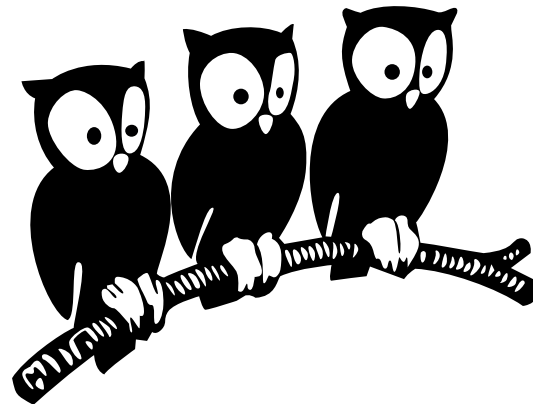


Laboratoire Kastler Brossel



**Atomes fermioniques de
Lithium-6 ultra-froids dans la
transition BEC-BCS :
expériences et construction
d'un montage expérimental**



Soutenance de thèse

Martin Teichmann

Paris, 27 Septembre 2007



superfluidité et supraconductivité

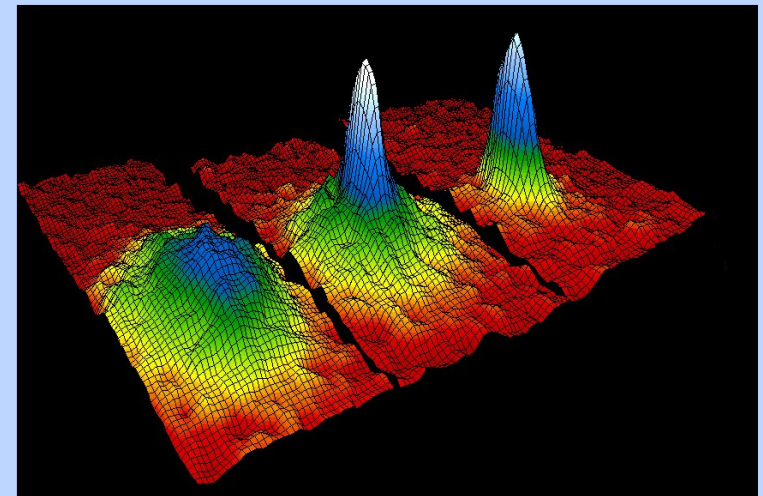
supraconductivité



superfluidité



Y a-t-il une connexion entre ces deux effets ?

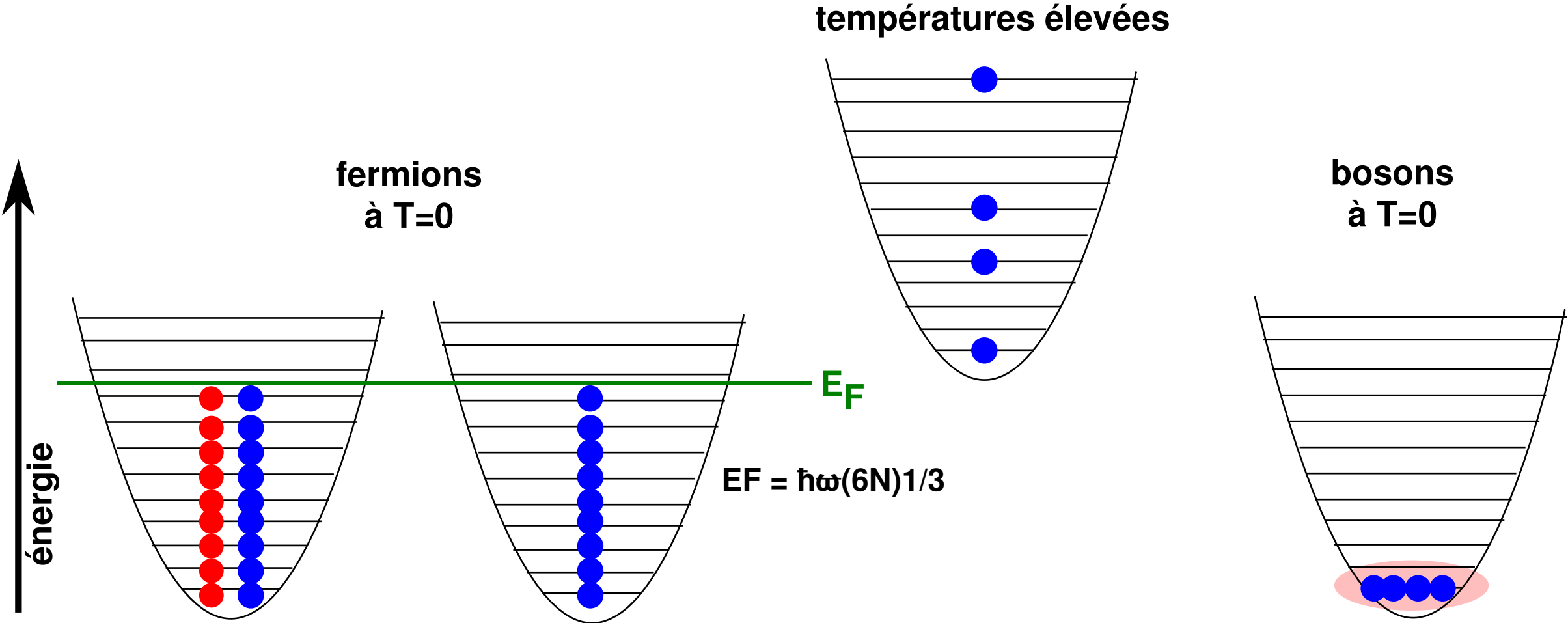


plan de la présentation

- **Introduction**
- **Le dispositif expérimental et les modifications effectuées**
- **Résultats**
- **Résumé**

fermions et bosons

gaz dans un piège harmonique :



E_F
 $E_F = \hbar\omega(6N)^{1/3}$

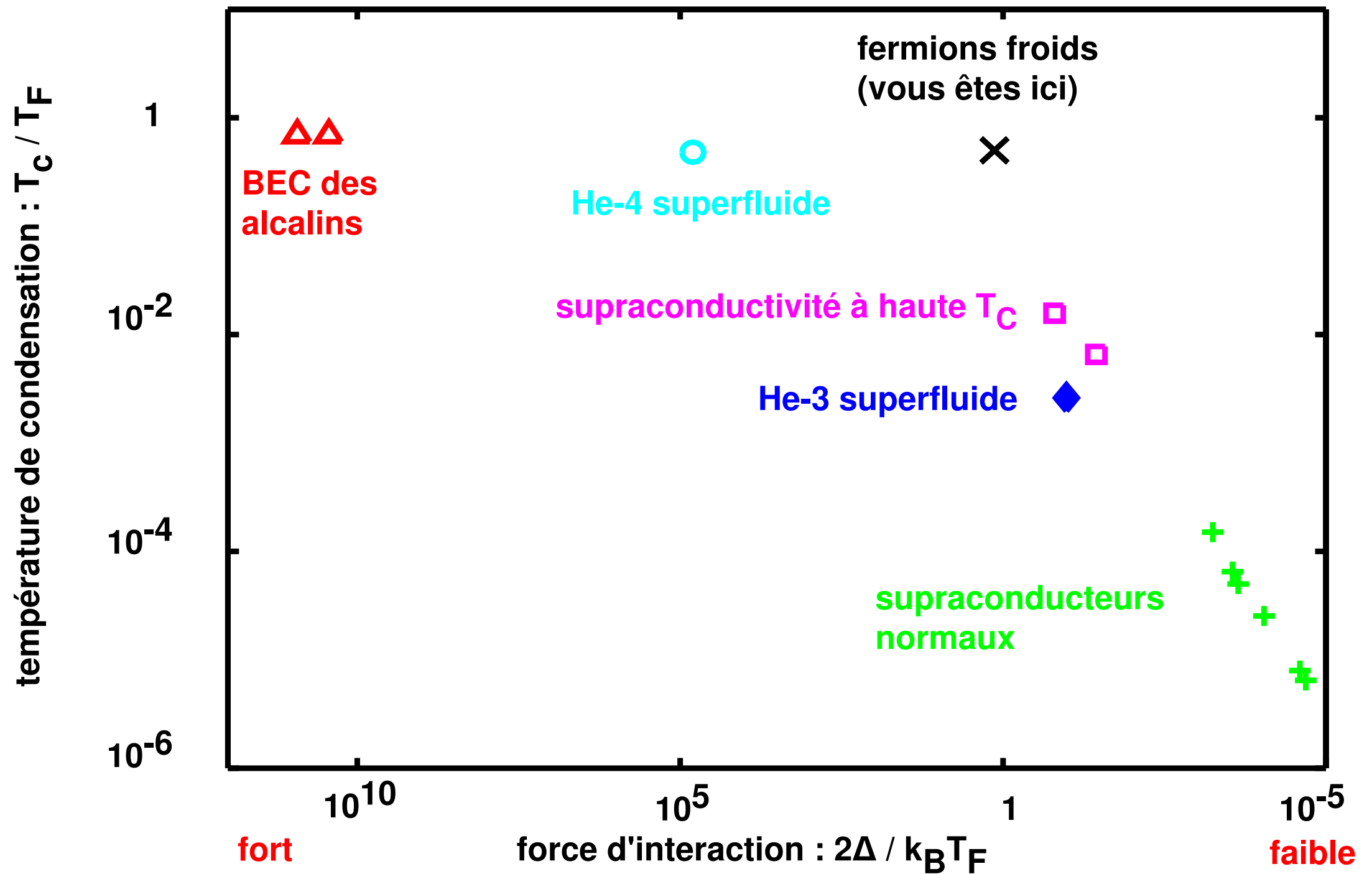
principe d'exclusion de Pauli

exemples :
électron, neutron, proton, **Li-6**

exemples :
photon, la majorité des isotopes stables, **Li-7**, molécules

fermions en interaction : la superfluidité

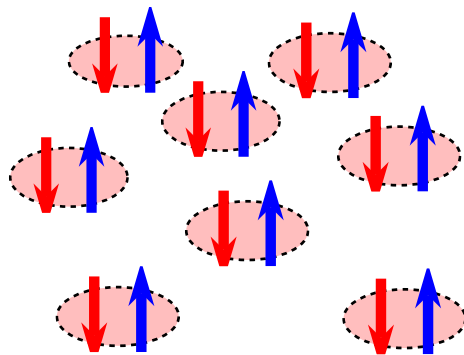
condensation dans un état superfluide en dessous de T_C



fermions en interaction : la transition BEC-BCS

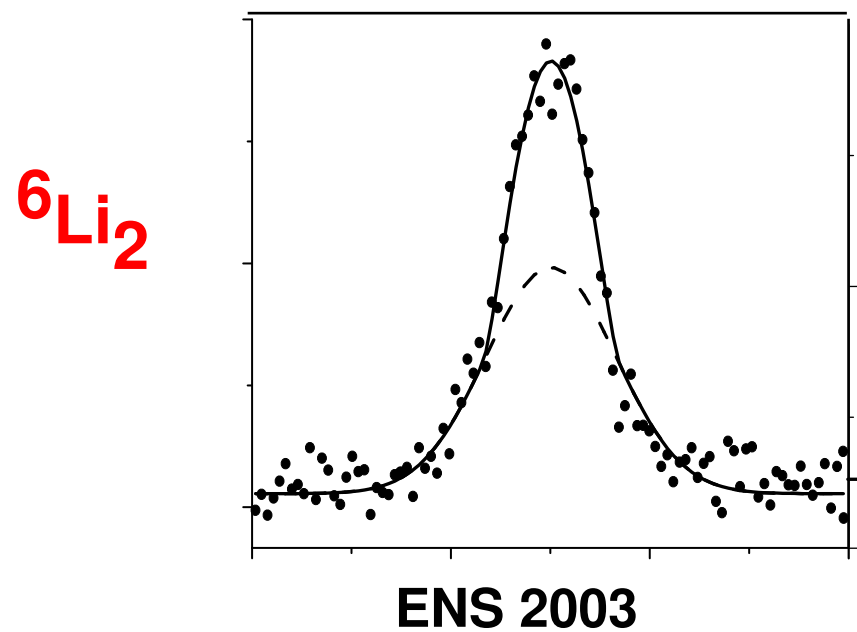
interactions fortes :

état moléculaire, effet à 2 corps



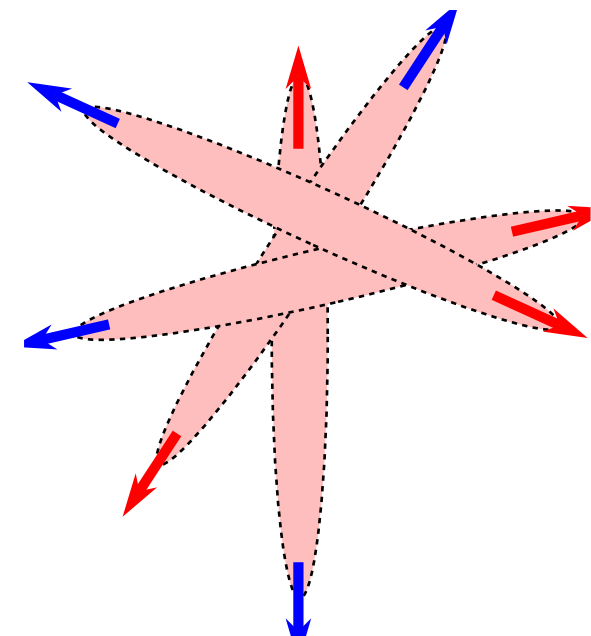
interactions effectives répulsives :

condensat de Bose-Einstein
des molécules



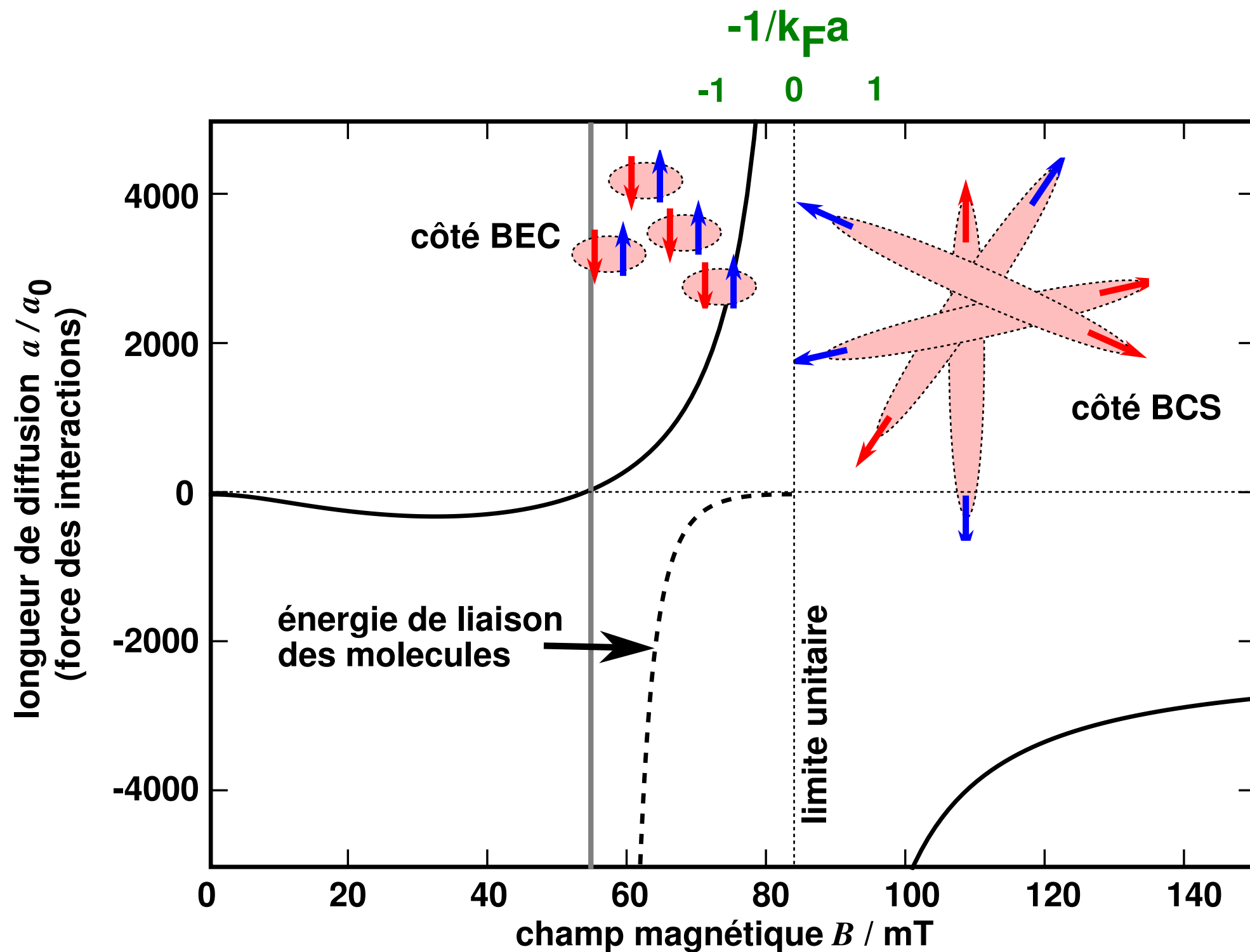
interactions faibles attractives:

état BCS, effet à N corps

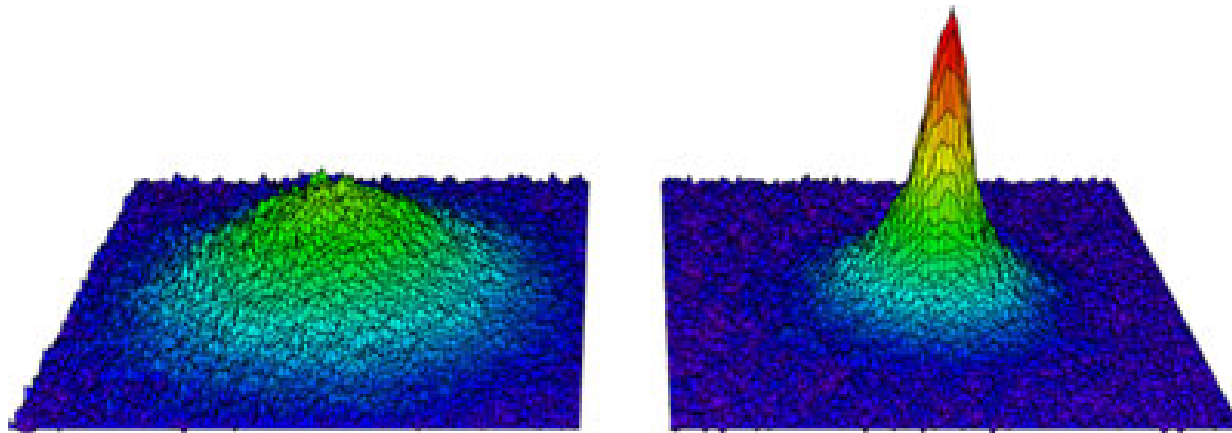


← transition BEC-BCS →

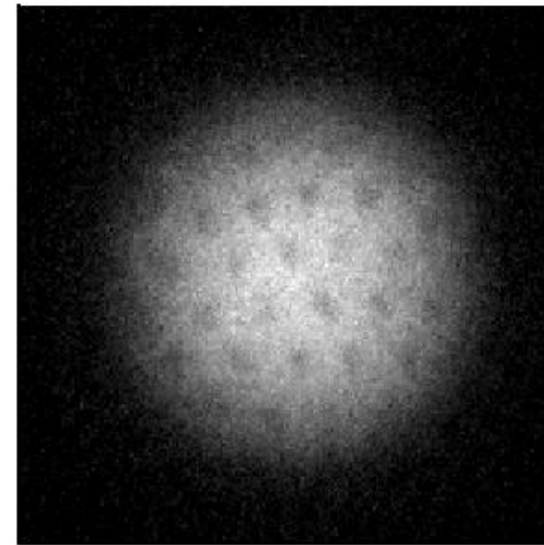
transition BEC - BCS dans le lithium-6 : résonance de Feshbach



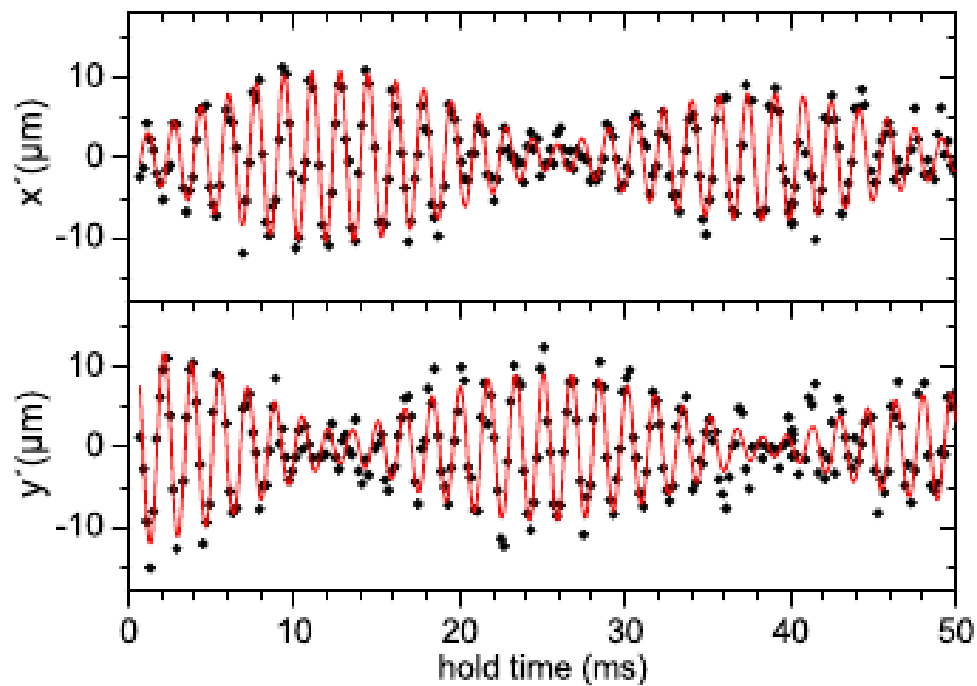
autres expériences dans la transition BEC-BCS



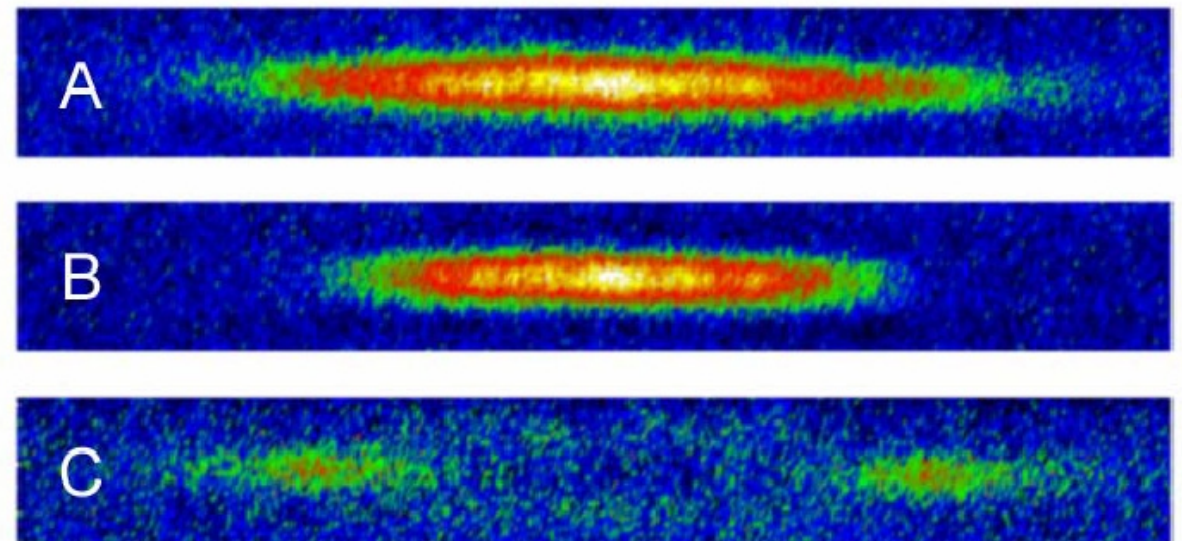
JILA, 2003



MIT, 2005



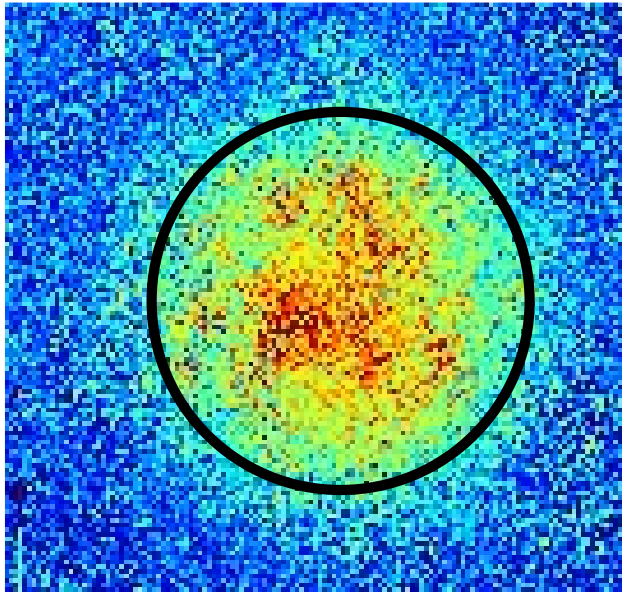
Innsbruck, 2006



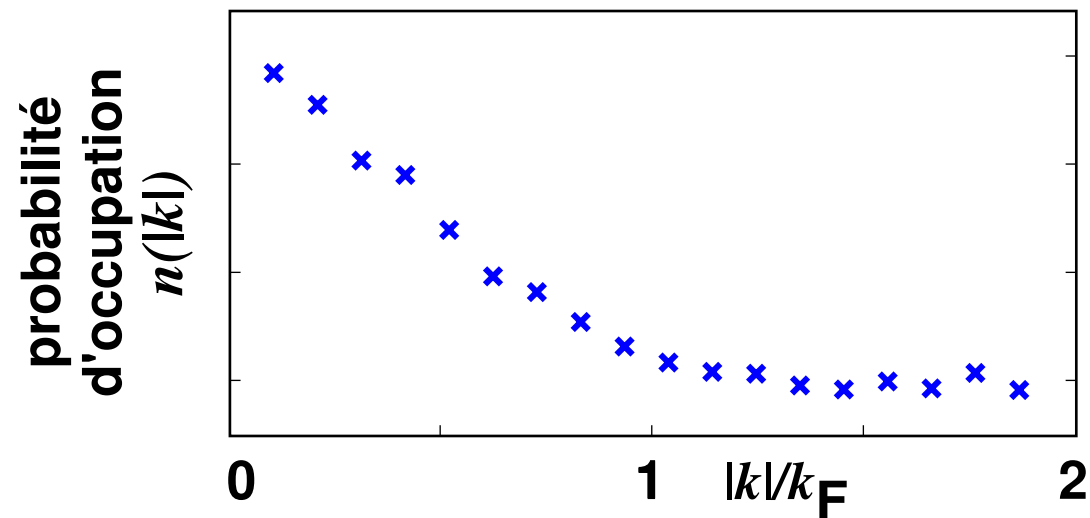
Rice, 2005

deux types d'expérience

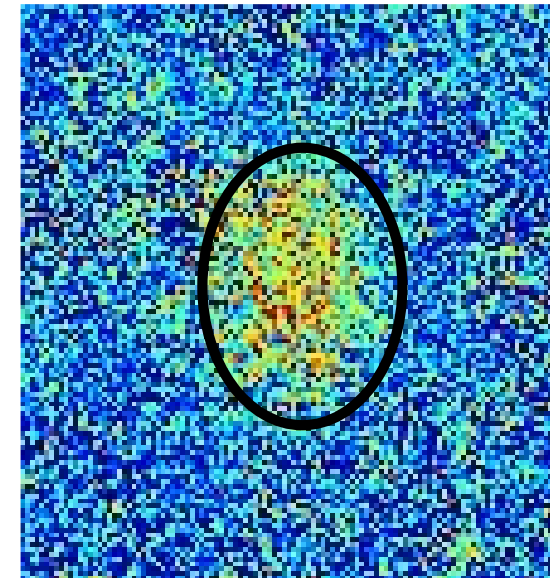
expansion sans interaction :
accès à la distribution
d'impulsions



nuage toujours rond
transformation d'Abel inverse donne :



expansion avec interactions :
dynamique d'un gaz en
expansion



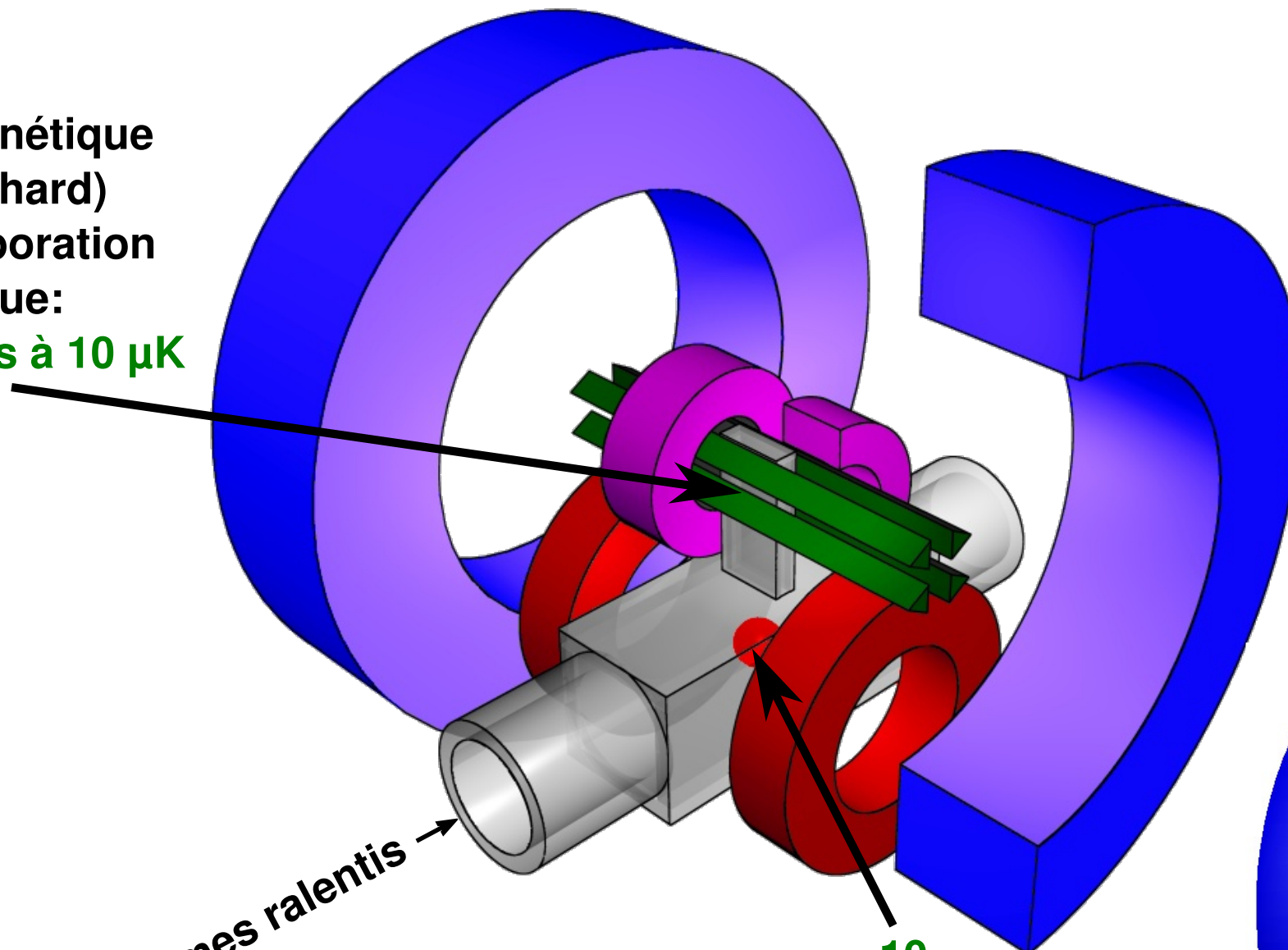
expansion d'un gaz normal toujours isotrope
ellipticité conséquence de la superfluidité

plan général de l'expérience

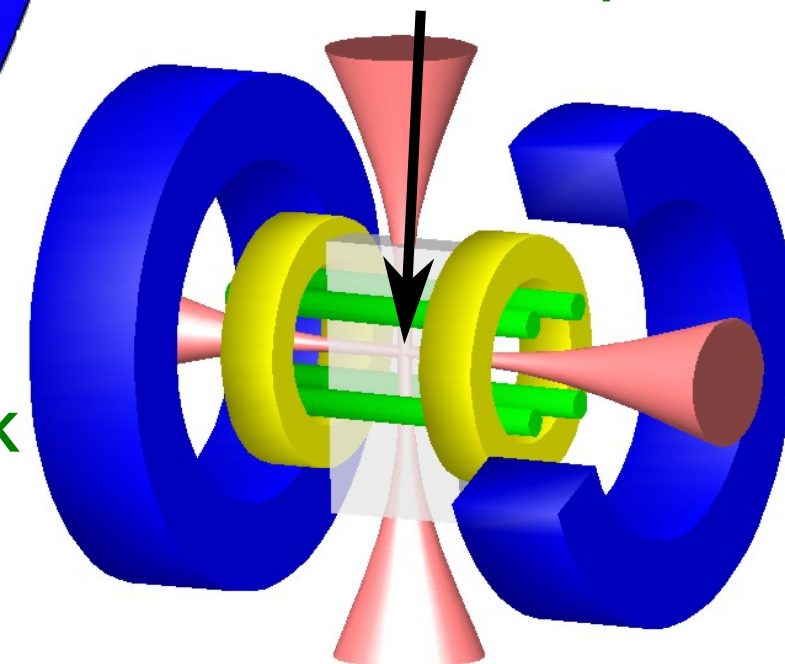
imagerie par absorption



Piège magnétique
(Ioffe-Pritchard)
après évaporation
sympathique:
 10^6 atomes à $10 \mu\text{K}$



évaporation finale
dans piège optique :
 10^5 atomes à $1 \mu\text{K}$



four : 850 K

jet d'atomes ralentis →

MOT : 10^{10} atomes à 1 mK
deux isotopes :
Li-6 fermion
Li-7 boson

plan général de l'expérience

imagerie par absorption



Piège magnétique (Ioffe-Pritchard) après évaporation sympathétique: $10 \mu\text{K}$

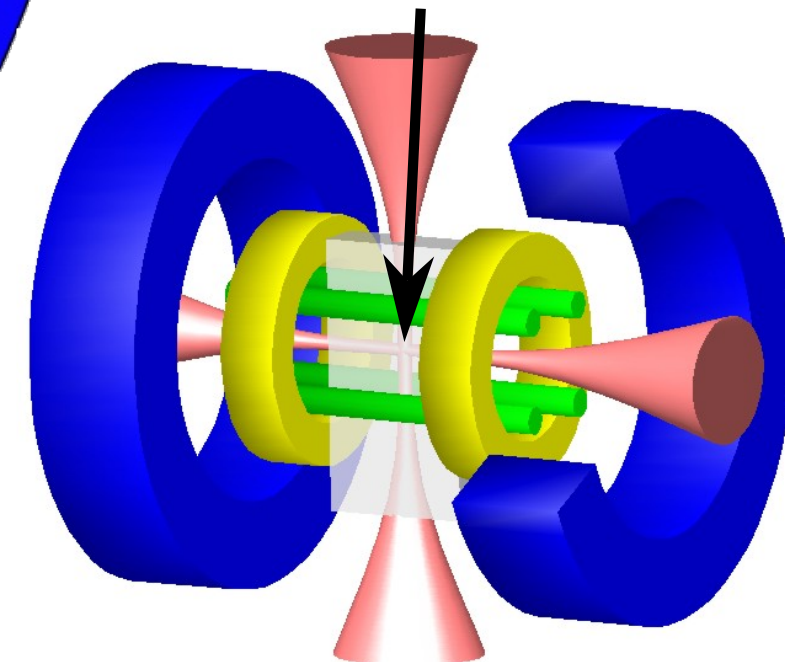
chargement du MOT réduit à 10 s (avant : $> 2 \text{ min}$)

nouveau four : augmentation du flux

nouveau ralentisseur Zeeman

MOT : 1 mK

évaporation finale dans piège optique : $\sim 1 \mu\text{K}$

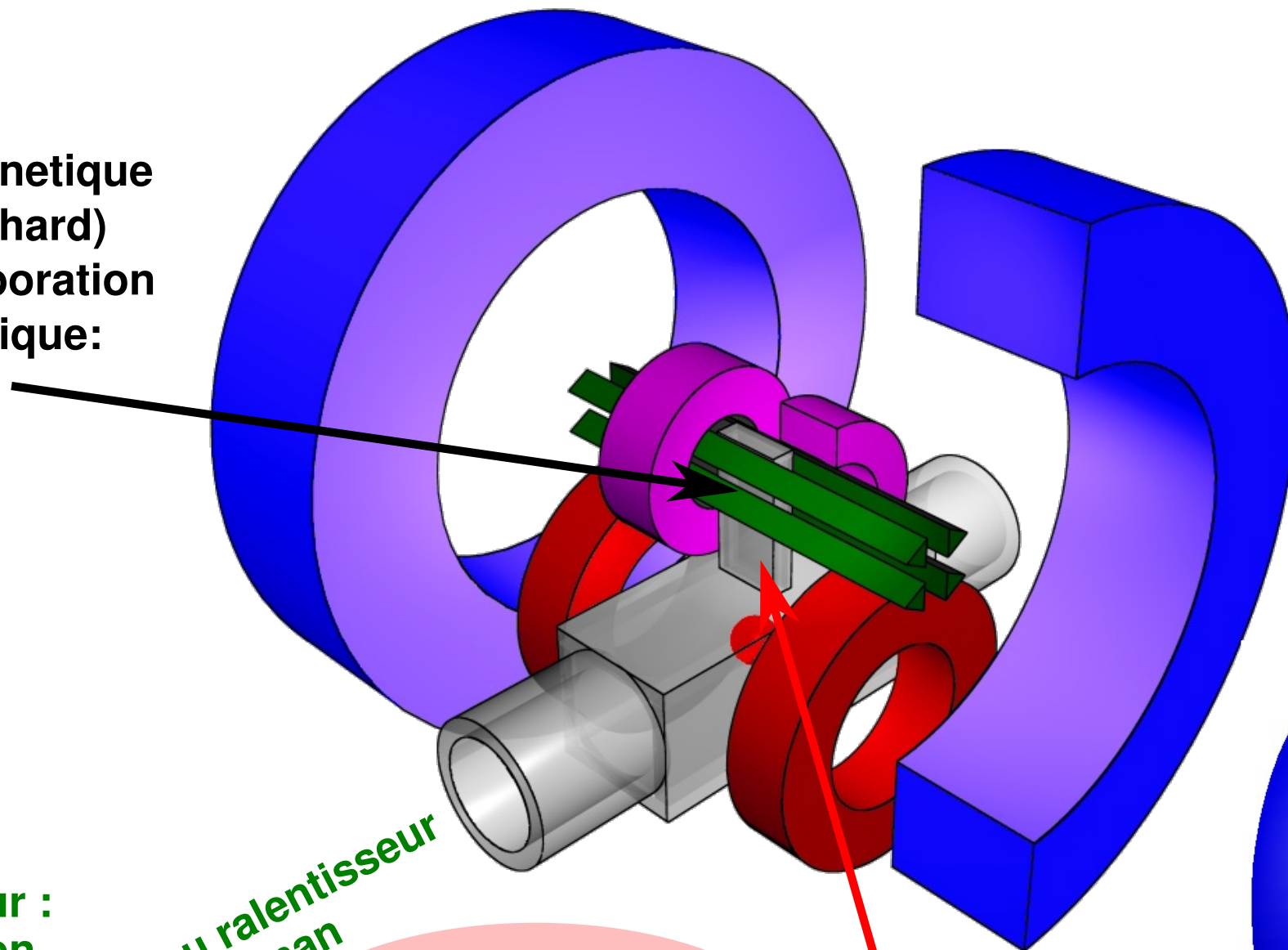


plan général de l'expérience

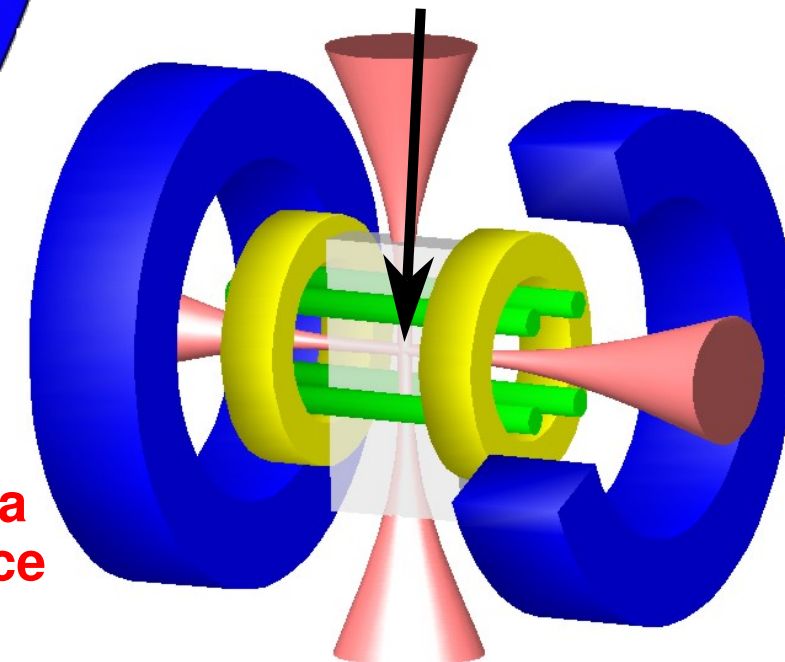
imagerie par absorption



Piège magnétique (Ioffe-Pritchard) après évaporation sympathétique: $10 \mu\text{K}$



évaporation finale dans piège optique : $\sim 1 \mu\text{K}$



nouveau four : augmentation du flux

nouveau ralentisseur Zeeman

5 fois plus d'atomes dans le piège magnétique

augmentation de la taille de l'appendice

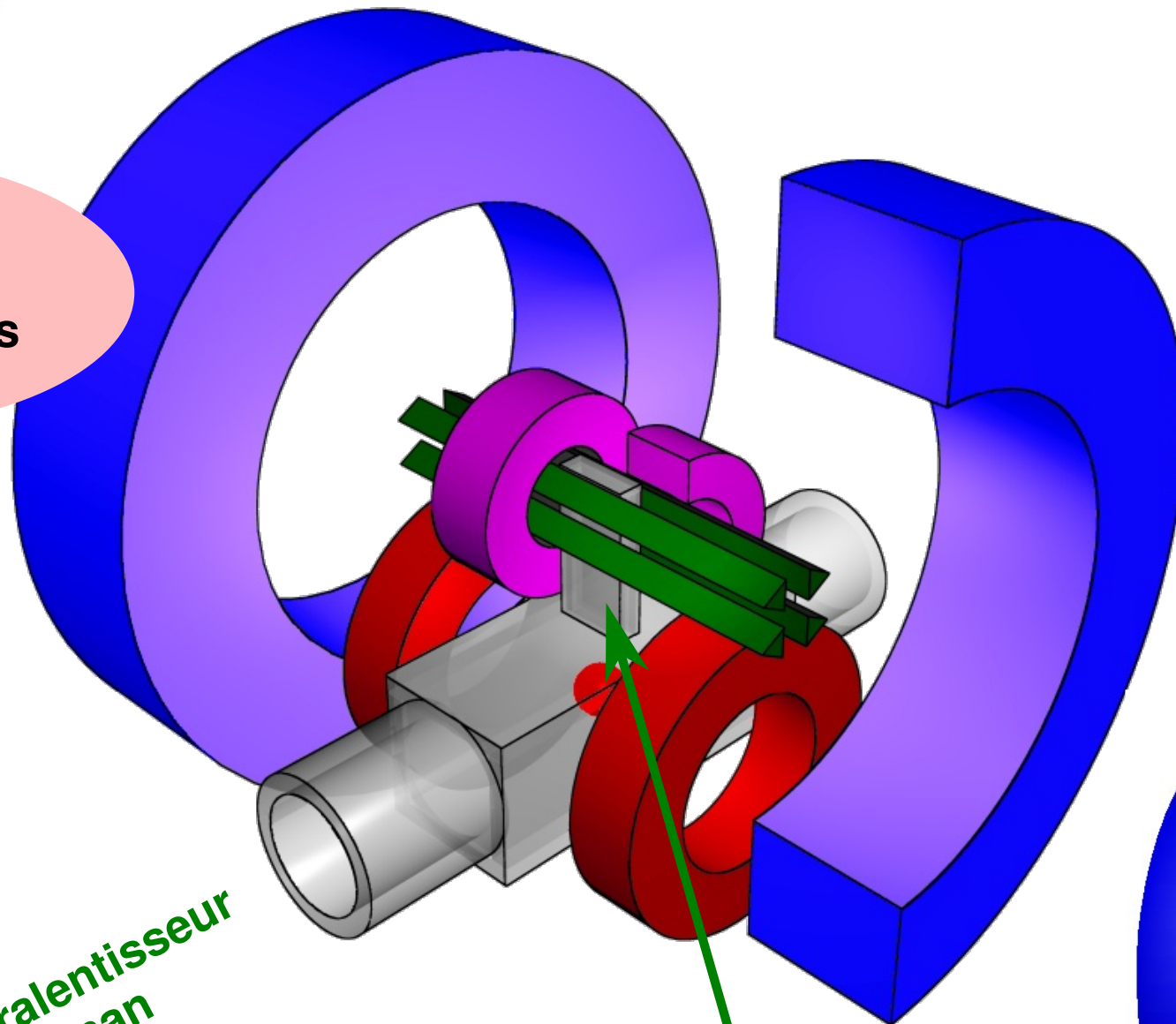
plan général de l'expérience

nouvelles diodes laser : 120 mW

imagerie par absorption



Ampli «MOPA»
remplacé
par système plus
flexible

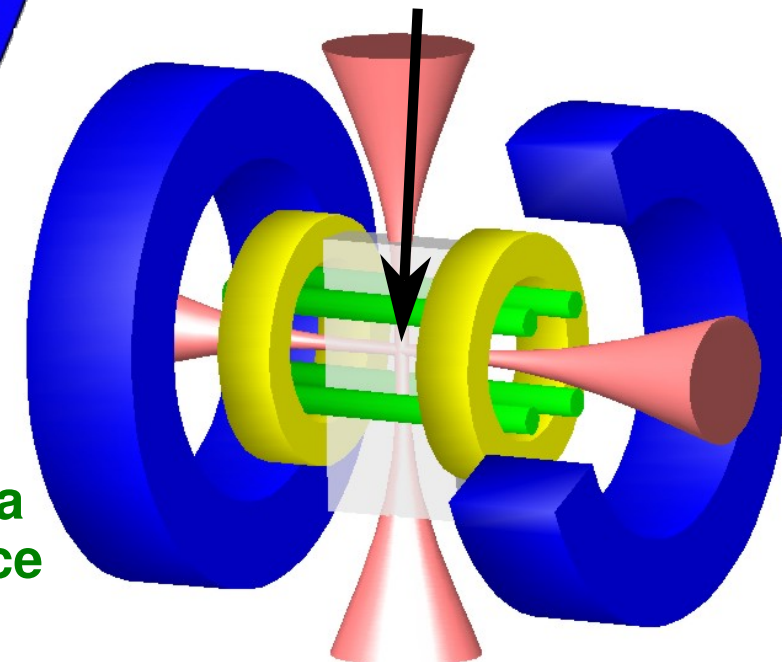


nouveau four :
augmentation
du flux

nouveau ralentisseur
Zeeman

augmentation de la
taille de l'appendice

évaporation finale
dans piège optique :
 $\sim 1 \mu\text{K}$



plan général de l'expérience

nouvelles diodes laser : 120 mW



imagerie par absorption



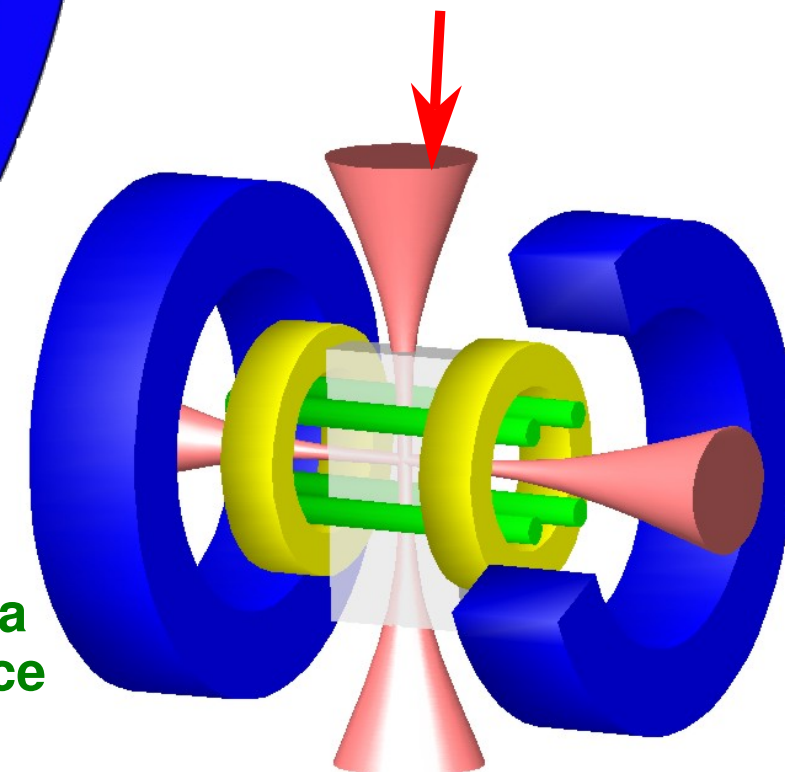
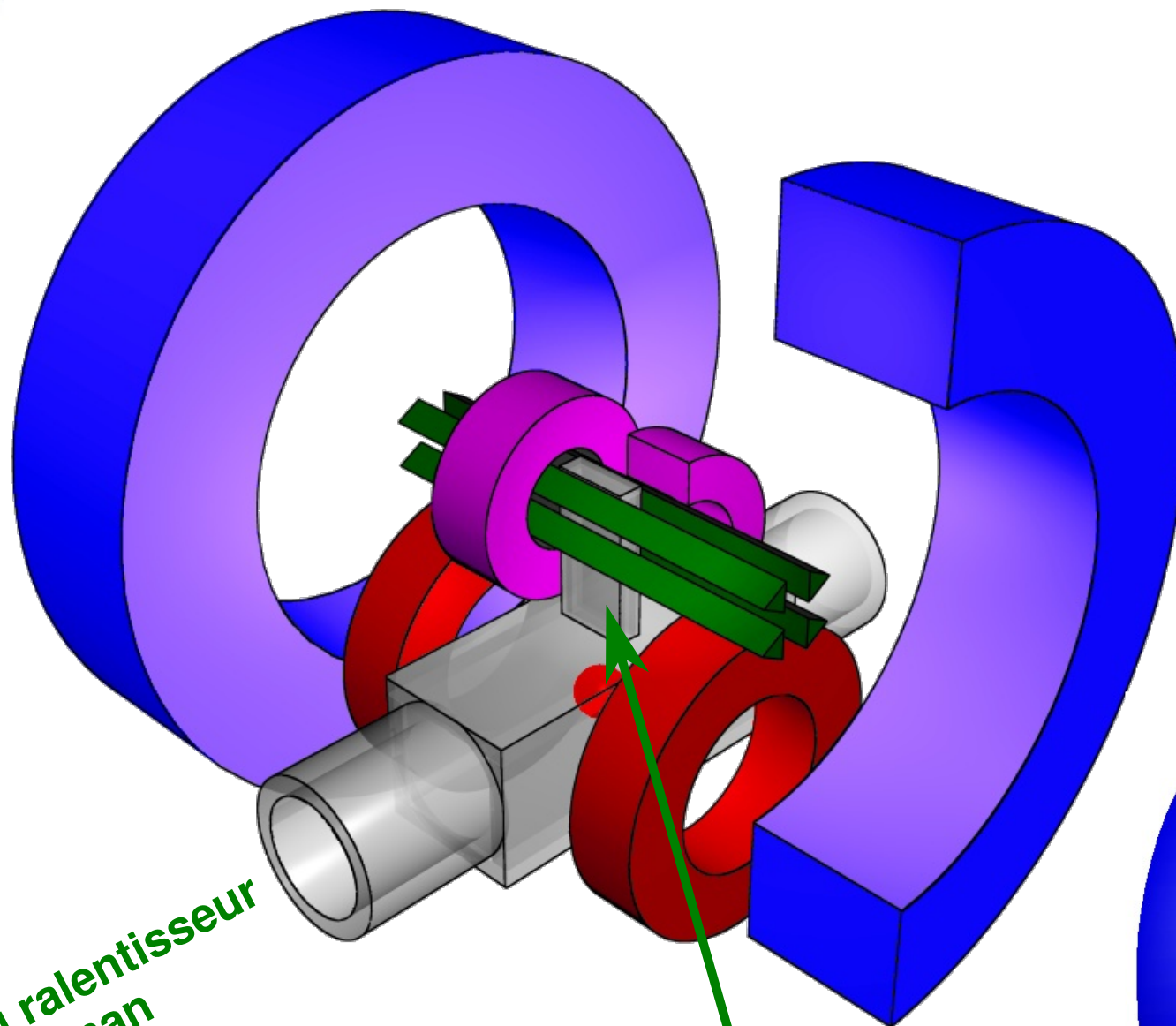
laser plus puissant
avec option réseau
optique

laser ELS à 20 W

nouveau four :
augmentation
du flux

nouveau ralentisseur
Zeeman

augmentation de la
taille de l'appendice

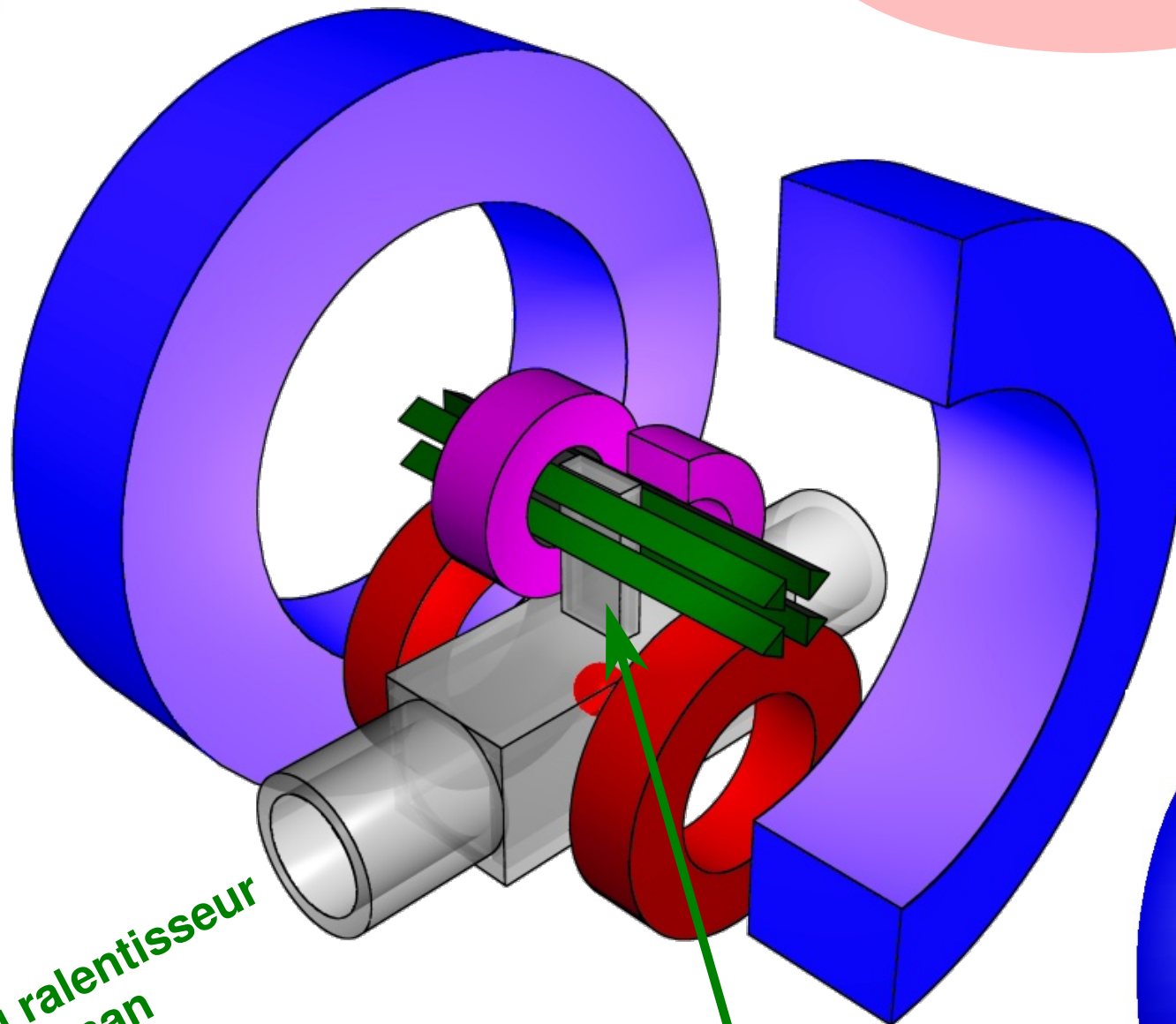


plan général de l'expérience

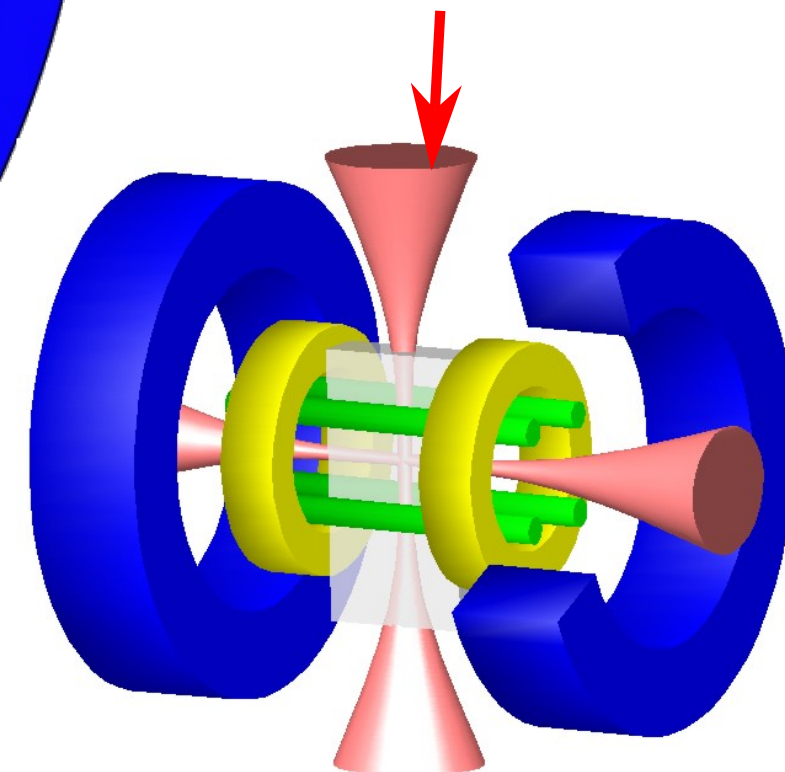
nouvelles diodes laser : 120 mW



nouveau système
d'acquisition de
donnés



laser ELS à 20 W

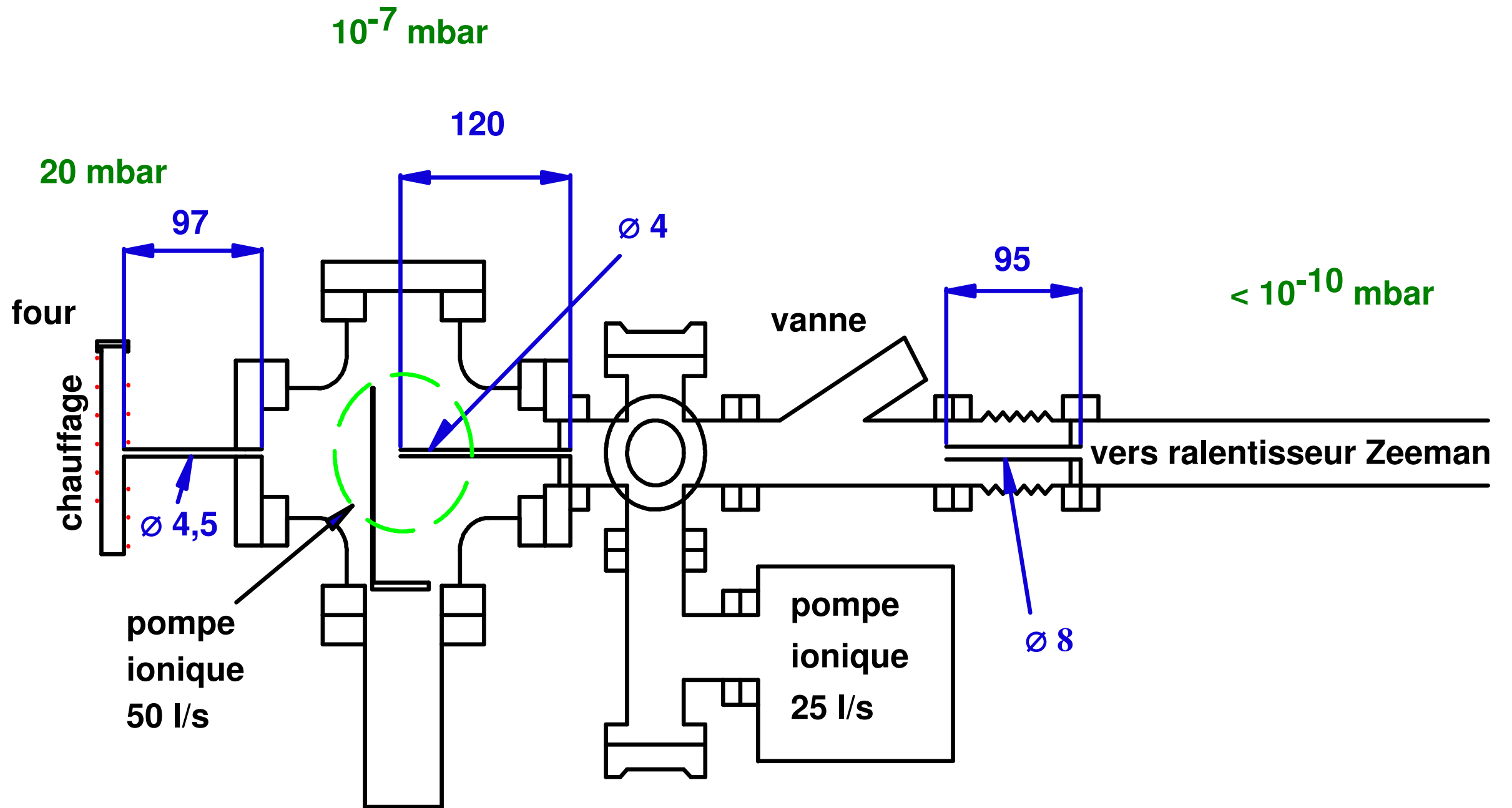


nouveau four :
augmentation
du flux

nouveau ralentisseur
Zeeman

augmentation de
l'appendice

la nouvelle partie four de l'enceinte à vide



un nouveau ralentisseur Zeeman

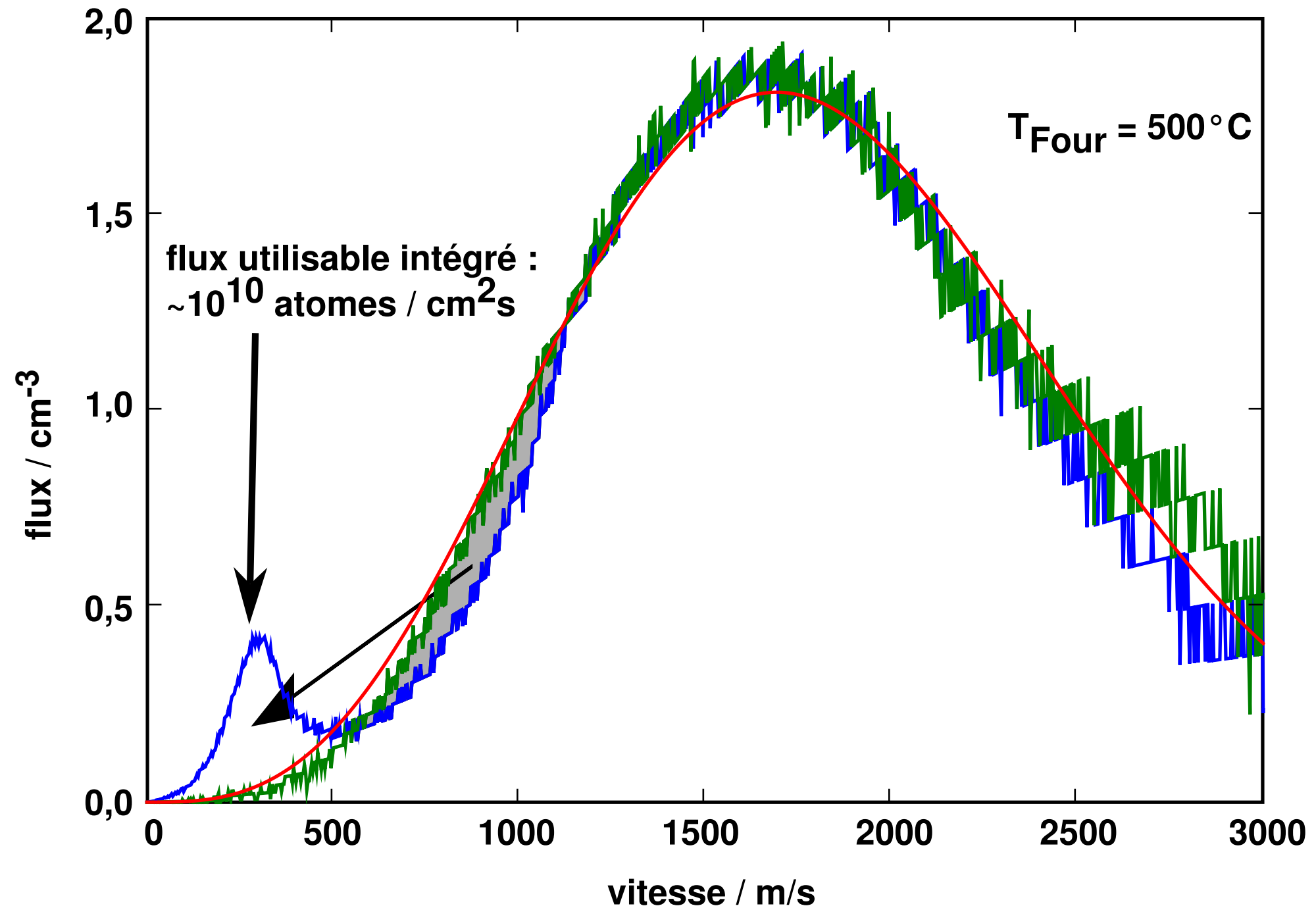


**céramique spéciale avec
SiC ajouté pour meilleure
conductivité thermique**

**Des couches avec fils électriques
alternent avec des couches de
refroidissement**



le fonctionnement du ralentisseur Zeeman

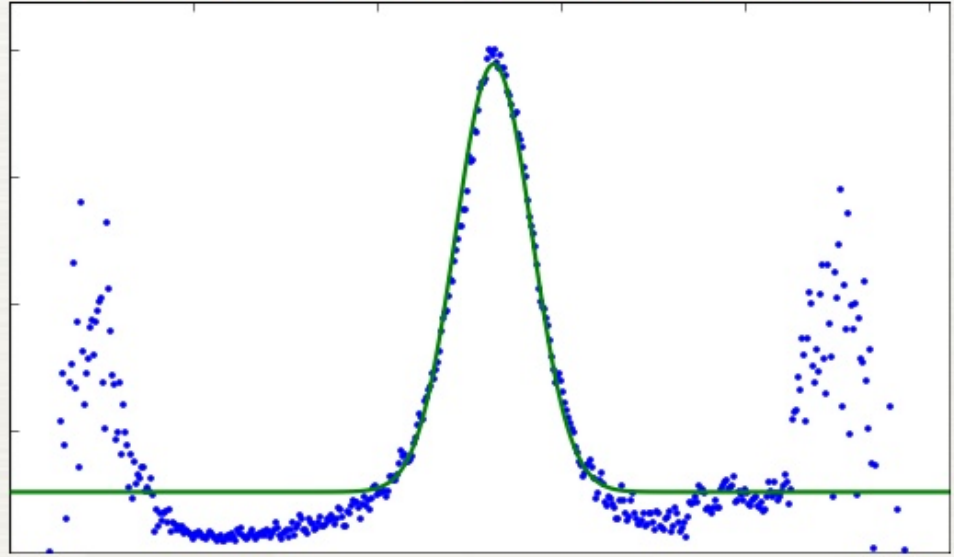
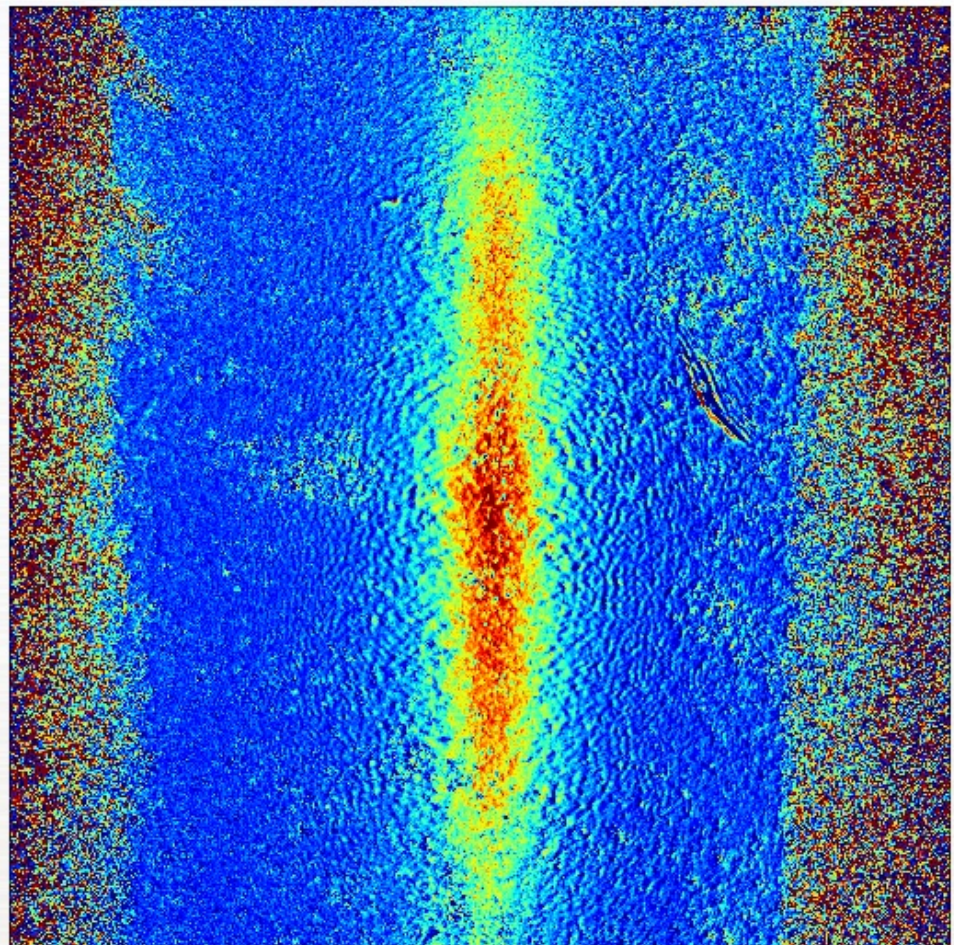
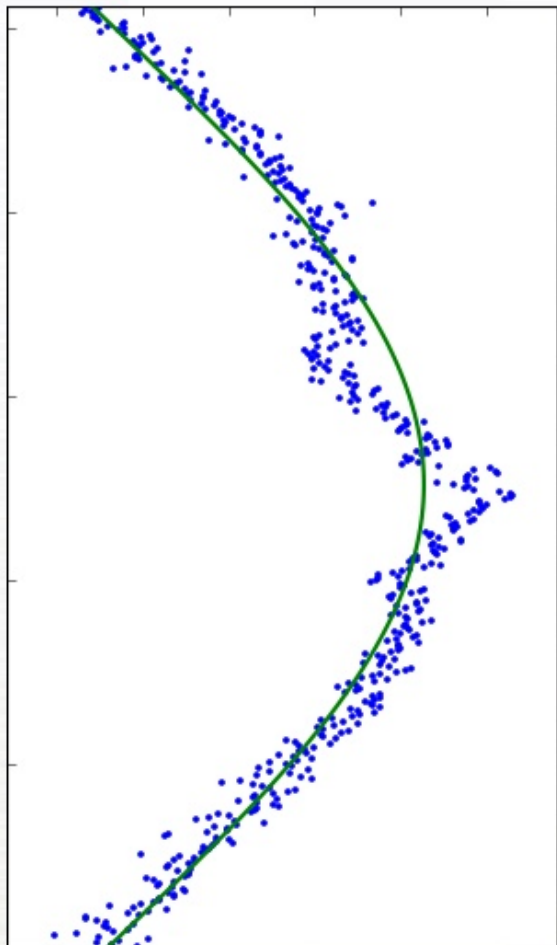


nouveau système d'acquisition des données

Select [Home] [Refresh] [Zoom In] [Zoom Out] [Fit] [Print] [Close]

Select fit : x=330
y=509

Densité optique Absorption Référence Bruit



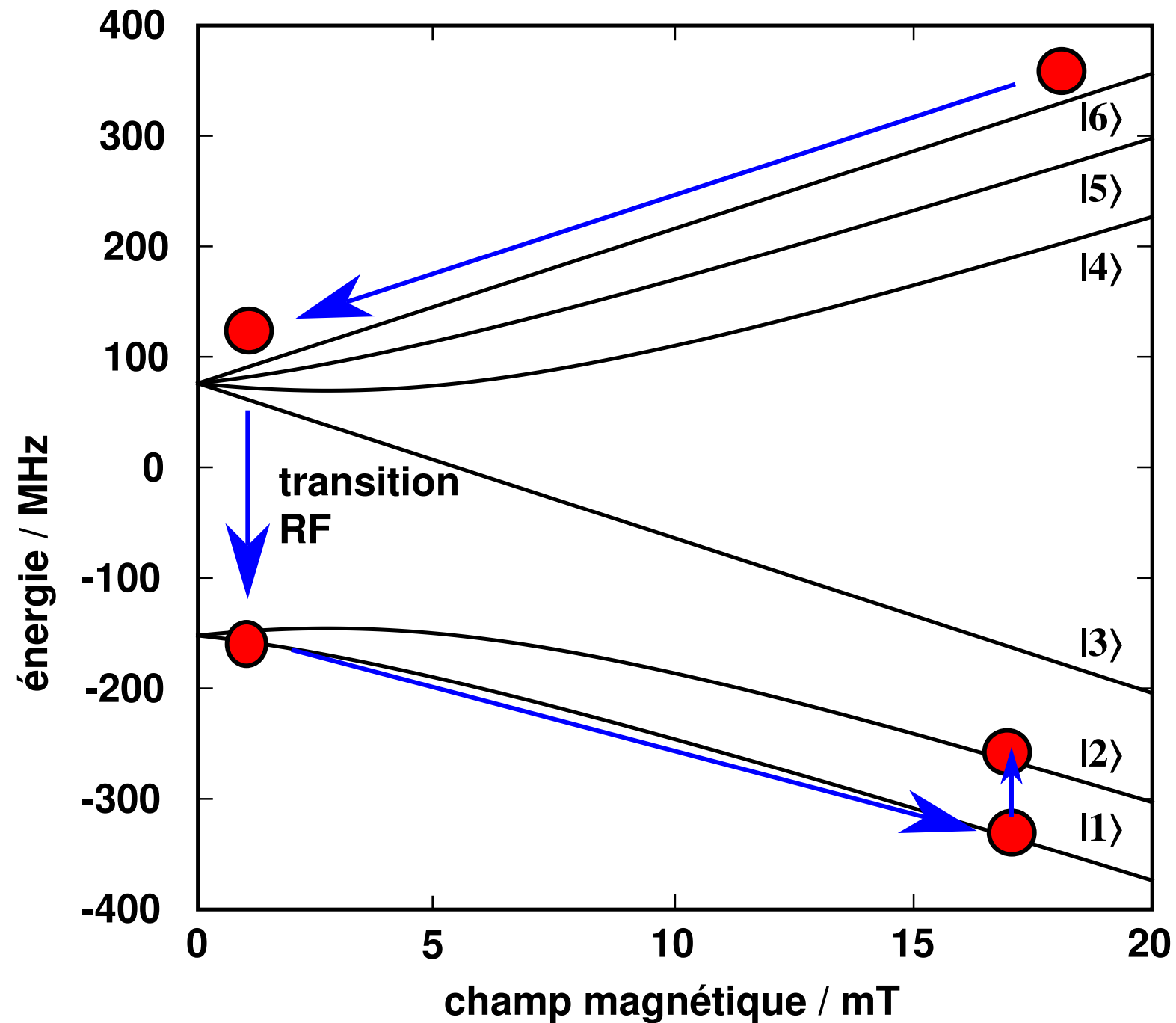
Name	Value
sigma y	3.2
sigma x	0.27
N	5.1e+008

Name

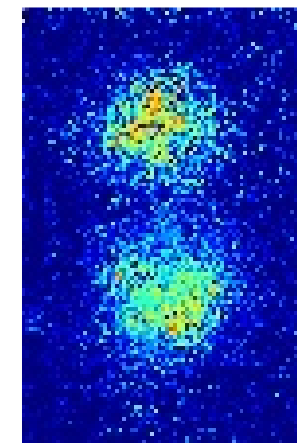
- 399
- 398
- 397
- 396
- 395
- 394
- 393
- 392
- 391
- 390
- 389
- 388
- 387
- 386
- 385
- 384
- 383
- 382
- 381
- 380
- 379
- 378
- 377
- 376
- 375
- 374
- 373
- 372
- 371
- 370
- 369
- 368
- 367
- 366
- 365
- 364
- 363
- 362
- 361
- 360
- 359
- 358
- 357
- 353
- 352
- 351
- 350
- 349
- 348
- 347

serial port opened.

préparation d'un mélange d'états de spin

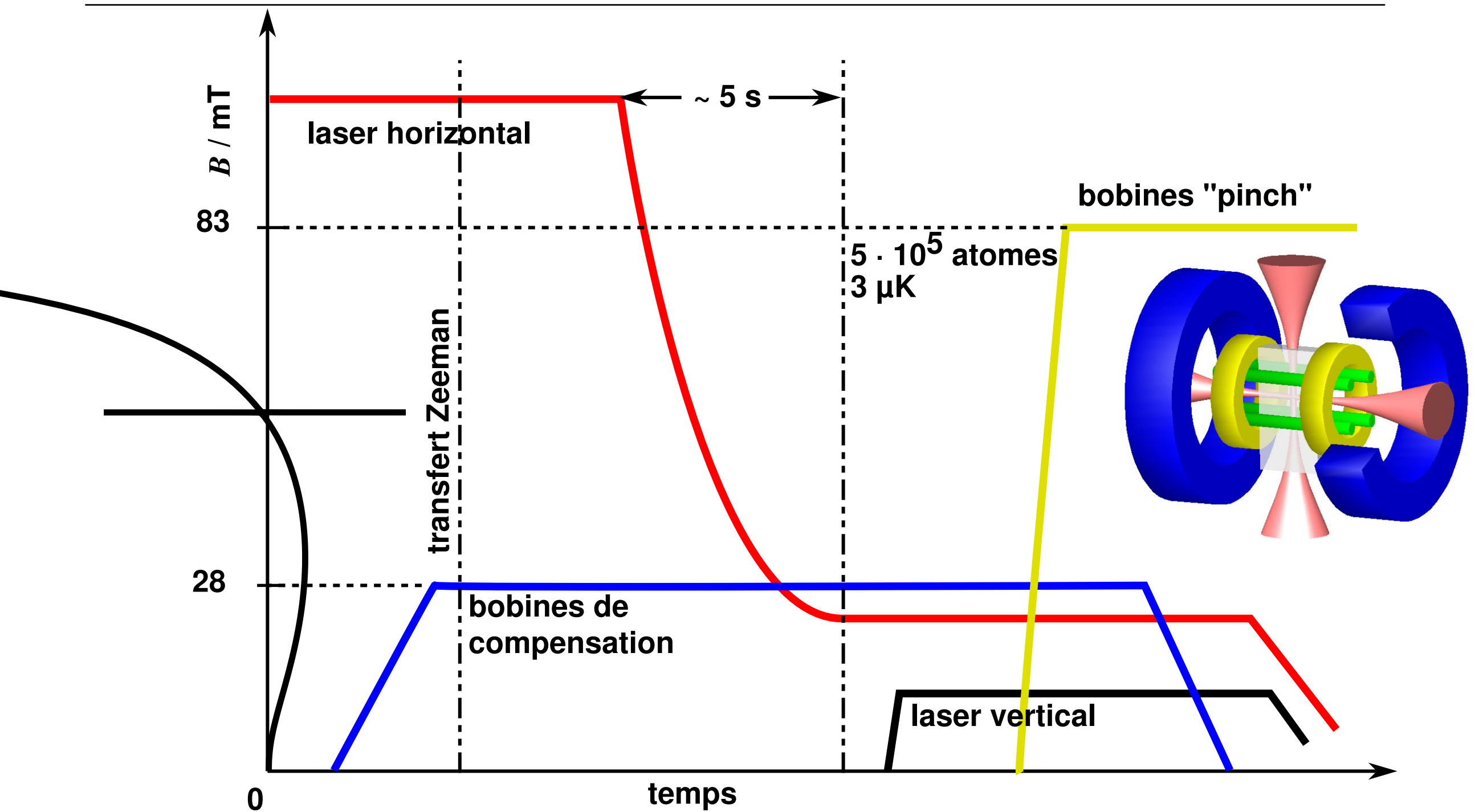


«notre» résonance de Feshbach est entre les états $|1\rangle$ et $|2\rangle$

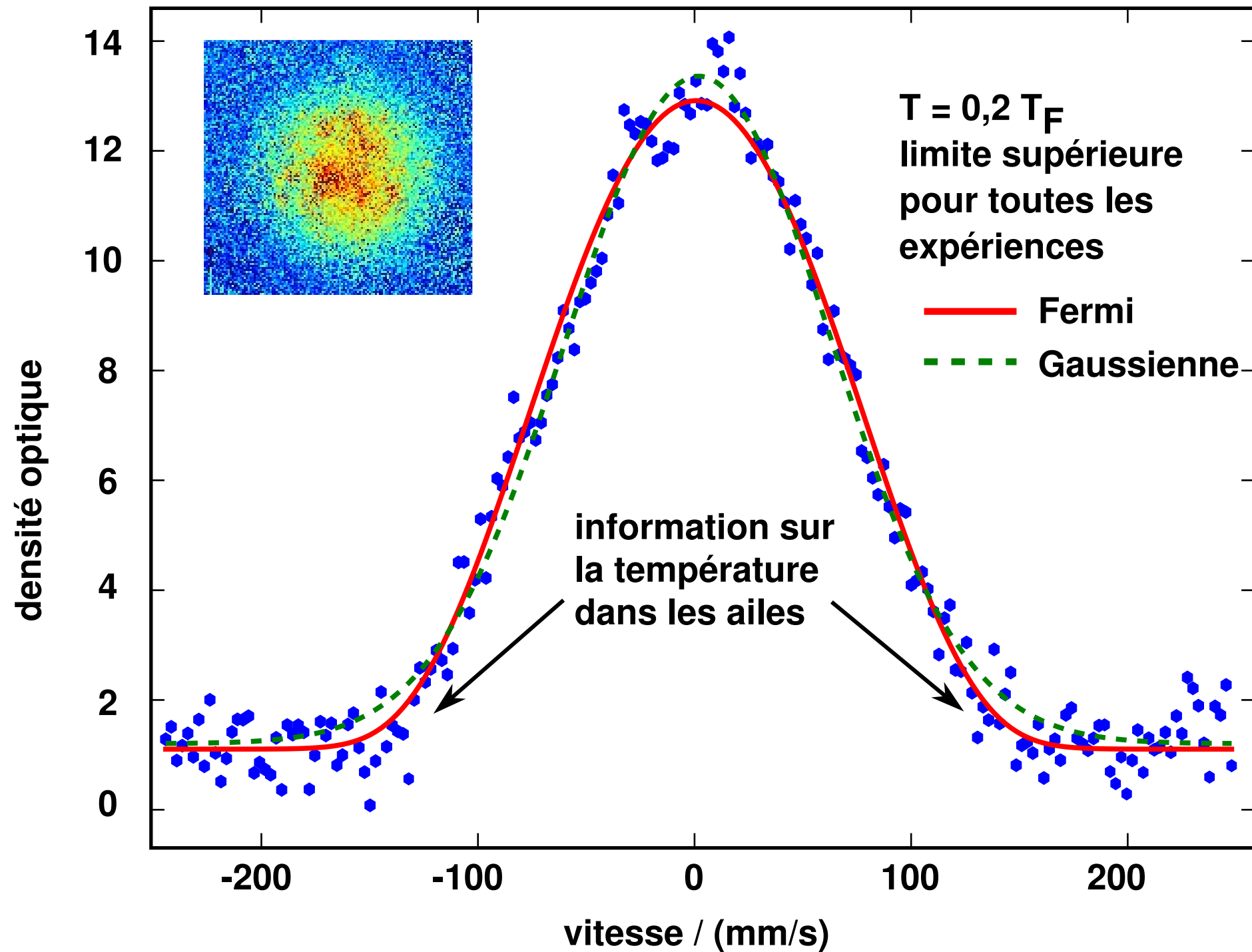


Stern-
Gerlach :
contrôle du
mélange à
3% près

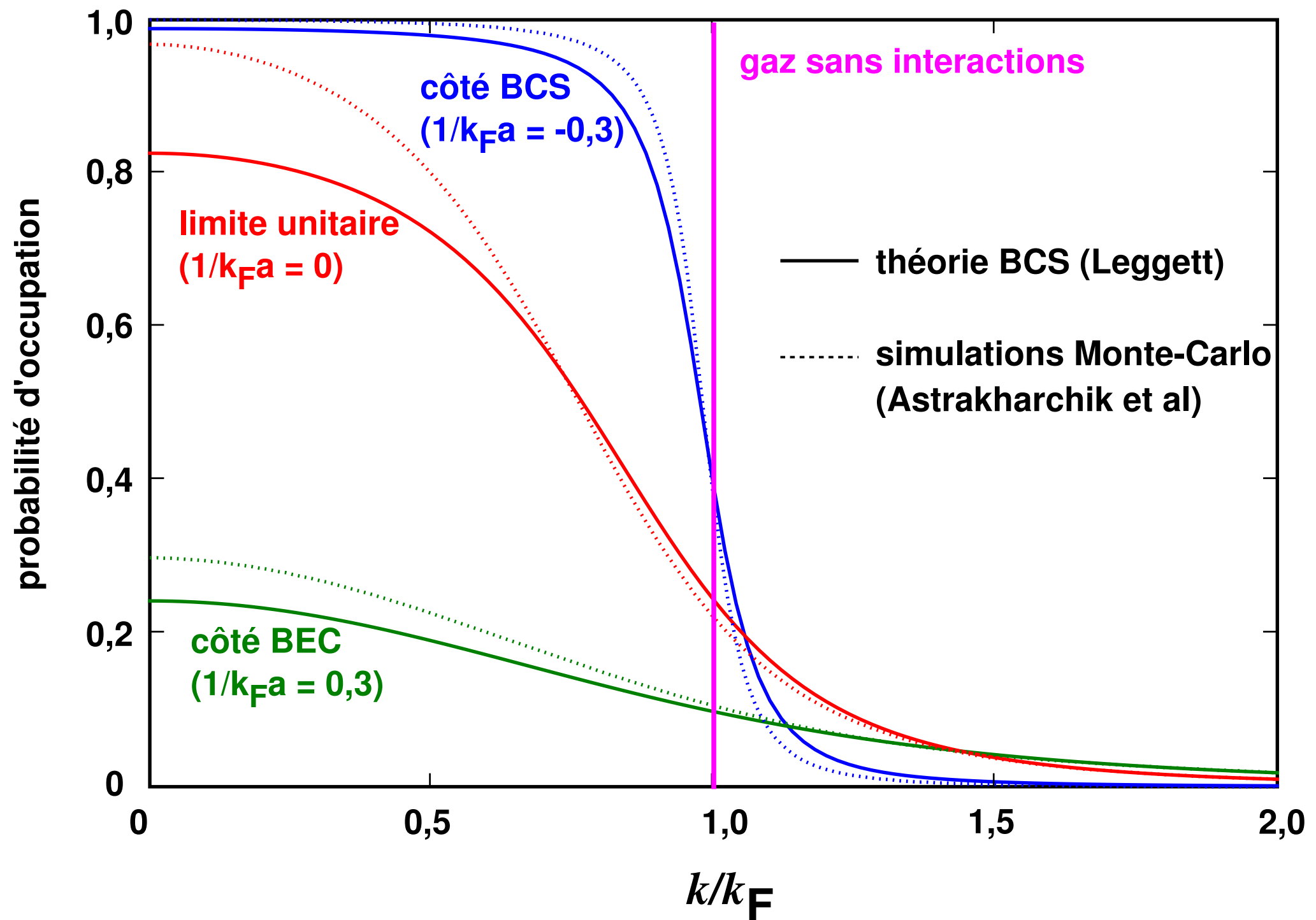
évaporation dans le piège dipolaire



détermination de la température par un fit avec la distribution de Fermi



la distribution en impulsion : cas homogène

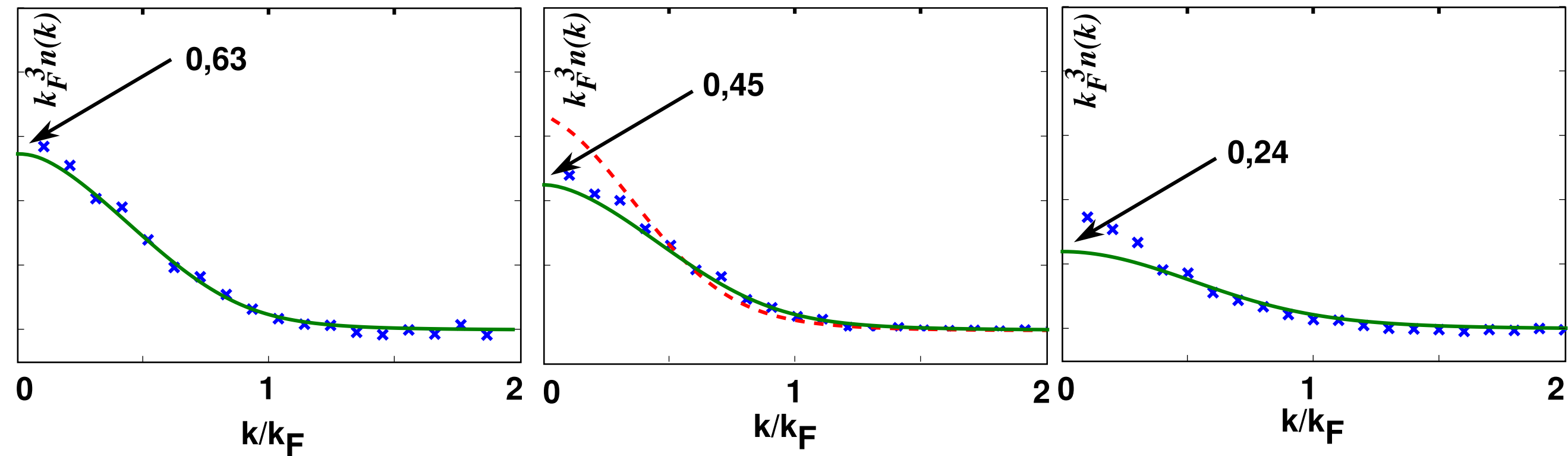


distribution d'impulsions : résultats expérimentaux

côté BCS
($1/k_F a = -0,3$)

limite unitaire
($1/k_F a = 0$)

côté BEC
($1/k_F a = 0,3$)



× points expérimentaux, déconvolués avec la transformation inverse d'Abel

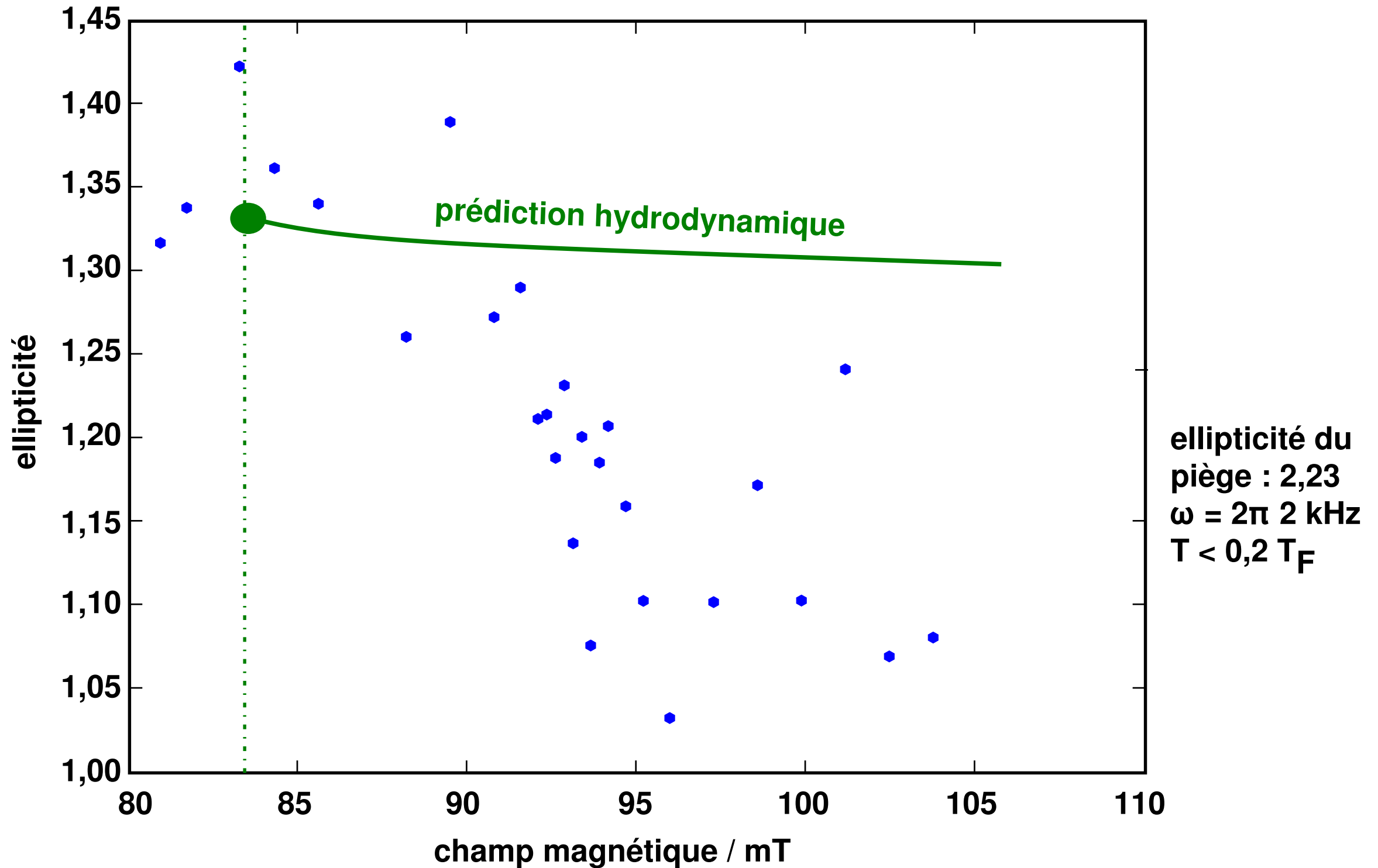
— théorie BCS (Leggett)

- - simulations Monte-Carlo (Astrakharchik et al.)

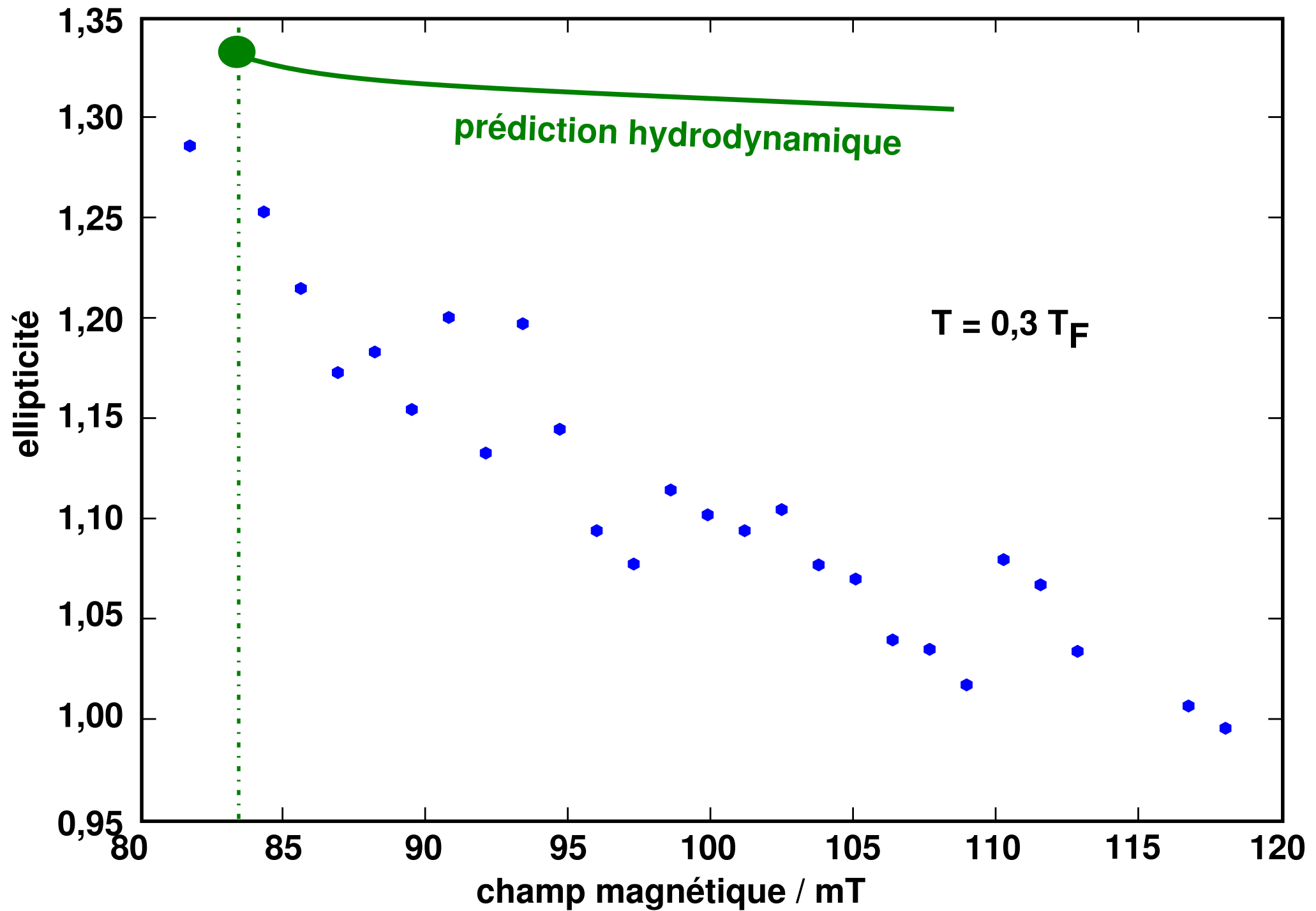
$1,5 \cdot 10^5$ atomes

$\bar{\omega} = 2\pi \cdot 3$ kHz

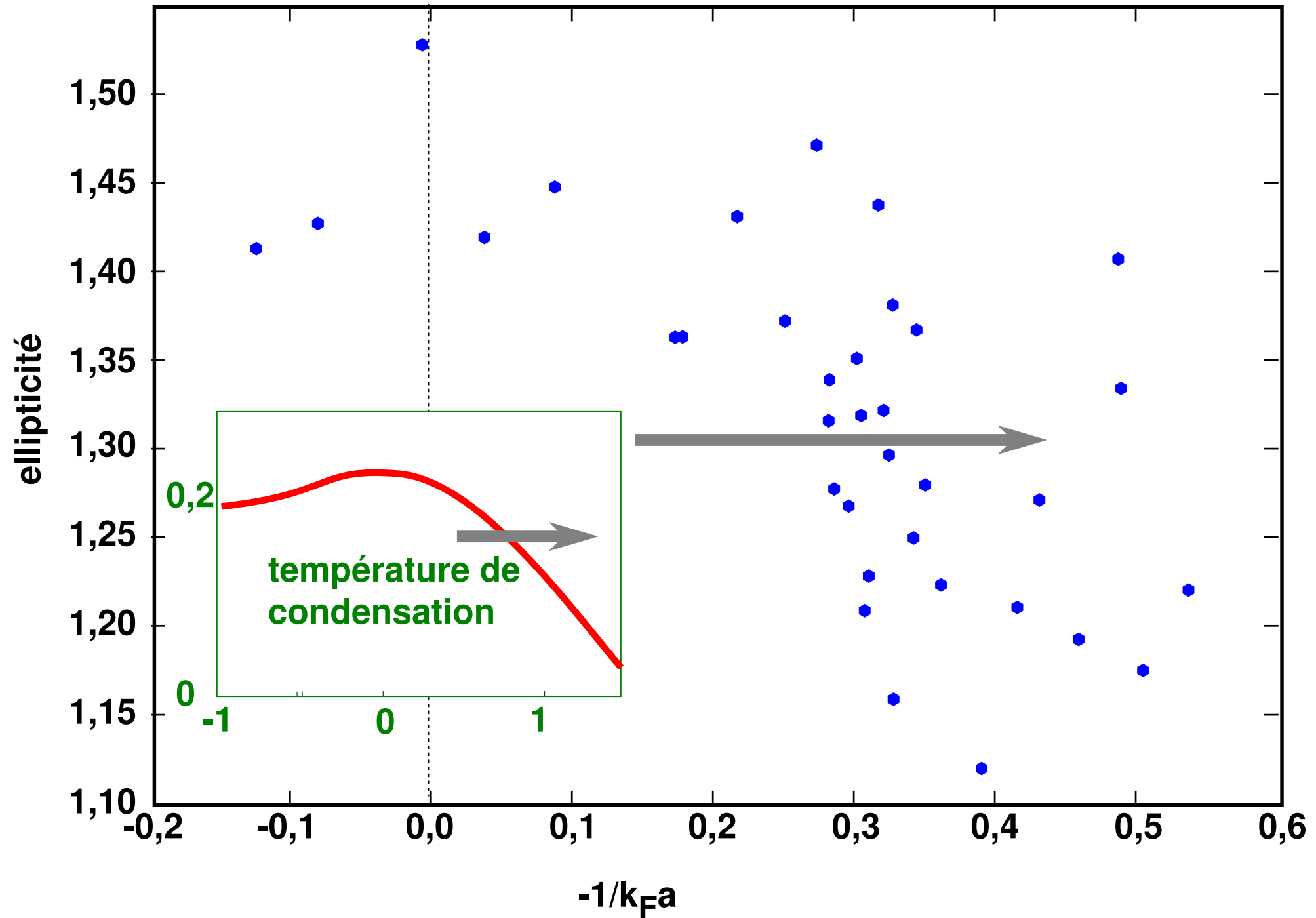
expansion avec interactions : l'ellipticité du nuage



expansion avec interactions : à plus haute température

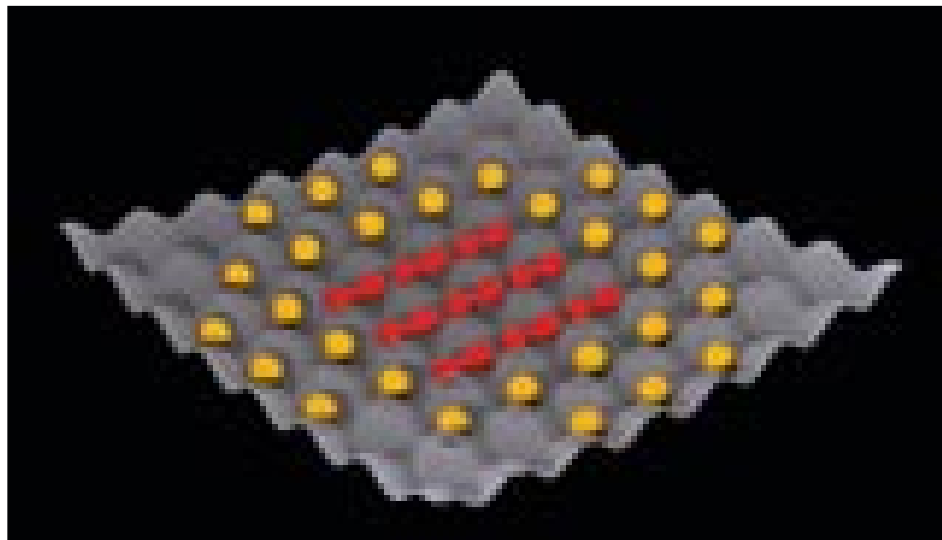


expansion avec interactions : en fonction de $-1/k_F a$



observation de résonances de Feshbach hétéronucléaires

«simulateur quantique» pour des
problèmes de la matière condensée



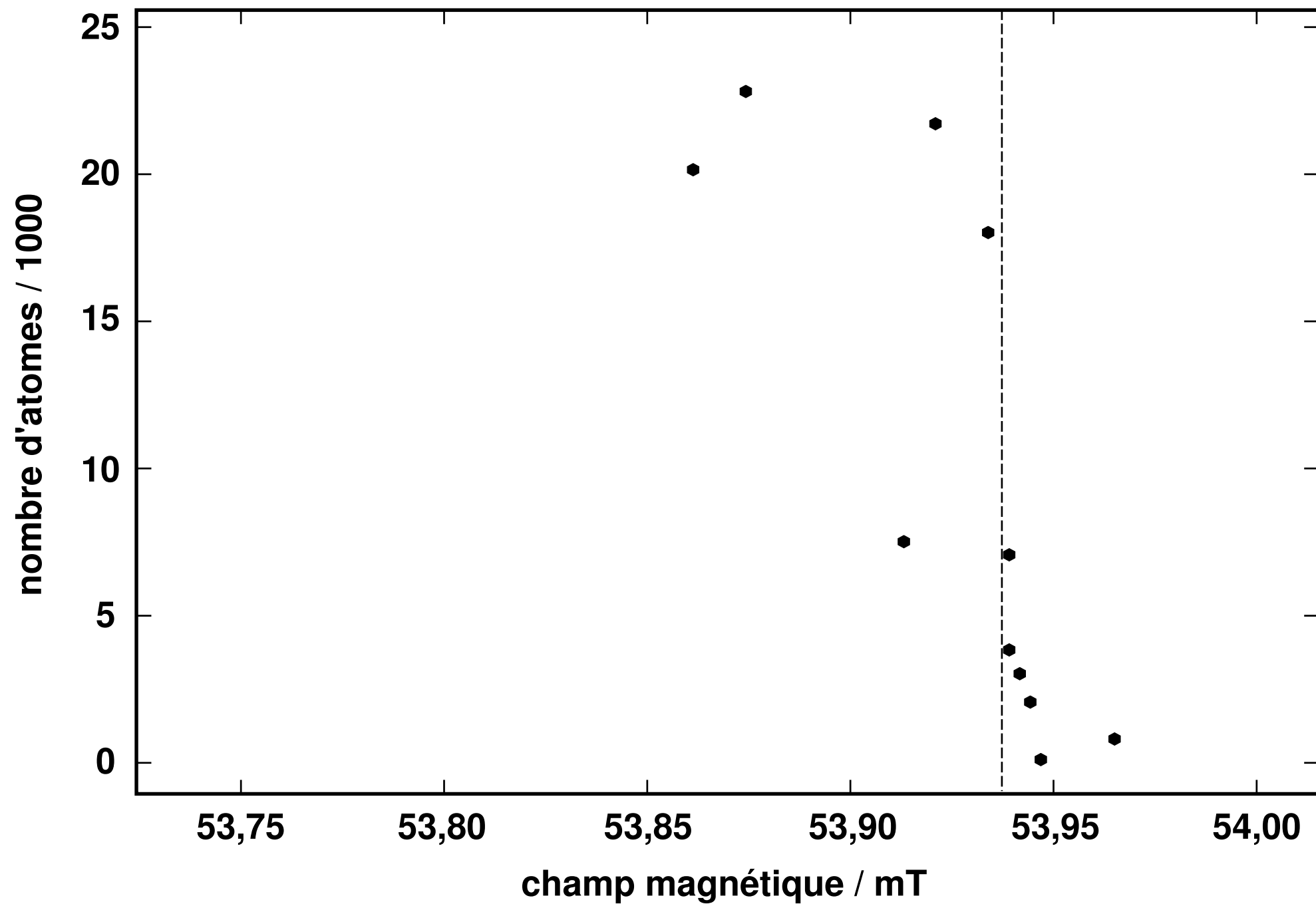
- réseau optiques sont sans défaut
- utiliser une espece comme «défauts ajustables», par exemple localisation d'Anderson

résonances de Feshbach entre Li-6 et Li-7

expérience	prédictions
champ magnetique / mT	
22,64	23,0
24,69	25,1
53,9	55,1
54,82	55,9

théorie : E. van Kempen et al., PRA 70, 050701 (2004)

profil d'une résonance hétéronucléaire

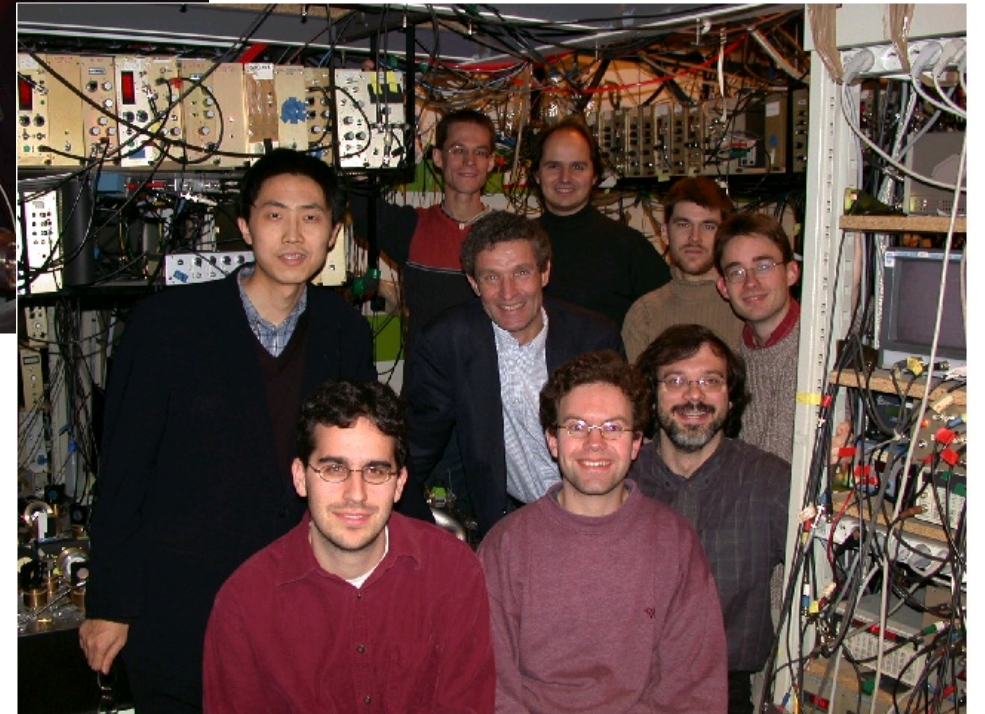
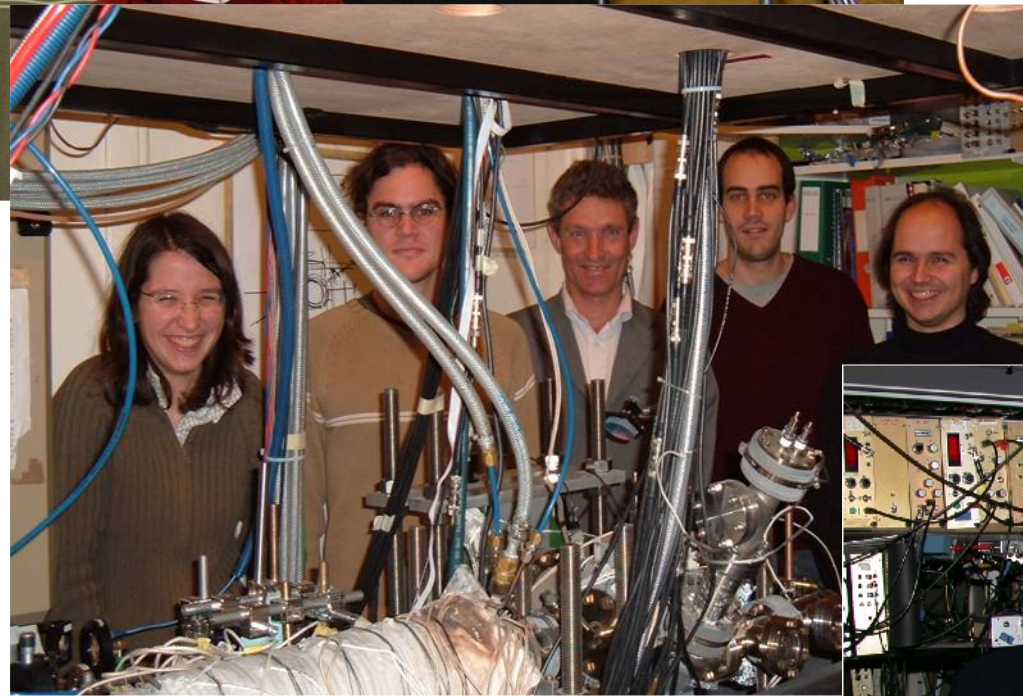


résumé

- **Nous avons construit une expérience pour les gaz fermioniques de deuxième génération**
- **Des mesures de distribution d'impulsion et la dynamique d'expansion d'une gaz fortement interagissant ont été effectuées**
- **Les résonances de Feshbach hétéronucléaires (Li-6, Li-7) ont été localisées**

- **La prochaine étape sera la construction d'un réseau optique : réalisation de modèles de la matière condensée**

Merci !



la théorie BCS

Hamiltonien de la théorie BCS :

$$H = \sum_{k\sigma} a_{k\sigma}^\dagger a_{k\sigma} + U \sum_{k\uparrow} a_{k\uparrow}^\dagger a_{-k\downarrow}^\dagger a_{-k\downarrow} a_{k\uparrow}$$

État fondamental :

$$|\psi_{\text{BCS}}\rangle = \prod (u_k + v_k a_{k\uparrow}^\dagger a_{-k\downarrow}^\dagger) |0\rangle$$

On minimise l'énergie libre. Solutions existantes pour toute valeur des interactions U . Après renormalisation suit :

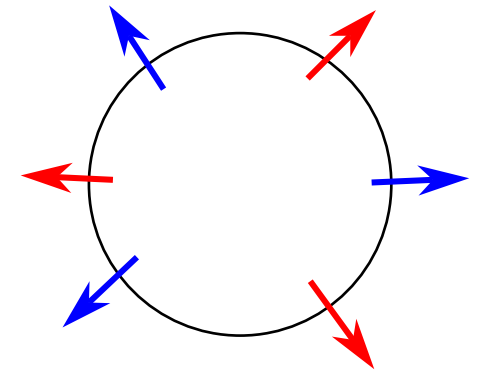
$$\frac{m}{4\pi\hbar^2 a} = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \left(\frac{1}{\varepsilon_k} - \frac{1}{((\varepsilon_k - \mu)^2 + \Delta^2)^{1/2}} \right) 4\pi k^2 dk$$

«équation du gap»

$$n = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^\infty \left(1 - \frac{\varepsilon_k - \mu}{((\varepsilon_k - \mu)^2 + \Delta^2)^{1/2}} \right) 4\pi k^2 dk$$

«équation du nombre»

avec μ le potentiel chimique, Δ le «gap» et U est relié à a



Correlations dans l'espace des impulsions entre les particules opposé en impulsion et spin

l'expansion hydrodynamique en champ magnétique

loi d'échelle :

$$n(x, y, z, t) = n\left(\frac{x}{b_x(t)}, \frac{y}{b_y(t)}, \frac{z}{b_z(t)}, 0\right)$$

(n est la densité locale)

valable si équation d'état est polytropique :

$$\mu = n^\gamma$$

(γ est la constante polytropique)

cas sans interactions : $\gamma = 1$

cas BEC : $\gamma = 2/3$

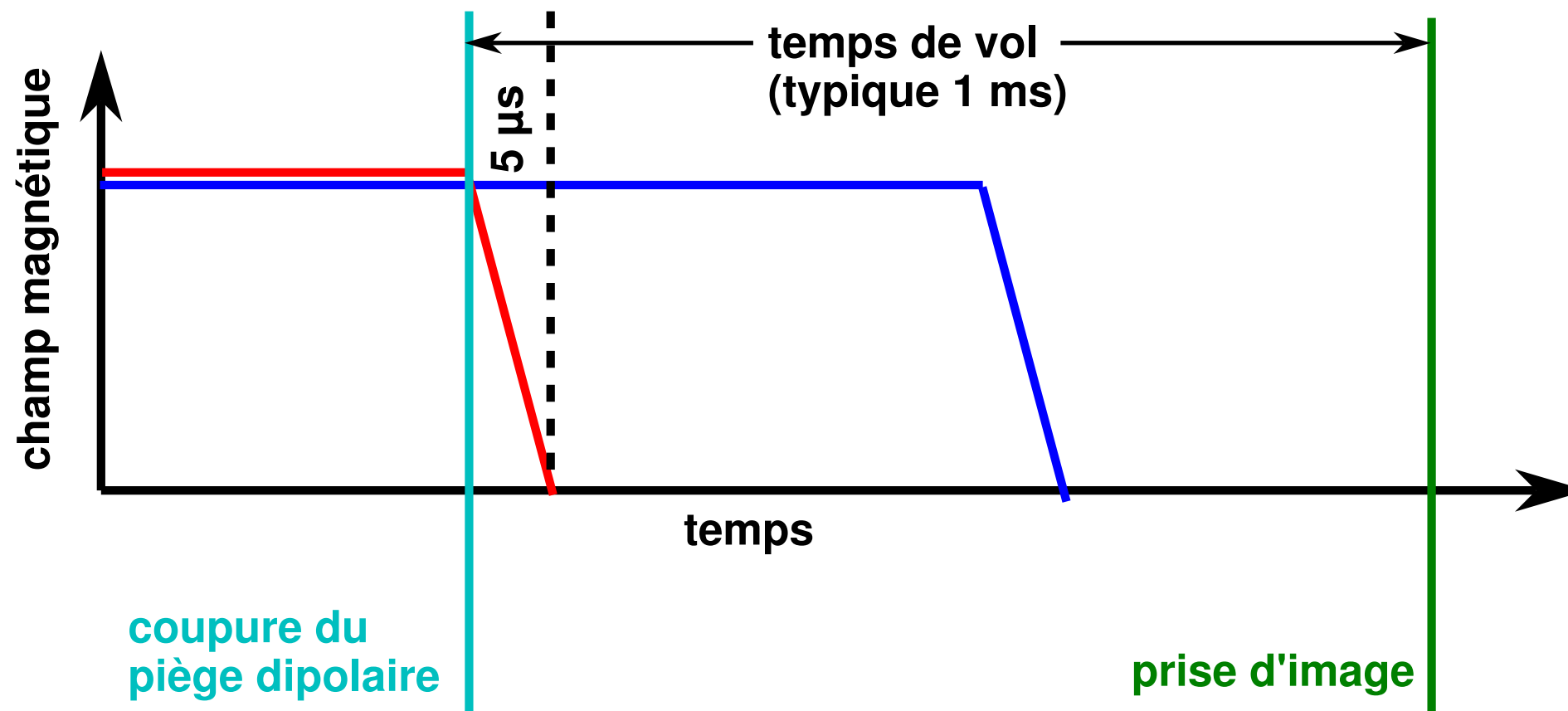
dans la transition on utilise l'approximation polytropique avec une constante déduit d'une simulation Monte-Carlo

(Astrakharchik et al, Diana et al)

deux types d'expérience : expansion avec ou sans champ magnétique

sans champ :
accès à la distribution
d'impulsions

avec champ :
accès à la dynamique
d'expansion d'un gaz en
interaction fort



changement de l'ellipticité pendant le temps de vol

