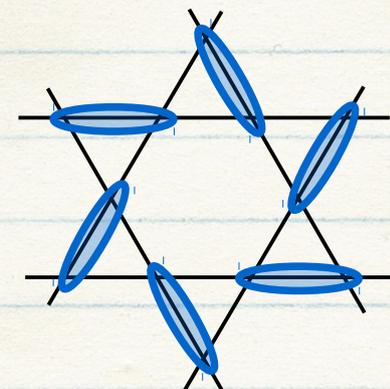
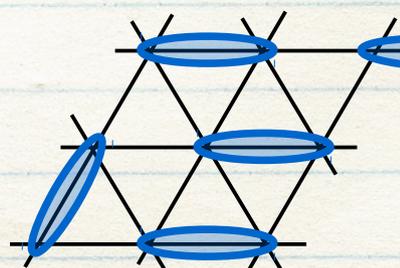
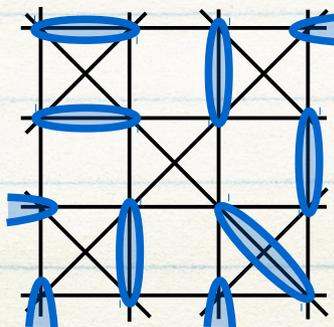
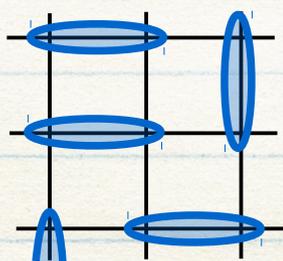
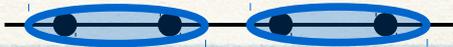


$$e_{cl} = -\frac{3}{8}$$

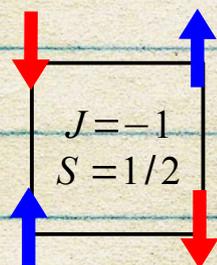


$$e_{cl} = -\frac{1}{4}$$

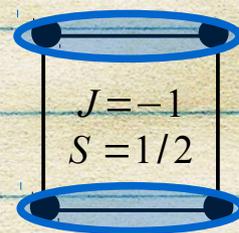
$$e_{vb} = -\frac{3}{8}$$



Dans quels cas peut-on s'attendre à ce type d'état?

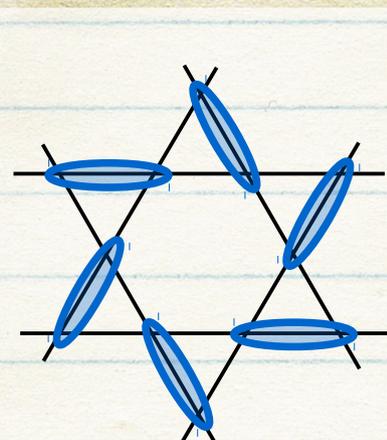
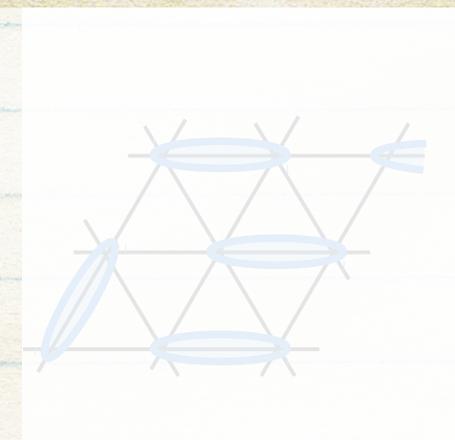
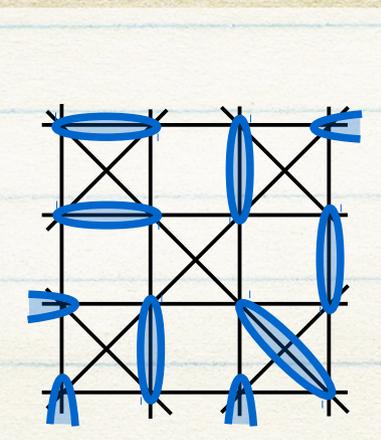
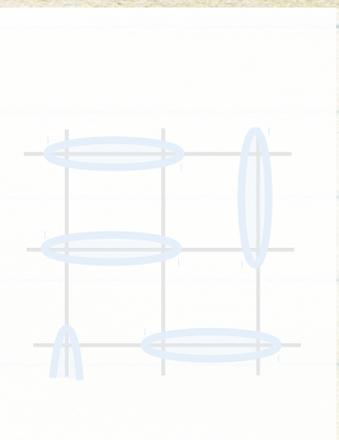
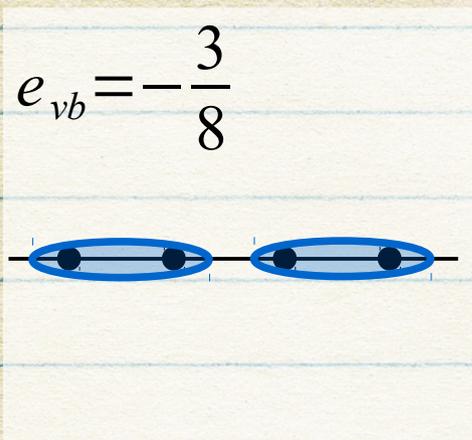
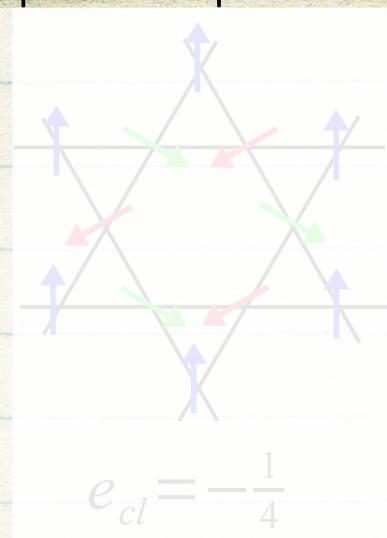
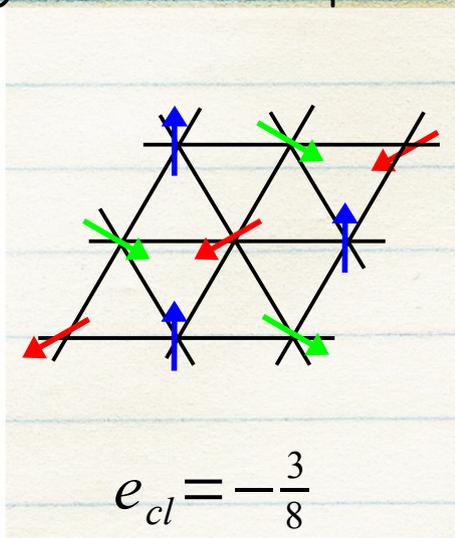
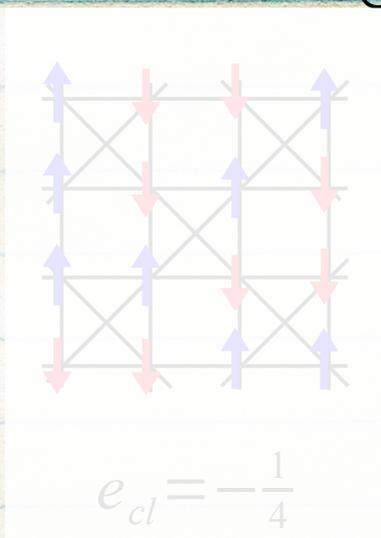
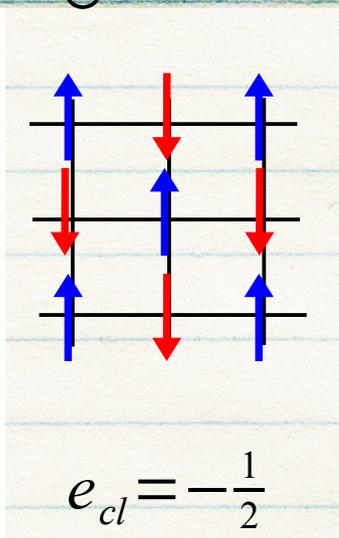
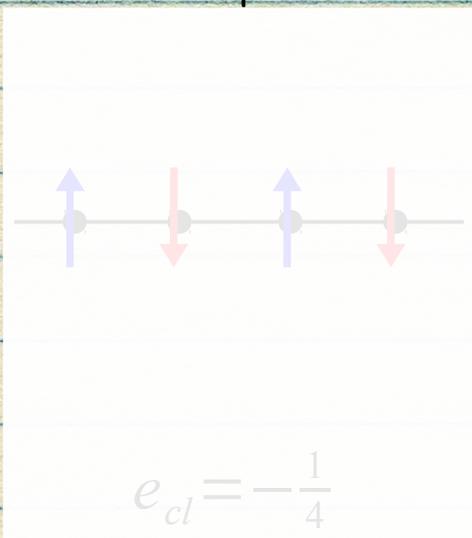


VS.



?

Comparaison grossière des énergies classique/quantique



Plusieurs pavages possibles : comment "choisir" ?

Cas envisageables

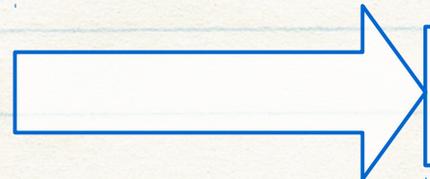
➤ un pavage est favorisé du fait :

- de la géométrie particulière du réseau (a)
- des fluctuations (ordre par le désordre) (b)



cristal quantique "VBC"

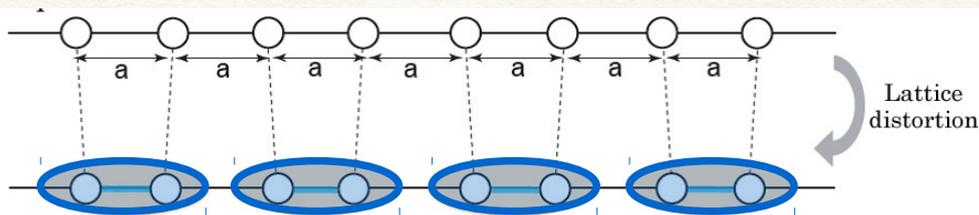
➤ on "résonne" entre les différents pavages (Anderson 1987)



liquide quantique "RVB"

(a) Géométrie particulière du réseau favorise un pavage

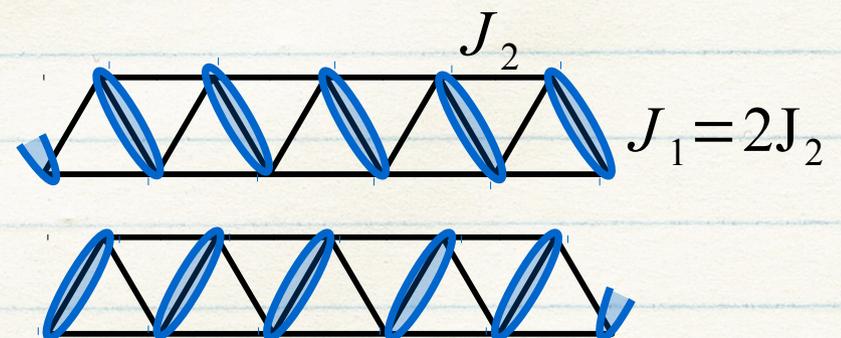
Distorsion structurale (eg. CuGeO3)



$$\langle S_i \cdot S_j \rangle \propto e^{-r/\xi}$$

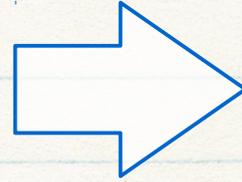
Param. d'ordre $\langle (S_1 \cdot S'_1) \cdot (S_2 \cdot S'_2) \rangle$

Majumdar-Ghosh model (1969)



(b) Ordre par le désordre : fluctuations quantiques favorisent une configuration

Pavage unique rarement état propre du système

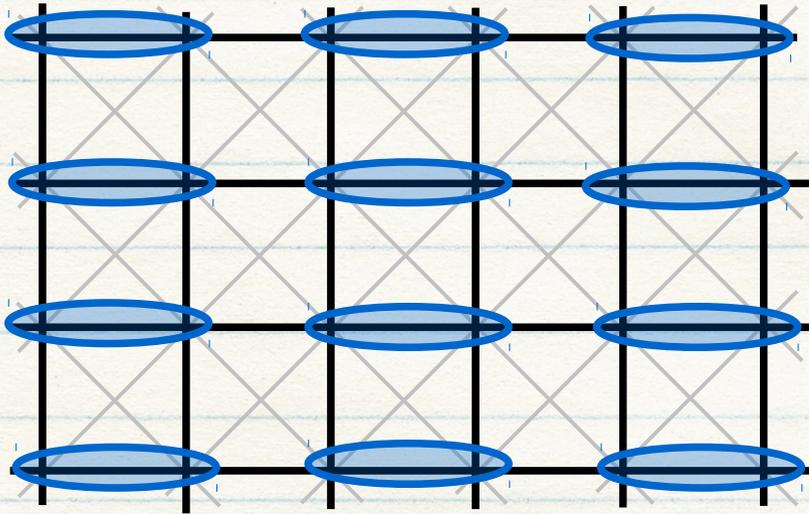


Etat fondamental "habillé" de fluctuations

Existe-t-il des fluctuations qui permettent de minimiser l'énergie et favoriser un pavage?

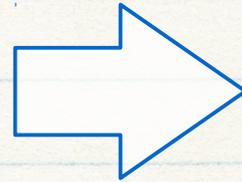
Effet des fluctuations

$$S_1 \cdot S_2 \equiv P_{12}$$



(b) Ordre par le désordre : fluctuations quantiques favorisent une configuration

Pavage unique rarement état propre du système

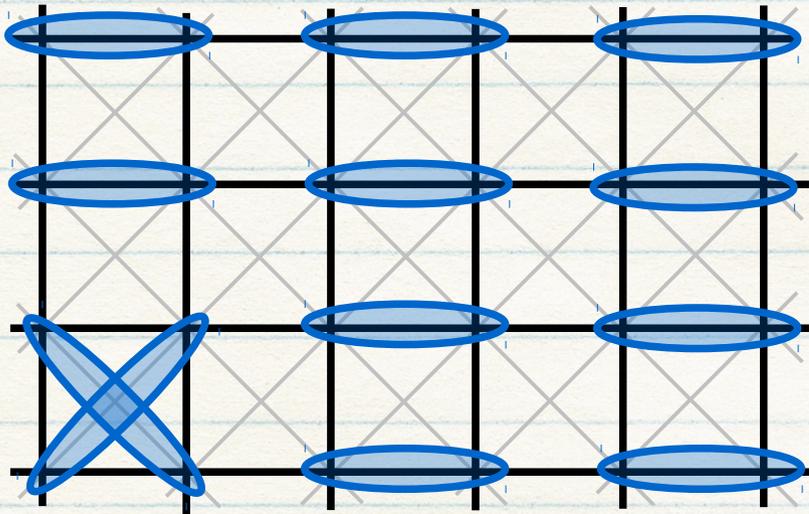


Etat fondamental "habillé" de fluctuations

Existe-t-il des fluctuations qui permettent de minimiser l'énergie et favoriser un pavage?

Effet des fluctuations

$$S_1 \cdot S_2 \equiv P_{12}$$



(b) Ordre par le désordre : fluctuations quantiques favorisent une configuration

Pavage unique rarement état propre du système

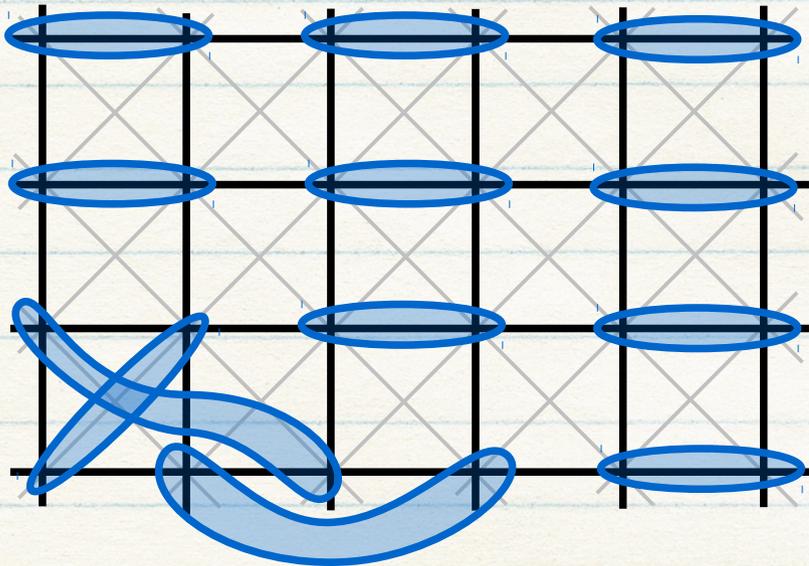


Etat fondamental "habillé" de fluctuations

Existe-t-il des fluctuations qui permettent de minimiser l'énergie et favoriser un pavage?

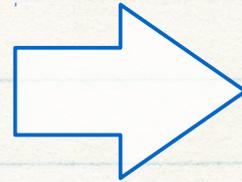
Effet des fluctuations

$$S_1 \cdot S_2 \equiv P_{12}$$



(b) Ordre par le désordre : fluctuations quantiques favorisent une configuration

Pavage unique rarement état propre du système

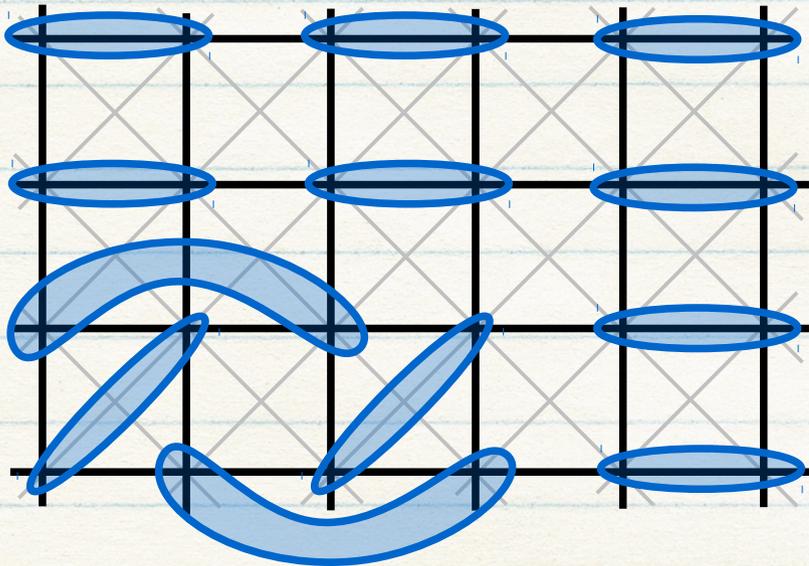


Etat fondamental "habillé" de fluctuations

Existe-t-il des fluctuations qui permettent de minimiser l'énergie et favoriser un pavage?

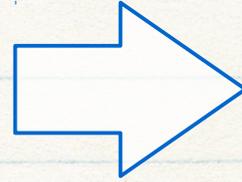
Effet des fluctuations

$$S_1 \cdot S_2 \equiv P_{12}$$



(b) Ordre par le désordre : fluctuations quantiques favorisent une configuration

Pavage unique rarement état propre du système

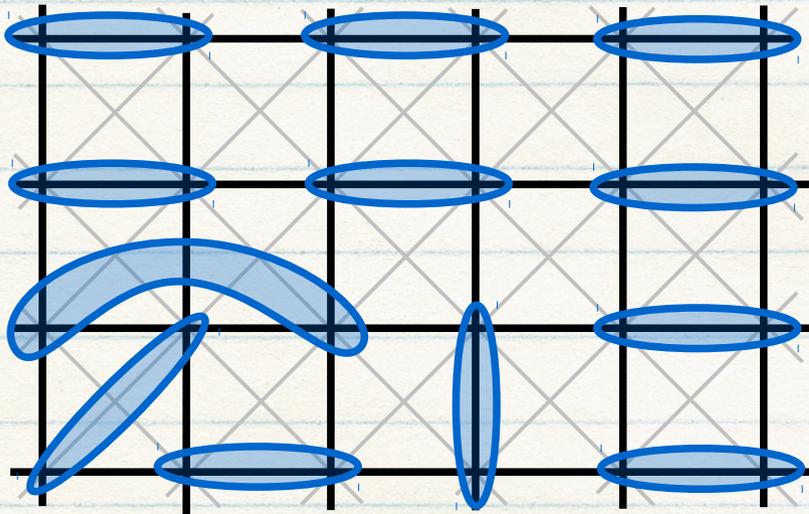


Etat fondamental "habillé" de fluctuations

Existe-t-il des fluctuations qui permettent de minimiser l'énergie et favoriser un pavage?

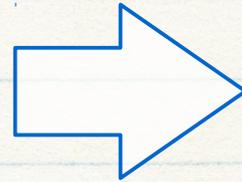
Effet des fluctuations

$$S_1 \cdot S_2 \equiv P_{12}$$



(b) Ordre par le désordre : fluctuations quantiques favorisent une configuration

Pavage unique rarement état propre du système

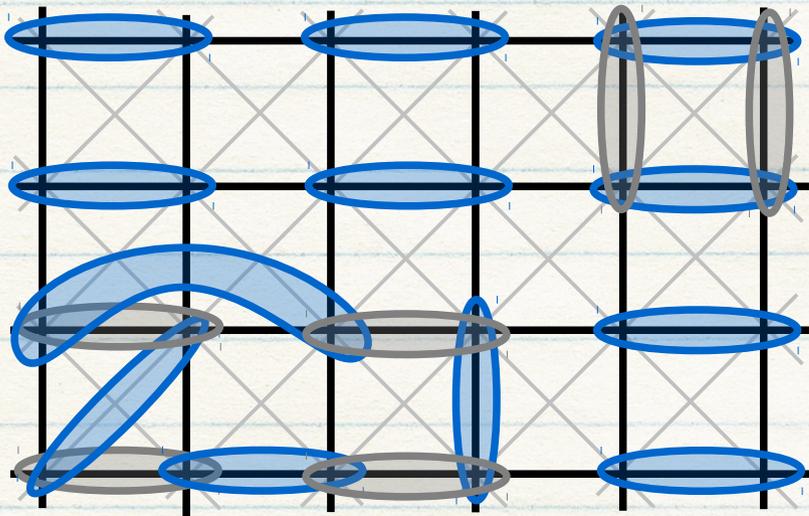


Etat fondamental "habillé" de fluctuations

Existe-t-il des fluctuations qui permettent de minimiser l'énergie et favoriser un pavage?

Effet des fluctuations

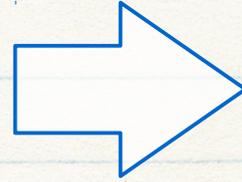
$$S_1 \cdot S_2 \equiv P_{12}$$



Système fluctue grâce aux boucles

(b) Ordre par le désordre : fluctuations quantiques favorisent une configuration

Pavage unique rarement état propre du système

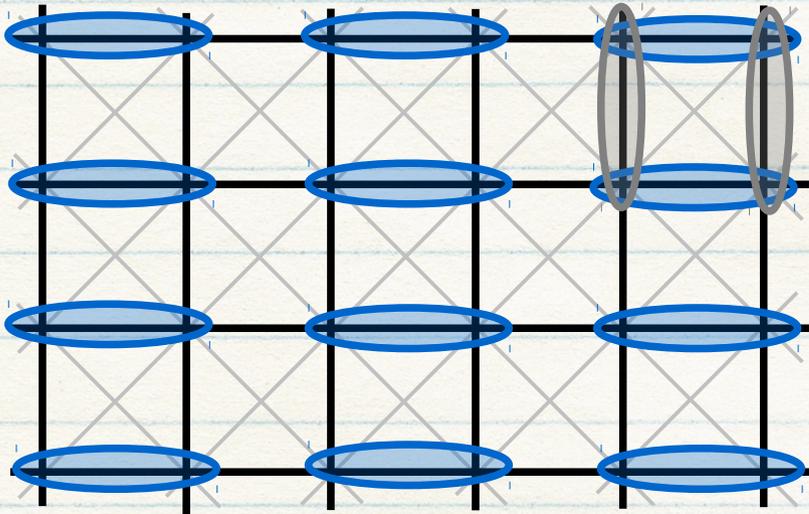


Etat fondamental "habillé" de fluctuations

Existe-t-il des fluctuations qui permettent de minimiser l'énergie et favoriser un pavage?

Effet des fluctuations

$$S_1 \cdot S_2 \equiv P_{12}$$



VBC sélectionné par les fluctuations!

(b) Ordre par le désordre : fluctuations quantiques favorisent une configuration

Pavage unique rarement état propre du système

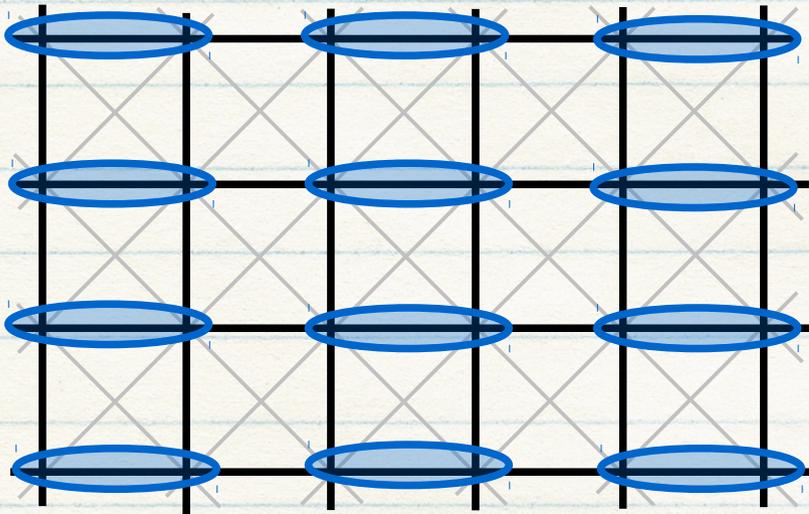


Etat fondamental "habillé" de fluctuations

Existe-t-il des fluctuations qui permettent de minimiser l'énergie et favoriser un pavage?

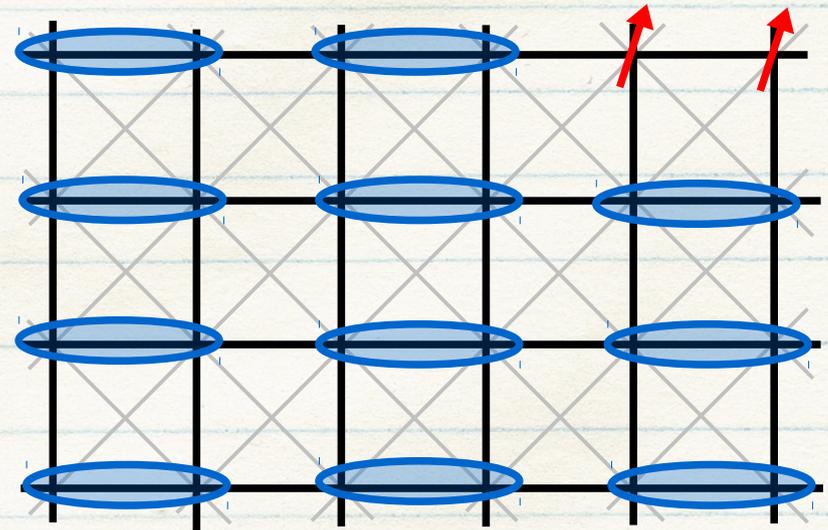
Effet des fluctuations

$$S_1 \cdot S_2 \equiv P_{12}$$



VBC sélectionné par les fluctuations!

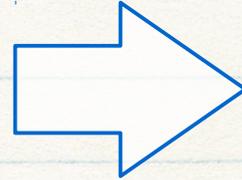
Quelles excitations?



Les spinons restent confinés

(b) Ordre par le désordre : fluctuations quantiques favorisent une configuration

Pavage unique rarement état propre du système

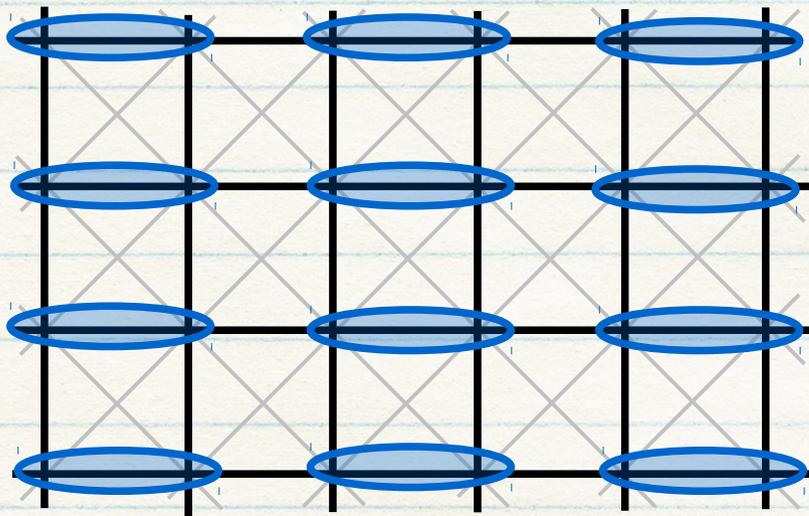


Etat fondamental "habillé" de fluctuations

Existe-t-il des fluctuations qui permettent de minimiser l'énergie et favoriser un pavage?

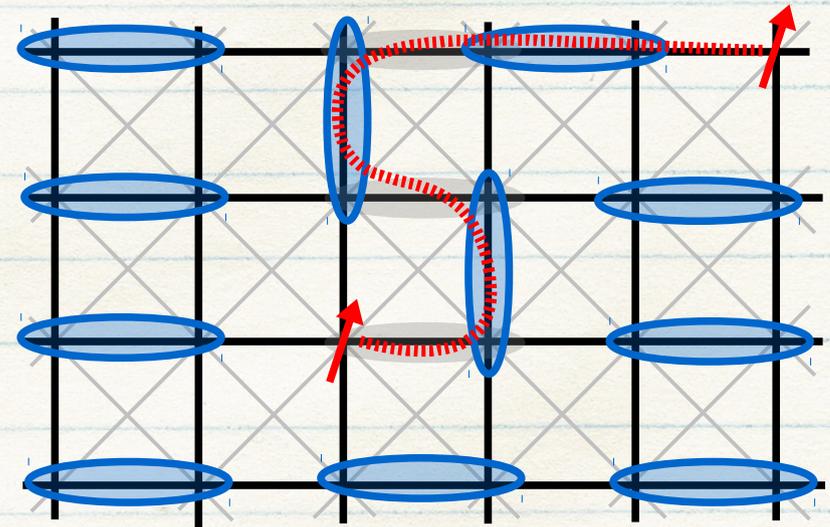
Effet des fluctuations

$$S_1 \cdot S_2 \equiv P_{12}$$



VBC sélectionné par les fluctuations!

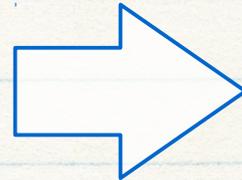
Quelles excitations?



Les spinons restent confinés

(b) Ordre par le désordre : fluctuations quantiques favorisent une configuration

Pavage unique rarement état propre du système

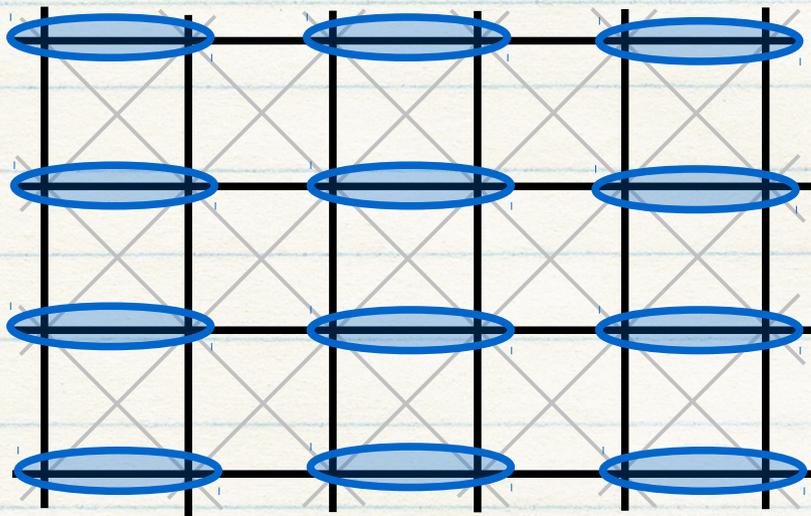


Etat fondamental "habillé" de fluctuations

Existe-t-il des fluctuations qui permettent de minimiser l'énergie et favoriser un pavage?

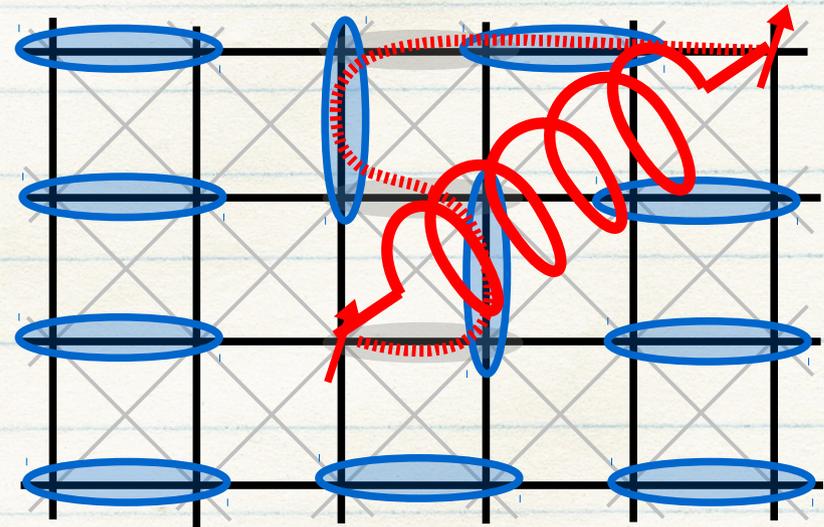
Effet des fluctuations

$$S_1 \cdot S_2 \equiv P_{12}$$



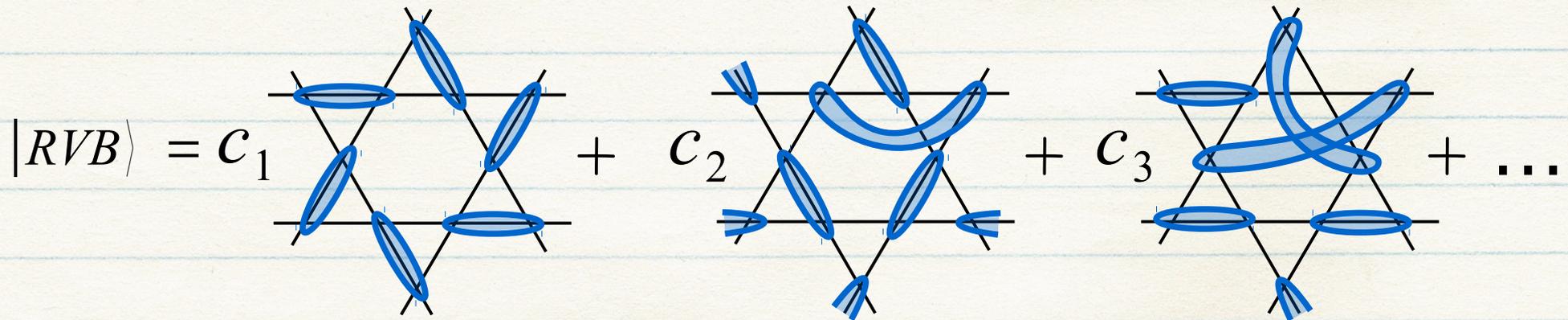
VBC sélectionné par les fluctuations!

Quelles excitations?



Les spinons restent confinés

(c) le système préfère continuer à "résonner" entre un nombre macroscopique de pavages

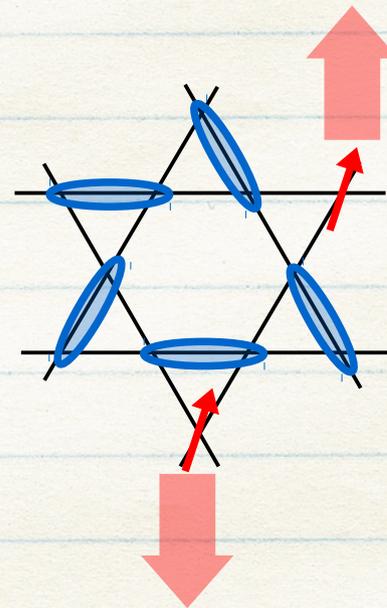


Liquide de spin, par définition (s) ...

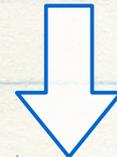
Pas de brisure spontanée de symétrie

- $\langle S_i \rangle = 0$
- translation conservée
- $t \rightarrow -t$

$$c_1, c_2, c_3, \dots, c_\infty?$$



pas de pavage
VB "parent"



Spinons déconfinés
(fractionnalisation)

(c) le système préfère continuer à "résonner" entre un nombre macroscopique de pavages

$$|RVB\rangle = c_1 \text{ (diagram 1) } + c_2 \text{ (diagram 2) } + c_3 \text{ (diagram 3) } + \dots$$

Exemple 1 : short range - RVB

- $\langle S_i \cdot S_j \rangle \propto e^{-r_{ij}/\xi}$

- excitations gappées :
 spinons $s=1/2$
 v-isons $s=0$ (\sim vortex)

Exemple 2 : long range - RVB

- $\langle S_i \cdot S_j \rangle \propto 1/r_{ij}^\alpha$

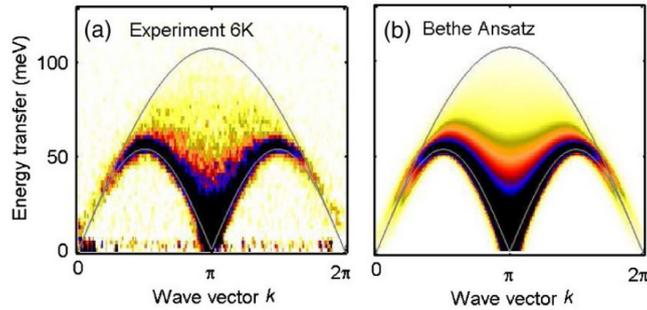
- excitations non gappées
 (spinons et excitations singulets
 ne sont plus des QP "libres")

Exemples/candidats de QSL

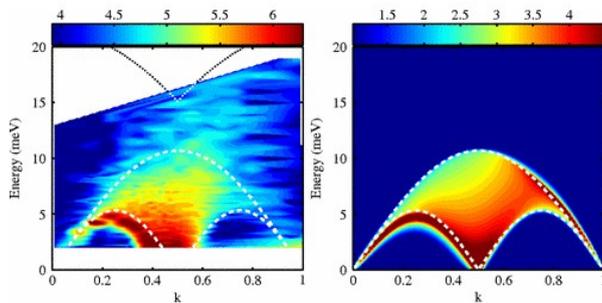
Le cas "d'école" : chaînes 1D

Exemple 2D : le réseau kagomé

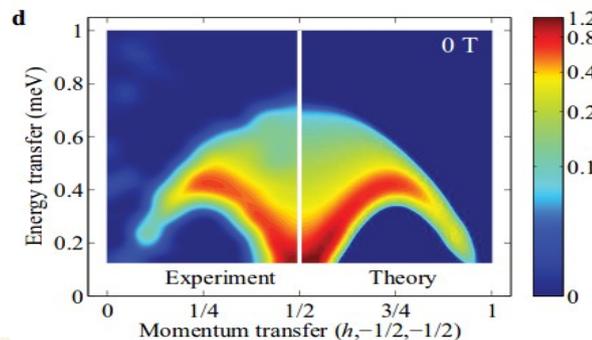
KCuF3 (Lake PRL2013)



LiCuVO4 (Enderle PRL2010)

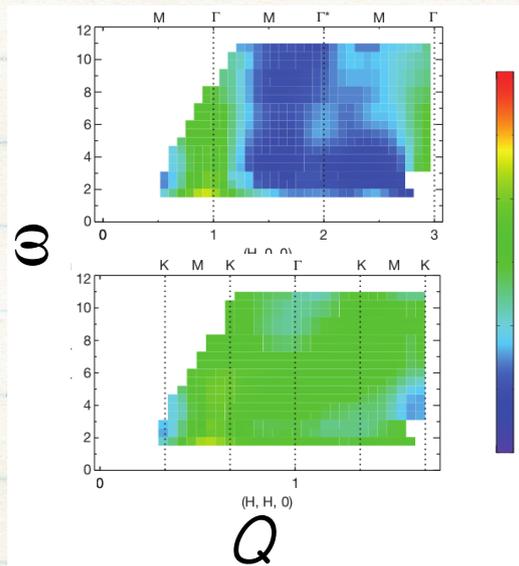


CuSO4-5D2O (Mourigal Nature2013)

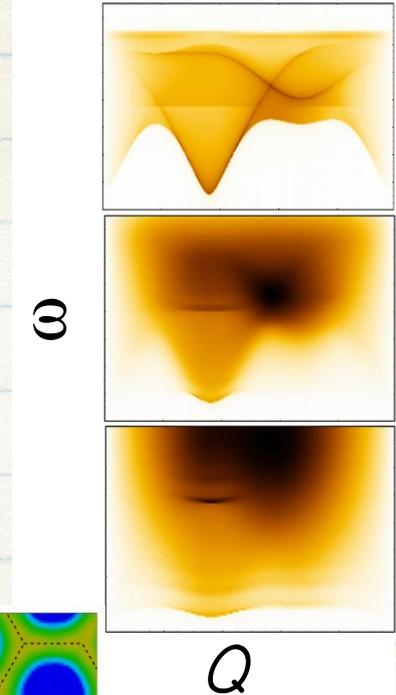


En théorie : sr-RVB (gap des excitations) ?

Herbertsmithite
(Han Nature2012)



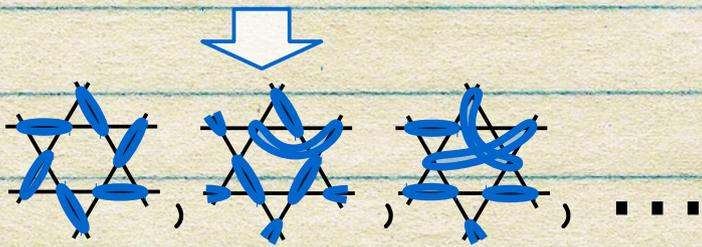
Schwinger Boson
(Punk Nature2014)



Fractionnalisation
mais pas de gap?

Rôle de l'interaction
Spinons-visons ?

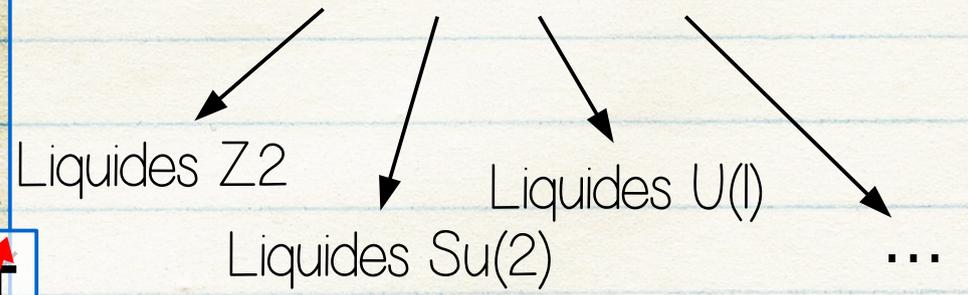
En résumé ...



Liquide de spin quantique (RVB) :

$$|RVB\rangle = c_1 \text{ (diagram 1) } + c_2 \text{ (diagram 2) } + c_3 \text{ (diagram 3) } + \dots$$

- fractionnalisation : spinons déconfinés
- "ordre topologique" (théorème LSMH) ?



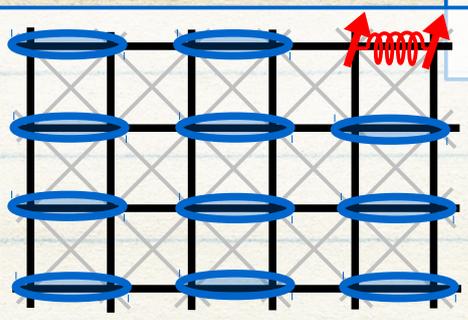
Géométrie "particulière" **ou** ordered state

non

oui

Cristal quantique (VBC)

- $\langle S_i \cdot S_j \rangle \propto e^{-r/\xi}$
- spinons confinés (excitations gappées)



Merci pour votre attention ... Questions?

WHAT YOU BROUGHT TO SEMINAR AND WHAT IT SAYS ABOUT YOU:

Stuff to take notes:
First year. Foolishly
thinks he'll ever
need notes again.



Reading
material: Third
year. Just
here for show.



Didn't bring
anything:
ABD/Postdoc.
Has nothing
better to do.



Laptop: Young
Assistant Professor.
Working on three
proposals at the
same time.



Playing with latest
Gadget/Gizmo:
Full Professor.
Loooves new toys.

