

# 1. Phénomène de localisation d'Anderson

présentation des effets d'interférences dans le désordre. scaling theory à la delande uniquement sur la conductance pour présenter la localisation 1D et 2D puis la 3D avec la transition. Terminer sur la quête du régime critique avec le graphe de delande2017, et introduction aux manips récentes et futures.

Paragraphe d'introduction ?

Dans ce chapitre, nous commencerons par décrire comment, lors de la propagation cohérente d'une onde dans un milieu désordonné, les interférences peuvent altérer la diffusion classique et engendrer le phénomène spectaculaire de *Localisation d'Anderson* dont nous donnerons les principales propriétés. Dans un second temps, nous présenterons succinctement les principaux systèmes utilisés pour l'investigation de la localisation d'Anderson, pour s'attarder plus particulièrement sur les expériences d'atomes froids. Enfin, nous terminerons ce chapitre par une discussion de nos enjeux actuels, l'étude du régime critique de la transition d'Anderson, dont nous présenterons l'état de l'art.

## 1.1 Diffusion et interférences

Intro historique sur Anderson et le mécanisme de localisation faible pour donner une approche un peu plus intuitive au rôle des interférences.

### 1.1.1 Phénomène de diffusion

Le phénomène de diffusion macroscopique est un phénomène de transport le plus connu de la physique classique. Celui-ci permet par exemple de décrire de manière simple la propagation de la chaleur dans un matériau homogène, l'homogénéisation de la concentration de particules dans un liquide ou encore le phénomène de résistance électrique dans un cadre unifié.

En effet, le phénomène macroscopique de diffusion provient, de manière générale, d'une

marche aléatoire des particules vectrices au sein de leur environnement. Drude a ainsi été le premier à calculer la résistivité électrique des matériaux en introduisant un temps de relaxation basé sur les collisions entre les électrons, vecteurs du courant électrique, et les impuretés du matériau dans lequel ceux-ci se déplacent [Ashcroft and Mermin, 2010].

Il apparaît ainsi que certaines propriétés macroscopiques des matériaux sont reliées aux grandeurs caractéristiques de la marche aléatoire associée. Ces grandeurs sont des briques élémentaires de la propagation en milieu désordonné, telles que le temps de diffusion élastique, le temps de transport, ou encore le coefficient de diffusion, que nous présenterons dans la suite.

### Temps de diffusion élastique

La quantité la plus naturelle permettant de caractériser de manière microscopique le phénomène de diffusion est le *temps de diffusion élastique*  $\tau_S$ , qui correspond à la durée typique entre deux événements successifs de *collision élastique* avec les impuretés du milieu. Ce temps est l'équivalent temporel du *libre parcours moyen*  $l_S$  correspondant à la distance moyenne entre deux événements de diffusion microscopique successifs. Dans le cas d'une particule de masse  $m$  se déplaçant à une vitesse  $v_i$ , ces deux grandeurs sont reliées par

$$\tau_S = \frac{l_S}{v_i} = \frac{m l_S}{\hbar k_i}, \quad (1.1)$$

où  $k_i$  est le nombre d'onde de l'onde quantique associée à la particule (celui-ci est inchangé après chaque événement de collision en raison de leur caractère élastique). On voit ainsi que  $\tau_S$  est une quantité faisant intervenir la perte de cohérence de l'onde subissant une collision élastique.

Comme nous le verrons plus en détails dans les chapitres ?? et ??, le temps de diffusion élastique est une quantité qui dépend des détails microscopiques du système, établissant ainsi le lien entre processus microscopiques et phénomène macroscopique.

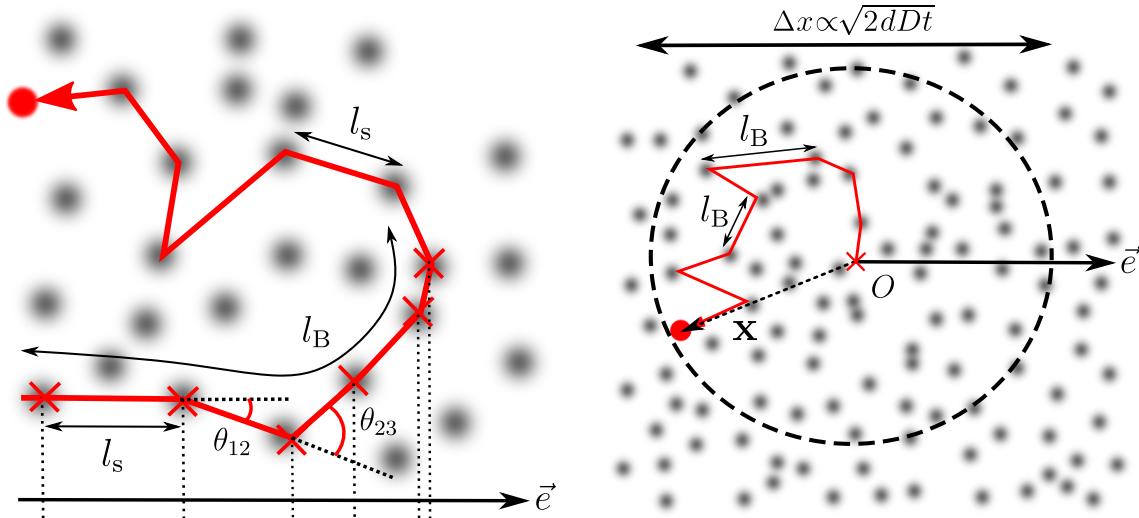
### Temps de transport

Si la norme du vecteur vitesse (ou de manière équivalente du vecteur d'onde) reste inchangée au cours de la propagation, sa direction est modifiée à chaque événement de collision élastique. Comme nous le verrons plus en détails dans le chapitre ??, lors de la collision avec un diffuseur de taille caractéristique  $\sigma$ , l'onde peut être diffusée selon un angle  $\langle\theta\rangle \sim 1/k_i\sigma$ . La diffusion peut donc être *anisotrope*, en analogie avec la diffraction en optique.

En considérant que la trajectoire d'une particule est composée de multiples collisions successives, il apparaît alors une seconde échelle de temps caractéristique, le *temps de transport* ou temps de Boltzmann  $\tau_B$ , décrivant la durée nécessaire pour que la particule perde l'information de la direction initiale de sa vitesse.

On peut ainsi montrer que le temps de transport (et son analogue spatial, la *longueur de transport*) s'expriment en fonction du temps de diffusion élastique [Akkermans and Montambaux, 2007]

$$\tau_B = \frac{\tau_S}{1 - \langle \cos \theta \rangle} \quad \text{et} \quad l_B = \frac{l_S}{1 - \langle \cos \theta \rangle}, \quad (1.2)$$



**FIGURE 1.1 – a : Longueur de transport pour des collisions anisotropes.** Une unique collision élastique ne modifie que peu la direction de la vitesse d'une particule. Il faut donc un grand nombre de collisions successives pour que la direction de la vitesse d'une particule soit décorrélée de la direction initiale. En conséquence, le temps de transport est beaucoup plus grand que le temps de diffusion élastique. **b : Mécanisme microscopique de la diffusion.** Le mouvement d'une particule peut être considérée comme une marche aléatoire composée d'événements de diffusion isotropes tous les  $\tau_B$  entre lesquels la particule se déplace d'une distance  $l_B = v\tau_B$  dans une direction aléatoire. L'étalement typique obtenu croit avec le temps selon  $\Delta x \propto \sqrt{t}$ .

où  $\langle \dots \rangle$  représente la valeur moyenne sur les différents évènements de diffusion.

On voit donc que dans le cas de collisions élastiques isotropes,  $\tau_B = \tau_S$ , montrant qu'une seule collision suffit à perdre l'information sur la direction initiale de la vitesse de la particule. En revanche, un grand nombre de collisions sont nécessaires pour obtenir une isotropisation de la direction des vitesses dans le cas d'évènements de diffusion anisotrope, comme illustré figure 1.1.a.

### Coefficient de diffusion

Une fois que la particule a parcouru une distance  $l_B$ , on peut considérer qu'elle subit une diffusion isotrope. On assimile alors le mouvement des particules à une marche aléatoire pour laquelle les particules de vitesse  $v$  subissent des évènements de collision isotrope à chaque intervalle de temps  $\tau_B$  pendant lesquels la particule parcourt une distance  $l_B = v\tau_B$ , comme illustré figure 1.1.b.

Ainsi, on peut déterminer l'étalement typique de la région explorée par la particule après  $N$  collisions à l'aide du théorème central limite [Diu et al., 1989],

$$\langle \Delta x^2 \rangle = 2Nl_B^2 . \quad (1.3)$$

En définissant le coefficient de diffusion par  $\langle \Delta x^2 \rangle = 2dDt$  et en faisant apparaître le temps  $t = N\tau_B$ , mon montre ainsi que

$$D = \frac{vl_B}{d} = \frac{\hbar}{md} kl_B , \quad (1.4)$$

où on a fait apparaître la quantité  $kl_B$ , qui sera essentielle dans la suite.

Une conséquence de l'équation 1.4 est qu'une diminution de la longueur de transport entraîne une diminution du coefficient de diffusion. Ainsi, plus un système sera désordonné, plus le coefficient de diffusion sera petit.

### 1.1.2 Localisation faible

Si le mécanisme de marche aléatoire présenté permet de décrire un grand nombre de situations de diffusion classique, nous avons omis un ingrédient essentiel à la propagation d'ondes en milieu désordonné : la *cohérence*, ou encore la capacité qu'une onde a à interférer. En particulier, nous verrons que celle-ci peut avoir des conséquences dramatiques sur les propriétés de transport d'une onde en présence de désordre.

#### Mécanisme de localisation faible

Pour cela, intéressons-nous à la probabilité  $P(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$  qu'une onde initialement à la position  $\mathbf{x}$  se retrouve à la position  $\mathbf{x}'$  après propagation dans le milieu désordonné. Dans la limite  $kl_B \gg 1$ , la trajectoire de l'onde peut être vu comme une marche aléatoire, où chaque trajectoire de diffusion est associée à une amplitude complexe de probabilité  $|A_j| e^{i\phi_j}$ , avec  $\phi_j$  la phase de la trajectoire. Ainsi, la probabilité  $P(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$  est donnée par la somme de l'amplitude sur toutes les trajectoires possibles :

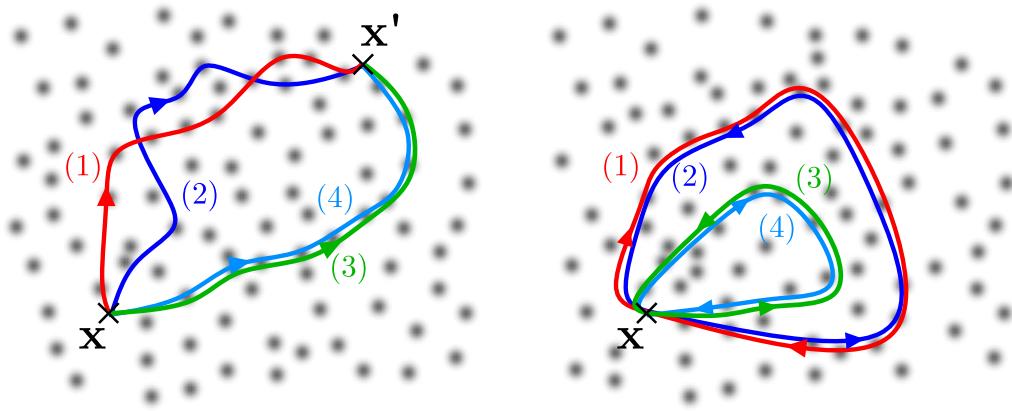
$$\begin{aligned} P(\mathbf{x}, \mathbf{x}') &= \left| \sum_j |A_j| e^{i\phi_j} \right|^2 = \sum_{i,l} |A_j| |A_l| e^{i(\phi_j - \phi_l)} \\ &= \sum_j |A_j|^2 + \sum_{j \neq l} |A_j| |A_l| e^{i(\phi_j - \phi_l)}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

où le premier terme décrit le phénomène de diffusion classique, où la probabilité  $P(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$  est la somme des probabilités de chaque trajectoire.

Le second terme de l'équation 1.5 représente quant à lui les interférences dues aux différentes phases accumulées par les différents chemins de diffusion. Intuitivement, on peut considérer que la contribution de ce terme s'annule en moyennant sur les différentes réalisations du désordre,  $\overline{e^{i(\phi_j - \phi_l)}} = 0$ , où  $\overline{\dots}$  désigne la moyenne d'ensemble. Cependant, une étude attentive montre que certaines trajectoires résistent au moyennage sur les réalisations du désordre.

En particulier, les trajectoires pour lesquelles l'onde se retrouve à son point de départ forment des boucles qu'il est possible de parcourir dans les deux sens, comme illustré figure 1.2. Par *symétrie par renversement du temps*, il est donc possible de trouver des paires de trajectoires dont la phase accumulée sera identique. De plus, ces paires de trajectoires existent quelque soit la réalisation du désordre, rendant ce processus d'interférences constructives robuste vis-à-vis du moyennage d'ensemble et  $\overline{e^{i(\phi_j - \phi_l)}} = 1$ . Ainsi, la probabilité qu'une onde retourne à son point de départ est le double de la prédiction classique :

$$P(\mathbf{x}, \mathbf{x}) = 2 \sum_j |A_j|^2. \quad (1.6)$$



**FIGURE 1.2 – a : Participation des différents chemins de diffusion à la propagation de l'onde.** La probabilité d'arriver au point  $x'$  en partant du point  $x$  est donnée par l'ensemble des trajectoires les reliant. Dans le cas des chemins 1 et 2, la phase accumulée le long de ces trajectoires diffère, détruisant en moyenne le phénomène d'interférence entre ces chemins. **b : Mécanisme de localisation faible.** Les chemins de diffusion pour lesquels l'onde retourne à son point de départ se présentent sous forme de boucles qu'il est possible de parcourir dans les deux sens, comme illustré par les trajectoires 1 et 2, ou encore les trajectoires 3 et 4. Ces paires de trajectoires existent quelle que soit la réalisation du désordre.

Les interférences entre chemins de diffusion tendent alors à favoriser le retour de l'onde à son point d'origine, ralentissant ainsi la diffusion. Cet effet de *localisation faible*, commun à tout type d'onde, a été intensivement étudié dans de nombreux domaines, aussi théoriquement que expérimentalement.

### Corrections de localisation faible

Comme le montre l'équation 1.6, le retour de l'onde à son point d'origine est favorisé à l'aide des interférences constructives qu'il existe entre des trajectoires symétriques par renversement du temps. Notamment, cet effet de localisation faible se traduit par la diminution du coefficient de diffusion par rapport à la prédition classique 1.4, que l'on peut alors écrire sous la forme

$$D = D_0 - \delta D , \quad (1.7)$$

où  $D_0$  est le coefficient de diffusion classique 1.4, et  $\delta D$  est la correction de localisation faible.

$$\delta D/D_0 = \begin{cases} \mathcal{O}(L/l_B) & \text{en 1D} \\ \mathcal{O}\left(\frac{1}{kl_B} \ln \frac{L}{l_B}\right) & \text{en 2D} \\ \mathcal{O}\left(\frac{1}{(kl_B)^2}\right) & \text{en 3D} \end{cases} \quad (1.8)$$

### 1.1.3 Suppression du transport : Localisation d'Anderson

suppression du transport  $D = 0$ . profil exponentiel de la fonction d'onde. longueur de localisation.

$$|\psi(\mathbf{x})|^2 \propto e^{-\mathbf{x}/\xi_{\text{loc}}} \quad (1.9)$$

1D et 2D toujours localisé sur différentes tailles. existence d'une transition de phase en 3D, régime critique.

$$D \sim |E - E_c|^s \quad \text{et} \quad \xi_{\text{loc}} \sim |E - E_c|^{-\nu} \quad (1.10)$$

## 1.2 Localisation des atomes froids

### 1.2.1 Etudes expérimentales de la localisation d'Anderson

phénomène universel, commun à tous types d'ondes. ultrasons, lumières dans des guides d'onde désordonnés, lumière dans la peinture blanche, ondes électroniques dans des matériaux dopés

### 1.2.2 L'approche des atomes froids

parler ondes de matières dans des potentiels lumineux. du coup on contrôle tout, même la dimensionnalité. expérience de diffusion de à 2D (équipe de thomas), qui montre la décroissance du pic central en  $1/t$  ou  $1/t^2$  suivant désordre ou non.

parler des manips 1D qui démontrent la localisation. Introduire  $\sigma$  la taille des grains pour expliquer le effective mobility edge ?

Parler des manips préliminaires à 3D.

Introduire brièvement le many-body, kick-rotors ? expérience récente en 2D.

## 1.3 Vers l'étude du régime critique

### 1.3.1 Etat de l'art de l'étude de la transition d'Anderson

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

### 1.3.2 Nécessité d'une spectroscopie pour sonder le régime critique

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula

henderit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.



## 2. Production d'ondes de matière

Dans la partie précédente, nous nous sommes concentrés sur la physique des atomes ultrafroids dans le désordre. En particulier, nous avons mis en évidence le fait que l'approche des atomes ultrafroids constitue une plateforme idéale pour l'étude de la propagation d'ondes dans un milieu désordonné, plateforme déjà éprouvée par l'observation de la localisation d'Anderson d'ondes de matières dans un désordre optique.

À présent, concentrons-nous sur la description de l'un des deux éléments-clé de la propagation d'ondes dans le désordre : notre source d'ondes de matière. Le second élément, notre désordre optique, sera quant à lui présenté dans le chapitre 4.

Dans ce chapitre, nous nous attacherons donc à définir ce qu'est un condensat de Bose-Einstein puis nous décrirons ses principales propriétés. Dans un second temps, nous nous intéresserons aux outils dont nous disposons pour manipuler les atomes, puis nous terminerons en présentant la manière dont ces outils sont implémentés sur notre dispositif expérimental.

### 2.1 Condensation de Bose-Einstein

Commençons par décrire ce qu'est un condensat de Bose-Einstein. Le phénomène de condensation a été prédit par Albert Einstein dans les années 1920 en s'appuyant sur les travaux de Satyendranath Bose traitant des statistiques quantiques pour des particules plus tard appelées *bosons*. Il a cependant fallu attendre les années 1960 et le développement des premiers lasers pour voir émerger les premières techniques de manipulation d'atomes. La mise au point de telles technologies a d'ailleurs valu le prix Nobel à ses principaux architectes Claude Cohen-Tannoudji, Steven Chu et William D. Phillips en 1997. Enfin, le premier condensat de Bose-Einstein gazeux de  $^{87}\text{Rb}$  a été obtenu par l'équipe de Eric Cornell et Carl Wieman [Anderson et al., 1995], rapidement suivi par un condensat de  $^{23}\text{Na}$  obtenu par Wolfgang Ketterle [Davis et al., 1995]. Ces travaux ont été récompensés par le prix Nobel de 2001.

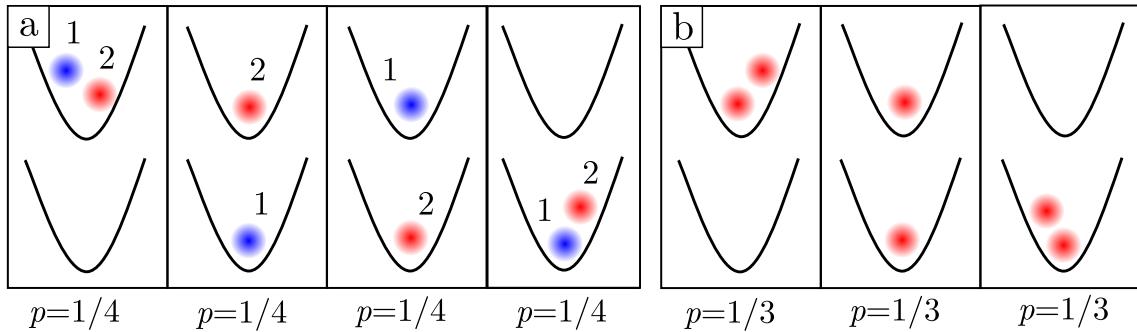


FIGURE 2.1 – a : Répartition de deux particules discernables numérotées 1 et 2 sur deux niveaux d'énergie. Quatre configurations sont possibles. b : Répartition de deux particules indiscernables sur deux niveaux d'énergie. Dans le cas où ces particules peuvent se trouver dans le même état (bosons), trois configurations sont alors possibles.

Depuis, des condensats de Bose-Einstein ont été produits pour un grand nombre d'espèces chimique, pour des atomes comme pour des molécules. Aujourd'hui, les condensats sont couramment utilisés comme outils à des fins différentes, aussi leurs propriétés ont pu être abondamment étudiées par le passé et restent l'objet de l'investigation de plusieurs groupes dans le monde. Ainsi, nous n'en présenterons ici que les propriétés essentielles à la suite de ce manuscrit.

### 2.1.1 Statistique de Bose-Einstein

Le phénomène de condensation de Bose-Einstein trouve son origine dans la statistique de Bose-Einstein. Celle-ci se différencie de la statistique classique de Boltzmann dans le formalisme grand-canonical donnée par :

$$N_{\mathbf{n}} = g_{\mathbf{n}} \exp(-(E_{\mathbf{n}} - \mu)/k_B T) \quad (2.1)$$

pour un gaz de  $N$  particules à l'équilibre thermique, avec  $N_{\mathbf{n}}$  le nombre moyen d'atomes présents dans l'état d'énergie  $E_{\mathbf{n}}$  et de dégénérescence  $g_{\mathbf{n}}$ ,  $\mu$  le potentiel chimique,  $T$  la température et  $k_B$  la constante de Boltzmann. L'origine de cette différence provient de l'indiscernabilité des particules : dans le cadre de la physique classique, les particules identiques sont discernables, c'est à dire qu'il est possible "d'étiqueter" les particules et de suivre leurs mouvements individuels. Dans le cadre de la mécanique quantique, une telle approche n'est pas possible car les particules sont décrites par des fonctions d'onde, étalées dans l'espace. Lors de collisions de particules identiques, le recouvrement de leur fonction d'onde fait qu'il est impossible de déterminer les trajectoires suivies par les particules. L'indiscernabilité des particules dans le cadre de la mécanique quantique est donc essentielle.

Considérons alors le cas simple de la répartition de deux particules sur deux niveaux d'énergie. Dans le cadre de la physique classique, il est possible d'attribuer un numéro à chaque particule, et il on peut placer chaque particule dans n'importe quel niveau d'énergie. Il existe alors quatre configurations que l'on supposera équiprobales, chacune de probabilité  $p = 1/4$  (voir figure 2.1a). L'approche quantique, dans laquelle il n'est pas possible de discerner les particules, restreint le nombre de possibilités à trois et donc la

probabilité de chacune des configurations est alors de  $p = 1/3$  (voir figure 2.1b). Calculons maintenant la probabilité que deux particules soient dans le même état. En physique classique, cette probabilité est de  $p = 2/4 = 1/2$ , tandis qu'en mécanique quantique, celle-ci est de  $p = 2/3$ . On s'attend alors à ce que l'indiscernabilité des particules en mécanique quantique modifie la statistique de Boltzmann en favorisant l'agrégation de particules dans le même état<sup>1</sup>.

### Condensation de Bose-Einstein

Considérons alors le cas d'un gaz de  $N$  bosons identiques dans un piège harmonique :

$$V(x, y, z) = \frac{1}{2}m\omega_x^2x^2 + \frac{1}{2}m\omega_y^2y^2 + \frac{1}{2}m\omega_z^2z^2 \quad (2.2)$$

où  $m$  correspond à la masse des particules, et les  $\omega_i$  correspondent aux fréquences de piégeage dans chaque direction de l'espace. Les énergies  $E_{\mathbf{n}}$  sont donc celles des états liés

$$E_{\mathbf{n}} = \left(n_x + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega_x + \left(n_y + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega_y + \left(n_z + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega_z \quad \text{avec} \quad \mathbf{n} = \{n_x, n_y, n_z\} \quad (2.3)$$

On peut alors montrer que le nombre moyen de particules est donné par la distribution de Bose-Einstein<sup>2</sup> :[Diu et al., 1989]

$$N_{\mathbf{n}} = \frac{g_{\mathbf{n}}}{\exp((E_{\mathbf{n}} - \mu)/k_B T) - 1} \quad (2.4)$$

Une condition de validité de cette équation est que le potentiel chimique  $\mu$  soit plus petit que l'énergie  $E_0$  du niveau de plus basse énergie, appelé niveau fondamental. Autrement, le nombre moyen de particules du niveau fondamental serait négatif (et cela impliquerait que la totalité du réservoir de particules vienne se déverser dans le niveau fondamental). Il est donc nécessaire que  $\mu < E_0$ . Une conséquence remarquable cette condition est que la population totale des états excités est bornée par :

$$N_e(\mu, T) = \sum_{\mathbf{n} \neq \mathbf{0}} N_{\mathbf{n}} \leq \sum_{\mathbf{n} \neq \mathbf{0}} \frac{g_{\mathbf{n}}}{\exp((E_{\mathbf{n}} - E_0)/k_B T) - 1} \quad (2.5)$$

Ainsi, chaque particule supplémentaire peuplera forcément l'état fondamental. On a donc ici le moyen d'accumuler un grand nombre de particules dans le même état quantique. La condensation de Bose-Einstein correspond, par définition, à cette accumulation d'un nombre macroscopique de particules dans l'état fondamental. C'est dans ce régime que les effets quantiques se manifestent, toutes ces particules partageant alors le même état quantique. Afin d'obtenir de tels effets, il est nécessaire que les fonctions d'onde des particules individuelles se recouvrent, c'est à dire que l'extension typique d'un paquet d'onde soit plus grande que la distance moyenne entre particules. Cette extension typique est donnée par la longueur d'onde thermique de de Broglie  $\Delta x \sim \lambda_{dB}$ , qui correspond à la

1. Ce raisonnement est valable pour des particules bosoniques, qui peuvent se retrouver dans le même état quantique. Pour des particules fermioniques, qui ne peuvent pas occuper le même état quantique, les statistiques en sont donc profondément changées. En guise d'illustration, la seule configuration possible de la figure 2.1b pour des fermions est la seconde configuration.

2. Pour un gaz de  $N$  fermions identiques, le nombre moyen de particules est donné par la distribution de Fermi-Dirac  $N_{\mathbf{n}} = \frac{g_{\mathbf{n}}}{\exp((E_{\mathbf{n}} - \mu)/k_B T) + 1}$ .

taille typique d'un paquet d'onde quantique dont la largeur de la distribution en impulsion est donnée par la température. Elle s'exprime [Diu et al., 1989]

$$\lambda_{\text{dB}} = \sqrt{\frac{2\pi\hbar^2}{mk_{\text{B}}T}} \quad (2.6)$$

avec  $m$  la masse de la particule, un atome de  $^{87}\text{Rb}$  dans le cas de notre expérience. La distance inter-particules dans un piège est estimée à partir de la densité de particules  $d \sim n^{-1/3}$ . On peut alors formuler le critère phénoménologique suivant :

$$n\lambda_{\text{dB}}^3 \gtrsim 1 \quad (2.7)$$

La quantité  $n\lambda_{\text{dB}}^3$  est appelée *densité dans l'espace des phases*. Tout l'enjeu des expériences d'atomes ultrafroids est d'arriver à augmenter la densité dans l'espace des phases afin de franchir le seuil donné par l'équation 2.7. Cette condition peut se réécrire en terme de *température critique* :

$$T_{\text{C}} \sim \frac{\hbar\bar{\omega}}{k_{\text{B}}} N^{1/3} \quad (2.8)$$

où  $\bar{\omega} = (\omega_x\omega_y\omega_z)^{1/3}$  est la fréquence moyenne du piège. Cette température critique est de l'ordre de quelques centaines de nanokelvin pour les expériences typiques d'atomes ultra-froids.

### 2.1.2 Propriétés d'un condensat de Bose-Einstein

On peut écrire l'équation de Schrödinger pour l'état fondamental en tenant compte de ce terme d'interaction entre particules. La description en champ moyen du condensat est alors donnée par l'équation de Gross-Pitaevskii (aussi connue sous le nom d'*équation de Schrödinger non-linéaire*) :

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(\mathbf{r}) + g |\phi_0(\mathbf{r})|^2 \right] \phi_0((\mathbf{r}) = \mu \phi_0(\mathbf{r}) \quad (2.9)$$

où  $\phi_0(\mathbf{r})$  est la fonction d'onde macroscopique du condensat et  $\mu$  est le potentiel chimique. La densité d'atomes est donnée par  $n(\mathbf{r}) = |\phi_0(\mathbf{r})|^2$ . Ainsi, la fonction d'onde du condensat  $\phi_0(\mathbf{r})$  est normalisée pour donner le nombre de particules dans le condensat  $N_0 = \int d\mathbf{r} |\phi_0(\mathbf{r})|^2$ .

Le premier terme de gauche décrit l'énergie cinétique, le second le terme d'énergie potentielle provenant du piège, et le dernier décrit l'énergie d'interaction entre particules, proportionnelle à la densité locale  $n(\mathbf{r})$ . La somme de ces énergies donne le potentiel chimique  $\mu$ , qui correspond à l'énergie qu'il faut fournir pour rajouter une particule supplémentaire au système de  $N_0$  particules.

#### Régime de Thomas-Fermi

Considérons le cas d'un condensat comportant un grand nombre de particules  $N_0$ . L'énergie cinétique totale du condensat varie avec  $N_0$  de manière linéaire :  $\langle E_k \rangle \propto N_0$ . L'énergie totale d'interaction varie quant à elle en  $E_{\text{int}} \propto N_0^2$ . Pour un nombre suffisamment grand de particules, il devient possible de négliger le terme d'énergie cinétique dans

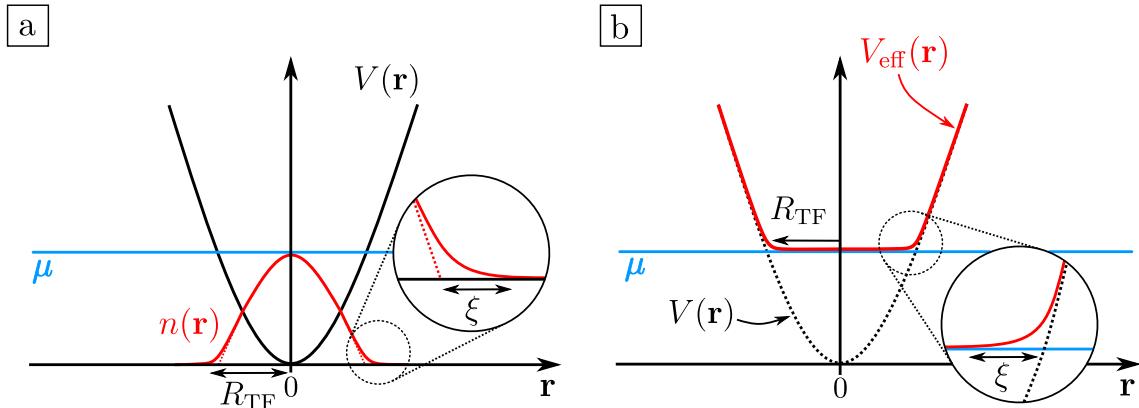


FIGURE 2.2 – a : Profil de densité dans le régime de Thomas-Fermi. La densité est une parabole inversée, liée à la forme parabolique du potentiel. Sur les bords du condensat, la densité s'écarte de la parabole sur une longueur typique appelée longueur de cicatrisation<sup>3</sup>. b : Potentiel effectif ressenti pour des particules individuelles. Ce potentiel effectif suit la forme du potentiel externe, et l'effet des interactions à l'intérieur du condensat écrante le potentiel externe par le potentiel chimique.

l'équation de Gross-Pitaevskii stationnaire : il s'agit du régime de Thomas-Fermi. Dans ce cas, le profil de densité s'écrit

$$n(\mathbf{r}) = \begin{cases} (\mu - V(\mathbf{r}))/g & \text{lorsque } \mu > V(\mathbf{r}) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.10)$$

Le profil de densité est donc une parabole inversée de rayons  $R_{TF,i} = \sqrt{\frac{2\mu}{m\omega_i^2}}$  en considérant le piège harmonique de l'équation 2.2. Ces rayons de Thomas-Fermi ont été déterminés par la condition  $n(\mathbf{r}) = 0$ . Il est intéressant de noter que le potentiel effectif vu par une particule  $V_{\text{eff}}(\mathbf{r}) = V(\mathbf{r}) + gn(\mathbf{r})$  est constant sur l'ensemble du condensat :

$$V_{\text{eff}}(\mathbf{r}) = \begin{cases} \mu & \text{lorsque } \mu > V(\mathbf{r}) \\ V(\mathbf{r}) & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.11)$$

L'énergie d'un atome est donc constante sur l'ensemble du condensat et est donnée par le potentiel chimique.  $\mu$  correspond alors à l'échelle d'énergie au-delà de laquelle le condensat est perturbé par le potentiel. Il est possible d'obtenir une expression pour le potentiel chimique [Pethick and Smith, 2008] :

$$\mu = \frac{1}{2} \left( 15aN_0\hbar^2\bar{\omega}^3 \right)^{2/5} m^{1/5} \quad (2.12)$$

qui vaut environ  $\mu/\hbar \approx 40\text{Hz}$  pour notre expérience.

3. En réalité, l'approximation de Thomas-Fermi décrit bien les zones à l'intérieur des condensats, cependant, il existe une petite région sur les bords du condensat où la densité est faible, et donc l'énergie cinétique ne peut plus être négligée devant l'énergie d'interaction. Cette échelle de longueur s'appelle la longueur de cicatrisation, et est donnée par  $\xi = \sqrt{\frac{\hbar^2}{n_0 mg}}$  avec  $n_0$  la densité moyenne du condensat.  $\xi$  représente donc la longueur sur laquelle le potentiel chimique n'écrante pas le potentiel externe.

## 2.2 Processus d'interaction lumière-matière

Précédemment, nous avons brièvement présenté le phénomène de condensation de Bose-Einstein ainsi que les principales propriétés d'un condensat. En particulier, nous avons identifié  $n\lambda_{dB}^3 \gtrsim 1$  comme un critère de condensation, impliquant l'obtention de nuages denses à très basse température. Il s'agit donc de la ligne à atteindre sur notre dispositif. Dans cette partie, nous allons présenter les différents outils de manipulation d'atomes dont nous disposons, tels que des champs magnétiques, des champs lasers ou encore des radio-fréquences, afin d'obtenir la condensation d'un nuage de rubidium  $^{87}\text{Rb}$ .

### 2.2.1 Le rubidium $^{87}\text{Rb}$

Comme déjà mentionné plusieurs fois, l'espèce atomique utilisée sur notre expérience est le rubidium  $^{87}\text{Rb}$ , le second isotope le plus fréquent après le rubidium  $^{85}\text{Rb}$  (l'abondance naturelle du  $^{87}\text{Rb}$  est de 27.8%). Il s'agit d'un alcalin bosonique (il possède donc un seul électron de valence) avec un spin nucléaire  $\mathbf{I} = 3/2$ . Historiquement, le  $^{87}\text{Rb}$  est l'atome ayant été condensé en premier [Anderson et al., 1995], son choix reposant sur l'existence d'une transition optique cyclante à 780 nm dans sa raie  $D$  ainsi que le développement rapide des technologies laser à cette longueur d'onde. La raie  $D$  est en réalité composée de deux transitions : la raie  $D_1$  correspondant à la transition  $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}$  à 795 nm, et la raie  $D_2$  correspondant à la transition  $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$  à 780 nm. Sauf mention contraire, nous n'utiliserons que la raie  $D_2$  dans la suite de ce manuscrit, la plupart de nos fréquences optiques se trouvant autour de 780 nm. Le choix de l'atome de rubidium est aussi dû à ses bonnes propriétés. En particulier, sa longueur de diffusion  $a_s = 5.3\text{ nm}$  résulte en des taux de collisions relativement élevés, permettant une thermalisation rapide du nuage.

La structure hyperfine de l'état fondamental  $5^2S_{1/2}$  consiste en deux niveaux hyperfins dégénérés  $|F=1\rangle$  et  $|F=2\rangle$  séparés de  $\Delta_{hf} = 6.835\text{ GHz}$ . Chacun de ces états est composé de  $2F+1$  sous-états Zeeman. Une vue simplifiée de cette structure est donnée figure 2.3, et un tableau récapitulatif des principales grandeurs du  $^{87}\text{Rb}$  peut être trouvé table 2.1.

### 2.2.2 Potentiel magnétique

Commençons par décrire l'interaction d'un atome de rubidium avec un champ magnétique statique. Ces champs magnétiques sont couramment utilisés dans les expériences d'atomes ultra-froids pour réaliser des pièges conservatifs à l'aide champs inhomogènes (après un refroidissement laser par exemple). En particulier, l'expérience de Stern & Gerlach montre que la force appliquée aux atomes par un gradient de champ magnétique dépend de l'état interne de l'atome. Explicitons cela.

Le moment cinétique total  $\hat{\mathbf{F}}$  est donné par la somme des moments cinétiques des composants de l'atome :

$$\hat{\mathbf{F}} = \hat{\mathbf{I}} + \hat{\mathbf{L}} + \hat{\mathbf{S}} \quad (2.13)$$

avec  $\hat{\mathbf{I}}$  le spin total nucléaire,  $\hat{\mathbf{L}}$  le moment cinétique orbital et  $\hat{\mathbf{S}}$  le moment cinétique de spin électronique. On a alors un moment magnétique total  $\hat{\mu} = \mu_B(g_I\hat{\mathbf{I}} + g_L\hat{\mathbf{L}} + g_S\hat{\mathbf{S}})$  où les  $g_{I,L,S}$  sont les facteurs de Landé et  $\mu_B$  est le magnéton de Bohr<sup>4</sup>. L'énergie d'interaction

4. L'interaction avec le spin du noyau donne une correction très faible car  $g_I \propto 1/m_P$  avec  $m_P$  la masse

Quantité physique	Symbole	Valeur
Masse	$m$	$1.44 \times 10^{-25} \text{ kg}$
Fréquence de transition $D_2$	$\omega_0$	$2\pi \times 384.230 \text{ THz}$
Longueur d'onde dans le vide ( $D_2$ )	$\lambda_0$	780.241 nm
Largeur naturelle de la transition $D_2$	$\Gamma$	$2\pi \times 6.07 \text{ MHz}$
Fréquence de transition $D_1$	$\omega_{D_1}$	$2\pi \times 377.107 \text{ THz}$
Longueur d'onde dans le vide ( $D_1$ )	$\lambda_{D_1}$	794.979 nm
Largeur naturelle de la transition $D_1$	$\Gamma_{D_1}$	$2\pi \times 5.75 \text{ MHz}$
Séparation hyperfine	$\Delta_{\text{hf}}$	6.834 682 611 GHz
Moment cinétique nucléaire	$I$	$3/2$
Facteur de Landé électronique	$g_S$	2.002319
Facteur de Landé orbital	$g_L$	0.999993
Facteur de Landé nucléaire	$g_I$	$-0.995\,141\,4 \times 10^{-3}$
Intensité de saturation	$I_{\text{sat}}$	1.67 mW/cm <sup>2</sup>
Longueur de diffusion	$a_s$	5.3 nm

TABLE 2.1 – Tableau récapitulatif des grandeurs physiques du rubidium  $^{87}\text{Rb}$  que nous utiliserons dans la suite. Ces valeurs sont tirées de [Steck, 2001].

de ce moment magnétique avec un champ magnétique  $\mathbf{B}$  est donnée par  $\hat{V} = -\hat{\mu} \cdot \mathbf{B}$ . On obtient les énergies propres par la formule de Breit-Rabi, dont l'application aux états  $|F=1\rangle$  et  $|F=2\rangle$  fournit :

$$\begin{aligned} E_{F=2} &= +\frac{h\Delta_{\text{hf}}}{2} \sqrt{1+m_F\beta+\beta^2} \\ E_{F=1} &= -\frac{h\Delta_{\text{hf}}}{2} \sqrt{1+m_F\beta+\beta^2} \end{aligned} \quad (2.14)$$

avec  $\beta \simeq 2\mu_B|B|/h\Delta_{\text{hf}}$ . À faible champ magnétique  $|B| \ll h\Delta_{\text{hf}}/\mu_B$  (régime où  $\beta \ll 1$ ), on retrouve l'effet Zeeman linéaire avec

$$U_{\text{mag}}(\mathbf{r}) = m_F g_F \mu_B |B(\mathbf{r})| \quad (2.15)$$

et  $g_{F=2} = 1/2$  et  $g_{F=1} = -1/2$ . L'utilisation d'un champ magnétique non homogène génère donc un potentiel dépendant de la position, tel que dans l'expérience de Stern & Gerlach. L'utilisation de tels champs inhomogènes est très répandue dans le domaine des atomes ultra-froids, en particulier pour la génération de pièges magnétiques, l'accélération de particules, mais aussi pour réaliser une lévitation magnétique comme c'est le cas sur notre expérience.

### 2.2.3 Forces lumineuses

On se concentre à présent sur l'interaction entre un atome et un champ laser incident. Ce champ laser comporte un grand nombre de photons émis par seconde (typiquement

---

du proton, et  $g_{L,S} \propto 1/m_e$  avec  $m_e$  la masse de l'électron. Ainsi,  $g_I \ll g_{L,S}$  et donc on peut négliger l'effet du spin nucléaire lors de l'application d'un champ magnétique extérieur, voir table 2.1.

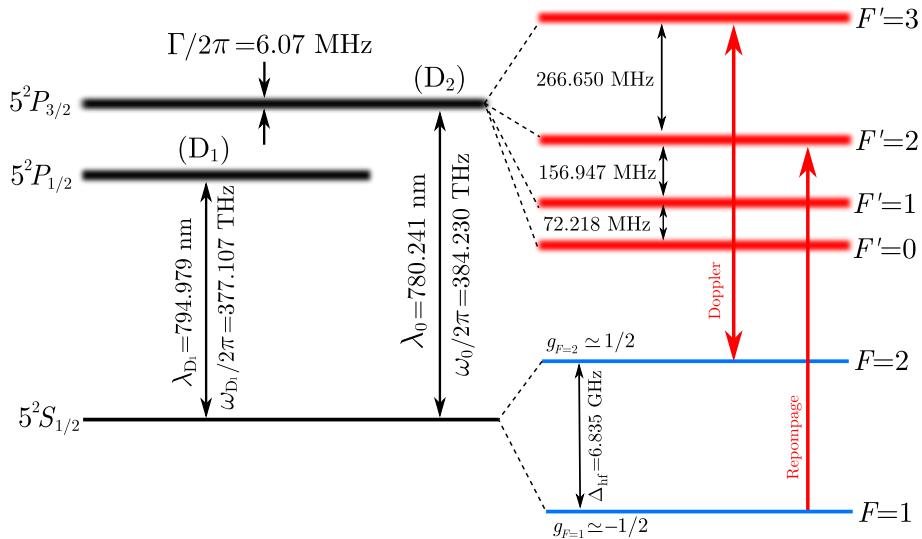


FIGURE 2.3 – **Structure de la raie D du rubidium  $^{87}\text{Rb}$ .** Celle-ci est composée de deux transitions, la  $D_1$  à 795 nm, et la transition  $D_2$  à 780 nm que nous utilisons sur l'expérience. L'état fondamental  $5^2\text{S}_{1/2}$  est dégénéré en deux sous-niveaux hyperfins séparés d'une énergie  $h\Delta_{\text{hf}}$  avec  $\Delta_{\text{hf}} = 6.835 \text{ GHz}$ .

$10^{12}$  photons par seconde pour une puissance de  $1 \mu\text{W}$ ), on peut donc décrire ce champ laser par une onde classique

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \text{Re} \left( E(\mathbf{r}) e^{-i\omega t - i\phi(\mathbf{r})} \epsilon \right) \quad (2.16)$$

dont l'effet sur un atome est donné par le hamiltonien  $H_{\text{AL}} = -\mathbf{D} \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ . Dans la cadre de la théorie de la réponse linéaire, on introduit la polarisabilité atomique  $\alpha(\omega)$  et on montre alors que la force moyenne exercée sur un atome est la somme de deux termes :

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2} \text{Re}(\alpha(\omega)) E(\mathbf{r}) \nabla E(\mathbf{r}) + \frac{1}{2} \text{Im}(\alpha(\omega)) E^2(\mathbf{r}) \nabla \phi(\mathbf{r}) \quad (2.17)$$

Un calcul pleinement quantique est nécessaire pour déterminer la polarisabilité, cependant on peut montrer que pour un système à deux niveaux, on a [Grimm et al., 1999]

$$\alpha(\omega) = 6\pi\epsilon_0 c^3 \frac{\Gamma/\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i(\omega^3/\omega_0^3)\Gamma} \quad (2.18)$$

où  $\omega_0$  est la fréquence de résonance et  $\Gamma$  est la largeur de la transition.

### Potentiel dipolaire

Le premier terme de l'équation 2.17 est proportionnel à la partie réelle de la polarisabilité atomique. Ce terme décrit donc comment un moment dipolaire électrique induit interagit avec le gradient d'intensité lumineuse. Cette force est conservative et dérive d'un potentiel qui est proportionnel à l'intensité lumineuse : on parle de *potentiel dipolaire*. Dans le cas d'un faisceau très désaccordé, ce potentiel s'écrit :

$$U_{\text{dip}}(\mathbf{r}) = \frac{3\pi c^2 I(\mathbf{r})}{2\omega_0^3} \left( \frac{\Gamma}{\omega - \omega_0} - \frac{\Gamma}{\omega + \omega_0} \right) \quad (2.19)$$

avec  $I(\mathbf{r})$  l'intensité lumineuse à la position  $\mathbf{r}$ . Appliquée au  $^{87}\text{Rb}$ , cette expression est valable très loin de résonance : cela signifie que le laser ne voit pas le détail de la raie  $D$ , c'est à dire que le désaccord  $\omega - \omega_0$  doit être très grand devant la structure fine séparant les transitions  $D_1$  et  $D_2$ , et l'onde laser ne voit qu'un système à deux niveaux  $\{5^2S, 5^2P\}$ .

Un tel potentiel présente de nombreux avantages pour les expériences d'atomes ultrafroids. Suivant le signe de la quantité  $\delta = \omega - \omega_0$ , ce potentiel peut être soit attractif ( $\delta < 0$ , on parlera alors de potentiel désaccordé vers le *rouge*), soit répulsif ( $\delta > 0$ , potentiel désaccordé vers le *bleu*). Les atomes seront alors attirés par les maxima d'intensité lumineuse (pour un faisceau désaccordé vers le rouge) ou bien vers les zones d'ombre (pour les faisceaux désaccordés vers le bleu). Un faisceau gaussien focalisé et désaccordé vers le rouge permet ainsi de piéger les atomes en son foyer : la forme gaussienne du faisceau attire les atomes vers le centre du faisceau.

De plus dans cette limite des grands désaccords, ce potentiel est indépendant de l'état interne. Contrairement à un piège magnétique, un piège dipolaire n'est pas sélectif en état de spin et donc offre de nombreuses possibilités grâce à la disponibilité de degrés de liberté internes. Nous tirerons profit de cet avantage de différentes manières dans la suite.

Cependant, l'utilisation de tels désaccords (plusieurs centaines de nanomètres) constraint l'utilisation de forte intensités lumineuses afin d'obtenir des potentiels suffisamment importants. Ainsi, il est courant que les expériences d'atomes ultrafroids utilisent des lasers ayant des puissances de plusieurs Watts<sup>5</sup> focalisés sur de petites tailles, typiquement de l'ordre de 100 μm.

Insistons sur le fait que l'expression 2.19 a été obtenue dans le contexte d'un système à deux niveaux, et donc dans la limite des grands désaccords. Cette approximation n'est plus valable pour des désaccords de quelques nanomètres, le laser pouvant sonder la structure fine, voire la structure hyperfine de l'atome. Cela permet des approches originales telles que la réalisation d'un potentiel dépendant de l'état interne. En revanche, le rapprochement des transitions atomiques rend les atomes susceptibles de subir des processus de diffusions inélastiques de photons via l'émission spontanée, décrits plus bas.

### Force de pression de radiation

Le second terme s'appelle *force de pression de radiation*. Il provient de la partie imaginaire de la polarisabilité atomique, qui caractérise l'absorption de photons par l'atome. Il s'agit donc d'une force inélastique qui résulte d'un grand nombre de cycles d'absorption de photons du faisceau laser et d'émission spontanée dans des directions aléatoires de l'espace<sup>6</sup>. L'impulsion totale cédée par émission spontanée s'annule donc, et en moyenne le transfert d'impulsion ne provient que de l'absorption de photons du faisceau laser comme illustré par le terme de droite de l'équation 2.17. En effet, le gradient de la phase du laser vaut  $\nabla\phi(\mathbf{r}) = \mathbf{k}$ . Cette force est donnée par

$$\mathbf{F}_{\text{PR}} = \hbar \mathbf{k} \Gamma_{\text{sp}} \quad (2.20)$$

avec  $\Gamma_{\text{sp}}$  le taux d'émission spontanée en présence du champ laser, et  $\mathbf{k}$  le vecteur d'onde associé à l'onde laser. L'interprétation est directe : en moyenne, l'atome acquiert une

5. À titre de comparaison, il ne suffit que de quelques milliWatts pour endommager l'œil humain.

6. Pour réaliser de tels cycles, il est nécessaire d'avoir une transition cyclante, c'est à dire de disposer d'un état excité dont la désexcitation renvoie forcément sur l'état d'origine.

impulsion  $\hbar\mathbf{k}$  à un taux  $\Gamma_{\text{sp}}$ . Ce taux vaut :

$$\Gamma_{\text{sp}} = \frac{\Gamma}{2} \frac{s}{1+s} \quad \text{avec} \quad s = \frac{I/I_{\text{sat}}}{1+4\delta^2/\Gamma^2} \quad (2.21)$$

où l'intensité de saturation  $I_{\text{sat}} = \frac{\pi hc\Gamma}{3\lambda_0^3} = 1.67 \text{ mW/cm}^2$  est une constante de l'atome de  $^{87}\text{Rb}$ . La grandeur  $s$  s'appelle le paramètre de saturation. Celui-ci dépend de l'intensité lumineuse incidente (et donc du nombre de photons incidents) ainsi que du désaccord du laser par rapport à la résonance atomique <sup>7</sup>  $\delta = \omega - \omega_0$ . Le paramètre de saturation est maximal en  $\delta = 0$ , c'est à dire lorsque le laser est à résonance. Dans le cas d'un laser très saturant  $s \gg 1$ , la force de pression de radiation s'écrit

$$\mathbf{F}_{\text{PR}} = \frac{\hbar\mathbf{k}\Gamma}{2} \quad (2.22)$$

où le facteur 2 indique que à forte saturation, un atome autant de chance d'être dans l'état excité que dans l'état fondamental. Enfin, mentionnons que pour un atome se déplaçant à une vitesse  $\mathbf{v}$  dans le référentiel du laboratoire, le désaccord devient  $\delta = \omega - \omega_0 - \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}$  par effet Doppler. Nous reviendrons sur ce point lorsque nous décrirons les mécanismes du refroidissement laser.

## 2.2.4 Couplage radio-fréquence

Les outils de manipulation des atomes présentés précédemment offrent la possibilité de créer des potentiels conservatifs (comme le potentiel dipolaire ou le potentiel magnétique) ou encore des forces dissipatives à l'aide la force de pression de radiation. De manière générale, certains de ces outils dépendent de l'état interne de l'atome <sup>8</sup>, une dernière possibilité de manipulation des atomes consiste donc à contrôler leur état électronique. Un bon contrôle de ce degré de liberté permet donc d'augmenter l'efficacité des processus qui en dépendent (le chargement d'un piège magnétique par exemple), ainsi que de proposer des solutions technologiques originales.

Comme présenté section 2.2.1, la séparation entre les états fondamentaux  $|F=1\rangle$  et  $|F=2\rangle$  correspond à une fréquence  $\Delta_{\text{hf}}$  de l'ordre du GHz, donc à une fréquence qui se trouve accessible électroniquement. Un couplage radio-fréquence entre ces états apparaît alors comme un formidable outil de contrôle de l'état interne des atomes, décrit par un système à deux niveaux dont le hamiltonien <sup>9</sup> est donné dans la base  $|F=1\rangle, |F=2\rangle$  par

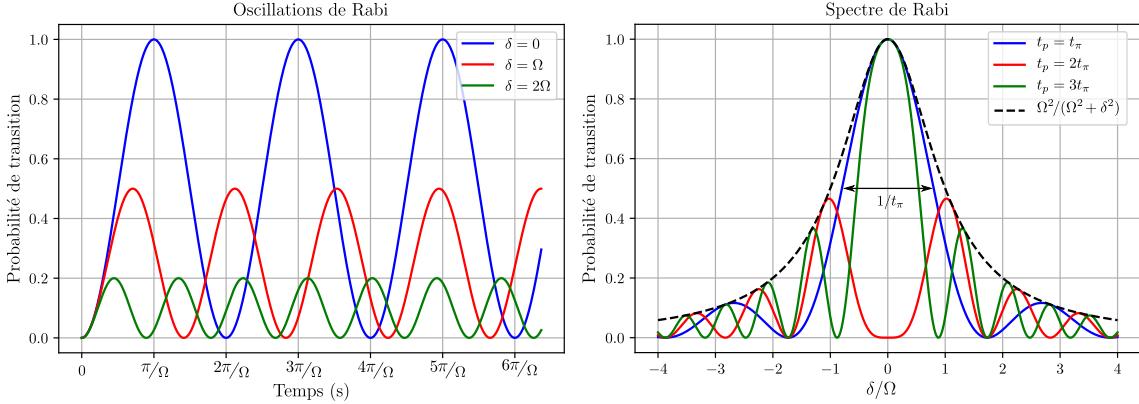
$$\hat{H}(t) = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} -\Delta_{\text{hf}} & \Omega e^{i\omega t} \\ \Omega e^{-i\omega t} & \Delta_{\text{hf}} \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

avec  $\omega$  la fréquence de l'onde radio-fréquence, et  $\Omega$  la pulsation de Rabi qui caractérise l'amplitude rayonnée sur les atomes. En se plaçant dans le référentiel tournant, le hamiltonien

7. L'expression 2.19 n'est valable que dans un régime de faible saturation. L'utilisation de grands désaccords autorise l'utilisation de grosses puissances optiques tout en gardant  $s \ll 1$ . Dans ce régime, on peut estimer le taux d'émission spontanée par  $\Gamma_{\text{sp}}(\mathbf{r}) = \frac{3\pi c^2 I(\mathbf{r})}{2\hbar\omega_0^3} \left( \frac{\omega}{\omega-\omega_0} \right)^3 \left( \frac{\Gamma}{\omega-\omega_0} - \frac{\Gamma}{\omega+\omega_0} \right)^2$ .

8. Le potentiel magnétique dépend bien évidemment de l'état interne, tandis que ce n'est pas le cas du potentiel dipolaire dans la limite des grands désaccords.

9. Le terme de couplage 2.23 est obtenu en appliquant l'approximation de l'onde tournante, c'est à dire que l'on néglige les termes en  $\omega + \Delta_{\text{hf}}$  devant les termes en  $\omega - \Delta_{\text{hf}}$  car on estime qu'ils évoluent rapidement, et donc qu'ils s'apparentent à leur valeur moyenne qui est nulle.



**FIGURE 2.4 – a : Oscillations de Rabi tracées pour différents désaccords.** Les populations oscillent à la fréquence  $\sqrt{\Omega^2 + \delta^2}$  avec une amplitude qui dépend du désaccord. L'amplitude est maximale et atteint 1 lorsque l'onde radio-fréquence est à résonance, et la population maximale transférée décroît avec l'augmentation du désaccord. **b : Spectres de Rabi pour différentes durées d'application  $t_p$ .** Le transfert de population est le plus efficace à résonance ( $\delta = 0$ ), et l'utilisation d'un désaccord entraîne une diminution de l'efficacité de transfert. Les populations maximales transférées sont décrites par l'enveloppe lorentzienne de l'équation 2.25.

du système devient

$$\hat{H} = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} \delta & \Omega \\ \Omega & -\delta \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

avec  $\delta = \omega - \Delta_{\text{hf}}$ . En supposant que le système est dans l'état  $|F = 1\rangle$  à  $t = 0$ , la probabilité d'avoir l'atome dans l'état  $|F = 2\rangle$  est donnée par la formule de Rabi [Basdevant et al., 2002]

$$\mathcal{P}_{|F=2\rangle}(t) = \frac{\Omega^2}{\Omega^2 + \delta^2} \sin^2 \left( \sqrt{\Omega^2 + \delta^2} \frac{t}{2} \right) \quad (2.25)$$

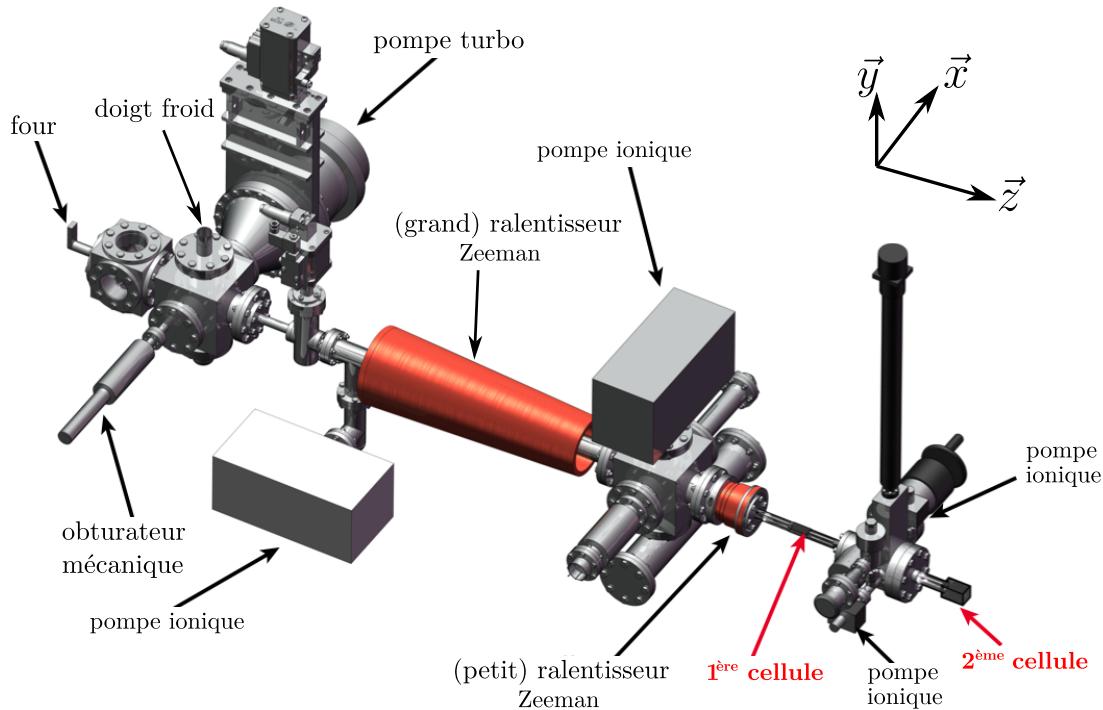
Cette formule met en évidence un caractère résonant des transitions radio-fréquences :

- Dans le cas d'un grand désaccord  $\delta \gg \Omega$ , la probabilité de transition est très faible à n'importe quel instant.
- À résonance  $\delta = 0$ , la probabilité de transition peut atteindre 1, même pour un couplage très faible ( $\Omega$  petit).

Ces caractéristiques sont illustrées figure 2.4. En effet, l'enveloppe lorentzienne représentée figure 2.4b montre les populations maximales transférées, faibles lorsque  $|\delta| > \Omega$ . On retrouve la condition de résonance à  $\delta = 0$ , où l'efficacité de transfert est maximale.

## 2.3 Description d'un cycle expérimental

Dans la partie précédente, nous nous sommes familiarisés avec quelques outils couramment utilisés sur les expériences d'atomes ultrafroids pour piéger et manipuler les atomes. Dans cette nouvelle partie, nous nous pencherons sur l'implémentation de ces outils sur notre expérience afin d'obtenir un condensat de Bose-Einstein de  $^{87}\text{Rb}$ . La présentation qui en sera donnée ici se verra succincte, nous nous contenterons d'illustrer brièvement les



**FIGURE 2.5 – Vue d’ensemble du corps de l’expérience.** Les atomes se trouvent dans un montage sous ultra-vide, composé de deux chambres dans lesquelles les atomes sont manipulés.

différentes étapes de refroidissement qui mènent à la condensation. De nombreux détails pourront être trouvés dans les thèses des doctorants qui ont contribué à faire de cette expérience ce qu’elle est aujourd’hui : [Fauquembergue, 2004], [Riou, 2006], [Bernard, 2010], [Jendrzejewski, 2012], [Muller, 2015], [Denechaud, 2018]…

### 2.3.1 Présentation générale du dispositif

Comme toutes les expériences d’atomes ultra-froids, la manipulation des atomes se déroule sous ultra-vide afin de s’affranchir des conditions extérieures. En particulier, on évite ainsi les collisions avec des particules extérieures à température ambiante, ce qui chaufferait notre gaz et détruirait la cohérence d’un nuage condensé. Une vue d’ensemble de l’enceinte à vide est donnée figure 2.5 qui montre aussi les pompes utilisées en continu pour maintenir le vide. Notre dispositif est composé d’un four chauffé à 120 °C qui éjecte les atomes de rubidium, il s’agit de notre source d’atomes. Un doigt froid refroidi à -30 °C sert de diaphragme et permet de filtrer le jet d’atomes tout en adsorbant les atomes qui sont bloqués afin de pas polluer le vide. Un obturateur mécanique permet de couper le jet lorsqu’on ne souhaite pas accumuler des atomes en cours de cycle. Les atomes sont décélérés dans le ralentisseur Zeeman et capturés dans la première cellule où ils subissent les premières étapes de refroidissement. Ils sont ensuite transportés dans la seconde cellule où ils sont refroidis jusqu’à la condensation. C’est dans cette seconde cellule que se déroulent les expériences de science, on l’appelle alors *Chambre de science*.

### 2.3.2 Première chambre

C'est dans la première chambre que se déroulent les premières étapes de refroidissement du gaz de rubidium. Celles-ci sont dans un premier temps basées sur le refroidissement laser, puis dans un second temps sur un piégeage magnétique et l'évaporation forcée à l'aide d'un couteau radio-fréquence.

#### Refroidissement laser

Le principe du refroidissement laser repose sur la force de pression de radiation, présentée section 2.2.3. Une compréhension du phénomène de refroidissement laser peut être donnée à l'aide du désaccord  $\delta = \omega - \omega_0 - \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}$  dans le cas d'un atome se déplaçant à vitesse  $\mathbf{v}$ . Dans le référentiel de l'atome, la condition de résonance  $\delta = 0$  s'écrit  $\omega_0 = \omega - \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}$ . L'atome va donc absorber un photon d'énergie  $\hbar\omega$  et en émettre un d'énergie  $\hbar\omega_0$  (d'énergie plus grande que le photon absorbé dans le cas d'un décalage vers le rouge par effet Doppler). Il y a donc eu un transfert d'énergie entre l'énergie cinétique et le désaccord. La répétition de tels cycles permet ainsi de transférer beaucoup d'énergie cinétique de l'atome vers le désaccord entre photons absorbés et photons rayonnés.

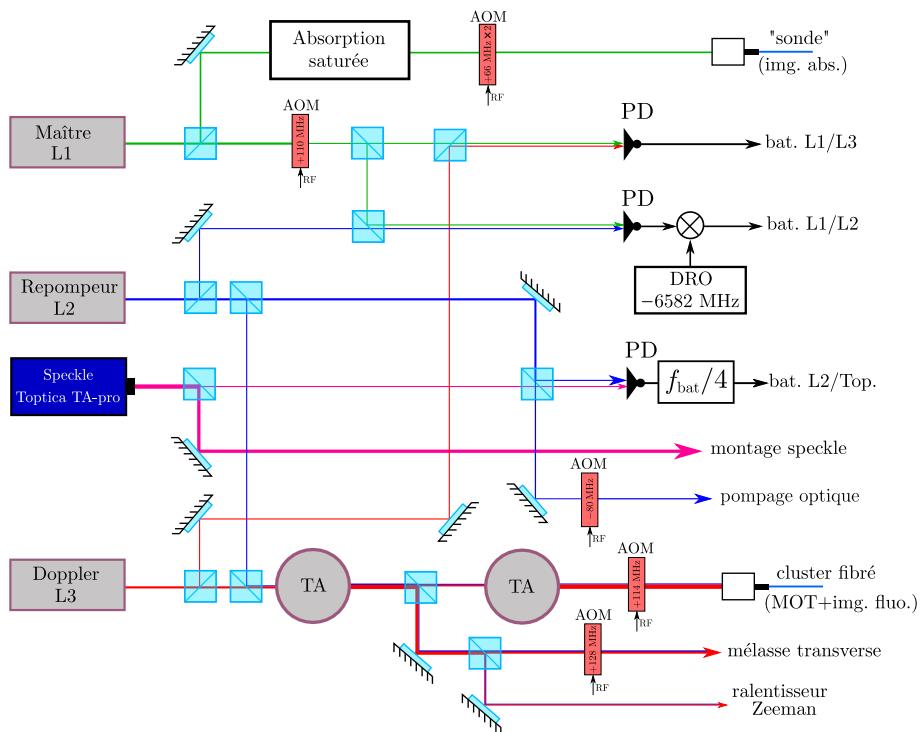
La possibilité de répéter ces cycles d'absorption de photons et d'émission spontanée repose sur l'existence d'une transition cyclante entre les états hyperfins  $|F = 2\rangle$  et  $|F' = 3\rangle$ . La désexcitation de  $|F' = 3\rangle$  renvoie forcément l'atome dans l'état  $|F = 2\rangle$  car les règles de sélection imposent  $F' - F = \{0, \pm 1\}$ . En revanche, on peut accidentellement envoyer des atomes dans l'état excité  $|F' = 2\rangle$  car la séparation avec l'état ciblé  $|F' = 3\rangle$  n'est que de 266 MHz. Statistiquement, un atome visite cet état tous les 50 cycles environ, et sa désexcitation peut faire tomber les atomes dans l'état  $|F = 1\rangle$ . Cet état étant un état noir, pour conserver les atomes, on doit alors utiliser un second laser appelé *repompeur* qui permet de recycler les atomes perdus vers la transition cyclante<sup>10</sup>. Il est accordé sur la transition  $|F = 1\rangle \rightarrow |F' = 2\rangle$ .

Notre dispositif laser se compose alors d'un laser principal de refroidissement accordé sur la transition  $|F = 2\rangle \rightarrow |F' = 3\rangle$ . Il est secondé d'un second laser *repompeur* accordé sur la transition  $|F = 1\rangle \rightarrow |F' = 2\rangle$ . Enfin un dernier laser sert de référence de fréquence pour les deux précédents en étant asservi par absorption saturée. Une représentation schématique de l'ensemble de ces lasers et de leur amplification peut être trouvée figure 2.6.

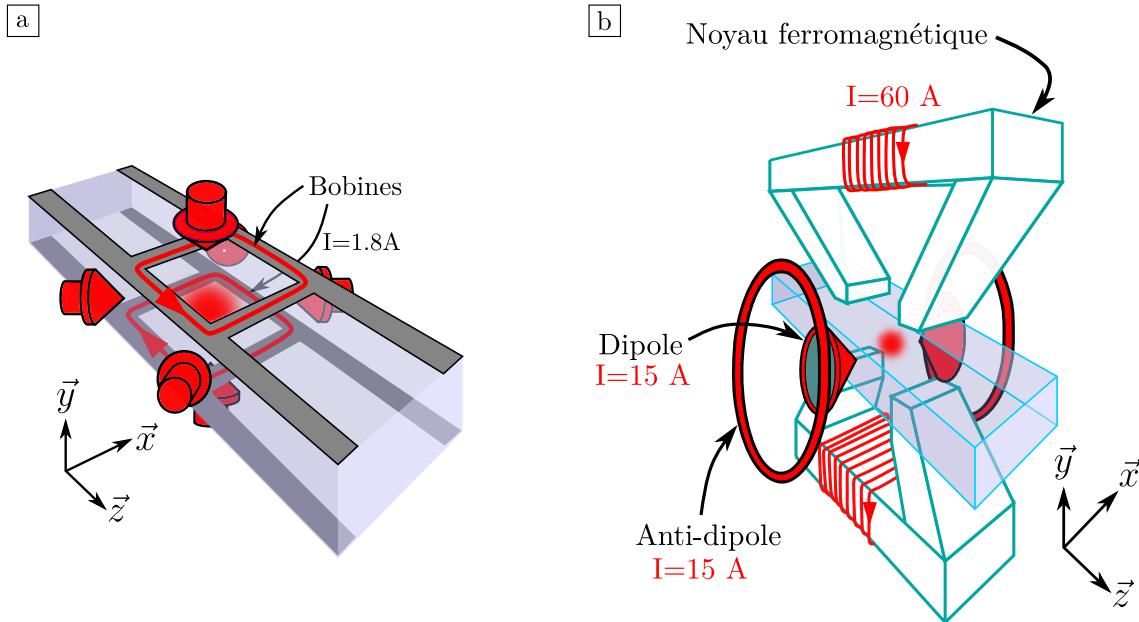
#### Le ralentisseur Zeeman

La première étape consiste à ralentir suffisamment le jet d'atomes pour pouvoir les capturer dans un premier piège. Un laser désaccordé vers le rouge par rapport à la transition cyclante  $|F = 2\rangle \rightarrow |F' = 3\rangle$  permet de réaliser une décélération des atomes à l'aide de cycles d'absorption et d'émission spontanée de photons. Cependant, le ralentissement des atomes entraîne un éloignement de la résonance à cause de l'effet Doppler. Pour palier à ce problème, on applique un champ magnétique pour satisfaire localement la condition de résonance par effet Zeeman. Ce champ est appliqué à l'aide d'une bobine comportant un nombre de tours par unité de longueur variable, représentée figure 2.5 entre le four et la

<sup>10</sup>. À titre d'illustration, le temps de vie du piège magnéto-optique a été mesuré à une dizaine de secondes. Sans le faisceau repompeur, les atomes tombent dans l'état noir  $|F = 1\rangle$  en quelques micro-secondes seulement.



**FIGURE 2.6 – Représentation schématique de notre montage laser.** Le laser maître  $L_1$  sert de référence de fréquence en étant asservi par absorption saturée. Le laser de refroidissement Doppler  $L_3$  est asservi par battements avec  $L_1$ . Le laser repompeur  $L_2$  est lui aussi asservi par battements avec  $L_2$  grâce à l'utilisation d'électronique rapide. Notons enfin que les faisceaux de  $L_2$  et  $L_3$  sont mélangés avant amplification (TA). Les faisceaux arrivant sur les atomes comporteront alors les fréquences provenant de ces deux lasers. Un obturateur mécanique (non représenté) permet de couper le faisceau de  $L_2$  allant vers les amplificateurs.



**FIGURE 2.7 – a : Éléments du piège magnéto-optique.** Il est réalisé à l'aide de trois paires de faisceaux contra-propageants et de deux bobines formant un champ quadrupolaire. Ces bobines sont faites à partir de circuits imprimés posés sur la cellule. **b : Géométrie du piège magnétique.** Un champ quadrupolaire intense est créé selon les directions  $\vec{y}$  et  $\vec{z}$  par un électroaimant. Un champ de biais est généré par deux paires de bobines suivant la direction  $\vec{x}$ . Ce champ possède une courbure longitudinale et est responsable du confinement suivant cette direction.

première chambre. Ainsi, on est capable de réduire la vitesse des atomes de  $100 \text{ ms}^{-1}$  à environ  $20 \text{ ms}^{-1}$  sur une distance de seulement 1 m.

### Le piège magnéto-optique

Une fois les atomes suffisamment ralentis, ils sont capturés dans le piège magnéto-optique (abrégé en *MOT* pour l'anglais *Magneto-Optical Trap*). Celui-ci est composé de trois paires de faisceaux contra-propageants désaccordés vers le rouge d'environ  $\delta = -16 \text{ MHz}$ , de polarisations opposées  $\sigma^+$  et  $\sigma^-$ . Chacun de ces faisceaux possède une puissance d'environ 12 mW. De plus, deux bobines en configuration anti-Helmholtz permettent de générer un champ quadrupolaire, donc un gradient magnétique dans les trois directions de l'espace, afin de créer une force de rappel. On charge environ  $2 \times 10^9$  atomes en moins d'une seconde grâce à la mélasse transverse qui permet de collimater le jet d'atomes et donc d'améliorer le flux. Une fois le chargement saturé, on coupe le champ magnétique pendant quelques millisecondes afin de réduire fortement la température : c'est l'étape de mélasse optique qui permet de descendre la température à environ  $50 \mu\text{K}$ .

### Piège magnétique et évaporation radio-fréquence

Après l'étape de mélasse, on souhaite manipuler les atomes dans un piège magnétique. Afin d'augmenter le nombre d'atomes piégeables magnétiquement, il est nécessaire de manipuler l'état interne des atomes. On procède ainsi à une étape de dépompage en

éteignant le faisceau de repompage et en accordant le faisceau de refroidissement sur la transition  $|F = 2\rangle \rightarrow |F' = 2\rangle$  : en moins d'une milliseconde, les atomes se trouvent dans l'état  $|F = 1\rangle$ , dont seul le sous-état Zeeman  $|F = 1, m_F = -1\rangle$  peut être piégé<sup>11 12</sup>. Afin de maximiser la population de ce sous-état, on allume un faisceau de pompage optique accordé sur la transition  $|F = 1\rangle \rightarrow |F' = 1\rangle$  et polarisé  $\sigma^-$  pendant 40 µs. En parallèle, on allume le champ du dipôle afin de définir un axe de quantification.

Le piège magnétique que l'on utilise est un piège de type *Ioffe-Pritchard*. Il est composé essentiellement de deux éléments :

- Un champ de biais orienté dans la direction  $\vec{x}$ , généré par une paire de bobines (*dipôle*) de configuration légèrement plus éloignée que celle de Helmholtz : on a ainsi une courbure positive dans la direction longitudinale au centre des bobines. Une seconde paire de bobines (*anti-dipôle*) permet d'abaisser le champ constant au centre du piège, et donc de le comprimer [Fauquembergue, 2004].
- Un champ quadrupolaire dans le plan  $(\vec{y}, \vec{z})$  généré par un électroaimant ferromagnétique épais (*quadrupôle*) comportant deux entrefers et deux bobines excitatrices dans deux sens opposés. L'épaisseur importante du matériau magnétique minimise l'effet de l'électroaimant dans la direction  $\vec{x}$ .

Le confinement dans la direction  $\vec{x}$  est donc réalisée par le champ de *dipôle*, tandis que le confinement dans les directions  $\vec{y}$  et  $\vec{z}$  est fait par le *quadrupôle*. La présence du champ de dipôle permet aussi de s'affranchir des pertes par transition Majorana, le champ ne s'annulant à aucun endroit de l'espace. On obtient ainsi un nuage piégé magnétiquement comportant environ  $1 \times 10^9$  atomes tous dans le même sous-état zeeman à une température de  $\sim 300 \mu\text{K}$ .

Une fois le nuage thermalisé, on procède à une étape de refroidissement évaporatif grâce à la méthode de *couteau radio-fréquence*. Le principe du refroidissement évaporatif sera détaillé section 3.4, mais on peut le résumer de la manière suivante :

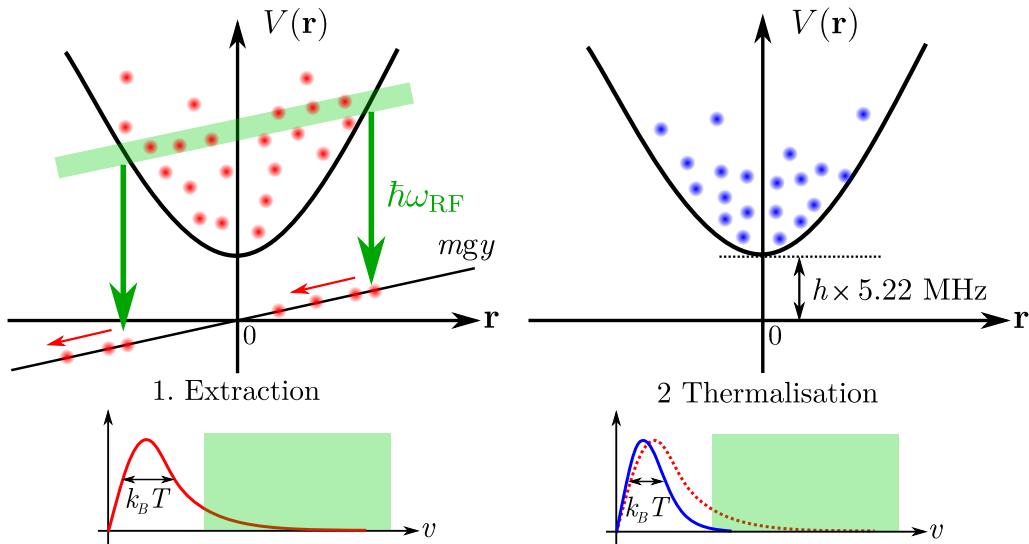
- On tronque le piège de telle sorte que quelques atomes très énergétiques (la queue de la distribution de vitesses de Maxwell-Boltzmann) puisse s'échapper du piège.
- Les collisions entre les particules étant restées dans le piège permettent au système de retourner à l'équilibre thermique à une température plus basse.

La troncature du piège se fait à l'aide d'une onde radio-fréquence rayonnée par les bobines MOT. Celle-ci induit une transition de l'état piégé  $|F = 1, m_F = -1\rangle$  à l'état non piégé  $|F = 1, m_F = 0\rangle$  lorsque la condition de résonance  $\hbar\omega_{\text{RF}} = m_F g_F \mu_B B(\mathbf{r})$  est vérifiée. En abaissant progressivement la fréquence rayonnée pendant une dizaine de secondes, on obtient finalement un nuage de  $70 \times 10^6$  atomes à une température de  $10 \mu\text{K}$ .

---

11. Il est le seul des trois sous-états Zeeman de *etatF1* à avoir le produit  $g_F m_F > 0$ , c'est à dire qu'il s'agit d'un état *Low Field Seeker*, qui est attiré par les zones de faible champ magnétique. En effet, c'est à l'aide d'un minimum de champ magnétique que l'on réalise ce piège, le théorème de Wing interdisant les maxima de champ magnétique.

12. Des huit sous-états Zeeman fondamentaux, il s'agit de celui ayant la plus grande probabilité d'occupation tout en étant piégeable, justifiant son choix.



**FIGURE 2.8 – Principe de l'évaporation radio-fréquence.** L'application d'une radiofréquence permet de tronquer le piège magnétique, et d'éliminer les atomes les plus énergétiques. L'énergie moyenne par particule étant plus basse, la température s'en retrouve abaissée après thermalisation.

### 2.3.3 Chambre de science

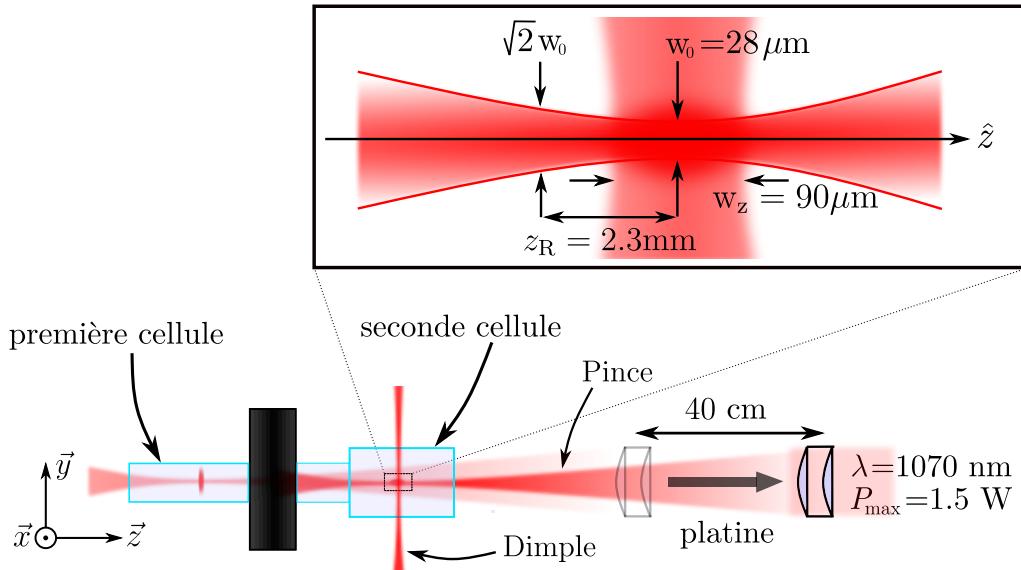
Après ces premières étapes de refroidissement, les atomes sont transportés dans une seconde cellule où l'on procède à une évaporation tout-optique pour franchir le seuil de condensation. La raison d'être de cette seconde cellule est de profiter d'un maximum d'accès optiques tout en s'affranchissant de l'environnement magnétique de la première chambre, en particulier celui du ferromagnétique. Nous nous contenterons ici de présenter les grandes lignes des éléments de cette seconde chambre, de nombreux détails pourront être trouvés dans la thèse d'Alain Bernard [Bernard, 2010], dans la thèse de Fred Jendrzejewski [Jendrzejewski, 2012] et de Kilian Muller [Muller, 2015]. De plus, certains de ces éléments ont été modifiés au cours de ma thèse et une étude plus approfondie en sera présentée dans le chapitre 3.

#### Transport dans une pince optique et piège dipolaire croisé

Après évaporation radio-fréquence, on transfert le nuage dans une pince optique. Il s'agit d'un piège dipolaire créé par focalisation sur les atomes d'un faisceau laser de longueur d'onde  $\lambda = 1070\text{ nm}$  et de puissance estimée d'environ 1.5 W. Dans le plan focal, ce faisceau a une taille  $w_0 = 28\text{ }\mu\text{m}$  et la distance de Rayleigh vaut donc  $z_R = \pi w_0^2 / \lambda = 2.3\text{ mm}$ . On obtient ainsi  $10 \times 10^6$  atomes à une température de  $10\text{ }\mu\text{K}$  aux alentours du foyer de la pince<sup>13</sup>.

Le transport dans la seconde chambre se fait à l'aide d'une platine de translation montée sur coussin d'air *Aerotech ABL80040*. Les optiques de focalisation de la pince se trouvent

13. Ce faible taux de transfert entre le piège magnétique et la pince provient du mauvais recouvrement spatial entre ces deux pièges. La pince est très allongée suivant la direction  $\vec{z}$ , tandis que le piège magnétique est étendu suivant la direction  $\vec{x}$ . Cette géométrie est un héritage des débuts de cette expérience, originellement utilisée pour étudier le laser à atomes.



**FIGURE 2.9 – Illustration du transport et du piège optique.** Les atomes sont capturés autour du foyer de la pince dans la première chambre, et le point de focalisation est déplacé de 40 cm à l'aide d'une platine de translation. Une fois le transport terminé, on allume un second faisceau de piégeage vertical (*dimple*).

sur cette platine, on déplace ainsi les atomes de 40 cm en moins de 2 s, comme illustré figure 2.9. On estime l'efficacité de transfert à 75%, mesurée en effectuant un aller-retour pour retourner dans la première chambre.

Une fois les atomes arrivés dans la seconde chambre, un second faisceau de piégeage dipolaire de longueur d'onde 1070 nm et de puissance 7 W est allumé afin de comprimer le nuage suivant la direction  $\vec{z}$  qui correspond à la direction longitudinale de la pince. Ce faisceau *Dimple* est de forme elliptique, de tailles  $180 \mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$  dans les directions  $\vec{x}$  et  $\vec{z}$  respectivement. Étant donnée sa grande longueur de Rayleigh (de l'ordre du centimètre), on suppose que le piégeage vertical induit est négligeable devant toutes les autres sources de piégeage. Ainsi, dans le piège dipolaire croisé, le confinement suivant les directions  $\vec{x}$  et  $\vec{y}$  est fait par la pince, tandis que le confinement suivant la direction  $\vec{z}$  est fait par le faisceau vertical<sup>14</sup>, comme illustré figure 2.9. À ce stade, on estime disposer de  $3 \times 10^6$  atomes à une température de  $10 \mu\text{K}$ .

Enfin, une dernière étape d'évaporation est requise pour franchir le seuil de condensation. Succinctement, celle-ci consiste à diminuer la puissance des lasers afin de diminuer la profondeur des potentiels de piégeage de telle sorte que les atomes les plus énergétiques puissent s'échapper. Cette étape sera étudiée plus en détails dans la partie 3.4.

### Lévitation magnétique

Une contrainte liée à l'étude la localisation d'Anderson réside dans les grands temps de propagation dans le désordre requis. Dans l'expérience visant à observer la localisation d'Anderson à trois dimensions, plusieurs secondes d'évolution dans le désordre ont été

14. La forme allongée du dimple dans la direction  $\vec{x}$  fait que le piégeage dans cette direction est très faible comparé à celui de la pince. De plus, cela rend le piège optique tolérant face à un léger défaut d'alignement.

nécessaires [Jendrzejewski et al., 2012], ce qui n'est pas possible en présence de la gravité. En conséquence notre expérience dispose d'une lévitation magnétique permettant de s'affranchir de la gravité et donc de multiplier nos possibilités expérimentales. Celle-ci a été mise en place durant la thèse d'Alain Bernard et de nombreux détails concernant ce système et ses performances se trouvent dans son manuscrit. Cependant, la lévitation magnétique a fait l'objet d'une attention particulière durant ma thèse, aussi une étude approfondie en sera donnée dans la partie 3.2. Donnons en tout de même quelques caractéristiques.

Le principe de la lévitation magnétique est de compenser la force de pesanteur à l'aide d'un gradient magnétique. Pour l'état  $|F = 1, m_F = -1\rangle$  qui est *Low Field Seeker*, il s'agit d'un gradient de  $30 \text{ G cm}^{-1}$ . Cependant, le théorème de Wing impose une valeur minimale aux fréquences de piégeage dues à la conservation du flux magnétique :

$$\sum_{i=x,y,z} \omega_i^2 \geq \left| \frac{mg^2}{2m_F g_f \mu_B B_0} \right| \quad (2.26)$$

avec  $g$  l'accélération de la pesanteur et  $B_0$  la norme du champ magnétique à la position des atomes. Une stratégie de réduction de ces fréquences de piégeage (les  $\omega_i$  sont positifs pour l'état  $|F = 1, m_F = -1\rangle$ ) consiste à augmenter fortement le champ  $B_0$ , on utilise alors des bobines pour créer un tel champ, qui peut monter jusqu'à 2000 G, entraînant des fréquences de piégeage de l'ordre de  $\omega_i/2\pi \sim 0.2 \text{ Hz}$ . Une version simpliste du design de notre lévitation est donnée figure 2.10.

Une autre stratégie couramment utilisée par l'équipe est de se placer dans l'état  $|F = 2, m_F = -2\rangle$  qui est *High Field Seeker*, il sera donc expulsé de la lévitation par les courbures résiduelles. Il s'agit pour nous d'un avantage puisque cela favorise le processus d'évaporation, de plus on ne pourra pas attribuer à la lévitation un éventuel arrêt de l'expansion du nuage dans l'étude de la localisation d'Anderson. Pour atteindre cet état, on applique une transition radio-fréquence dans le piège optique croisé avant évaporation.

Pour finir, citons un dernier avantage offert par la lévitation magnétique : la compensation de la gravité n'entraîne pas d'effet SAG, c'est à dire que la gravité ne vient pas "pencher" le potentiel de notre piège optique. Nous avons donc la possibilité de pousser l'évaporation optique jusque dans un domaine où la gravité aurait normalement dû tirer les atomes en dehors du piège, nous pouvons ainsi évaporer beaucoup plus loin et atteindre des températures extrêmement basses.

### Refroidir encore plus

L'assimilation d'un condensat de Bose-Einstein à une onde de matière monochromatique  $|k = 0\rangle$  nécessite de pouvoir négliger la largeur de distribution de vitesses  $\Delta k$ , et implique donc d'obtenir des nuages extrêmement froids. Bien que la lévitation magnétique nous permette d'obtenir des températures particulièrement basses, le refroidissement peut être poussé encore plus loin.

Une première technique consiste en une décompression du nuage à l'aide de l'ouverture adiabatique du piège. Cette décompression se traduit par une diminution des fréquences de piégeage, que l'on obtient en changeant la taille des faisceaux de piégeage. En pratique, il nous suffit de reculer le plan de focalisation de la pince de 4.5 mm en une seconde à l'aide de la platine de translation comme illustré figure 2.12a. La température obtenue est alors

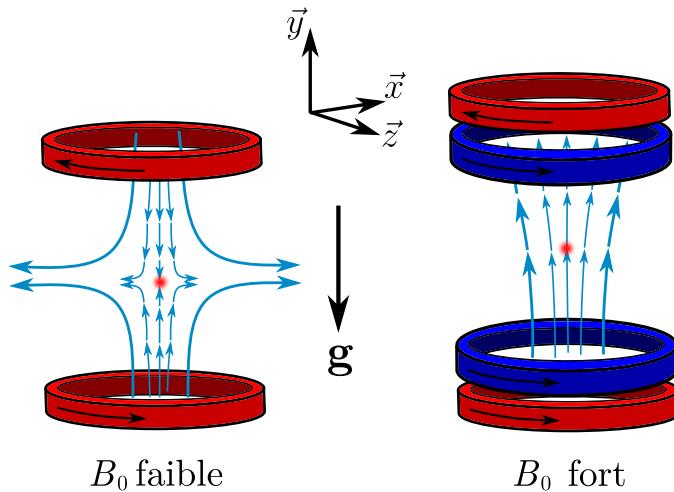


FIGURE 2.10 – **Design simplifié de la lévitation magnétique.** Un gradient magnétique est appliqué aux atomes grâce à une paire de bobines parcourues par des courants opposés. La conservation du flux magnétique entraîne des gradients dans les autres directions de l'espace. L'application d'un fort champ de biais créé par d'autres bobines permet de minimiser l'impact de ces gradients et de diminuer les fréquences de piégeage (ou d'anti-piégeage) associées.

donnée par le théorème d'équipartition de l'énergie :

$$T' = \frac{\omega_r'}{\omega_r} T < T \quad (2.27)$$

avec  $\omega_r$  la fréquence de piégeage de la pince dans la direction radiale. L'abaissement de la température est donc obtenu par diminution de la densité du nuage, c'est à dire par dilution. Cette étape se déroule en même temps que l'évaporation optique.

À la fin du cycle d'évaporation et d'ouverture adiabatique, il reste environ  $2 \times 10^5$  atomes dont environ 50% forment un condensat de Bose-Einstein. Le potentiel chimique de la partie condensée est estimée à  $\mu/h = 40\text{ Hz}$ , et la température de la fraction thermique est d'environ 5 nK.

Après l'extinction du piège, l'énergie d'interaction du nuage est convertie en énergie cinétique, le nuage s'étend alors librement grâce à la lévitation. L'évolution de la taille du nuage donne alors accès à la distribution de vitesse, en particulier à sa dispersion  $\Delta k \simeq 0.5\text{ }\mu\text{m}^{-1}$ . Une dernière technique reposant aussi sur le principe de la dilution permet de réduire davantage cette dispersion. Cette technique dite de *refroidissement par delta-kick* consiste à transférer l'énergie d'interaction en énergie cinétique en éteignant le piège, puis à figer le mouvement des atomes en appliquant un potentiel harmonique pendant un bref instant. L'énergie cinétique est alors transformée en énergie potentielle, disparaissant à l'extinction du piège. Une illustration de ce procédé est donnée figure 2.12b.

Une approche classique permet de justifier cela. En supposant que l'expansion des atomes est balistique, la position des atomes après un temps d'expansion  $t_{\text{exp}}$  suffisamment grand est donnée par leur vitesse initiale :

$$\mathbf{r}(t_{\text{exp}}) = \mathbf{v} t_{\text{exp}} \quad (2.28)$$

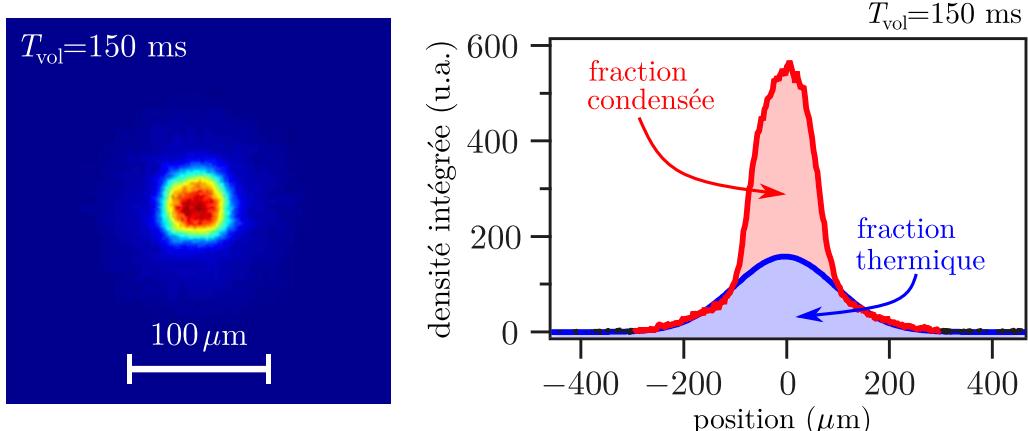


FIGURE 2.11 – **Image expérimentale d'un condensat de Bose-Einstein.** Cette image correspond à celle d'un condensat après expansion pendant un temps de vol de 150 ms. L'image de droite correspond au profil de la densité intégrée suivant une direction, et montre la double structure témoignant d'une partie condensée. La partie condensée a un profil parabolique (en rouge), tandis que la partie thermique est de forme gaussienne (en bleu).

Et appliquons un kick de potentiel harmonique pendant un temps  $\Delta t$ . La vitesse des atomes à la fin de ce kick est donnée par

$$\dot{\mathbf{r}}(\Delta t) = -\mathbf{r}\omega \sin(\omega\Delta t) + \mathbf{v} \cos(\omega\Delta t) \quad (2.29)$$

avec  $\omega$  la fréquence du piège. On peut trouver  $\Delta t$  tel que  $\dot{\mathbf{r}}_i = 0$  :

$$\Delta t = \frac{1}{\omega} \arctan \left( \frac{1}{t_{\text{exp}}\omega} \right) \quad (2.30)$$

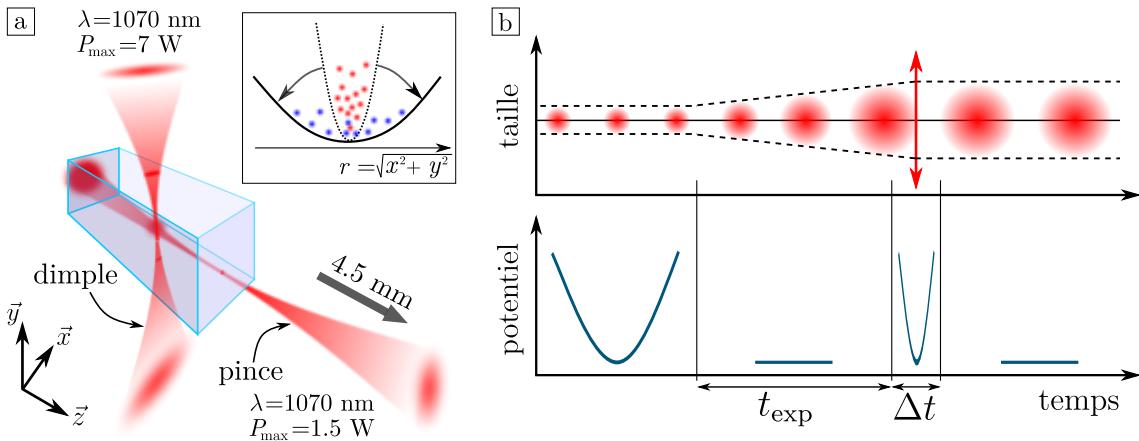
On remarque que  $\Delta t$  ne dépend pas de la vitesse initiale des atomes : on peut donc geler l'ensemble du nuage en appliquant un potentiel harmonique pendant la bonne durée de kick<sup>15</sup>. La mise en œuvre expérimentale de cette technique est détaillée dans le manuscrit de thèse de Kilian Muller [Muller, 2015] et témoigne de résultats impressionnantes : la dispersion en vitesse s'est abaissée à  $\Delta k \simeq 0.15 \mu\text{m}^{-1}$ . La température effective associée est alors de  $T \sim 150 \text{ pK}$ , et en tenant compte de la taille du nuage de l'ordre de  $\Delta r \sim 30 \mu\text{m}$ , on s'approche à un ordre de grandeur de la limite de Heisenberg  $\Delta r \hbar \Delta k \simeq 10 \hbar / 2$ .

### 2.3.4 Imagerie

À la fin de la majorité de nos cycles expérimentaux, nous souhaitons obtenir des informations à propos de notre gaz d'atomes. Une grande partie de ces informations peut être extraite d'une image du nuage après extinction du piège, image que l'on obtient à l'aide d'une caméra et l'utilisation de lasers à résonance avec les atomes<sup>16</sup>. L'utilisation

15. Une approche équivalente consiste à dire que la force de rappel est proportionnelle à la distance parcourue par les atomes, qui est proportionnelle à la vitesse initiale. L'instant où les vitesses s'annulent ne dépend donc pas de la vitesse initiale des atomes.

16. L'utilisation de lasers à résonance conduit inévitablement à la destruction du nuage sur notre expérience. Il est donc nécessaire de répéter l'ensemble du cycle expérimental pour obtenir une seconde image des atomes.



**FIGURE 2.12 – a : Principe de l'ouverture adiabatique.** Le déplacement du point de focalisation de la pince permet d'augmenter la taille du faisceau au niveau des atomes. La fréquence de piégeage en est alors diminuée, et on abaisse alors la température par dilution. **b : Illustration du refroidissement par *delta-kick*.** L'extinction du piège entraîne l'étalement du nuage, et le transfert de l'énergie d'interaction en énergie cinétique. On peut ensuite *focaliser* les atomes à l'aide d'un *kick* de potentiel, en transformant l'énergie cinétique en énergie potentielle, supprimée à l'extinction du piège.

d'un retard (appelé *temps de vol* et abrégé en *TOF* pour l'anglais *Time Of Flight*) entre l'extinction du piège et la prise de l'image est extrêmement courant fournit de précieux renseignements.

### Dispositif d'imagerie

L'expérience est équipée de trois caméras *EMCCD C9102* de chez *Hamamatsu*, chacune comportant une matrice de  $1000 \times 1000$  pixels de taille  $8\text{ }\mu\text{m} \times 8\text{ }\mu\text{m}$ . Ces trois caméras sont contrôlées via l'outil d'acquisition d'images de *MATLAB*, qui permet aussi de récupérer et traiter les images obtenues. L'acquisition des images est déclenchée de manière externe par le séquenceur.

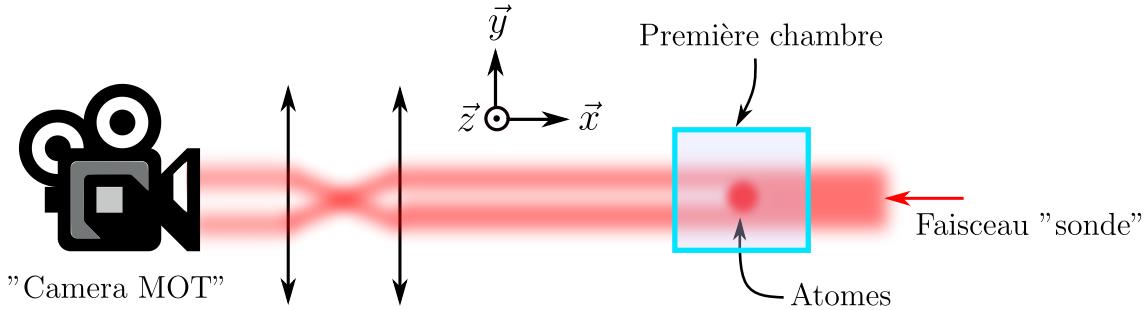
Une première caméra acquiert des images des atomes dans la première chambre selon l'axe horizontal  $\vec{x}$  avec un grossissement de 1, la zone imageable est donc de  $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ . Il est possible d'utiliser cette caméra pour de l'imagerie par absorption (représentée figure 2.13) aussi que pour de l'imagerie par fluorescence grâce à un montage  $4f$ . Néanmoins, l'observation selon une direction induit forcément une intégration de la densité suivant cette direction : on ne peut mesurer qu'une densité intégrée.

$$n_{2D}(y, z) = \int dx n(x, y, z) \quad (2.31)$$

avec  $n$  la densité à trois dimensions.

Les deux autres caméras sont positionnées autour de la chambre de science selon l'axe horizontal  $\vec{x}$  et vertical  $\vec{y}$ . Toutes deux voient le nuage au travers d'un système optique de grossissement 3<sup>17</sup>, conduisant à une résolution de  $2.71\text{ }\mu\text{m}$  pour une zone imageable de  $2.71\text{ mm} \times 2.71\text{ mm}$ . Seule de l'imagerie par fluorescence est utilisable dans cette chambre, en revanche il est possible d'utiliser ces deux caméras simultanément pour obtenir les

17. Ce grossissement a été mesuré en observant la chute libre du nuage en l'absence de la lévitation.



**FIGURE 2.13 – Imagerie par absorption.** Un faisceau collimaté est envoyé sur les atomes, qui absorbent une partie des photons qui traversent le nuage. Le signal détecté à la caméra correspond à "l'ombre" des atomes, et la comparaison avec une image du faisceau incident sans atomes permet de remonter à la densité atomique intégrée selon la direction longitudinale.

densités intégrés suivant deux directions  $n_{2D}(y, z)$  et  $n_{2D}(x, y)$  pour le même nuage.

### Imagerie par absorption

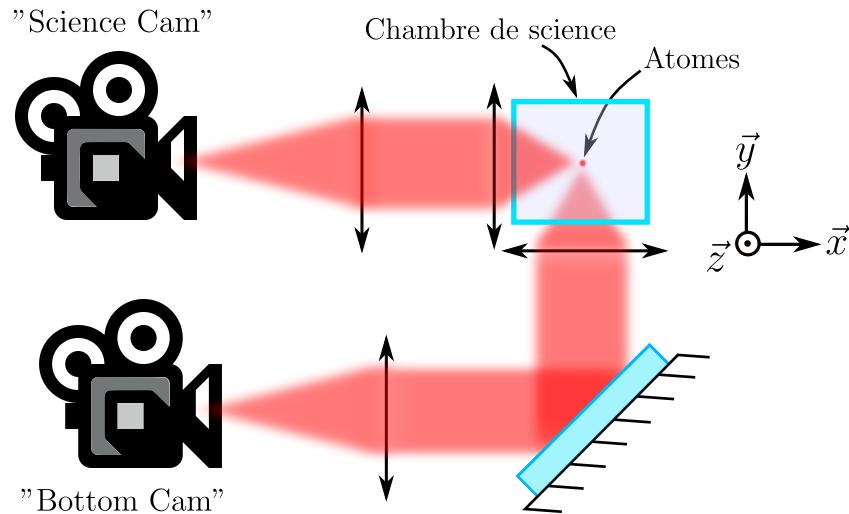
Le principe de l'imagerie par absorption repose sur la loi de Beer-Lambert. En effet, lorsque qu'un faisceau laser traverse un milieu, son absorption dépend directement de la densité du milieu en particules absorbantes (la densité atomique dans notre cas). Pour sonder cette densité atomique, on envoie donc un faisceau laser à résonance directement sur les atomes et la caméra comme illustré figure 2.13. Dans un régime de très basse saturation  $s \ll 1$ , on peut montrer que la section efficace d'absorption de photons  $\sigma$  est indépendante de l'intensité incidente  $I_0(y, z)$ . En pratique, on garde la puissance du faisceau *sonde* en dessous de  $100 \mu\text{W}$  pour s'en assurer. Le faisceau *sonde* correspond à une impulsion lumineuse d'une durée de  $50 \mu\text{s}$  réalisée par un laser à résonance avec la transition  $|F = 2\rangle \rightarrow |F' = 3\rangle$  et permet ainsi de mesurer la densité atomique dans l'état  $|F = 2\rangle$ .

Afin de mesurer aussi les atomes qui sont dans l'état  $|F = 1\rangle$ , on procède à un transfert de population vers l'état  $|F = 2\rangle$  à l'aide d'une impulsion du faisceau repompeur accordé sur la transition  $|F = 1\rangle \rightarrow |F' = 2\rangle$  pendant une durée de  $40 \mu\text{s}$ . Ce transfert est réalisé à la fin du temps de vol, juste avant le déclenchement de la caméra.

L'application de la loi de Beer-Lambert permet de déterminer la densité atomique intégrée suivant l'axe longitudinal :

$$n_{2D}(y, z) = \frac{1}{\sigma} \ln \left( \frac{I_0(y, z)}{I(y, z)} \right) \quad (2.32)$$

L'opération de reconstruction du profil de densité atomique nécessite donc deux images : une image des atomes absorbant une partie du faisceau *sonde*, et une image de ce faisceau sans les atomes pour connaître le profil d'intensité  $I_0(y, z)$ . En pratique, on prend une troisième image afin de soustraire le bruit de fond. De plus, une bonne reconstruction du profil nécessite des contraintes supplémentaires. En effet, nous nous fixons de travailler dans un régime où la sonde ne sature pas la caméra (cela fixe une borne supérieure pour l'intensité du faisceau), et où l'absorption de photons n'est pas totale dans les régions les plus denses.



**FIGURE 2.14 – Dispositif d'imagerie par fluorescence pour la chambre de science.** Une caméra capte les photons de fluorescence émis par les atomes selon une direction horizontale (*Science Cam*), tandis qu'une autre capte ceux émis vers le bas avec un transport d'image (*Bottom Cam*). Les faisceaux de fluorescence ne sont pas représentés ici (selon l'axe  $\vec{z}$ ).

### Imagerie par fluorescence

Le principe de l'imagerie par fluorescence consiste à éclairer les atomes avec de la lumière à résonance, puis à détecter la lumière que les atomes diffusent comme illustré figure 2.14. Pour cela, on envoie des faisceaux très saturants  $s \gg 1$  sur les atomes afin que le taux d'émission spontanée ne dépende plus de l'intensité incidente. Un avantage de cette technique par rapport à l'imagerie par absorption est sa capacité à détecter de très faibles nombres d'atomes, rendu possible grâce à l'amplification des caméras. Un deuxième avantage réside dans la simplicité de sa mise en œuvre : l'imagerie dans la première chambre est réalisée à l'aide des faisceaux MOT. L'imagerie de la seconde chambre est quant à elle réalisée à l'aide de deux autres faisceaux dédiés. Les faisceaux d'imagerie sont à résonance avec la transition  $|F = 2\rangle \rightarrow |F' = 3\rangle$  et permettent donc de sonder les atomes se trouvant dans l'état  $|F = 2\rangle$ . Comme pour l'imagerie par absorption, il est aussi possible d'adresser les atomes qui sont dans l'état  $|F = 1\rangle$ . Pour cela, on superpose aux faisceaux de fluorescence le faisceau repompeur<sup>18</sup>, accordé sur  $|F = 1\rangle \rightarrow |F' = 2\rangle$  pendant toute la durée de l'impulsion lumineuse, qui est typiquement de 50μs.

L'intensité fluorescée captée dans le plan d'imagerie est alors donnée par :

$$I_{\text{fluo}}(y, z) = \frac{\Omega}{4\pi} \frac{s}{1+s} \frac{\Gamma \hbar \omega_0}{2} n_{2D}(y, z) \quad (2.33)$$

avec  $\Omega \simeq \pi ON^2$  l'angle solide dans lequel les photons de fluorescence sont captés par le système d'imagerie d'ouverture numérique  $ON \sim 0.4$ .

Théoriquement, une seule image suffit à obtenir le profil de densité atomique. Cependant, on décide de prendre une seconde image avec les faisceaux de fluorescence allumés afin de soustraire un éventuel bruit dû à ces faisceaux. Pour des raisons de simplicité de

18. Les faisceaux de refroidissement laser et de fluorescence comportent déjà une partie de repompeur : le mélange se fait avant les amplificateurs optiques et il est possible de couper la partie repompeur à l'aide d'un obturateur mécanique, voir figure 2.6.

configuration des caméras, on décide aussi de prendre une troisième image du bruit de fond, non utilisée pour le calcul de densité atomique.

Étant donné le nombre de paramètres non parfaitement connus dans la formule 2.33, il est nécessaire de calibrer cette méthode d'imagerie. La calibration du nombre d'atomes se fait par comparaison avec l'imagerie par absorption. Si la comparaison est directe dans la première chambre, celle de l'imagerie dans la chambre de science est un peu plus délicate. La méthode retenue par l'équipe consiste à calibrer l'efficacité du transfert par la pince optique à l'aide d'allers-retours pour déterminer le nombre d'atomes attendu dans la seconde chambre.



### 3. Mises à jour de l'expérience

Nous avons vu dans le chapitre précédent comment, expérimentalement, nous pouvons créer une onde de matière obtenue par la condensation de Bose-Einstein. Nous avons ainsi présenté les principaux outils dont nous disposons pour manipuler les atomes et la manière dont nous en tirons profit sur notre dispositif. Une telle plateforme requiert une quantité importante de matériels variés qu'il est nécessaire d'entretenir, de réparer, voire de remplacer.

Dans ce nouveau chapitre, nous nous pencherons sur les modifications apportées à l'expérience au cours de ma thèse. Dans la première partie, nous parlerons d'informatique et plus particulièrement du contrôle de l'expérience. Dans un second temps, nous caractériserons la lévitation magnétique suite à une avarie sur le circuit de refroidissement à eau. Ensuite, nous calibrerons le piège dipolaire dont le laser source a été changé. Pour terminer, nous discuterons de l'amélioration de l'évaporation optique permise par les changements précédents.

#### 3.1 Contributions au système informatique de l'expérience

Souvent absente des présentations des expériences, l'informatique occupe pourtant une place primordiale dans les dispositifs d'atomes ultra-froids. Le contrôle simultané et de manière séquentielle des différents équipements de l'expérience, souvent précis à la micro-seconde, n'est possible qu'à l'aide d'un ordinateur disposant de sorties de tension contrôlables. Cet ordinateur, appelé *séquenceur*, constitue le cerveau de l'ensemble du dispositif et contrôle tous les éléments nécessaires à la manipulation des atomes.

Le second aspect où l'informatique se rend indispensable réside dans l'acquisition et le traitement d'images. Le contrôle des caméras et l'extraction des quantités physiques à partir d'images expérimentales nécessite l'utilisation d'un ordinateur et d'au moins un logiciel adapté.

De manière générale, les ordinateurs sont les éléments du dispositif avec lesquels

l'expérimentateur interagit le plus. Dans cette partie, on présentera donc les changements informatiques ayant eu lieu durant ma thèse.

### 3.1.1 Contrôle de l'expérience : passage à la suite Cicero

Une modification majeure a été le changement du séquenceur de l'expérience. Le précédent système développé par André Villing, ingénieur électronicien du laboratoire maintenant retraité, était piloté de manière programmatique depuis le logiciel Matlab. À des fins de maintenance ainsi que de meilleures performances, le nouveau séquenceur est d'origine commerciale et est basé sur du matériel *National Instruments* :

- Un ordinateur *PXIe-8840* dans un châssis *PXIe-1078* qui alimente aussi les cartes de génération de signaux.
- Deux cartes numériques *PXIe-6535* de 32 voies chacune.
- Deux cartes analogiques *PXIe-6738* de 32 voies  $\pm 10\text{V}$  chacune et codées sur 16 bits.

En addition, un circuit logique programmable (*FPGA*) *XEM3001* provenant de *Opal-Kelly* permet de générer une horloge de fréquence variable pour le matériel *National Instruments*. La justification de cette horloge de fréquence variable réside dans la grande variabilité de la durée des différentes étapes d'une expérience d'atomes ultra-froids : l'expérience peut rester dans le même état plusieurs secondes (pendant le chargement d'un MOT par exemple) tout comme elle doit pouvoir changer d'état pendant quelques microsecondes seulement (pendant l'imagerie par exemple). Une séquence durant typiquement 30 s discrétisée toutes les microsecondes pour un minimum d'une cinquantaine de voies saturerait alors la mémoire de l'ordinateur.

L'écriture de la séquence se fait à présent grâce à la suite *Cicero Word Generator*, développée au *MIT* dans le groupe de Wolfgang Ketterle [Keshet and Ketterle, 2013]. Cette suite comporte deux logiciels qui fonctionnent selon une architecture client/serveur. Le client *Cicero* est une interface graphique dans laquelle l'utilisateur écrit une séquence sous la forme d'une suite d'étapes comme illustré figure 3.1. Au lancement d'un cycle expérimental, *Cicero* envoie les données de séquence au serveur *Atticus* qui calcule alors les consignes des cartes ainsi que l'horloge variable à appliquer [Keshet, 2008].

Grâce à cette architecture client/serveur, il est possible de connecter une interface *Cicero* à plusieurs serveurs. Nous avons ainsi développé un serveur supplémentaire<sup>1</sup> afin de faciliter notre traitement de données. Celui-ci enregistre les principales données de séquence<sup>2</sup> à chaque cycle.

Ce changement de séquenceur ouvre de nouvelles perspectives en augmentant le nombre de voies utilisables (16 voies analogiques codées sur 12 bits et 48 voies numériques avec le précédent système) tout en permettant la génération de signaux arbitraires (auparavant limités à des morceaux de rampes).

---

1. Une attention particulière a été accordée à n'apporter aucune modification au code source de la suite *Cicero* excepté dans l'environnement de ce serveur. Les environnements de *Cicero*, *Atticus* et les environnements communs n'ont subit aucun changement pour s'assurer de la compatibilité avec la version compilée 1.64rev7 de la suite.

2. Il s'agit du nom de séquence, de l'heure de lancement, de l'ensemble des variables, des étapes, des groupes d'étapes et de la dernière consigne du piège dipolaire avant le temps de vol.

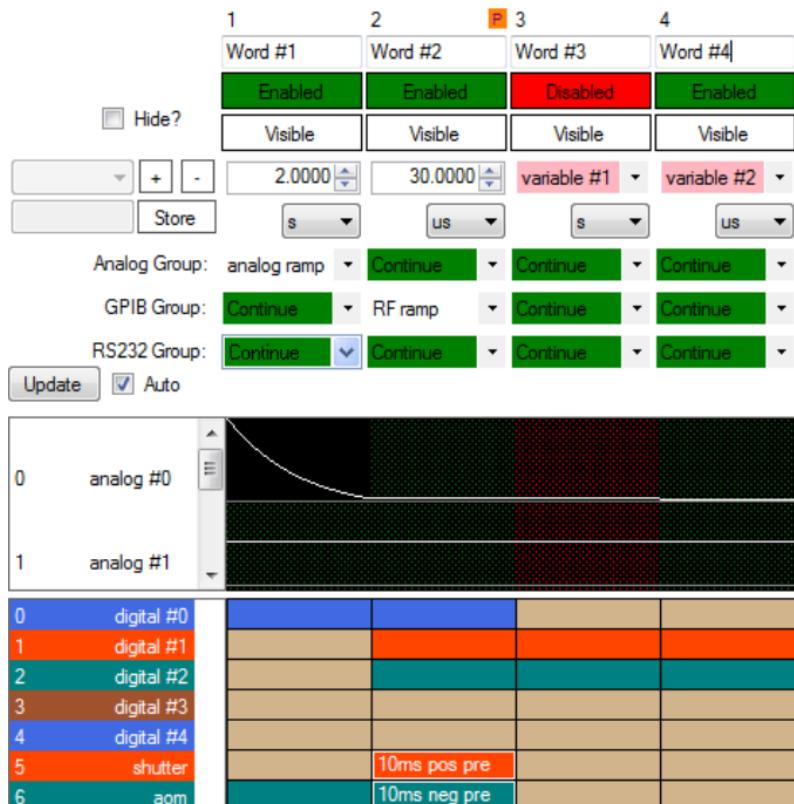


FIGURE 3.1 – Capture d'écran de *Cicero*. Une séquence est une suite d'étapes (des colonnes dans l'interface) pendant lesquelles on peut faire des motifs avec les voies analogiques. Les voies numériques changent d'état en général entre deux étapes. Il est possible de désactiver certaines étapes et d'utiliser des variables. Figure tirée de [Keshet and Ketterle, 2013].

### 3.1.2 Développement d'une nouvelle interface d'acquisition et de traitement d'images

Comme présenté dans la partie 2.3.4, les caméras que l'on utilise sur l'expérience sont configurées et contrôlées via le logiciel Matlab. En particulier, l'acquisition et le traitement des images se faisait à l'aide d'une interface commune avec l'ancien séquenceur. Son remplacement a donc eu un impact important sur le fonctionnement de la partie imagerie.

En conséquence, nous avons réalisé une nouvelle interface graphique permettant de configurer les caméras, d'acquérir et de traiter les images, d'enregistrer les données et de contrôler tout les éléments non adressables depuis *Cicero*. Le cahier des charges de cette nouvelle interface est donc le suivant :

- Gestion des trois caméras, avec possibilité de faire l'acquisition simultanée sur les deux caméras de la chambre de science<sup>3</sup>.
- Imagerie par absorption et par fluorescence.
- Calcul en direct des grandeurs physiques pour chaque image.
- Lecture des données de *Cicero* récupérées grâce au serveur que nous avons développé.
- Programmation en début de cycle des sources radio-fréquence utilisées pour l'évaporation radio-fréquence et la manipulation de l'état de spin dans la chambre de science<sup>4</sup>.
- Enregistrement de l'ensemble des données et des paramètres du cycle pour un futur traitement.

L'utilisation de cette nouvelle interface a donc permis de centraliser les données générées par l'acquisition d'images en n'ayant plus besoin d'un ordinateur supplémentaire (et de la synchronisation associée). De plus, ce changement a permis de s'affranchir de plusieurs canaux de communication, les libérant ainsi pour le contrôle d'instruments. Enfin, l'utilisation et le fonctionnement de cette nouvelle interface Matlab sont simplifiés, permettant d'opérer avec une plus grande facilité les changements à venir sur l'expérience.

## 3.2 Calibration de la lévitation magnétique

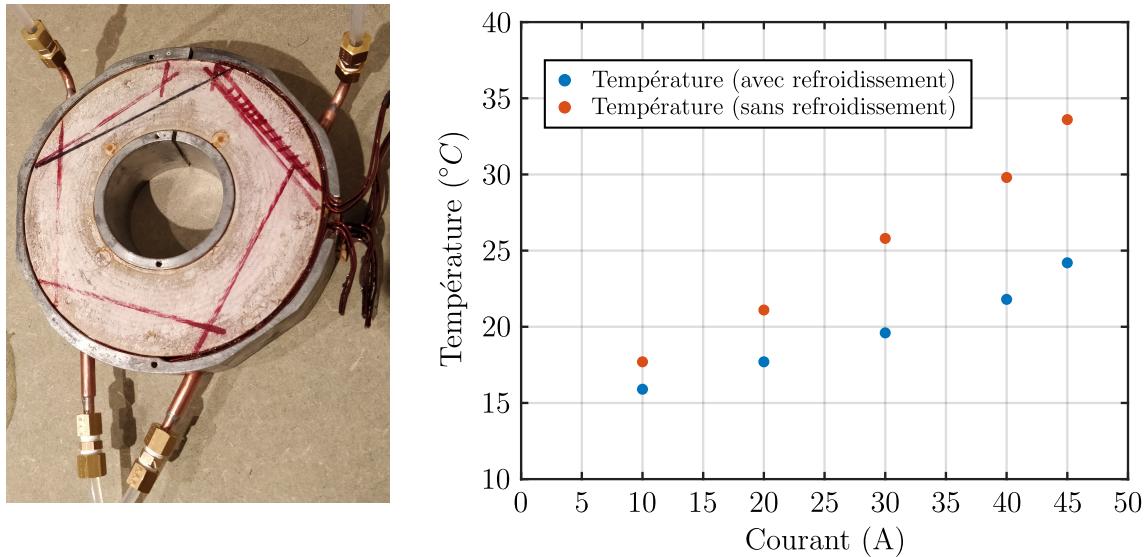
Comme présenté partie 2.3.3, la lévitation magnétique est un élément essentiel de notre expérience. En plus d'être un pré-requis pour l'étude de la localisation d'Anderson à trois dimensions, celle-ci nous permet de manière plus générale d'obtenir des échantillons particulièrement froids. Son bon fonctionnement est donc une priorité pour notre expérience.

Malheureusement, une avarie dans le circuit de refroidissement de la lévitation a conduit à son démontage. Les modifications apportées avant remontage ayant pu conduire à une modification du comportement magnétique du système, une nouvelle calibration des champs générés a été menée.

---

3. Un ordinateur supplémentaire était nécessaire pour le contrôle de la caméra *bottom*, pilotée via une autre interface. Il fallait donc synchroniser ces deux ordinateurs qui enregistraient chacun leurs fichiers de données.

4. Cette programmation en début de cycle est rendue possible grâce à l'utilisation d'un *FileSystemWatcher* provenant d'une bibliothèque .NET utilisable dans Matlab. Un fichier texte contenant les données du cycle en cours est généré en début de séquence par le serveur que nous avons développé, déclenchant alors automatiquement sa lecture par l'interface.



**FIGURE 3.2 – a : Refroidissement de la lévitation magnétique.** L'un des supports des bobines de la lévitation est maintenant refroidi à l'aide de deux tubes en cuivre le traversant. Auparavant, l'eau circulait directement dans le support dans un circuit percé illustré par les traits rouges. Les tubes en cuivre ont pu être installés en rendant une partie de ce circuit débouchant. **b : Efficacité de refroidissement.** Ces mesures ont été réalisées dans des conditions proches de véritables cycles expérimentaux. Le même courant a été appliqué pendant 10 s sur toutes les bobines à la fin de séquences habituelles. La température a été mesurée après la répétition d'au moins 30 cycles et en s'assurant de sa stabilisation.

Dans cette partie, nous présenterons dans un premier temps notre système de lévitation ainsi que les modifications qui y ont été apportées. Ensuite, nous nous pencherons sur les méthodes utilisées pour calibrer le système après sa réinstallation sur l'expérience, en commençant par des expériences d'oscillations puis à l'aide transitions radio-fréquences.

### 3.2.1 Implémentation de la lévitation magnétique

L'ensemble du système de la lévitation magnétique a été développé alors que l'équipe se dirigeait vers les expériences de localisation d'Anderson à trois dimensions. De nombreux détails de conception pourront être retrouvés dans le manuscrit de thèse d'Alain Bernard [Bernard, 2010], mais rappelons les éléments nécessaires à la suite.

La lévitation magnétique est composée de plusieurs bobines collées dans un support en aluminium, qui sert aussi de réservoir thermique à l'aide d'un refroidissement à eau. Après de lourds travaux de débouchage et d'étanchéité, ce refroidissement est à présent effectué par le contact entre le support en aluminium et la circulation d'eau dans deux tubes en cuivre encastrés<sup>5</sup>. L'efficacité de ce refroidissement est illustrée figure 3.2.

Ces supports, disposés de part et d'autre de la cellule, comportent chacun trois bobines.

5. Auparavant, l'eau circulait directement dans des trous percés dans le support en aluminium. Le débouchage de ces trous leur a fait perdre leur étanchéité, et après quelques essais infructueux, nous avons retenu la solution de deux tubes de cuivre encastrés et débouchants. De nombreux tests électriques ont été menés sur les bobines tout au long de leur maintenance pour s'assurer de l'absence de dégradation.

Les deux paires de bobines les plus proches de la cellule créent un champ de biais au niveau des atomes, dans des configurations légèrement plus rapprochée que celle de Helmholtz pour les bobines les plus proches de la cellule et légèrement plus éloignée pour les autres<sup>6</sup>. Enfin, la paire de bobines la plus éloignée permet de créer un gradient magnétique qui permet de lutter contre la gravité.

Le champ magnétique au niveau des atomes peut alors être écrit

$$\mathbf{B} = \left(\frac{b'}{2}x\right)\vec{x} + \left[B_0 - b'y + b''\left(y^2 - \frac{x^2+z^2}{2}\right)\right]\vec{y} + \left(\frac{b'}{2}z\right)\vec{z}, \quad (3.1)$$

où  $b'$  correspond au gradient magnétique généré par les bobines de *Gradient*, les plus éloignées de la cellule. Le paramètre  $b''$  est la courbure du champ généré par l'écart des bobines de *Biais* à la configuration de Helmholtz. Le potentiel magnétique étant proportionnel à la norme du champ, celle-ci est donnée à l'ordre deux par

$$B = B_0 - b'y + b''y^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{b'^2}{4B_0} - b''\right)(x^2 + z^2), \quad (3.2)$$

où le terme linéaire est celui qui permet de compenser la gravité.

Comme mentionné précédemment, il existe une limite pour les fréquences de piégeage (formule 2.26) qui décroît avec la norme du champ magnétique. Une stratégie usuelle est donc de créer un champ aussi fort que possible, qui est d'environ 2000 G avec notre système (correspondant à un courant maximal de 200 A). Pour de tels champs, le potentiel magnétique n'est plus décrit par l'effet Zeeman linéaire, mais par la formule de Breit-Rabi 2.14. En revanche, pour une petite zone autour du centre de la lévitation, on peut simplifier l'étude en supposant que le champ change peu  $B \simeq B_0$ . On peut ainsi définir un facteur de Landé local

$$\tilde{g}_{F,m_F}(B_0) = \frac{1}{m_F \mu_B} \frac{dE}{dB}(B_0), \quad (3.3)$$

obtenu à l'aide d'un développement limité de la formule de Breit-Rabi. La physique derrière cette approche est de considérer l'effet Zeeman linéaire sur un état dont la réponse dépend du champ de Biais  $B_0$ . La valeur du gradient nécessaire pour compenser la gravité peut alors être donnée par

$$b' = \frac{mg}{m_F \tilde{g}_{F,m_F}(B_0) \mu_B}. \quad (3.4)$$

Cette dépendance est illustrée figure 3.3 pour les différents états internes d'intérêt dans cette thèse :  $|F=1, m_F=-1\rangle$ ,  $|F=2, m_F=+1\rangle$  et  $|F=2, m_F=-2\rangle$ . Il est possible de déduire de cette dépendance une calibration des bobines de gradient à partir de couples  $\{I_{\text{Gradient}}, I_{\text{Biais}}\}$  permettant de compenser précisément la gravité. Le gradient généré s'écrit alors  $b' = c_G I_G$  avec le facteur de calibration  $c_G = 0.66 \text{ G cm}^{-1} \text{ A}^{-1}$ . Notons également trois résultats remarquables de la figure 3.3 :

- L'état  $|F=2, m_F=-2\rangle$  nécessite un gradient indépendant du biais magnétique pour être lévité.
- Les états  $|F=1, m_F=-1\rangle$  et  $|F=2, m_F=+1\rangle$  sont lévités pour le même gradient à bas champ.

6. L'intérêt de cette configuration est de contrôler la courbure du champ au niveau des atomes indépendamment de la valeur du champ. Il suffit de jouer sur l'équilibre des courants dans les différentes paires de bobines pour changer la courbure.

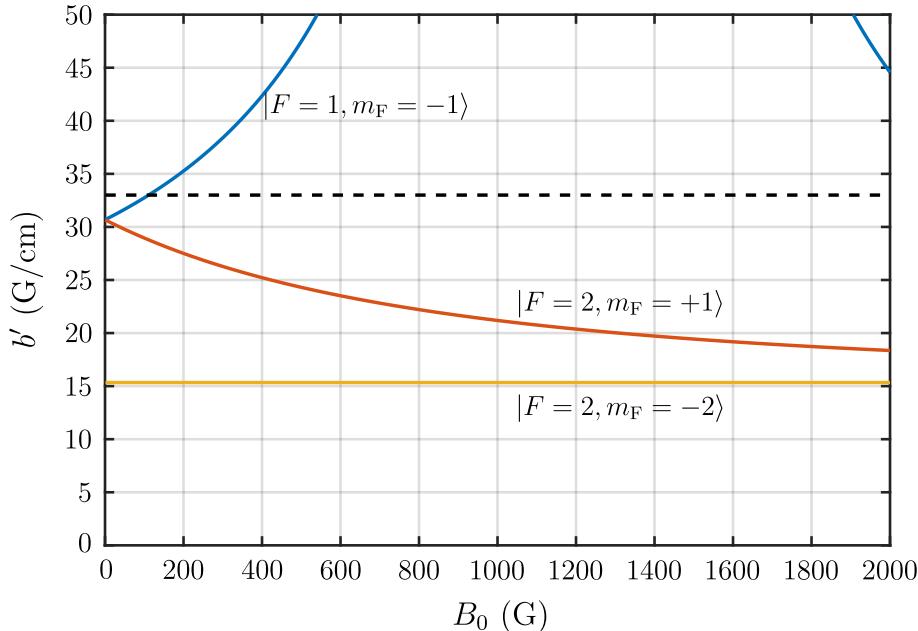


FIGURE 3.3 – **Gradient nécessaire pour compenser la gravité.** La valeur du gradient magnétique à appliquer pour léviter dépend de l'état électronique, mais aussi du biais magnétique  $B_0$  par la formule de Breit-Rabi. L'état  $|F = 1, m_F = -1\rangle$  ne peut être lévité qu'à bas champ, l'alimentation des bobines de gradient ne pouvant délivrer plus de 50 A (limite tracée en pointillés).

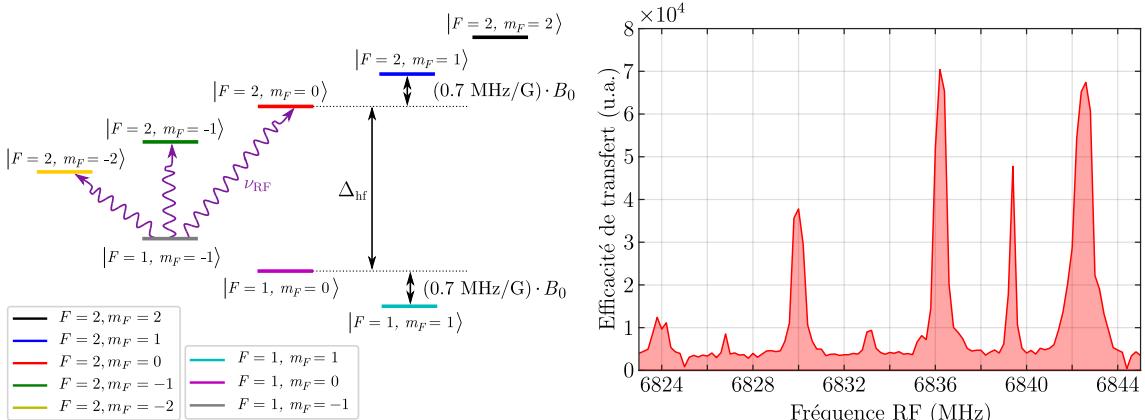
- L'état  $|F = 1, m_F = -1\rangle$  ne peut être lévité que pour des champs inférieurs à environ 150 G, le gradient nécessaire pour contrer la gravité augmentant avec le champ magnétique.

Plusieurs stratégies expérimentales de lévitation s'offrent alors. La première provient de l'état  $|F = 2, m_F = -2\rangle$  qui peut être lévité tout en gardant la valeur du champ de biais comme un degré de liberté, on peut alors réaliser des lévitations très décomprimées. Il s'agit de l'approche utilisée pour la mesure du temps de diffusion élastique, présentée chapitre ???. Une autre possibilité est que les états  $|F = 1, m_F = -1\rangle$  et  $|F = 2, m_F = +1\rangle$  peuvent coexister dans le champ de lévitation, on peut ainsi utiliser l'état interne de l'atome comme degré de liberté tout en étant lévité. Cette stratégie a par exemple été utilisée pour la mesure des fonctions spectrales [Volchkov et al., 2018].

### 3.2.2 Calibration par radio-fréquences

Cette dernière stratégie rend possible l'approche novatrice de désordre dépendant de l'état interne, qui impose de travailler à un *biais magique*  $B_0^* = 3.229\text{G}$  pour lequel les susceptibilités magnétiques des états  $|F = 1, m_F = -1\rangle$  et  $|F = 2, m_F = +1\rangle$  sont identiques [Denechaud, 2018]. La valeur précise de ce champ magique demande alors une connaissance fine des caractéristiques du dispositif de génération des champs magnétiques de l'expérience.

À ces fins, la mesure précise de ces champs magnétiques a été effectuée par spectroscopie radio-fréquence. Son principe repose sur le transfert de population entre l'état d'origine  $|F = 1, m_F = -1\rangle$  et les états  $\{|F = 2, m_F = -2\rangle, |F = 2, m_F = -1\rangle, |F = 2, m_F = 0\rangle\}$  acces-



**FIGURE 3.4 – a : Principe de la spectroscopie radio-fréquences.** En balayant la fréquence de l'onde radio-fréquence appliquée, on adresse les différentes transitions entre sous-états Zeeman de  $|F = 1\rangle$  et  $|F = 2\rangle$  dont la séparation dépend du champ magnétique. **b : Spectre radio-fréquence.** Lorsque l'onde radio-fréquence est à résonance, on transfère des atomes initialement dans l'état  $|F = 1\rangle$  vers l'état  $|F = 2\rangle$ . La présence de sept résonances équidistantes indique une dépolarisation partielle du nuage<sup>7</sup>, les règles de sélection imposant  $\Delta m_F = \{\pm 1, 0\}$ . Le champ magnétique extrait de ce spectre est alors d'environ 4.4 G.

sibles, dont la séparation en énergie dépend du champ magnétique. Ainsi, lorsque la radio-fréquence satisfait la condition de résonance  $\nu_{RF} = \Delta_{hf} + \delta\nu(B)$  avec  $\delta\nu(B)$  le décalage par effet Zeeman, une partie des atomes sera transférée dans l'un des sous-états de  $|F = 2\rangle$ . Le principe de cette spectroscopie est illustré figure 3.4.

Cette mesure a été effectuée dans le piège dipolaire croisé, et étant donné le très grand désaccord du faisceau de piégeage, on peut considérer que les déplacements lumineux induits sur les états  $|F = 1\rangle$  et  $|F = 2\rangle$  sont identiques. La séparation entre les états considérés n'en sera donc pas affectée. Il est ensuite possible d'imager sélectivement les atomes dans l'état  $|F = 2\rangle$  en coupant la partie du faisceau d'imagerie provenant du laser repompeur.

En relevant le spectre des transitions radio-fréquences, on accède ainsi à la valeur du champ magnétique au niveau des atomes à l'aide du décalage Zeeman :

$$\delta\nu(B) \simeq -(m_{F_2} - m_{F_1}) \times 0.7 \text{ MHz G}^{-1} \times B . \quad (3.5)$$

En réalisant cette opération pour différents courants appliqués aux bobines générant les champs de biais, on peut ainsi calibrer les champs magnétiques de biais :

$$B = \sqrt{(B_x + b_{0x})^2 + (B_y + b_{0y})^2 + (B_z + b_{0z})^2} , \quad (3.6)$$

où  $B_i = c_i I_i$  est la composante du champ rayonné dans la direction  $\vec{i}$  qui dépend du courant appliqué  $I_i$  via le facteur de calibration  $c_i$ .  $b_{0i}$  est la composante du champ rémanent dans cette même direction, souvent négligeable devant le champ rayonné pour des courants usuels. Cependant à bas courant, on peut en déduire toutes les composantes du champ naturellement présent dans la cellule. Il est également possible de déterminer un courant seuil pour lequel les alimentations haute-puissance des bobines de lévitation commencent à faire circuler le courant. L'ensemble de ces grandeurs est donné table 3.1.

7. Cette dépolarisation a été confirmée par une analyse Stern-Gerlach.

Grandeur	Valeur
Calibration Biais A $c_A$	$4.704 \text{ G A}^{-1}$
Calibration Biais B $c_B$	$6.180 \text{ G A}^{-1}$
Calibration Compensation X $c_x$	$4.903 \text{ G A}^{-1}$
Calibration Compensation Z $c_z$	$4.969 \text{ G A}^{-1}$
Courant seuil Biais A $I_{0,A}$	$< 1 \text{ mA}$
Courant seuil Biais B $I_{0,B}$	$0.345 \text{ A}$
Champ rémanent $b_{0x}$	$0.089 \text{ G}$
Champ rémanent $b_{0y}$	$0.426 \text{ G}$
Champ rémanent $b_{0z}$	$-0.416 \text{ G}$

TABLE 3.1 – **Calibration des champs de biais dans la chambre de science.** Les champs rémanents  $b_{0i}$  correspondent aux champs extérieurs dans la direction  $\vec{i}$ . Le champ magnétique généré dans la cellule est proportionnel au courant parcourant les bobines  $B_i = c_i \times (I_i - I_{0,i})$  avec  $I_{0,i}$  le courant seuil, qui correspond à la consigne minimale à appliquer pour le courant circuler dans les bobines.

Toutes ces mesures sont en accord avec celles réalisées à l'aide d'un gaussmètre dans la limite d'une déviation de 10% , que l'on attribue à un défaut de positionnement du gaussmètre, celui-ci ne pouvant être placé à l'intérieur de la cellule.

### 3.2.3 Étude du piégeage

Il est primordial que les atomes se trouvent au centre de la lévitation car il s'agit de l'endroit où le champ magnétique est le plus homogène, et cette condition est d'autant plus importante alors nous nous orientons vers des lévitations à bas champ. En effet, c'est dans ce régime de bas champ que l'effet de piégeage de la lévitation est le plus fort.

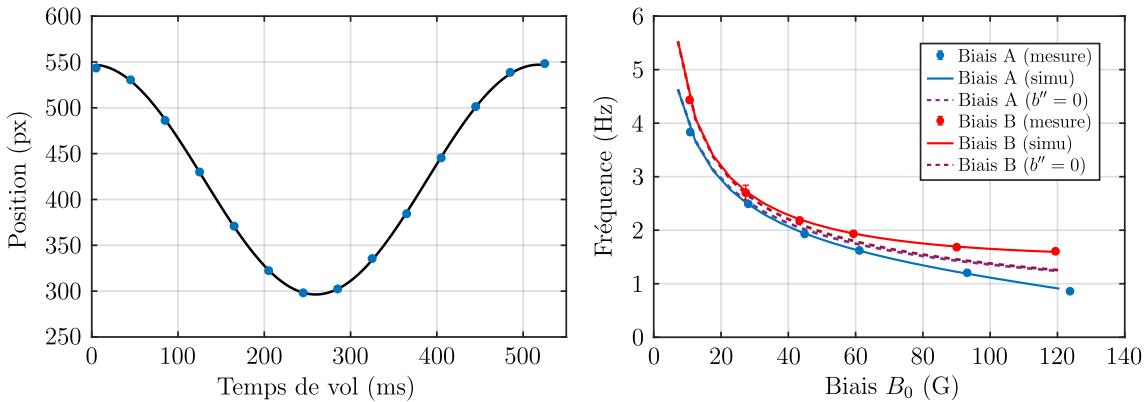
#### Fréquences de la lévitation

Ainsi, si les atomes ne sont pas au centre du piège, la réalisation de temps de vol en présence de la lévitation conduira à un mouvement du nuage. Pour l'état  $|F=1, m_F=-1\rangle$  en particulier, le centre de masse du nuage décrit des oscillations autour du centre de la lévitation dont les fréquences peuvent être trouvées à l'aide de la norme du champ magnétique 3.2 :

$$\omega_x^2 = \omega_z^2 = \left| \frac{m_F \tilde{g}_{F,m_F} \mu_B}{m} \left( \frac{b'^2}{4B_0} - b'' \right) \right| \quad \text{et} \quad \omega_y^2 = \left| \frac{2m_F \tilde{g}_{F,m_F} \mu_B}{m} b'' \right|. \quad (3.7)$$

L'exploitation de ces oscillations fournit donc de précieux renseignements quant à la position du centre de la lévitation, mais aussi quant à la forme du potentiel magnétique dans lequel les atomes évoluent.

En particulier, la mesure des fréquences de la lévitation permet de déterminer la courbure des champs générés par les bobines de biais A et de biais B. L'influence de ces courbures est représentée figure 3.5 pour les champs de biais A et de biais B. Pour un courant suffisamment grand, le terme de courbure n'est plus négligeable devant celui de



**FIGURE 3.5 – Oscillation du nuage dans la lévitation magnétique.** Le nuage, initialement dans le piège optique, est relâché sur le bord de la lévitation. Il acquiert alors un mouvement oscillatoire autour du centre de la lévitation pendant le temps de vol où la gravité est compensée. **Évolution des fréquences de piégeage de la lévitation.** Les fréquences mesurées (points) diminuent avec l'augmentation de  $B_0$  et sont comparées à des simulations (lignes continues) afin de calibrer le champ créé par les bobines. L'influence des courbures est visible pour les plus champs les plus intenses, les simulations en absence de courbure (courbes tiretées) montrant alors une déviation par rapport aux données.

gradient, atténué par le biais. En effet, la comparaison des fréquences expérimentales à un modèle sans courbure montre un fort désaccord dans la zone des courants les plus hauts, tandis qu'un modèle tenant compte d'une courbure proportionnelle au courant décrit correctement cette zone (voir figure 3.5). On peut alors extraire le facteur de conversion courant/courbure  $c_i''$ .

Courbure	Valeur
Biais A $c_A''$	$4 \times 10^{-2} \text{ G/cm}^2/\text{A}$
Biais B $c_B''$	$-7 \times 10^{-2} \text{ G/cm}^2/\text{A}$

**TABLE 3.2 – Calibration des courbures de la lévitation magnétique.** Les bobines générant les champs de biais n'étant pas en configuration de Helmholtz, elles créent donc une courbure de champ magnétique au niveau des atomes. Cette courbure dépend de la géométrie des bobines ainsi que du courant les parcourant  $b_i'' = c_i'' \times (I_i - I_{0,i})$ .

On peut alors estimer les fréquences de piégeage (ou d'anti-piégeage pour l'état  $|F=2, m_F=-2\rangle$ ) dans les configurations expérimentales d'intérêt. Pour le champ magique  $B_0^*$ , les états  $|F=1, m_F=-1\rangle$  et  $|F=2, m_F=+1\rangle$  sont soumis à un piégeage de fréquence d'environ 5 Hz par les bobines de biais A tandis que dans le régime de champ fort, nécessaire pour obtenir les décompressions maximales qu'offre notre système, la fréquence de piégeage (anti-piégeage) pour  $|F=2, m_F=+1\rangle$  ( $|F=2, m_F=-2\rangle$ ) est diminuée jusqu'à 0.20 Hz (0.18 Hz) sous un champ de 2000 G [Bernard, 2010].

### Centre de la lévitation

Si pour le système isolé de lévitation magnétique le centre du potentiel magnétique correspond au centre géométrique des bobines, ce n'est plus le cas en présence d'un

champ extérieur. Afin d'éviter de mettre le nuage en mouvement après relâchement du piège optique, on utilise alors des champs de compensation générés à l'aide de bobines supplémentaires et dont le rôle est de s'affranchir de ces champs extérieurs, et donc de repositionner le centre du potentiel magnétique sur le nuage.

Le champ permettant de déplacer le potentiel est donc la somme du champ naturellement présent et du champ de compensation :

$$B_i = b_{0,i} + c_i \times I_i \quad \text{avec} \quad i = \{x, z\}. \quad (3.8)$$

Les mesures des différents termes de ce champ ont été effectuées à l'aide de radio-fréquences, comme décrit section 3.2.2. Le champ magnétique total s'écrit alors

$$\mathbf{B} = \left( \frac{b'}{2} x \right) \vec{x} + \left[ B_0 - b'y + b'' \left( y^2 - \frac{x^2 + z^2}{2} \right) \right] \vec{y} + \left( \frac{b'}{2} z + B_z \right) \vec{z} \quad (3.9)$$

en ne considérant un effet que dans la direction  $\vec{z}$ . La présence d'un champ de biais dans le plan horizontal mène donc à un déplacement du centre de la lévitation

$$z_c = -\frac{2B_z}{b'} \left( \frac{1}{1 - 4B_0b''/b'^2} \right) \quad (3.10)$$

pour un champ  $B_z \ll B_0$ <sup>8</sup>. On retrouve ici le résultat intuitif que dans le régime de bas champ  $B_0$ , l'effet d'un biais horizontal est de déplacer le centre de la lévitation à l'aide d'un gradient  $b'/2$ , résultant en un déplacement du potentiel magnétique de  $z_c = -2B_z/b'$ .

Une conséquence importante de ce résultat est que le déplacement du centre de la lévitation par un biais de positionnement dépend du biais de lévitation, ainsi que du gradient et de la courbure du champ. La décompression de la lévitation magnétique peut alors entraîner un déplacement du nuage, dont l'effet peut être critique pour l'étude à énergie résolue de la transition d'Anderson. Deux solutions sont envisageables pour contrer cet effet :

- Placer le nuage au centre géométrique des bobines de lévitation, c'est à dire avoir  $B_z = 0$  et compenser exactement les champs naturellement présents.
- Modifier le champ de compensation à chaque instant lors de la décompression pour éviter le déplacement du centre du potentiel magnétique.

L'étude du système de lévitation magnétique nous a non seulement permis de calibrer nos bobines dont la position, l'orientation et le comportement magnétique ont été légèrement modifiés suite à un démontage et de lourds travaux de réparation, mais elle nous a de plus permis d'identifier de possibles limitations pour l'étude de la transition d'Anderson à énergie résolue. En particulier, il nous sera nécessaire de pouvoir contrôler de manière arbitraire les courants des bobines de compensation en cours de séquence, ce qui n'est pas possible sur le dispositif actuel. Il s'agit d'une étude à laquelle l'équipe porte une attention particulière à l'heure de l'écriture de ces lignes.

---

8. Dans l'hypothèse où le champ de biais généré par les bobines de lévitation ne serait pas orienté parfaitement selon l'axe du gradient vertical, l'effet d'un angle  $\theta$  se manifesterait via la présence d'un champ horizontal  $B_0 \sin \theta$ , qui participerait à déplacer le centre.

### 3.3 Changement du laser telecom et calibration du piège optique

Listés dans la partie 2.3.3, uniquement deux éléments participent à la manipulation d'atomes dans la chambre de science avant condensation. Le premier élément, la lévitation magnétique, a fait l'objet d'un entretien essentiel présenté dans la partie précédente.

Cette partie se concentrera sur le second élément, le piège optique. Nous commencerons par présenter le système optique et décrire les changements opérés, puis nous décrirons la calibration de ce piège sur les atomes.

#### 3.3.1 Changement du laser telecom

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que le piège dipolaire était composé de deux faisceaux se croisant dans la chambre de science. Ces deux faisceaux, la pince et le dimple, sont orientés suivant les directions  $\vec{z}$  et  $\vec{y}$  respectivement et permettent de franchir le seuil de condensation. Il s'agit donc du piège donnant au condensat ses propriétés. De plus, c'est avec ce même piège que l'on met en œuvre les techniques de refroidissement extrême que sont l'ouverture adiabatique du piège ou encore le refroidissement par delta-kick. Il est donc primordial d'avoir une connaissance complète des caractéristiques de ce piège.

Les deux faisceaux du piège dipolaire croisé proviennent d'une source laser commune avant d'être mis en forme séparément. Cette source, un laser fibré Ytterbium de *Keopsys* émettant une puissance 20 W en continu à une longueur d'onde  $\lambda = 1070\text{ nm}$ , a été changée au cours de ma thèse. Ce laser a été sujet à un grand nombre d'opérations de maintenance, et, dans les mois précédent son remplacement, il ne pouvait plus émettre que 14 W lors de son allumage et seulement 12.5 W en fin de journée.

Cette source a été remplacée par un laser fibré Ytterbium *YLR-50-LP-A-Y12* de *IPG*, opérant à la même longueur d'onde  $\lambda = 1070\text{ nm}$ , et avec une puissance maximale mesurée à 55 W. La taille du faisceau en sortie de fibre est de 0.8 mm (contre 1.4 mm pour le laser *Keopsys*), il a donc fallu adapter un télescope afin de conserver les mêmes tailles de faisceaux au niveau des atomes. Le montage de mise en forme des faisceaux est présenté figure 3.6. Celui-ci est majoritairement mis dans des tubes (représentés figure 3.6) contenant un grand nombre de diaphragmes, facilitant ainsi la procédure d'alignement.

#### 3.3.2 Calibration du piège optique

La présence d'une fibre optique pour la mise en forme du faisceau de la pince permet de s'assurer que le mode envoyé sur les atomes n'a pas changé. Pour le faisceau dimple en revanche, le trajet jusqu'à la cellule se fait sans filtrage. La présence de deux périscopes, d'un nombre d'éléments optiques important et l'utilisation d'un profil elliptique imposent une étude attentive des caractéristiques de ce faisceau au niveau des atomes.

##### Estimation de la taille du faisceau au niveau des atomes

Le faisceau dimple est rendu elliptique à l'aide du second télescope qui comporte quatre lentilles dont deux cylindriques, comme illustré figure 3.6. Le rapport de forme du faisceau est alors de 2. Cependant, l'utilisation de plusieurs périscopes risque de faire tourner cette

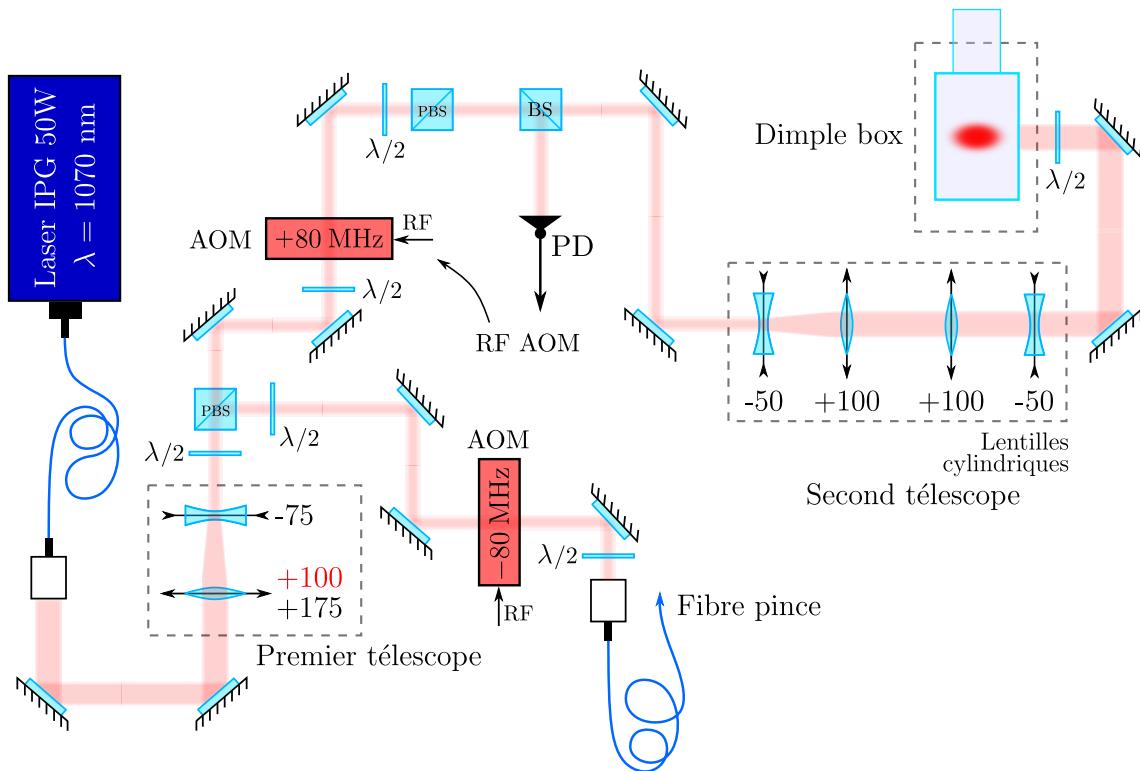


FIGURE 3.6 – Schéma du montage optique pour le piège dipolaire. Le faisceau issu du laser source passe dans un premier télescope avant d'être séparé en deux parties. La partie déviée passe dans une fibre optique pour devenir le faisceau de la pince. La partie transmise ensuite passe dans un second télescope pour devenir elliptique et arrive dans la *Dimple box*, qui envoie le faisceau sur les atomes et contient les optiques d'imagerie [Muller, 2015]. Afin de garder les mêmes tailles de faisceaux, la première lentille du premier télescope a été remplacée par une lentille de focale  $+100 \text{ mm}$ .

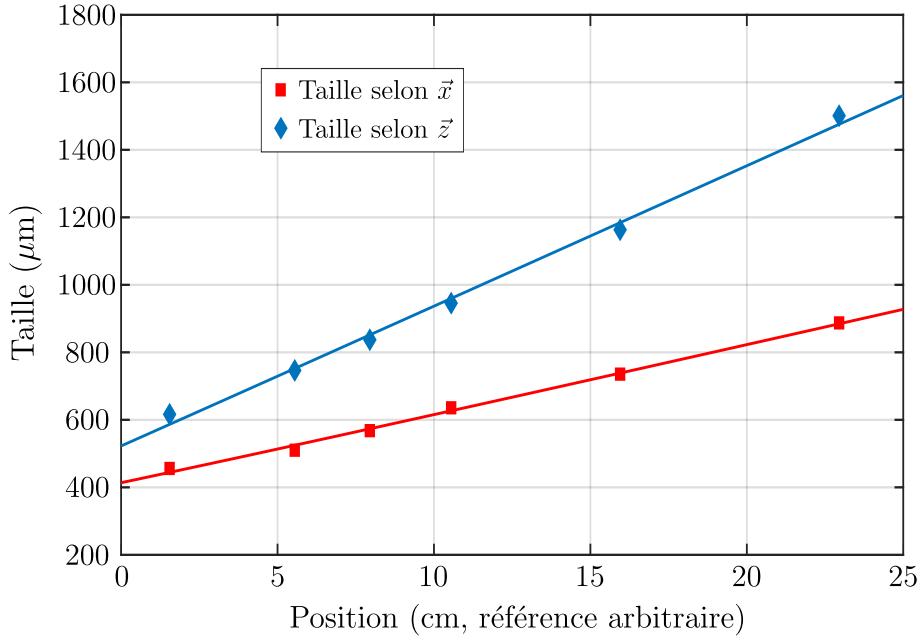


FIGURE 3.7 – **Divergence du faisceau dimple après la cellule.** Les tailles du faisceau dimple sont représentées en fonction de la position de la caméra. La divergence du faisceau permet de remonter aux waists du faisceau et d'en estimer la position. Les waists extraits sont de  $w_z \simeq 82 \mu\text{m}$  et de  $w_x \simeq 160 \mu\text{m}$  et leur position est compatible avec celle des atomes.

ellipse, il est donc primordial de connaître les tailles du faisceau au niveau des atomes.

L'approche suivie pour estimer le profil du faisceau au niveau des atomes consiste à en étudier la divergence après la cellule à l'aide d'une caméra, la zone d'intérêt se trouvant sous vide. Un avantage de cette méthode est de s'affranchir d'un système optique qui compliquerait le traitement, sous réserve que la caméra soit suffisamment large pour imager l'entièreté du faisceau. Le principal inconvénient est qu'il est nécessaire d'extrapoler la forme du faisceau pour en estimer le profil au niveau des atomes.

Cette extrapolation est en réalité aisée : la taille du faisceau  $w_i(y)$  dans la direction  $\vec{i}$  ( $\vec{i} = \{\vec{x}, \vec{z}\}$ ) est donnée par l'optique gaussienne :

$$w_i(y) = w_i \sqrt{1 + \left(\frac{y}{y_{Ri}}\right)^2}, \quad (3.11)$$

où  $w_i$  est le waist du faisceau dans la direction  $\vec{i}$ . La distance de Rayleigh associée s'exprime  $y_{Ri} = \pi w_i^2 / \lambda$  et correspond à la distance sur laquelle la taille du faisceau suivant la direction  $\vec{i}$  change peu. Dans le régime de champ lointain  $y \gg y_{Ri}$ , le faisceau diverge selon un angle  $\tan \theta_i \simeq \lambda / \pi w_i$ .

La mesure des tailles du faisceau a été réalisée à l'aide d'une caméra *IDS Ueye* disposant d'une matrice de  $1024 \times 1280$  pixels de  $5.2 \mu\text{m}$  de côté. Les tailles ont été extraites par ajustement gaussien après intégration suivant une direction. Enfin, l'évolution de la taille en fonction de la position a été ajustée par la formule 3.11, illustrée figure 3.7.

On estime alors les waists du faisceau à  $w_z = 81.6 \pm 7.8 \mu\text{m}$  et  $w_x = 160 \pm 13 \mu\text{m}$ , assez proche des valeurs précédentes. La position de ces waists est compatible avec la position

des atomes, et la longueur de Rayleigh du faisceau est de l'ordre de  $y_{Rz} \simeq 2\text{ cm}$ .

### Calibration des fréquences de piégeage

Le fonctionnement du piège optique repose sur le potentiel dipolaire. Celui-ci s'écrit :

$$U(\mathbf{r}) = \frac{3\pi c^2 \Gamma}{2\omega_0^3 \bar{\Delta}} I(\mathbf{r}) \quad \text{avec} \quad \frac{1}{\bar{\Delta}} = \frac{1}{\omega - \omega_0} - \frac{1}{\omega + \omega_0}. \quad (3.12)$$

En supposant que les atomes restent proches du centre du piège, on peut faire l'approximation que le profil d'intensité des faisceaux est de forme harmonique. On peut ainsi définir la profondeur de piégeage pour chaque faisceau :

$$U_{\text{pince}} = \frac{3c^2 \Gamma P_{\text{pince}}}{\omega_0^3 \bar{\Delta}} \frac{1}{w_0^2} \quad \text{et} \quad U_{\text{dimple}} = \frac{3c^2 \Gamma P_{\text{dimple}}}{\omega_0^3 \bar{\Delta}} \frac{1}{w_x w_z}, \quad (3.13)$$

ainsi que les fréquences de piégeage  $\omega_{x,y,z}$ . Rappelons que le confinement dans les directions  $\vec{x}$  et  $\vec{y}$  est fait par la pince, et que celui dans la direction  $\vec{z}$  est fait par le dimple, les fréquences de piégeage du piège dipolaire croisé s'expriment alors :

$$\omega_x = \omega_y = \sqrt{-\frac{4U_{\text{pince}}}{mw_0^2}} \quad \text{et} \quad \omega_z = \sqrt{-\frac{4U_{\text{dimple}}}{mw_z^2}}. \quad (3.14)$$

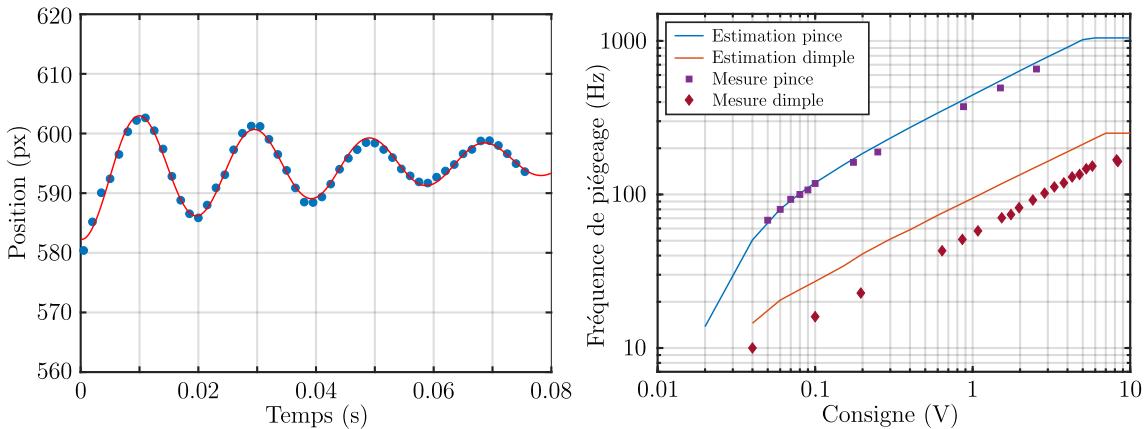
La caractérisation finale du piège dipolaire croisé se fait à l'aide des fréquences de piégeage, qui fixent les propriétés physiques du nuage. Afin de mesurer ces fréquences, nous avons fait le choix d'induire de petites oscillations du nuage à l'intérieur du piège à l'aide d'une force extérieure, et de suivre ces oscillations en fonction du temps d'évolution dans le piège de manière équivalente à celle présentée pour la lévitation magnétique section 3.2.3.

La fréquence de piégeage de la pince a été mesurée suivant la direction verticale à l'aide de la lévitation magnétique. En commutant rapidement le courant des bobines de gradient, on dispose d'un bouton pour allumer et éteindre la gravité, et donc générer une force pendant un bref instant pour donner un mouvement aux atomes dans le piège. En relevant la position des atomes en fonction de la durée d'évolution dans le piège après excitation, on extrait alors la fréquence associée.

La mesure de la fréquence de piégeage dans la direction  $\vec{z}$ , provenant du dimple, a été effectuée selon deux méthodes suivant la puissance du faisceau :

- À haute puissance, les atomes sont poussés à l'aide d'un gradient magnétique provenant de bobines de compensation. Celles-ci peuvent exercer une force sur les atomes pendant de courts instants à l'aide d'un commutateur rapide.
- À plus basse puissance, le piège optique est décomprimé et peu profond grâce à la lévitation. Cependant, le piégeage de la lévitation peut arracher les atomes du piège optique, il est donc nécessaire de déplacer le centre de la lévitation magnétique à l'aide de champs de compensation. Pour pousser les atomes, on utilise alors les bobines de compensation dans leur configuration normale, et leur brève extinction conduit à accélérer les atomes en déplaçant le centre de la lévitation magnétique.

L'ensemble de ces mesures est représenté figure 3.8. La variation des fréquences s'est fait en abaissant la puissance du laser au cours de l'évaporation optique, celle-ci conduisant à une décompression du piège de comportement  $\omega/2\pi = A\sqrt{P}$  comme illustré formules 3.13



**FIGURE 3.8 – a : Exemple d'oscillation dans le piège optique.** Le nuage oscille dans la direction  $\vec{z}$  pour une puissance du dimple de 0.70 W après avoir été poussé par un gradient magnétique. La fréquence d'oscillation est alors de  $\omega_z/2\pi \simeq 51$  Hz. **b : Fréquences d'oscillations du piège optique.** Les fréquences mesurées par oscillations du nuage (points) sont comparées à des estimations issues de mesures de la taille des faisceaux et de mesures de puissance de ces faisceaux (lignes continues).

et 3.14. Les fréquences mesurées expérimentalement (carrés pour la pince, losanges pour le dimple) sont comparées à celles estimées à l'aide de mesures de la puissance des faisceaux et de leurs tailles (lignes continues). Si la comparaison est tout à fait correcte pour la pince, ce n'est pas le cas pour le dimple qui présente une surestimation de la fréquence de piégeage. La calibration de la pince est alors  $A_{\text{pince}} = 912 \pm 30 \text{ Hz/W}^{1/2}$ , et celle du dimple est de  $A_{\text{dimple}} = 62.5 \pm 1.2 \text{ Hz/W}^{1/2}$ . La prédiction pour cette dernière est de  $103 \text{ Hz/W}^{1/2}$  en utilisant les tailles mesurées  $w_x \simeq 160 \mu\text{m}$  et  $w_z \simeq 82 \mu\text{m}$ , en accord qualitatif avec la valeur mesurée<sup>9</sup>.

Une seconde conséquence de la figure 3.8 est que les deux faisceaux présentent une saturation à haute puissance, c'est à dire qu'ils restent à leur puissance maximale au delà d'une certaine consigne seuil. Pour le dimple, cette saturation provient d'une limitation de la puissance de la source de la radio-fréquence servant à la diffraction du faisceau dans le modulateur acousto-optique. Pour la pince, cette limitation provient du maximum de l'efficacité de diffraction du modulateur acousto-optique. Ces deux saturations peuvent être repoussées en augmentant la puissance émise par le laser source<sup>10</sup>, cependant elles ne sont pas problématiques pour notre configuration. De plus, cette augmentation de puissance se traduirait par un chauffage local des bloqueurs de faisceau plus important, entraînant des effets thermiques néfastes.

9. La dernière calibration date de la mise en place de la *dimple box* lors de la thèse de Kilian Muller [Muller, 2015]. Celle du dimple était alors de  $A_{\text{dimple}} = 64.5 \pm 1.2 \text{ Hz/W}^{1/2}$ , très proche de la valeur actuelle.

10. Le réglage actuellement utilisé sur l'expérience est une émission à 50% de la puissance maximale du laser *IPG*, c'est à dire environ 23 W. Il a été observé que le mode émis est suffisamment stable à ce point de fonctionnement.

## 3.4 Optimisation de l'évaporation tout-optique

Vingt-cinq ans après l'obtention du premier condensat de Bose-Einstein, l'étape de refroidissement par évaporation forcée reste un passage obligatoire pour l'obtention d'un gaz dégénéré, à l'exception de quelques développements récents se basant des techniques novatrices de refroidissement laser [Stellmer et al., 2013] [Hu et al., 2017].

Comme brièvement présenté dans le chapitre précédent, le principe du refroidissement évaporatif repose sur l'extraction de particules très énergétiques, suivie par la thermalisation des particules restantes moins énergétiques en moyenne, donc de température abaissée.

Néanmoins, l'efficacité de ce processus dépend fortement de la configuration expérimentale. Les modifications apportées à notre piège optique, piège dans lequel le seuil de condensation est franchi, nécessitent donc d'adapter les consignes d'évaporation à notre nouvelle géométrie. De plus, l'utilisation de nouvelles cartes analogiques *National Instruments* avec la suite *Cicero Word Generator* permet de générer de nouvelles consignes arbitraires, non limitées à des morceaux de rampes telles qu'auparavant.

Dans cette partie, nous allons dans un premier temps présenter le fonctionnement du refroidissement par évaporation forcée, puis nous détaillerons les résultats de l'optimisation de notre évaporation optique.

### 3.4.1 Lois d'échelle du refroidissement évaporatif

Le but de l'étape de refroidissement évaporatif étant d'augmenter la densité dans l'espace des phases  $\mathcal{D} = n\lambda_{dB}^3$ , aussi appelée *paramètre de dégénérescence*, afin de franchir le seuil de condensation, il est donc nécessaire que notre système présente de la dissipation. L'origine de celle-ci repose sur la profondeur finie des pièges utilisés.

#### Évaporation naturelle dans un piège de profondeur finie

Une conséquence de cette profondeur finie est que la fonction de partition  $f(E)$  est tronquée à l'énergie  $U$  correspondant à la profondeur du piège. Plus précisément, il a été montré que la fonction de partition est très proche d'une distribution de Boltzmann tronquée

$$f(E) \propto e^{-\frac{E}{k_B T}} \Theta(U - E), \quad (3.15)$$

dont le temps de thermalisation  $\tau_{th}$  est de l'ordre de quelques collisions élastiques [Luiten et al., 1996].

En effet, la collision élastique de deux particules permet de transférer de l'énergie d'une particule à la seconde. En particulier, une particule est susceptible d'acquérir par collision une énergie mécanique totale supérieure à la profondeur de piège, celle-ci est donc extraite du piège et emporte une énergie  $U + \kappa k_B T$  ( $\kappa > 0$ ) supérieure à l'énergie moyenne par particule. La particule restante a quant à elle perdu de l'énergie.

Ce processus étant le plus probable pour des particules de grandes énergies, celui-ci favorise l'accumulation des particules dans les états de basse énergie tandis qu'il dépeuple les états de grande énergie. Ce raisonnement permet d'expliquer de manière qualitative la

forme de la fonction de partition 3.15, qui favorise les états de basse énergie.

Ce phénomène d'*évaporation naturelle* conduit donc à une diminution de la température, dont l'efficacité décroît avec le temps. En effet, l'énergie moyenne par particule diminuant, la probabilité que des particules acquièrent suffisamment d'énergie pour s'échapper du piège décroît exponentiellement [Walraven, 2010]. Ainsi, le processus d'évaporation naturelle est fortement ralenti et le taux d'évaporation, c'est à dire le nombre de particules expulsées du piège par évaporation naturelle par unité de temps, peut être estimé par  $\Gamma_{\text{ev}} \sim e^{-U/k_B T} \Gamma_c$ , avec  $\Gamma_c$  le taux de collisions élastiques (voir équation 3.31).

Très rapidement, le temps d'évaporation  $1/\Gamma_{\text{ev}}$  excède le temps de vie des atomes dans le piège et ceux-ci sont perdus par des collisions inélastiques. Afin de dépasser cette limitation et de garder une évaporation efficace, la technique expérimentale développée afin d'obtenir les premiers condensats de Bose-Einstein consiste à abaisser progressivement la profondeur du piège  $U$ . On parle alors d'*évaporation forcée*.

### Lois d'échelle de l'évaporation forcée

Comme mentionné précédemment, la mise en œuvre pratique du refroidissement évaporatif se fait par le biais de la diminution de la profondeur du piège, forçant ainsi le processus d'évaporation. Cette opération est réalisée en continu, et à une vitesse suffisamment lente devant le temps de thermalisation  $\tau_{\text{th}}$  afin que le système soit constamment à l'équilibre thermodynamique<sup>11</sup>.

En particulier, définissons le paramètre de troncature  $\eta$  comme le rapport entre la profondeur du piège et la température du gaz piégé :

$$\eta = \frac{U}{k_B T} . \quad (3.16)$$

Dans le cas d'un abaissement lent et continu de la profondeur du piège, le paramètre de troncature est constant<sup>12</sup> et sa valeur est de l'ordre de 10 dans le cas d'un piège optique.

Le potentiel de piégeage  $U(\mathbf{x}, t)$  étant modifié au cours de l'évaporation, les atomes sont soumis à un potentiel variant dans le temps. Dans le cas d'un piège harmonique, les fréquences de piégeage associées peuvent changer au cours de l'évaporation en fonction de l'implémentation expérimentale du refroidissement évaporatif<sup>13</sup>. Les variations d'énergie

11. Dans ce cas, les seules pertes d'atomes considérées sont celles liées à l'évaporation par collisions élastiques. Cela revient à négliger la dynamique de l'évaporation, qui fait apparaître les pertes par dévergènement [Cohen-Tannoudji, 1996]. Celles-ci correspondent aux atomes ayant une énergie de  $U - \delta E$  qui ne sont plus piégés lors de l'abaissement de la profondeur du piège de  $U$  à  $U - dU$ , avec  $dU > \delta E$ . Dans le cas d'un gaz à l'équilibre thermodynamique, seule une infime partie des atomes se trouve dans cet intervalle d'énergie que l'on peut négliger devant les autres sources de pertes.

12. Étant donné la dépendance exponentielle du taux d'évaporation en  $\eta$ , le processus d'évaporation sera très fortement ralenti dans le cas d'un nuage très froid ( $\eta$  grand), et rapide dans le cas d'un nuage chaud ( $\eta$  petit). Lors de l'abaissement de la profondeur du piège, un nuage chaud sera rapidement évaporé tandis qu'un nuage froid sera figé, la température variant donc avec la profondeur du piège.

13. La méthode de couteau radio-fréquence utilisée dans le piège magnétique dans la première chambre ne modifie pas les fréquences de piégeages et ne change que la profondeur du piège, tandis que l'évaporation tout optique, réalisée à l'aide de faisceaux lasers de tailles fixées, est accompagnée d'une décompression du piège lors de l'abaissement de la puissance des lasers.

potentielle sont alors caractérisées par le paramètre  $\nu$  défini par

$$\nu = \frac{\dot{\bar{\omega}}/\bar{\omega}}{\dot{U}/U} \quad (3.17)$$

où  $\bar{\omega}$  est la moyenne géométrique des fréquences du piège. Comme explicité formule 3.14, les fréquences de piégeage du piège optique évoluent en  $\bar{\omega} \propto \sqrt{U}$ , impliquant donc  $\nu = 0.5$  [O'hara et al., 2001]. L'abaissement de la profondeur du piège sera donc forcément accompagnée d'une décompression de celui-ci.

Dressons alors un bilan d'énergie afin de déterminer la manière dont varient les principales quantités thermodynamiques au cours de l'évaporation. L'énergie totale du gaz dans un piège harmonique est donnée par

$$E = 3Nk_B T \quad (3.18)$$

avec  $N$  le nombre total d'atomes. La variation temporelle de l'énergie totale du gaz est alors donnée par

$$\dot{E} = 3\dot{N}k_B T + 3Nk_B \dot{T}, \quad (3.19)$$

exprimée en fonction des variations temporelles du nombre d'atomes et de la température.

En identifiant les différentes sources de variations de l'énergie totale, on montre que la variation de l'énergie totale du système est donnée par [Cohen-Tannoudji, 1996]

$$\dot{E} = \dot{N}(U + \kappa k_B T) + \nu \frac{\dot{U}}{U} E, \quad (3.20)$$

où le premier terme décrit la perte d'énergie liée à l'évaporation des atomes énergétiques et le second terme décrit le changement d'énergie potentielle des particules restées dans le piège. Dans le cas d'une évaporation 3D,  $\kappa = 3/2$  [Ketterle and Van Druten, 1996].

En combinant les équations 3.19 et 3.20, on montre alors que la variation du nombre d'atomes en fonction de la profondeur de piégeage est donnée par [O'hara et al., 2001] :

$$\frac{\dot{N}}{N} = \frac{3(1-\nu)}{\eta'-3} \frac{\dot{U}}{U}, \quad (3.21)$$

avec  $\eta' = \eta + \kappa$ . Il est alors possible de déterminer les lois d'échelle des différentes grandeurs thermodynamiques d'un gaz classique.

En particulier, dans le cas d'un piège harmonique, la densité dans l'espace des phases s'exprime :

$$\mathcal{D} = N \left( \frac{\hbar \bar{\omega}}{k_B T} \right)^3. \quad (3.22)$$

On peut alors déterminer les variations du paramètre de dégénérescence en fonction des variations du nombre d'atomes :

$$\frac{\dot{\mathcal{D}}}{\mathcal{D}} = -(\eta' - 4) \frac{\dot{N}}{N}. \quad (3.23)$$

Le paramètre  $\eta' - 4 \equiv \gamma$  correspond à l'efficacité du processus d'évaporation : la perte d'atomes engendre un gain de densité dans l'espace des phases d'autant plus élevé que ce

paramètre est grand. L'enjeu de l'optimisation du refroidissement évaporatif consiste donc à augmenter ce paramètre autant que possible.

Une conséquence remarquable de l'équation 3.23 est que l'efficacité du processus d'évaporation ne dépend pas du paramètre  $\nu$  témoignant du changement de forme du piège. Ceci s'explique par le fait que pour une évaporation à  $\eta$  constant, le paramètre  $\nu$  traduit une ouverture adiabatique du piège, la décompression du nuage étant accompagnée d'une diminution de la température, voir section 2.3.3.

### Taux de collisions et régime d'emballement

Si l'équation 3.23 ne fait pas apparaître l'influence du paramètre  $\nu$ , celui-ci joue cependant un rôle primordial quant à la cinétique de l'évaporation. En effet, la vitesse maximale d'évaporation est limitée par la vitesse à laquelle le gaz atteint un état d'équilibre thermique, c'est à dire le taux de thermalisation  $1/\tau_{\text{th}}$ . Celui-ci est de l'ordre du taux de collisions élastiques  $\Gamma_c = n\sigma\bar{v}$ , avec  $n$  la densité du gaz,  $\sigma$  la section efficace de diffusion et  $\bar{v}$  la vitesse moyenne relative entre deux atomes [Walraven, 2010].

Dans le cas d'un piège harmonique, on montre que la loi de variation du taux de collisions élastiques peut s'écrire [O'hara et al., 2001]

$$\frac{\dot{\Gamma}_c}{\Gamma_c} = \left[ 1 - (\eta' - 3) \left( \frac{1 - 3\nu}{3(1 - \nu)} \right) \right] \frac{\dot{N}}{N}, \quad (3.24)$$

où le facteur entre crochets peut changer de signe suivant la valeur de  $\nu$ . Ainsi, il est possible que le taux de collisions élastiques augmente au cours de l'évaporation malgré la perte d'atomes, rendant ainsi l'évaporation de plus en plus rapide. Dans ce régime d'*emballement*, la diminution du nombre d'atomes et de leur vitesse relative est plus que compensée par une forte augmentation de la densité au centre du piège, augmentant ainsi le taux de collisions. Ce régime est atteint pour de faibles valeurs de  $\nu$ , en particulier pour notre piège magnétique où  $\nu = 0$ .

En revanche, l'évaporation optique opère en abaissant la puissance des faisceaux laser, imposant donc  $\nu = 0.5$ . Dans ce régime, le taux de collisions élastiques diminue au cours de l'évaporation, la rendant de plus en plus lente contrairement au régime d'emballement. Il est donc primordial qu'une évaporation optique commence avec un grand taux de collisions élastiques pour permettre une thermalisation rapide. De manière générale, une évaporation optique possède une première phase pendant laquelle la puissance des faisceaux laser est abaissée rapidement, la thermalisation du nuage étant immédiate grâce au grand taux de collisions, puis une seconde phase plus lente où la thermalisation du nuage nécessite plus de temps.

### Effet des collisions inélastiques

En pratique, l'évaporation par collisions élastiques n'est pas la seule source de perte des particules. L'expérience se déroulant à l'intérieur d'une enceinte sous ultra-vide pompée en continu, les collisions avec les particules du gaz résiduel à température ambiante sont responsables de pertes indépendantes de l'énergie des atomes piégés. Cela se traduit par un temps de vie  $1/\Gamma_{\text{bg}}$  fini des atomes dans le piège.

On peut alors écrire les pertes d'atomes liées au gaz résiduel sous la forme d'équations

de taux

$$\dot{N}_{\text{bg}} = -\Gamma_{\text{bg}} N \quad (3.25)$$

$$\dot{E}_{\text{bg}} = -\Gamma_{\text{bg}} E , \quad (3.26)$$

où le temps de vie  $1/\Gamma_{\text{bg}}$  est de l'ordre de 10 s.

Deux régimes limites se présentent alors. Dans le cas d'une évaporation rapide telle que  $\Gamma_{\text{ev}} \gg \Gamma_{\text{bg}}$ , l'essentiel des pertes d'atomes est dû au processus d'évaporation. La présence du gaz résiduel n'a donc que peu d'effet sur le nuage, l'évaporation pouvant se dérouler sur une durée petite devant le temps de vie des atomes dans le piège.

Au contraire, les pertes dues au gaz résiduel peuvent fortement entraver le processus d'évaporation dans le cas d'un petit temps de vie, dans le régime où  $\Gamma_{\text{ev}} \ll \Gamma_{\text{bg}}$ . Dans ces conditions, les atomes ne peuvent rester assez longtemps dans le piège pour que certains aient le temps d'acquérir une énergie suffisante pour être évaporés.

Le gaz résiduel n'est pas la seule source néfaste de perte d'atomes. Des processus complexes liés à la nature métastable des expériences d'atomes froids peuvent conduire à la perte de plusieurs atomes. Aux températures atteintes par les nuages piégés, la majorité des éléments devraient se trouver à l'état solide, mais le caractère binaire des collisions élastiques permet au système de rester sous forme gazeuse. Cependant, il est possible que lors d'une collision tertiaire, deux atomes établissent une liaison moléculaire, dont la grande énergie est évacuée par le biais d'un troisième atome. Ce processus de pertes à trois corps conduit alors à la perte des trois atomes.

Puisque ce mécanisme nécessite la collision de trois atomes, on peut décrire la variation de densité due aux pertes à trois corps ainsi que la variation de l'énergie totale à l'aide d'une loi de puissance :

$$\dot{n}_{3b}(\mathbf{x}) = -K_{3b}n^3(\mathbf{x}) \quad (3.27)$$

$$\dot{E}_{3b} = \frac{3}{2}\dot{N}_{3b}k_B T + \int d\mathbf{x} U(\mathbf{x})\dot{n}_{3b}(\mathbf{x}) , \quad (3.28)$$

où le coefficient  $K_{3b}$  est une constante du  $^{87}\text{Rb}$  et vaut  $1.8 \times 10^{-29} \text{ cm}^6 \text{s}^{-1}$  [Burt et al., 1997][Söding et al., 1999].

Comme illustré par l'équation 3.27, le mécanisme de pertes à trois corps devient important dans des régions de fortes densités. Les pièges optiques étant fortement comprimés afin d'avoir un taux de collisions suffisant pour pouvoir évaporer, ceux-ci sont particulièrement susceptibles de générer des pertes à trois corps.

En présence de ces pertes, il est possible de modifier les lois d'échelles présentées précédemment [Luiten et al., 1996][Brantut, 2009]. En particulier, on peut montrer que dans le cas d'un piège harmonique profond, l'équation 3.21 régissant l'évolution du nombre d'atomes se généralise en

$$\frac{\dot{N}}{N} = \left( \frac{\eta' - 3}{3(1-\nu)} + R \frac{2 - \eta'}{3(1-\nu)} \right)^{-1} \frac{\dot{U}}{U} , \quad (3.29)$$

où  $R = \dot{N}_{3b}/\dot{N}_{\text{tot}}$  est la fraction d'atomes perdus par collisions à trois corps. De même, l'équation 3.23 devient

$$\frac{\dot{\mathcal{D}}}{\mathcal{D}} = -\gamma \frac{\dot{N}}{N} \quad \text{avec} \quad \gamma = \eta' - 4 + R(2 - \eta') , \quad (3.30)$$

témoignant ainsi de la réduction de l'efficacité de l'évaporation par les pertes à trois corps.

### 3.4.2 Implémentation expérimentale

Nous allons à présent détailler la manière dont cette étape d'évaporation est implémentée sur notre dispositif. La consigne présentée ici est le résultat d'une optimisation de l'efficacité de l'évaporation, encodée dans le paramètre  $\gamma$ . De plus, nous discuterons l'influence qu'a la lévitation magnétique lors de cette étape de refroidissement.

#### Consigne d'évaporation

Les lois d'échelle présentées dans la section précédente montrent comment évoluent les différentes grandeurs thermodynamiques du nuage en fonction de la profondeur du piège, sans pour autant spécifier la dépendance temporelle de celle-ci. Afin de déterminer le profil optimal de la consigne d'évaporation, il est possible d'établir un bilan du nombre d'atomes présents dans le piège<sup>14</sup>. En considérant que les atomes sont uniquement perdus par évaporation, on peut écrire les variations du nombre d'atomes à l'aide d'une équation de taux [Luiten et al., 1996][O'hara et al., 2001]

$$\dot{N} = -\Gamma_{\text{ev}} N \quad \text{avec} \quad \Gamma_{\text{ev}} = 2(\eta - 4)e^{-\eta}\Gamma_c . \quad (3.31)$$

On peut alors déterminer que le profil optimal de la consigne d'évaporation est aussi donné par une loi de puissance

$$U(t) = U_0 \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{-\beta} , \quad (3.32)$$

avec  $U_0 = U(t=0)$  la profondeur initiale de chaque faisceau au début de l'étape d'évaporation. L'optimisation de cette étape sur notre nuage nous a permis de déterminer les paramètres  $\beta_{\text{pince}} = \beta_{\text{dimple}} = 6$ ,  $\tau_{\text{pince}} = 1.2\text{s}$  et  $\tau_{\text{dimple}} = 1.3\text{s}$ , dont le profil est comparé à l'ancienne consigne composée de morceaux de rampes linéaires figure 3.9.

On remarque que la nouvelle consigne appliquée est de forme similaire à l'ancienne et possède deux dynamiques distinctes. Comme annoncé dans la section 3.4.1, l'évaporation est dans un premier temps rapide afin de profiter du grand taux de collisions élastiques, puis dans un second temps, la consigne est lentement abaissée en raison de l'augmentation du temps de thermalisation.

Notons tout de même la principale différence entre ces courbes. Par construction, la formule 3.32 permet de mieux tirer parti du processus d'évaporation naturelle. Il est alors possible d'effectuer une évaporation plus rapide, réduisant l'impact de la durée de vie finie des atomes par collisions avec le gaz résiduel<sup>15</sup>.

#### Mesure de la température d'un nuage lévité

La quantité thermodynamique permettant de témoigner du refroidissement du gaz au cours de l'évaporation correspond naturellement à sa température. De manière générale,

14. Les lois d'échelle présentées dans la section précédente ont été obtenues à l'aide d'un bilan d'énergie.

15. Dans le cadre d'une évaporation à  $\eta$  constant, le taux de pertes à trois corps ne dépend pas de la vitesse à laquelle l'évaporation est effectuée.

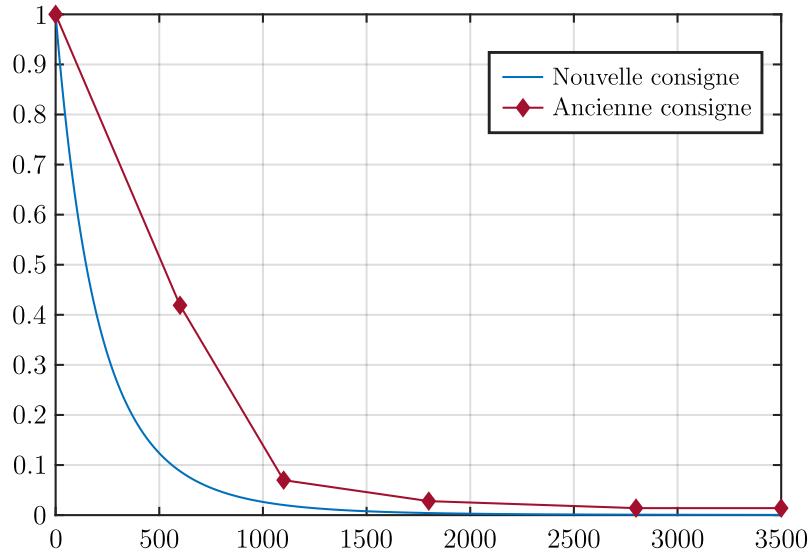


FIGURE 3.9 – **Comparaison de la nouvelle consigne d'évaporation du piège optique.** L'ancienne consigne, composée de cinq morceaux de rampe linéaire, est représentée . La nouvelle consigne, donnée par l'équation 3.32 et représentée, possède une décroissance plus rapide que dans le cas de l'ancienne consigne, et permet d'obtenir un condensat de Bose-Einstein plus rapidement.

celle-ci est estimée à l'aide d'une imagerie par *temps de vol*. Son principe repose sur l'expansion libre du nuage après extinction du piège, expansion dont l'origine provient de la distribution des vitesses des atomes. Dans le cas d'un nuage thermique, la température est donnée par la largeur de la distribution des vitesses du gaz, qui est directement donnée par la taille du nuage après un temps d'expansion suffisamment long<sup>16</sup>.

Cependant, pour des nuages particulièrement froids, les temps d'expansion requis pour estimer correctement la température du nuage peuvent dépasser le temps d'observation possible des atomes alors en mouvement de chute libre. L'utilisation de la lévitation magnétique pendant cette phase d'expansion permet de dépasser cette limite en compensant la gravité<sup>17</sup>. Néanmoins, comme nous l'avons détaillé dans la section 3.2.3, l'utilisation de la lévitation magnétique conduit à un piégeage de l'état  $|F=1, m_F=-1\rangle$  dans lequel nous souhaitons franchir le seuil de condensation.

L'estimation de la température du nuage impose alors deux contraintes sur le temps d'expansion du nuage :

- Celui-ci doit être suffisamment grand pour pouvoir négliger la taille initiale du nuage devant celle mesurée.
- Le temps d'expansion doit être suffisamment petit devant la période d'oscillation de la taille du nuage, liée au piégeage de la lévitation magnétique. De cette manière,

16. La taille du nuage thermique évolue selon  $\sigma_i^2 = \sigma_{i,0}^2 + t^2 k_B T / m$ , avec  $T$  la température,  $m$  la masse des atomes,  $t$  le temps d'expansion libre et  $\sigma_{i,0}$  la taille du nuage à  $t = 0$ . Pour  $t$  suffisamment grand, on peut ainsi négliger la taille initiale du nuage.

17. Un second intérêt de la lévitation magnétique est de supprimer l'influence de la gravité lors de l'évaporation. La pesanteur a pour effet de *pencher* le potentiel, pouvant changer la dimensionnalité de l'évaporation [Boyer, 2000], mais aussi limiter la profondeur du piège optique à environ  $U/k_B \sim 2.5 \mu\text{K}$  pour laquelle le gradient maximal d'intensité lumineuse ne permet plus de compenser le poids des atomes.

l'expansion peut être considérée balistique.

Dans la configuration à bas champ de la lévitation magnétique, proche du biais magique  $B_0^* = 3.2 \text{ G}$ , les fréquences de piégeage sont particulièrement grandes et il n'est pas possible de satisfaire ces deux contraintes simultanément.

La méthode retenue par l'équipe pour obtenir une mesure correcte de la température du nuage repose sur la technique de *focalisation atomique*. Celle-ci permet d'imager dans l'espace réel la distribution de vitesses à l'aide d'un potentiel harmonique, à l'instar d'une lentille en optique [Murthy et al., 2014]. Pour illustrer ces propos, considérons un ensemble d'atomes dont la distribution initiale des positions est de largeur  $\Delta x_{i,0}$  dans la direction  $\vec{i}$  et la distribution de vitesses est de largeur  $\Delta v_{i,0} = \hbar \Delta k_{i,0} / m$ . Sous l'effet du potentiel harmonique, l'évolution temporelle de la largeur de la distribution de positions est donnée par

$$\Delta x_i^2(t) = \Delta x_{i,0}^2 \cos^2(\omega_i t) + \frac{\hbar^2 \Delta k_{i,0}^2}{m^2 \omega_i^2} \sin^2(\omega_i t). \quad (3.33)$$

En coupant le potentiel harmonique après un quart d'oscillation à  $t = T_{\text{osc}}/4$  avec  $T_{\text{osc}} = 2\pi/\omega_i$  la période d'oscillation, la distribution de positions des atomes a une largeur donnée par

$$\Delta x_i(T_{\text{osc}}/4) = \left| \frac{\hbar \Delta k_{i,0}}{m \omega_i} \right|, \quad (3.34)$$

indépendante de la distribution initiale des positions des atomes. À l'aide de la distribution thermique des vitesses, on déduit

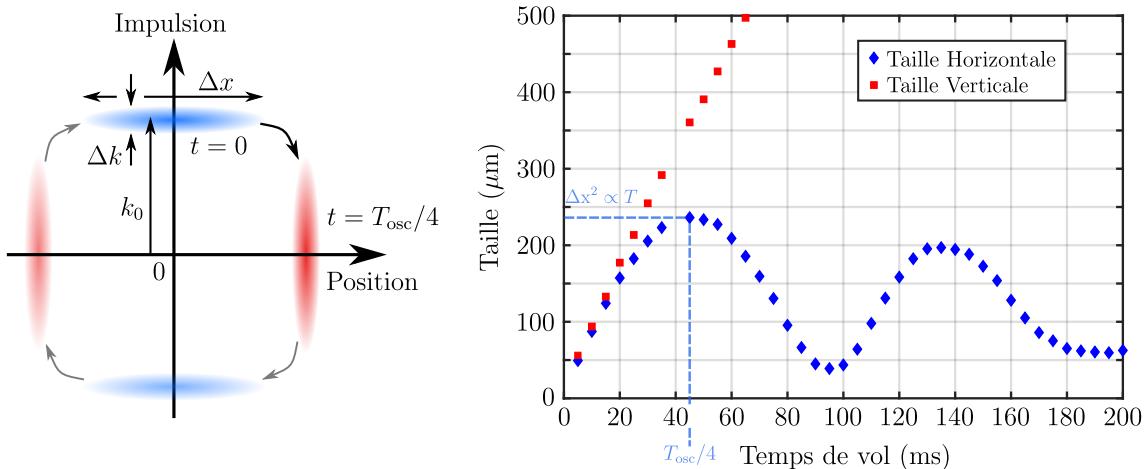
$$T = \frac{m \omega_i^2 \Delta x_i^2(T_{\text{osc}}/4)}{k_B} \quad (3.35)$$

Cette mesure de la température est donc indépendante de la taille initiale du nuage, contrairement à la mesure par temps de vol qui nécessite une longue expansion pour s'affranchir de l'influence de la taille initiale. Une seconde différence entre ces méthodes réside dans le fait que le temps d'expansion par focalisation atomique n'est plus ajustable, celui-ci étant fixé par la fréquence du piégeage harmonique de la lévitation magnétique.

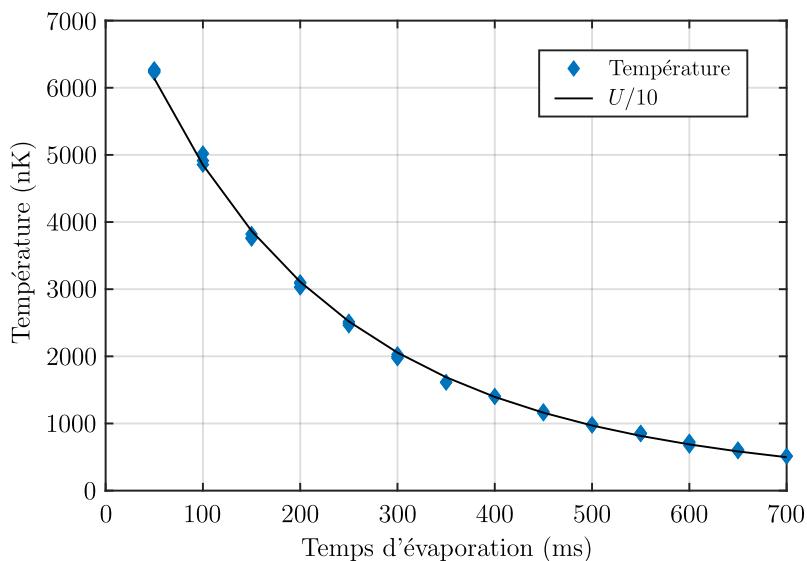
Notons que dans la configuration magnétique choisie, le piégeage vertical est négligeable devant celui des directions horizontales. En considérant que l'expansion du nuage est balistique suivant la direction verticale, la valeur de la température obtenue est en accord avec les valeurs extraites par focalisation atomique suivant les deux directions horizontales, comme illustré figure 3.10.

Nous pouvons alors comparer la température du nuage à la profondeur du piège, que l'on estime au cours de l'évaporation à l'aide de la calibration du piège optique présentée dans la section 3.3.2. L'évolution temporelle de la température du nuage est représentée figure 3.11, à laquelle nous superposons sans paramètre ajustable<sup>18</sup> la profondeur estimée du piège divisée par 10. L'accord entre ces courbes est remarquable, validant ainsi l'approche d'une évaporation à  $\eta$  constant.

<sup>18</sup> L'estimation de la profondeur du piège optique est réalisée selon la calibration présentée dans la section 3.3.2, donc uniquement à l'aide de mesures photométriques des puissances et tailles des faisceaux, complétées par les mesures des fréquences de piégeage obtenues par oscillations du centre de masse du nuage.



**FIGURE 3.10 – a : Principe de la focalisation atomique.** L'évolution temporelle d'un nuage dans l'espace des phases est une rotation autour de l'origine. À  $t = T_{\text{osc}}/4$ , la distribution du nuage dans l'espace des phases a subi une rotation de  $-\pi/2$ . On peut ainsi mesurer la distribution initiale d'impulsion par une mesure de densité atomique dans l'espace réel. **b : Évolution temporelle de la taille du nuage dans la champ de lévitation.** Le piégeage étant quasi-nul dans la direction verticale, le nuage s'étend de manière balistique (points rouges). Dans la direction horizontale, le nuage subit l'effet de piégeage harmonique de la lévitation magnétique et sa taille oscille à une fréquence correspondant au double de la fréquence de piégeage (points bleus). Pour un temps de vol d'environ 45 ms, le nuage atteint sa taille maximale représentative de la distribution initiale d'impulsion. Cette valeur est en accord avec la fréquence de piégeage estimée à environ 5 Hz. On remarque de plus que l'expansion du nuage est isotrope à temps court. La température du nuage, mesurée suivant les deux directions, est d'environ 620 nK.



**FIGURE 3.11 – Évolution de la température au cours de l'évaporation.** La température (points bleus) est mesurée après différentes durées d'évaporation et comparée à la profondeur du piège divisée par 10 (courbe noire). Sans paramètre ajustable, les deux courbes se superposent remarquablement. Chaque point correspond à une mesure unique, répétée plusieurs fois pour chaque durée d'évaporation sans moyenner.

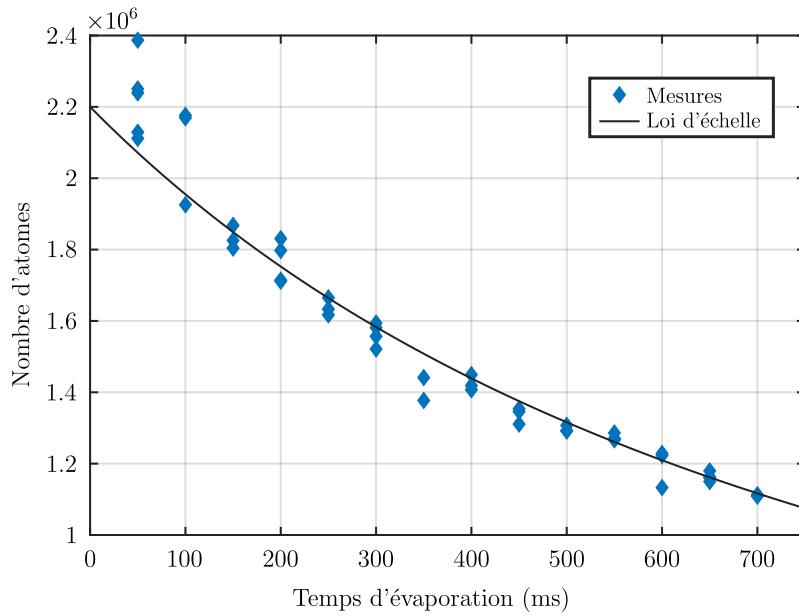


FIGURE 3.12 – **Évolution du nombre d'atomes au cours de l'évaporation.** Les points bleus correspondent aux mesures expérimentales du nombre d'atomes, chaque point étant issu d'un unique cycle expérimental. La ligne continue noire correspond à la prédiction de la loi d'échelle 3.29 avec les paramètres  $\eta = 10$  et  $R = 0.1$ , et où le seul paramètre ajustable est le nombre d'atomes initial. Il apparaît alors un très bon accord entre les données et le modèle.

### Résultats de l'optimisation de l'évaporation

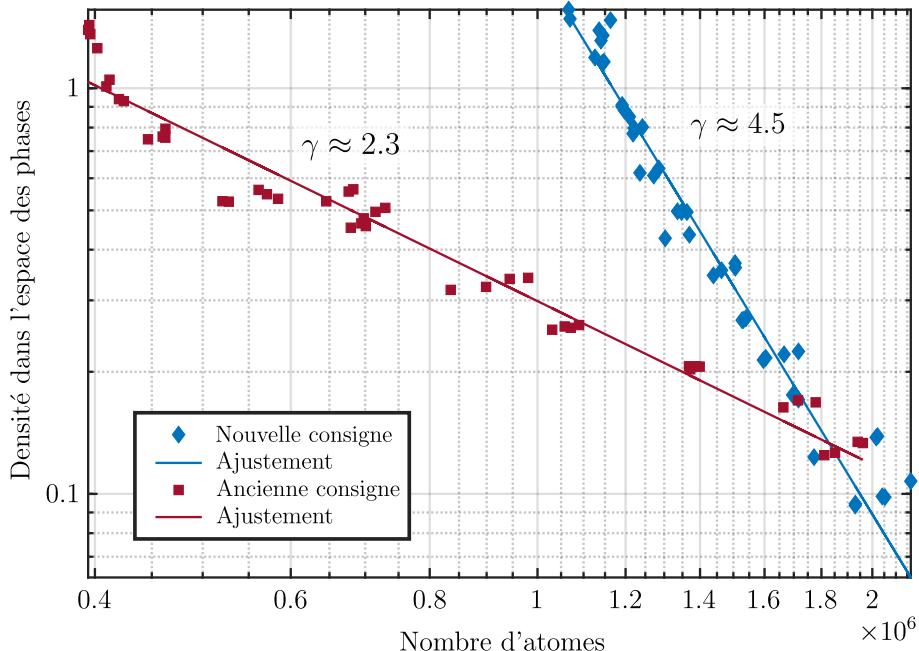
L'évolution du nombre d'atomes au cours de l'évaporation présente un intérêt particulier car celle-ci contient les informations liées aux processus inélastiques.

En particulier, il est possible de mesurer la densité atomique du nuage au cours de l'évaporation, et ainsi d'évaluer les pertes à trois corps à l'aide de la formule 3.27. En comparant ces pertes aux variations mesurées du nombre d'atomes, on obtient un rapport  $R$  de l'ordre de 0.1. Il apparaît donc que les pertes à trois corps ont un effet marqué sur la cinétique de l'évaporation, mais que celles-ci ne constituent pas une limite pour notre système.

De plus, il est possible de négliger l'effet des pertes due aux collisions avec le gaz résiduel, limitant le temps de vie des atomes dans le piège à  $1/\Gamma_{bg} \approx 10\text{s}$ . En effet, l'optimisation de notre évaporation se concentre sur les premières 700 ms d'abaissement de la profondeur du piège<sup>19</sup> comme illustré sur les figures 3.11 et 3.12, et la durée totale de notre évaporation est de 3.5 s, courte comparée au temps de vie permis par le gaz résiduel.

L'évolution du nombre d'atomes au cours de l'évaporation est représentée figure 3.12 et est comparée à la prédiction de la loi d'échelle 3.29, tracée avec les paramètres  $\eta = 10$  et  $R = 0.1$ , extraits de la mesure de température et du nombre d'atomes. En ajustant uniquement le nombre d'atomes initial du modèle, il apparaît que la théorie d'échelle permet de décrire correctement l'évolution du nombre d'atomes.

19. Cette durée correspond au temps nécessaire pour franchir le seuil de condensation  $\mathcal{D} \approx 1$  et l'obtention d'un gaz dégénéré. Celle-ci était d'environ 1.2 s avec l'ancienne consigne.



**FIGURE 3.13 – Efficacité de l'évaporation optique.** En traçant la densité dans l'espace des phases du nuage en fonction du nombre d'atomes, on peut évaluer l'efficacité du refroidissement évaporatif. La nouvelle consigne d'évaporation permet d'obtenir les points bleus pour différents temps d'évaporation, tandis que l'ancienne consigne est représentée en bordeaux. Les lignes continues sont des ajustements des données expérimentales par des lois de puissance 3.23, qui permettent ainsi d'extraire le paramètre  $\gamma$  quantifiant l'efficacité de l'évaporation.

Enfin, rappelons que l'optimisation de l'évaporation est réalisée en maximisant le gain de densité dans l'espace des phases par atome perdu, donné par le paramètre  $\gamma$  en présence de pertes à trois corps (voir la formule 3.30).

L'évolution de la densité dans l'espace des phases en fonction du nombre d'atomes est représentée figure 3.13 en échelle *log-log* pour dans le cas de notre nouvelle consigne (en bleu) ainsi que pour notre ancienne consigne (en bordeaux). La comparaison est immédiate : la nouvelle consigne permet d'atteindre le seuil de condensation  $\mathcal{D} \approx 1$  pour une perte d'atomes bien moindre que l'ancienne.

Plus quantitativement, l'efficacité mesurée pour la nouvelle consigne est de  $\gamma \approx 4.5$  tandis que l'ancienne présente une efficacité d'environ 2.3<sup>20</sup>, témoignant de la nette amélioration de notre évaporation. Notons que la loi d'échelle 3.30 en présence de pertes à trois corps prédit une valeur  $\gamma \approx 6.5$ , bien supérieure à notre valeur mesurée. Une étude approfondie de l'origine de cette différence n'a pas été menée compte-tenu de l'excellente efficacité obtenue. En effet, la valeur de  $\gamma \approx 3$  représente déjà une très bonne efficacité pour la plupart des expériences d'atomes ultra-froids [Barrett et al., 2001][Hung et al., 2008].

Finalement, la consigne retenue à l'issue de l'optimisation de l'évaporation permet d'obtenir un condensat de Bose-Einstein d'environ  $1.2 \times 10^6$  atomes avec une température

20. Cette mesure a été réalisée après le changement du laser source du piège optique. Avant changement, l'efficacité était plutôt estimée à 2.8 [Jendrzejewski, 2012].

d'environ 500 nK en 700 ms. Après 3.5 s d'évaporation, notre nuage contient environ  $2 \times 10^5$  atomes à une température de 10 nK sans utiliser la technique d'ouverture adiabatique pour refroidir davantage. À l'heure de l'écriture de ces lignes, l'implémentation de cette technique n'a pas encore été réalisée.



## 4. Propriétés d'un désordre de type speckle

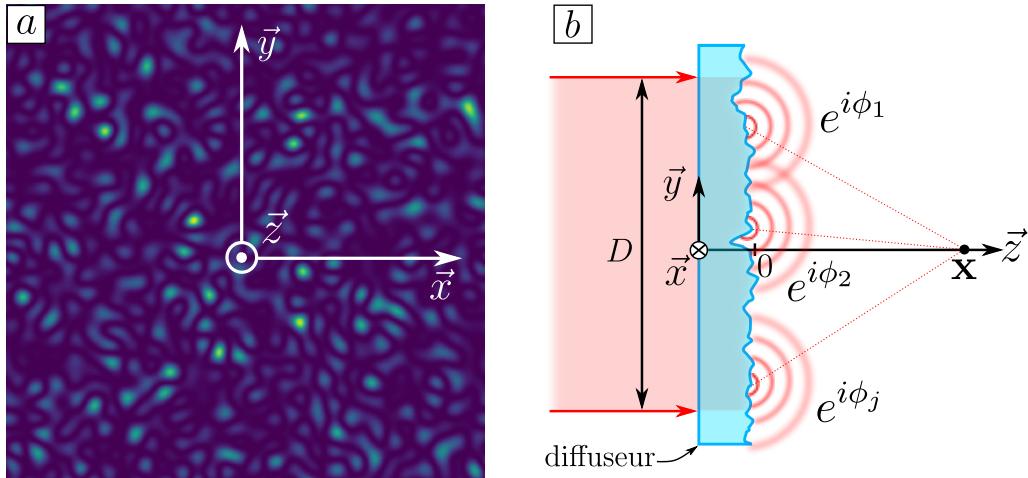
Le chapitre 2 nous a renseigné quant aux propriétés de notre onde de matière ainsi que sa production. En particulier, on a vu qu'il était possible d'appliquer des potentiels externes conservatifs aux atomes par le biais du potentiel dipolaire. Ce potentiel étant proportionnel à l'intensité lumineuse  $I$ , on peut alors appliquer un désordre à nos atomes, pourvu que l'on soit capable de créer un désordre optique. En effet, une originalité de notre expérience est "d'inverser" les rôles habituels de la matière et de la lumière.

Ainsi, dans ce chapitre, nous allons nous attacher à décrire le second élément clé de la localisation d'Anderson : le désordre. Nous montrerons que la génération d'un tel désordre est aisée : la diffraction d'un faisceau laser au travers d'une lame de verre rugueuse produit un motif d'intensité lumineuse aléatoire et à fort contraste, appelé champs de tavelures optiques, ou encore *Speckle* (anglicisme communément admis). Citons deux énormes avantages d'un tel désordre : on en connaît toutes les propriétés, régies par la diffraction, et on contrôle ce désordre.

La première partie se concentrera sur la génération d'un champ de speckle, en particulier sur le diffuseur qui donne au speckle toutes ses propriétés. Dans un second temps, nous décrirons les propriétés spatiales d'un speckle, en particulier la taille des grains de lumière dans les directions transverses et longitudinale. Dans une troisième partie nous parlerons du potentiel ressenti par les atomes ainsi que des possibilités offertes par la structure multi-niveaux du  $^{87}\text{Rb}$  et l'excellent contrôle du désordre dont nous disposons, puis dans une ultime partie nous étudierons une approche à deux longueurs d'onde pour dépasser les limitations d'un speckle monochromatique pour l'étude de la transition d'Anderson à énergie résolue.

### 4.1 Génération d'un champ de speckle

C'est avec le développement des premiers lasers qu'a été observée la structure granulaire de la lumière réfléchie par certaines surfaces rugueuses. Rapidement, il a été compris que ce motif provenait de la diffraction aléatoire et cohérente par une surface rugueuse.



**FIGURE 4.1 – a : Motif de speckle.** Un tel motif est composé de grains lumineux entourés de zones d'ombre, où l'intensité est quasiment nulle. **b : Génération d'une figure de speckle.** La diffraction d'une onde cohérente par une surface rugueuse appelée diffuseur résulte en l'interférence multiple d'une grand nombre d'ondes à déphasage aléatoire. La phase de chacune de ces ondes est déterminée par l'épaisseur de verre traversée en chaque point.

Cette surface rugueuse peut-être considérée comme un ensemble d'émetteurs cohérents de déphasages aléatoires, et le profil d'intensité obtenu est le résultat de l'interférence multiple de l'ensemble de la surface. Un profil typique est montré figure 4.1. Celui-ci comporte un ensemble de grains lumineux séparés par des zones d'obscurité. Souvent considéré néfaste dans le domaine de l'imagerie, le speckle est pour nous une formidable source de désordre optique.

#### 4.1.1 Statistiques de l'intensité d'un speckle

Le phénomène de speckle apparaît lorsque l'amplitude  $E(\mathbf{x})$  au point d'observation  $\mathbf{x}$  résulte de la somme d'un grand nombre  $N$  d'ondes indépendantes d'amplitude  $E_0$  et de phases aléatoires  $\phi_j$  comme illustré figure 4.1. Cette amplitude peut alors s'écrire

$$E(\mathbf{x}) = \sum_j^N E_0 e^{i\phi_j}. \quad (4.1)$$

En supposant qu'un grand nombre de grains du diffuseur participent à l'interférence au point d'observation ( $r_{\text{diff}} \ll D$  avec  $r_{\text{diff}}$  la taille typique d'un grain du diffuseur et  $D$  la taille de l'éclairement incident), on peut appliquer le théorème central limite à l'amplitude rayonnée. En supposant de plus que les phases aléatoires  $\phi_j$  sont réparties de manière homogène sur l'intervalle  $[0, 2\pi]$ , les distributions de probabilités des parties réelle et imaginaire de l'amplitude sont données par la loi normale

$$\mathcal{P}(E_{\mathcal{R}, \mathcal{I}}) = \frac{1}{\sigma_E \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{E_{\mathcal{R}, \mathcal{I}}^2}{2\sigma_E^2}\right), \quad (4.2)$$

avec  $E_{\mathcal{R}}$  et  $E_{\mathcal{I}}$  les parties réelle et imaginaire du champ complexe  $E = E_{\mathcal{R}} + iE_{\mathcal{I}}$  respectivement. Étant donné que les atomes ne sont sensibles qu'à l'intensité lumineuse  $I = |E|^2$ ,

on montre alors que la distribution de probabilité de l'intensité lumineuse suit une loi exponentielle [Goodman, 2007]

$$\mathcal{P}(I) = \frac{1}{\bar{I}} \exp\left(-I/\bar{I}\right). \quad (4.3)$$

De manière générale, on appellera *speckle pleinement développé* tout speckle vérifiant cette loi de probabilité. Deux conséquences importantes de cette loi sont à noter :

- L'écart-type  $\sigma_I$  de la loi 4.3 est égal à sa valeur moyenne  $\bar{I}$ , et donc le contraste  $\sigma_I/\bar{I}$  d'une figure de speckle pleinement développé est de 1. Une telle figure comportera alors des zones de forte intensité tout comme des zones d'intensité quasi-nulle.
- La probabilité d'obtenir une forte intensité lumineuse est exponentiellement petite, tandis que les zones de faible intensité sont beaucoup plus probables. Ainsi, une figure typique de speckle (représentée figure 4.1) est composée de maxima d'intensité lumineuse (*grains de speckle*) entourés de larges zones d'ombre.

#### 4.1.2 Propriétés du diffuseur

L'analyse précédente décrivant la statistique de l'intensité lumineuse d'un speckle pleinement développé repose sur deux hypothèses :

- Il faut qu'un grand nombre d'émetteurs participe à l'interférence au point d'observation. Notamment, cela signifie que le diffuseur comporte un nombre suffisamment grand de *grains* ( $r_{\text{diff}} \ll D$ ) et que ceux-ci rayonnent au point d'observation. Ce dernier point sera illustré section 4.2.
- Pour que la distribution de probabilité de l'amplitude soit centrée en 0, propriété essentielle pour un speckle pleinement développé, il faut que la distribution de phases soit suffisamment large, c'est à dire  $\sigma_\phi \gg 2\pi$ .

Les deux grandeurs apparaissant dans ces hypothèses,  $r_{\text{diff}}$  et  $\sigma_\phi$ , sont fixées par les propriétés du diffuseur, que nous nous attacherons à décrire dans cette partie.

Dans le cadre de notre expérience, la génération du speckle se fait par transmission d'une onde laser au travers d'une lame de verre dépolie, d'épaisseur locale  $e(\mathbf{x}_0)$  aléatoire et répartie selon une distribution gaussienne de largeur  $\sigma_e$  et de valeur moyenne  $\bar{e}$ , où  $\dots$  représente la moyenne sur les différentes réalisations de l'épaisseur aléatoire. On supposera que cette lame a été dépolie de manière homogène, ainsi, la statistique de l'épaisseur ne dépend pas de la position considérée sur la surface du diffuseur. On assimilera donc la distribution de l'épaisseur à un processus stationnaire.

La phase localement accumulée par le faisceau laser incident lors de la traversée du diffuseur est proportionnelle à l'épaisseur traversée et donnée par

$$\phi(\mathbf{x}_0) = 2\pi(n - 1) \frac{e(\mathbf{x}_0)}{\lambda}, \quad (4.4)$$

avec  $n$  l'indice du verre et  $\lambda \approx 780\text{nm}$  la longueur d'onde de l'onde laser. L'influence de cette phase sur l'amplitude du champ laser se traduit via la transmission locale du diffuseur

$$t_{\text{diff}}(\mathbf{x}_0) = e^{i\phi(\mathbf{x}_0)} \quad (4.5)$$

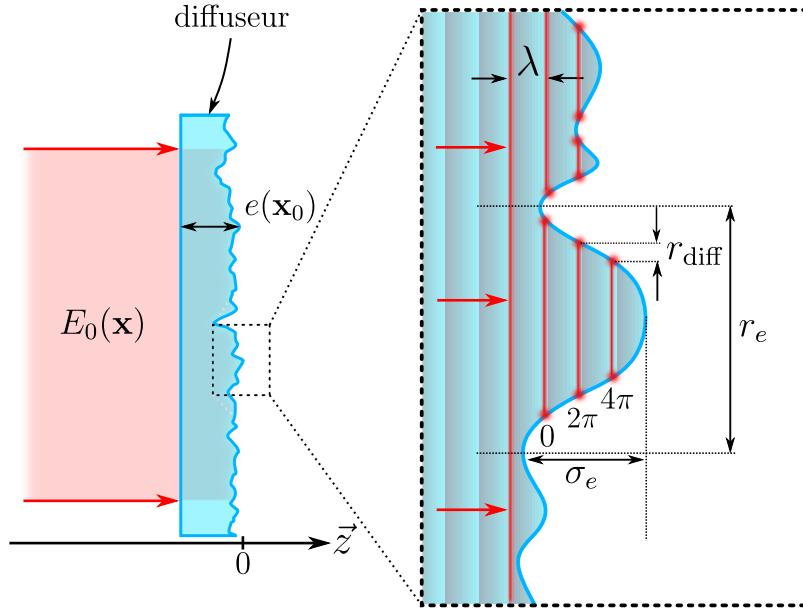


FIGURE 4.2 – **Caractéristiques du diffuseur.** L'épaisseur aléatoire est caractérisée par une hauteur typique  $\sigma_e$  et une granularité de taille  $r_e$ . Pour  $\sigma_e \gg \lambda$ , on a plusieurs oscillations de l'onde incidente dans le même grain, et donc  $t_{\text{diff}}$  qui est une fonction  $2\pi$ -périodique, voit sa corrélation réduite.

dont la valeur moyenne  $\overline{t_{\text{diff}}}$  caractérise le pouvoir diffusant. Pour une lame peu rugueuse, le faisceau est en moyenne peu affecté lors de sa traversée et l'on a  $\overline{t_{\text{diff}}} \approx 1$ , tandis que dans le cas d'un diffuseur fort  $\overline{t_{\text{diff}}} \approx 0$ . En fixant la phase moyenne  $\overline{\phi} = 0$ , on montre annexe ?? que [Denechaud, 2018]

$$\overline{t_{\text{diff}}} = e^{-\frac{\sigma_\phi^2}{2}} \quad \text{avec} \quad \sigma_\phi = 2\pi(n-1)\frac{\sigma_e}{\lambda}. \quad (4.6)$$

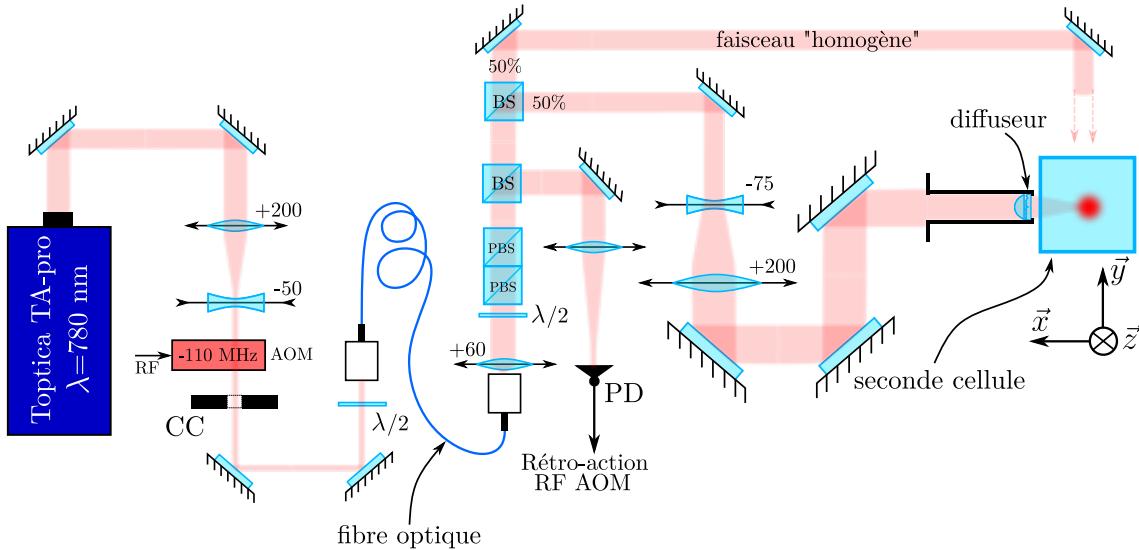
Dans le cas d'un diffuseur de grande rugosité, dont l'épaisseur typique des grains  $\sigma_e$  est de l'ordre de plusieurs  $\lambda$ , on a  $\sigma_\phi \gg 2\pi$  et cela permet donc de considérer que la distribution de phases est constante sur l'intervalle  $[0, 2\pi]$ , essentiel pour un speckle pleinement développé.

Les grains du diffuseur sont de plus caractérisés par une certaine extension typique  $r_e$  correspondant à une largeur de corrélation de l'épaisseur. Celle-ci induit donc une corrélation spatiale de la transmission, décrite à l'aide la fonction de corrélation

$$C_{\text{diff}}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}'_0) = \overline{t_{\text{diff}}(\mathbf{x}_0)t_{\text{diff}}^*(\mathbf{x}'_0)} = \overline{e^{i(\phi(\mathbf{x}_0)-\phi(\mathbf{x}'_0))}}. \quad (4.7)$$

Puisque l'épaisseur et la phase sont proportionnelles, ces deux grandeurs sont corrélées sur la même taille  $r_e$  correspondant à la granularité de la surface du verre. En revanche, dans le cas où  $\sigma_e \gg \lambda$  (ce qui est le cas sur notre expérience), l'onde oscille plusieurs fois dans le même grain du diffuseur. La transmission étant une fonction  $2\pi$ -périodique de la phase, celle-ci perd alors sa corrélation sur une taille  $r_{\text{diff}} \ll r_e$ , voir figure ?? . On montre alors annexe ?? que la corrélation de la transmission à courte portée<sup>1</sup> est de forme

1. La corrélation de la transmission tend suffisamment vite vers 0 pour que l'on puisse considérer que  $|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}'_0| \ll r_e$  dans le cas où  $\sigma_\phi \gg 2\pi$ .



**FIGURE 4.3 – Montage de génération du désordre optique.** Ce montage se décompose en deux parties, la première étant dédiée à la mise en forme du faisceau. Celui-ci est émis d'un laser Toptica TA-Pro, dont le mode et la polarisation sont filtrés, et la puissance est stabilisée. Dans un second temps, ce faisceau est focalisé sur les atomes et passe au travers du diffuseur générant le speckle.

gaussienne :

$$C_{\text{diff}}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}'_0) \approx \exp\left(-\frac{|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}'_0|^2}{2r_{\text{diff}}^2}\right) \quad \text{avec} \quad r_{\text{diff}} = r_e/\sigma_\phi. \quad (4.8)$$

$r_{\text{diff}}$  joue alors le rôle de la taille effective d'un émetteur indépendant tel que considéré dans la section 4.1.1. La condition d'un grand nombre d'émetteurs s'écrit alors  $r_{\text{diff}} \ll D$ .

Enfin, il est possible de définir l'angle de diffusion  $\theta_{\text{diff}} = \lambda/\pi r_{\text{diff}} = 2(n-1)\sigma_e/r_e$ , qui est indépendant de la longueur d'onde de l'onde laser incidente.  $\theta_{\text{diff}}$  est donc une constante du diffuseur, fixée par les paramètres géométriques de celui-ci.

### 4.1.3 Implémentation expérimentale

Les expériences menées sur notre dispositif jusqu'en 2014 utilisaient un speckle réalisé à la longueur d'onde de 532 nm. Ce grand désaccord vers le bleu par rapport à la transition D<sub>2</sub> du <sup>87</sup>Rb permet ainsi de s'affranchir de l'émission spontanée, même pour les très longs temps de propagation nécessaires à l'étude de la localisation d'Anderson. Depuis 2015 en revanche, l'équipe utilise un speckle accordable autour de 780 nm offrant ainsi la possibilité de réaliser un désordre attractif ou répulsif. Nous verrons section 4.3 que cette accordabilité autour de la transition D<sub>2</sub> offre un grand nombre de possibilités expérimentales.

#### Mise en forme du faisceau speckle

Par vœux de concision, seules les grandes lignes du montage de génération du speckle à 780 nm seront données ici, de nombreux détails à propos de ce montage pouvant être retrouvés dans les thèses de Jérémie Richard, Vincent Denechaud et Musawwadah Mukhtar [Richard, 2015; Denechaud, 2018; Mukhtar, 2019]. De plus, les détails des éléments du

montage dépendent fortement de la mesure souhaitée comme nous le verrons dans la suite de chapitre, néanmoins la philosophie en reste inchangée.

Ce montage se décompose en deux parties, la première permettant de mettre en forme les propriétés du faisceau laser, et la seconde génère le désordre sur les atomes.

Le faisceau source du speckle est émis par un laser industriel *Toptica TA-Pro 2 W* accordable autour de 780 nm. Étant donné la proximité de la transition atomique, ce laser peut être asservi par battements sur le laser repompeur *L2*<sup>2</sup>, ce qui permet alors d'en fixer la fréquence avec une précision de 1 MHz. Le mode spatial et la polarisation du faisceau sont filtrés à l'aide d'une fibre optique à maintien de polarisation et de cubes séparateurs de polarisation.

Une partie de la puissance du faisceau est ensuite prélevée et mesurée à l'aide d'une photodiode, et la rétroaction sur le faisceau à l'aide d'un modulateur acousto-optique (AOM pour l'anglais *Acousto-Optic Modulator*) permet alors d'en stabiliser la puissance. La photodiode étant placée après la fibre optique et les cubes séparateurs de polarisation, la boucle d'asservissement de puissance permet de plus de s'affranchir des fluctuations de puissance dues à la polarisation.

Enfin, le faisceau est séparé en deux parties par une séparatrice 50/50, chacune de ces parties pouvant être envoyée sur les atomes. La partie réfléchie est ensuite agrandie à l'aide d'un télescope avant d'être focalisée sur les atomes et diffraction par le diffuseur, dont la géométrie sera présentée dans le paragraphe suivant. À ce stade, on dispose d'un faisceau de waist 14.6 mm (rayon à  $1/e^2$ ), de polarisation  $\pi$  et dont la puissance est stabilisée et contrôlable.

Historiquement, la partie transmise était utilisée afin de réaliser une superposition cohérente de deux faisceaux speckle, permettant d'obtenir un désordre isotrope<sup>3</sup> [Jendrzejewski, 2012]. Aujourd'hui, ce faisceau est utilisé sans diffuseur et permet de réaliser un potentiel homogène servant à calibrer l'amplitude du potentiel.

## Génération du speckle

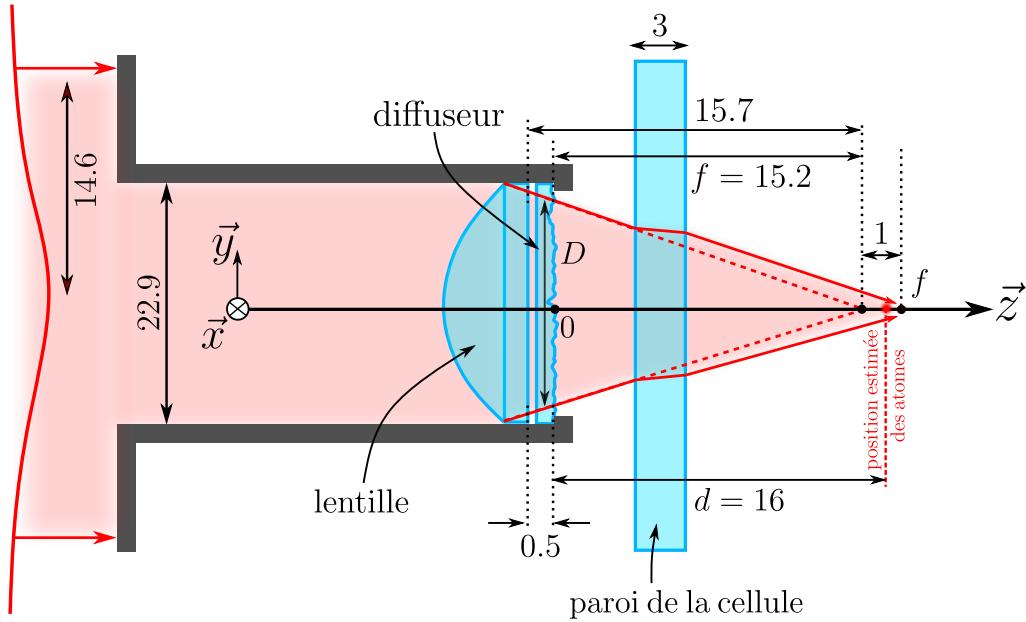
La génération du speckle se fait selon le montage représenté figure 4.4. Un faisceau gaussien collimaté de waist 14.6 mm et de longueur d'onde  $\lambda = 780$  nm, dont la mise en forme a été présentée dans le paragraphe précédent, est tronqué par un diaphragme de diamètre 22.9 mm. Ce faisceau passe ensuite au travers d'une lentille asphérique épaisse (*Thorlabs ACL2520-B*) de focale 16.0 mm (et de frontale 15.7 mm) montée dans ce même diaphragme. Le rôle de celle-ci est de focaliser la lumière sur les atomes<sup>4</sup>. Accolé à cette

---

2. Le choix d'asservir ou non ce laser dépend du désaccord utilisé. Ainsi, nous verrons que le laser speckle n'était pas asservi en fréquence pour la mesure du temps de diffusion élastique ( $|\Delta|/2\pi \sim 1$  THz), tandis que ce fut le cas lors de la mesure des fonctions spectrales ( $|\Delta|/2\pi \sim 70$  MHz).

3. Comme nous le verrons section 4.2.3, les grains d'un speckle unique sont étendus suivant la direction longitudinale. L'interférence entre deux speckles croisés permet de fortement réduire cette anisotropie [Piraud, 2012].

4. Nous verrons dans la section suivante que cela permet d'obtenir des grains de speckle les plus petits possibles. En effet, on attend la manifestation d'effets quantiques sur la propagation d'une onde de matière dans un speckle pour des longueurs d'onde de de Broglie plus grandes que la taille des grains de speckle.



**FIGURE 4.4 – Géométrie du montage de génération du speckle.** Un faisceau gaussien incident de waist 14.6 mm est tronqué dans un diaphragme de diamètre 22.9 mm qui supporte le diffuseur. Ce faisceau est ensuite focalisé par une lentille asphérique épaisse de focale 16 mm et traverse le diffuseur d'épaisseur 0.5 mm. Le plan de focalisation est déplacé d'environ 1 mm à cause de la paroi de la cellule à vide, d'épaisseur 3 mm.

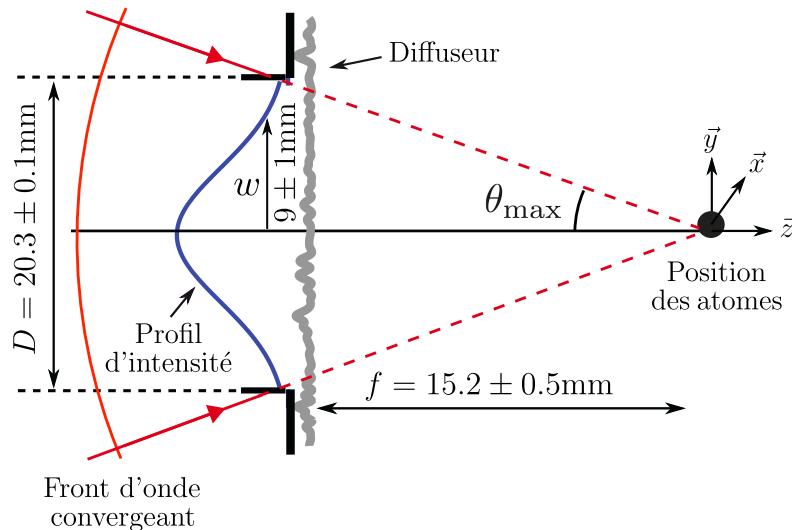
lentille se trouve un diffuseur *Newport FSD10-3* possédant une épaisseur de 0.5 mm<sup>5</sup> et un angle de diffusion  $\theta_{\text{diff}} \approx 5^\circ$ .

Enfin, ce faisceau convergent traverse la paroi de la cellule en verre sous ultra-vide d'épaisseur  $e = 3.0$  mm et située à 0.5 mm de la monture du diffuseur. Le matériau de cette cellule est du Vycor, d'indice optique  $n = 1.46$ . L'épaisseur de cette cellule, considérée comme une lame à faces parallèles, induit un décalage des rayons lumineux par réfraction, décalage représenté figure 4.4 montrant la trajectoire des rayons lumineux en absence de la paroi par des traits pointillés. La présence de la paroi entraîne donc un déplacement du plan de focalisation donné par  $\Delta d = e(1 - 1/n) \approx 1$  mm. La distance focale en présence de la paroi de la cellule est alors de 17.0 mm.

En choisissant pour origine de l'axe  $\vec{z}$ <sup>6</sup> la surface du diffuseur, la position du plan de focalisation se trouve à  $f = 16.2$  mm. Dans ce repère, la position des atomes dans le piège optique est estimée quant à elle à  $d = 16 \pm 0.5$  mm, dont la valeur est proche de celle de la position du plan de focalisation. Néanmoins, l'incertitude liée à la position des atomes est cruciale, celle-ci pouvant conduire à un écart de 0.7 mm du plan de focalisation. Il est ainsi primordial de connaître les propriétés du speckle autour du plan de focalisation.

5. Cette épaisseur était initialement de 3 mm avant d'être réduite à 0.5 mm par l'atelier d'optique de l'IOGS.

6. L'axe  $\vec{z}$  utilisé dans ce chapitre correspond à la direction de propagation du faisceau speckle. Dans le repère de l'expérience, il s'agit en réalité de l'axe  $\vec{x}$ , perpendiculaire au plan formé par les faisceaux du piège optique.



**FIGURE 4.5 – Géométrie effective du montage du diffuseur.** L'épaisseur de la lentille n'étant pas négligeable, l'éclairage au niveau du diffuseur a déjà subit un effet de focalisation comparé à celui au niveau de la lentille. Cela se traduit par un front d'onde au niveau du diffuseur qui est convergeant, avec un profil gaussien de largeur  $w \approx 9\text{ mm}$  tronqué à un diamètre  $D \approx 20.3\text{ mm}$ .

### Géométrie effective du montage du diffuseur

La lentille asphérique utilisée pour la focalisation du faisceau sur les atomes étant épaisse<sup>7</sup>, le faisceau est donc fortement affecté par sa traversée. L'éclairage dans le plan du diffuseur correspond donc à l'éclairage incident gaussien de waist 14.6 mm (rayon à  $1/e^2$ ) tronqué par une pupille de diamètre 22.9 mm et ayant déjà subit un effet de focalisation. Il a été déterminé par photographie que le profil de l'éclairage dans le plan du diffuseur est aussi de forme gaussienne tronquée, avec un waist  $w_0 = 9 \pm 1\text{ mm}$  et une pupille de diamètre  $D = 20.3 \pm 0.1\text{ mm}$ .

Il est alors possible de décrire le montage du diffuseur et le champ incident à l'aide d'une géométrie effective simplifiée illustrée figure 4.5. On considérera ainsi que le profil d'intensité au niveau du diffuseur est donné par une forme gaussienne de largeur  $w = 9 \pm 1\text{ mm}$  tronquée par une diaphragme de diamètre  $D = 20.3 \pm 0.1\text{ mm}$  et convergeant à la distance  $f = 15.2 \pm 0.5\text{ mm}$ <sup>8</sup>. Ceci entraîne une ouverture numérique maximale  $\text{ON} = \sin(\theta_{\max}) = 0.55 \pm 0.02$ .

Dans la suite, nous utiliserons ce modèle pour décrire les propriétés du champ de speckle.

7. L'épaisseur au centre est de 12 mm pour une frontale de 15.7 mm.

8. Si la présence de la paroi de la cellule entraîne un déplacement du plan focalisation, celle-ci ne modifie pas l'ouverture numérique du système, c'est à dire l'angle des rayons avec l'axe optique. Comme nous le verrons dans la suite, il s'agit de la quantité qui décrit, avec la longueur d'onde, les propriétés spatiales d'un champ de speckle.

## 4.2 Propriétés spatiales d'un champ de speckle

Le speckle résultant de la propagation d'un faisceau transmit par le diffuseur, il est donc régit par les lois de la diffraction et il est possible de déduire ses propriétés spatiales de celles de l'éclairage au niveau au diffuseur. Notamment, les variations spatiales du champ de speckle sont décrites quantitativement par la fonction de corrélation de ce champ. L'étude de cette fonction de corrélation nous permet donc de déterminer toutes les tailles caractéristiques d'intérêt pour notre expérience, l'extension du champ de speckle ainsi que les tailles moyennes des grains de lumière.

Dans cette section, nous allons nous attacher à décrire ces échelles de longueur caractéristiques autour du plan de focalisation à l'aide de la fonction de corrélation du champ, dont le détail des calculs est donné en annexe ??.

De plus, lors de la conception de ce système, l'extension du champ de speckle ainsi que les tailles des grains de speckle ont été mesurées expérimentalement sur un montage reproduisant exactement les conditions réelles en présence de la cellule à vide, celle-ci empêchant de faire des mesures in-situ. La description de ces mesures et de leur traitement sont référencées dans la thèse de Jérémie Richard [Richard, 2015].

### 4.2.1 Extension transverse du champ de speckle le long de l'axe optique

L'extension transverse du champ de speckle est donnée par le waist du faisceau speckle, il est donc nécessaire de calculer le profil d'intensité moyenne  $\bar{I}(\mathbf{x}_d)$ , où l'ensemble des points  $\{\mathbf{x}_d\}$  correspond au plan  $\{x, y, z = d\}$  situé à une distance  $d$  de la surface du diffuseur. Pour cela, explicitons le champ rayonné  $E(\mathbf{x}_d)$  à l'aide du principe de Huygens-Fresnel dans l'approximation paraxiale :

$$E(\mathbf{x}_d) \propto \int d\mathbf{x}_0 E_{\text{diff}}(\mathbf{x}_0) \exp\left(ik\frac{\mathbf{x}_0^2}{2d_{\text{eff}}}\right) \exp\left(-ik\frac{\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_0}{d}\right), \quad (4.9)$$

où  $k = 2\pi/\lambda$  est le nombre d'onde et  $d_{\text{eff}}$  correspond à une distance effective donnée par  $1/d_{\text{eff}} = 1/d - 1/f$ . L'ensemble des points  $\{\mathbf{x}_0\}$  décrit le plan du diffuseur  $\{x, y, z = 0\}$ , et  $E_{\text{diff}}(\mathbf{x}_0)$  correspond au champ dans ce plan, qu'il est possible de décomposer sous la forme

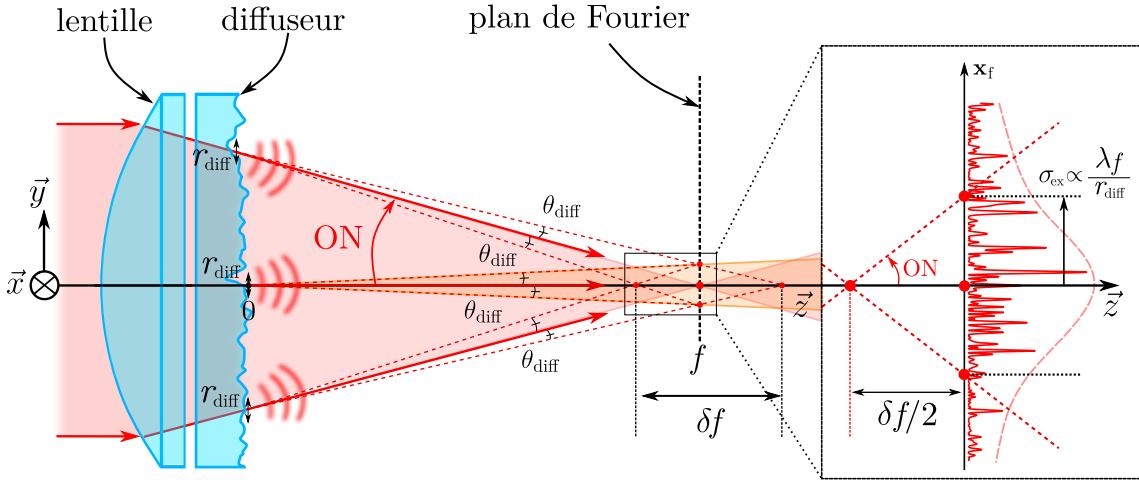
$$E_{\text{diff}}(\mathbf{x}_0) = E_0(\mathbf{x}_0)t_{\text{diff}}(\mathbf{x}_0) \quad \text{avec} \quad E_0(\mathbf{x}_0) = E_{\text{inc}}(\mathbf{x}_0)m(\mathbf{x}_0), \quad (4.10)$$

où  $t_{\text{diff}}(\mathbf{x}_0)$  est la transmission du diffuseur,  $E_{\text{inc}}(\mathbf{x}_0)$  est le champ incident<sup>9</sup>, et  $m(\mathbf{x}_0) = \Theta(|\mathbf{x}_0| - D/2)$  avec  $\Theta$  la fonction de Heaviside est un masque représentant le diaphragme de diamètre  $D$  et les montures de optiques.  $E_0(\mathbf{x}_0)$  correspond alors au champ au niveau du diffuseur, et on supposera dans la suite que celui-ci varie lentement à l'échelle des variations de  $t_{\text{diff}}(\mathbf{x}_0)$ , c'est à dire que  $E_0(\mathbf{x}_0 + \delta\mathbf{x}_0) \approx E_0(\mathbf{x}_0)$  avec  $\delta\mathbf{x}_0$  de l'ordre de  $r_{\text{diff}}$ .

On montre alors (voir annexe ??) que le profil d'intensité moyenne à la distance  $d$  peut s'écrire [Gatti et al., 2008]

$$\begin{aligned} \bar{I}(\mathbf{x}_d) &= \overline{E(\mathbf{x}_d)E^*(\mathbf{x}_d)} \\ &\propto I_0\left(\frac{d_{\text{eff}}}{d}\mathbf{x}_d\right) * \widetilde{C_{\text{diff}}}\left(\frac{\mathbf{x}_d}{\lambda d}\right), \end{aligned} \quad (4.11)$$

<sup>9</sup>. Il s'agit du faisceau gaussien de waist 9 mm dans notre géométrie effective.



**FIGURE 4.6 – Extension du champ de speckle.** L’extension du faisceau de speckle est due à deux effets distincts, la focalisation du faisceau incident et la diffraction du faisceau par le diffuseur. La contribution de la focalisation à l’extension du faisceau est illustrée par des flèches rouges et un remplissage rose, tandis que celle de la diffraction correspond à un remplissage orange. La région aux alentours du plan focal est particulièrement intéressante car il s’agit de celle où l’ensemble des émetteurs contribuent à l’éclairement, chaque émetteur diffractant dans un cône d’angle  $\theta_{\text{diff}}$  illustré par des pointillés rouges. Dans le cas où l’angle de diffusion est petit devant l’ouverture numérique  $\theta_{\text{diff}} \ll \text{ON}$ , on peut estimer par trigonométrie l’étendue de cette région à  $\delta f/2 = \sigma_{\text{ex}}/\text{ON}$  (encart).

où le symbole  $*$  dénote le produit de convolution. L’évolution du profil d’intensité moyenne en fonction de la distance  $d$  est alors dû à deux contributions dont l’interprétation physique est la suivante :

- Le premier terme correspond à l’effet de la lentille, et focalise donc le profil d’intensité initiale  $I_0(\mathbf{x}_0) = |E_0(\mathbf{x}_0)|^2$  dans le plan focal  $\{x, y, z = f\}$ . Cette focalisation se traduit au travers d’un changement d’échelle de l’intensité par le facteur  $d/d_{\text{eff}} = |d - f|/f$ . Ainsi, la taille de ce faisceau focalisé décroît avec la distance jusqu’à s’annuler dans le plan focal, comme prédit par l’optique géométrique.
- Le second terme est la transformée de Fourier de la fonction de corrélation du diffuseur  $C_{\text{diff}}(\mathbf{x}_0)$ . Ce terme traduit la diffraction de l’onde incidente par les grains du diffuseur de taille  $r_{\text{diff}}$ , dont la largeur est donnée par  $\lambda d/\pi r_{\text{diff}}$ , qui croît linéairement avec la distance  $d$ .

Ces dépendances sont illustrées figure 4.6, où le fond rose correspond au premier terme de focalisation, tandis le fond orange illustre le second terme de diffraction. On identifie alors deux régimes pour lesquels un terme est prépondérant.

Dans une première région, loin du plan focal de la lentille, la taille du faisceau est donnée par l’effet de focalisation de la lentille. Une seconde région, proche du plan focal de la lentille, est dominée par l’effet de diffraction des émetteurs du diffuseur, la taille de l’éclairement incident étant fortement réduite par focalisation. Ainsi, pour une zone très proche du plan focal de la lentille, on peut décrire le profil d’intensité lumineuse par

$$\bar{I} \propto \text{TF}[C_{\text{diff}}](\mathbf{x}_f/\lambda f) \quad (4.12)$$

où l'ensemble des points  $\{\mathbf{x}_f\}$  correspond au plan de Fourier<sup>10</sup>  $\{x, y, z = f\}$ , et  $C_{\text{diff}}$  est la fonction de corrélation du diffuseur, de forme de gaussienne avec une largeur  $r_{\text{diff}}$ . Le profil d'intensité lumineuse dans le plan de Fourier est alors donnée par

$$\bar{I}(\mathbf{x}_f) \propto \exp\left(-\frac{2|\mathbf{x}_f|^2}{\sigma_{\text{ex}}^2}\right) \quad \text{avec} \quad \sigma_{\text{ex}} = \frac{\lambda f}{\pi r_{\text{diff}}} . \quad (4.13)$$

$\sigma_{\text{ex}}$  correspond donc au waist du profil d'intensité moyenne, dont l'expression peut se réécrire à l'aide de l'angle de diffusion  $\sigma_{\text{ex}} = \theta_{\text{diff}} f = 1.5 \pm 0.1 \text{ mm}$ . Donc, dans le plan de Fourier, l'extension du champ de speckle ne provient que de l'effet de la diffraction des émetteurs individuels dont les faisceaux se recouvrent tous, comme illustré figure 4.6 par la zone orange.

Cette condition de recouvrement des faisceaux provenant de l'ensemble des émetteurs du diffuseur permet de considérer que dans cette région le speckle est entièrement développé. Afin d'en déterminer l'étendue longitudinale, on s'intéresse aux positions de l'espace où l'ensemble des faisceaux provenant du diffuseur participent. Dans la limite  $\theta_{\text{diff}} \ll \text{ON}$ , on détermine par trigonométrie que cette zone s'étend par part et d'autre du plan de Fourier sur une distance  $\delta f / 2 \approx \sigma_{\text{ex}} / \text{ON} = 2.5 \pm 0.1 \text{ mm}$  (voir figure 4.6), délimitant ainsi les régions décrites précédemment. Par analogie avec un faisceau gaussien, on appellera  $\delta f$  la *distance de Rayleigh* du champ de speckle, et sa valeur nous assure que les atomes de trouveront dans la zone où le speckle est pleinement développé, celle-ci étant un ordre de grandeur plus grande que l'incertitude de positionnement des atomes.

#### 4.2.2 Longueur de corrélation transverse le long de l'axe optique

La seconde taille caractéristique du speckle, la taille des grains de lumière, est une grandeur d'une importance capitale pour la physique du désordre. Si l'extension du faisceau de speckle est une grandeur d'intérêt pratique (celle-ci donne une borne supérieure sur les tailles de nuages), nous verrons chapitre ?? que la taille des grains de speckle fixe la dynamique de la propagation d'une onde en milieu désordonné.

Le potentiel ressenti par les atomes étant proportionnel à l'intensité lumineuse, la taille des grains du potentiel est donnée par la largeur de la fonction de corrélation des fluctuations d'intensité. À l'aide du théorème de Wick pour les variables gaussiennes, il est possible de relier cette fonction de corrélation des fluctuations d'intensité à la fonction de corrélation en amplitude du champ :

$$\overline{\delta I(\mathbf{x}_d)\delta I(\mathbf{x}'_d)} = \left| \overline{E(\mathbf{x}_d)E^*(\mathbf{x}'_d)} \right|^2 , \quad (4.14)$$

où  $\delta I(\mathbf{x}_d) = I(\mathbf{x}_d) - \bar{I}(\mathbf{x}_d)$  correspond aux fluctuations statistiques d'intensité et les positions  $\mathbf{x}_d$  et  $\mathbf{x}'_d$  correspondent à deux points dans le plan  $\{x, y, z = d\}$  transverse à l'axe optique.

Dans les conditions expérimentales usuelles, il est possible de négliger l'effet de l'extension spatiale finie du speckle, celle-ci étant très grande à l'échelle des grains de speckle. Ainsi, on peut considérer que la fonction de corrélation en amplitude ne dépend uniquement que de la différence des positions considérées. Dans ce régime, on montre annexe ?? que la

10. Dans le plan focal  $\{x, y, z = f\}$ , le champ rayonné est alors la transformée de Fourier du champ incident comme illustré par la formule 4.9. Il s'agit d'une propriété bien connue des lentilles de pouvoir ramener l'infini de la diffraction de Fraunhofer à distance finie.

fonction de corrélation transverse en amplitude le long de l'axe optique peut s'écrire [Gatti et al., 2008] :

$$\begin{aligned} C_E(\mathbf{x}_d, \mathbf{x}'_d) &= \overline{E(\mathbf{x}_d) E^*(\mathbf{x}'_d)} \\ &\propto \tilde{I}_0\left(\frac{\delta \mathbf{x}_d}{\lambda d}\right) * C_{\text{diff}}\left(\frac{d_{\text{eff}}}{d} \delta \mathbf{x}_d\right), \end{aligned} \quad (4.15)$$

où  $\delta \mathbf{x}_d = \mathbf{x}'_d - \mathbf{x}_d$ . De même que pour l'extension spatiale du champ de speckle, la fonction de corrélation transverse résulte de deux contributions, dont les interprétations physiques sont les suivantes :

- Le premier terme correspond à la transformée de Fourier de l'intensité lumineuse dans le plan du diffuseur. Il s'agit ici du motif de diffraction à l'infini en l'absence du diffuseur, dont la taille est proportionnelle à la distance. Ce facteur d'échelle s'interprète comme une diminution de l'ouverture numérique au fur et à mesure de l'éloignement avec le diffuseur, comme indiqué par la relation  $ON'(d) = D/2d$  en considérant les rayons les plus inclinés, avec  $D$  la taille du diaphragme de l'éclairage au niveau du diffuseur. Ce terme conduit donc à largeur de l'ordre de  $\sim \lambda/\pi ON'(d)$ , qui croît linéairement avec la distance  $d$ .
- Le second terme décrit quant à lui le fait que les grains du diffuseur ne diffractent que selon un angle  $\theta_{\text{diff}}$ . De fait, ce terme décrit les régions de l'espace dans lesquelles l'ensemble du diffuseur ne participe pas à l'interférence au point  $\mathbf{x}_d$ , comme illustré par la zone orange figure 4.7. Ce terme joue ainsi le rôle d'ouverture numérique effective, dont l'expression  $ON_{\text{eff}}(d) = \theta_{\text{diff}} f / |d - f|$  peut être obtenue par trigonométrie. L'écriture de ce terme donnée équation 4.15 permet néanmoins d'obtenir une expression simple de la largeur induite pour la fonction de corrélation transverse :  $\sim \lambda/\pi ON_{\text{eff}}(d)$ .

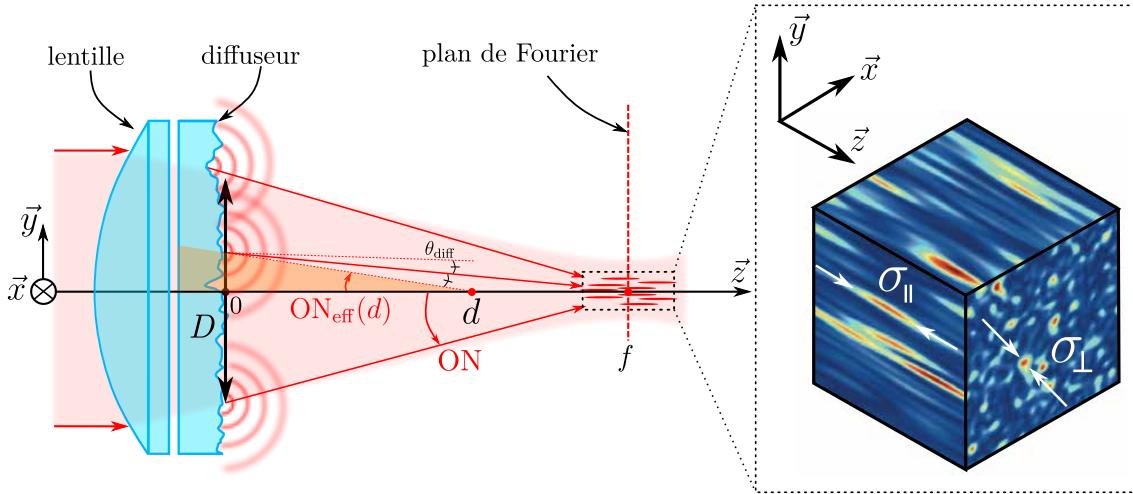
La largeur de la fonction de corrélation apparaît alors comme la plus petite taille permise par les lois de la diffraction : il s'agit de la limite de diffraction. L'étude de la taille transverse des grains de speckle se résume alors à l'évolution de l'ouverture numérique le long de l'axe de propagation du faisceau.

À l'instar de l'extension du champ de speckle, il est possible d'identifier deux régions dans lesquelles le comportement de la largeur de la fonction de corrélation transverse en amplitude du speckle est majoritairement dû à l'un des effets mentionnés ci-dessus. La frontière entre ces deux régions est donnée, comme pour l'extension du speckle, par la distance de Rayleigh  $\delta f$  du champ lumineux qui caractérise, rappelons-le, l'étendue sur laquelle l'ensemble de diffuseur participe à l'amplitude rayonnée.

Nous considérerons donc dans la suite que les atomes se trouvent à proximité du plan de Fourier, et la fonction de corrélation sera dominée par le régime de diffraction à l'infini, où l'ouverture numérique y est maximale. La fonction de corrélation des fluctuations d'intensité s'écrit alors simplement

$$\overline{\delta I(\mathbf{x}_f) \delta I(\mathbf{x}_f + \delta \mathbf{x}_f)} \propto |\text{TF}[I_0](\delta \mathbf{x}_f / \lambda f)|^2, \quad (4.16)$$

qui n'est autre que le théorème de Van Cittert-Zernike en remarquant que la fonction de corrélation  $\overline{\delta I(\mathbf{x}_f) \delta I(\mathbf{x}_f + \delta \mathbf{x}_f)}$  correspond au degré de cohérence spatiale. Dans la suite, nous assimilerons la forme de cette fonction de corrélation à une gaussienne (voir section 4.2.4), cependant, la forme exacte de la fonction de corrélation aux alentours du plan de



**FIGURE 4.7 – Tailles des grains de speckle.** La taille transverse  $\sigma_{\perp}$  des grains de speckle est donnée par la limite de diffraction, et dépend donc de l'ouverture numérique à la position d'observation  $d$ . Loin du plan de Fourier, seule une zone réduite du diffuseur participe à l'interférence, réduisant donc l'ouverture numérique (zone orange). **Encart :** Simulation tridimensionnelle d'un champ de speckle. Celle-ci fait apparaître une forme très allongée des grains selon la direction longitudinale. La taille longitudinale  $\sigma_{\parallel}$  des grains est de l'ordre de la distance de Rayleigh associée à la taille transverse  $\sigma_{\perp}$  comme on le verra section 4.2.3.

Fourier nécessite tout de même une connaissance fine du profil d'intensité dans le plan du diffuseur<sup>11</sup>.

Nous retiendrons ici que la taille transverse des grains de lumière est donnée par la limite de diffraction du système,  $\sigma_{\perp} \sim \lambda/\pi \text{ON}$  de l'ordre de  $0.5 \mu\text{m}$ , bien inférieure à l'extension du faisceau de speckle  $\sigma_{\perp} \ll \sigma_{\text{ex}}$ . Une calibration précise de la taille transverse des grains de speckle est présentée section 4.2.4.

### 4.2.3 Longueur de corrélation longitudinale autour du plan de Fourier

Comme représenté figure 4.7, les grains de speckle possèdent une extension longitudinale finie. De même que dans le cas de l'extension transverse des grains, la taille longitudinale des grains de speckle est donnée par la largeur de la fonction de corrélation longitudinale des fluctuations des grains de speckle aux alentours du plan de Fourier :

$$\overline{\delta I(f)\delta I(f + \delta z)} = |E(f)E^*(f + \delta z)|^2 , \quad (4.17)$$

évaluée aux positions  $\{0, 0, z = f\}$  et  $\{0, 0, z = f + \delta z\}$  sur l'axe optique.

En supposant que l'extension longitudinale  $\delta f$  du champ de speckle est très grande devant la taille longitudinale des grains, on peut se limiter à des petits déplacements  $\delta z \ll \delta f$ . On montre alors que la corrélation longitudinale en amplitude aux alentours du

11. L'assimilation à une forme gaussienne revient à considérer que l'effet du diaphragme sur l'éclairement incident est moindre dans le cas de la corrélation transverse.

plan de Fourier peut s'écrire [Magatti et al., 2009] :

$$\overline{E(f)E^*(f + \delta z)} \propto \int d\mathbf{x}_0 I_0(\mathbf{x}_0) e^{i\pi\mathbf{x}_0^2\delta z/\lambda f^2}. \quad (4.18)$$

On retrouve ainsi un comportement similaire à celui de la corrélation transverse aux alentours du plan de Fourier : la fonction de corrélation ne dépend que de l'éclairement incident. Cependant, la détermination de la fonction de corrélation longitudinale est plus compliquée que celle de la corrélation transverse, celle-ci ne se résumant pas qu'à une simple transformation de Fourier. Néanmoins, il est possible de donner une estimation de la longueur de corrélation à l'aide de la *méthode du col*. En effet, les valeurs de  $\mathbf{x}_0$  qui contribuent significativement à l'intégrale sont celles pour lesquelles la phase  $\pi\mathbf{x}_0^2\delta z/\lambda f^2$  est très petite devant 1. On peut alors obtenir une estimation de la longueur de corrélation longitudinale :

$$\sigma_{\parallel} \sim \frac{\lambda}{\pi ON^2}. \quad (4.19)$$

La taille longitudinale des grains apparaît alors comme étant la longueur de Rayleigh associée à la taille transverse des grains, ceux deux grandeurs étant reliées par  $\sigma_{\parallel} \sim \sigma_{\perp}/ON$ .

### Forme de la fonction de corrélation longitudinale

Il est possible d'obtenir des expressions analytiques de la fonction de corrélation longitudinale pour certains profils d'intensité. Notamment, on peut montrer que dans le cas d'un éclairement purement gaussien, la fonction de corrélation 4.17 est de forme lorentzienne :

$$\overline{\delta I(f)\delta I(f + \delta z)} \propto \frac{1}{1 + 4\delta z^2/\sigma_{\parallel}^2} \quad (4.20)$$

avec  $\sigma_{\parallel} = 4\lambda f^2/\pi w^2$  et  $w$  le waist du faisceau incident. On retrouve ainsi la prédiction de la formule 4.19. Un second cas d'intérêt correspond à celui d'un faisceau homogène tronqué par un diaphragme de diamètre  $D$ . Dans cette situation, la fonction de corrélation longitudinale 4.17 possède une forme en sinus cardinal au carré.

Dans le cas de notre éclairement à la fois gaussien et tronqué par un diaphragme, la fonction de corrélation possède donc une forme complexe proche d'une fonction lorentzienne et d'un sinus cardinal au carré, voir figure 4.8. Une calibration expérimentale de la longueur de corrélation longitudinale, donnée par la largeur de cette fonction de forme complexe, est présentée dans la section suivante.

#### 4.2.4 Effets non-paraxiaux sur les corrélations du speckle

La forme des fonctions de corrélations étant directement donnée par celle de l'intensité  $I_0(\mathbf{x}_0)$ , la détermination précise des longueurs de corrélation du speckle demande une connaissance fine de l'éclairement dans le plan du diffuseur. Cependant, les considérations sur l'éclairement au niveau du diffuseur présentées section 4.1.3 ne suffisent pas à reproduire les fonctions de corrélations expérimentales, mesurées à l'aide d'un objectif de microscope à haute résolution. Le procédé de mesure est décrit dans la thèse de Jérémie Richard [Richard, 2015].

Cette différence observée s'explique par le fait que les expressions des fonctions de corrélation des fluctuations d'intensité ont été obtenues dans le cadre de l'approximation paraxiale. Si l'utilisation d'un système de grande ouverture numérique permet certes d'obtenir les tailles de grains les plus petites possible, cela remet en cause l'approximation paraxiale utilisée pour décrire les caractéristiques spatiales de notre champ de tavelures. En particulier, notre système permet d'obtenir une grande ouverture numérique  $ON = \sin\theta_{\max} = 0.55 \pm 0.02$  et cela implique que certains rayons lumineux sont inclinés d'un angle de plus de  $30^\circ$  par rapport à l'axe optique, pour lesquels l'approximation  $\sin\theta = \theta$  n'est plus suffisante.

Notons tout de même que la forme de la fonction de corrélation transverse est très bien décrite par une fonction gaussienne, comme représenté figure 4.8. En particulier, dans le cas d'un désordre 2D<sup>12</sup> tel qu'utilisé pour les mesures du temps de diffusion élastique, seule la corrélation transverse participe à la dynamique du transport de l'onde de matière. On définit alors la fonction de corrélation normalisée à deux dimensions par

$$c_{2D}(\Delta\mathbf{r}_\perp) = e^{-\Delta\mathbf{r}_\perp^2/\sigma_\perp^2} \quad (4.21)$$

dont l'ajustement sur les données expérimentales donne  $\sigma_\perp = 0.50 \pm 0.01 \mu\text{m}$ . Il s'agit de la valeur de la longueur de corrélation transverse que l'on retiendra dans la suite.

### Modèle numérique non paraxial

Afin de reproduire le désordre utilisé sur notre expérience, M. Pasek et D. Delande ont proposé une approche numérique reposant sur le principe de Huygens-Fresnel [Volchkov et al., 2018]. En se basant sur la géométrie de notre dispositif expérimental, ils ont développé un modèle discret dans le but est de reproduire la fonction de corrélation expérimentale

$$c_{\text{exp}}(\Delta\mathbf{x}) = \frac{\overline{\delta I(\mathbf{x})\delta I(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x})}}{\overline{\delta I^2}}, \quad (4.22)$$

essentielle à la simulation du comportement d'ondes de matière dans notre désordre optique.

Pour cela, le modèle se base sur la génération numérique d'un masque de phase représentant la forme de l'éclairement :

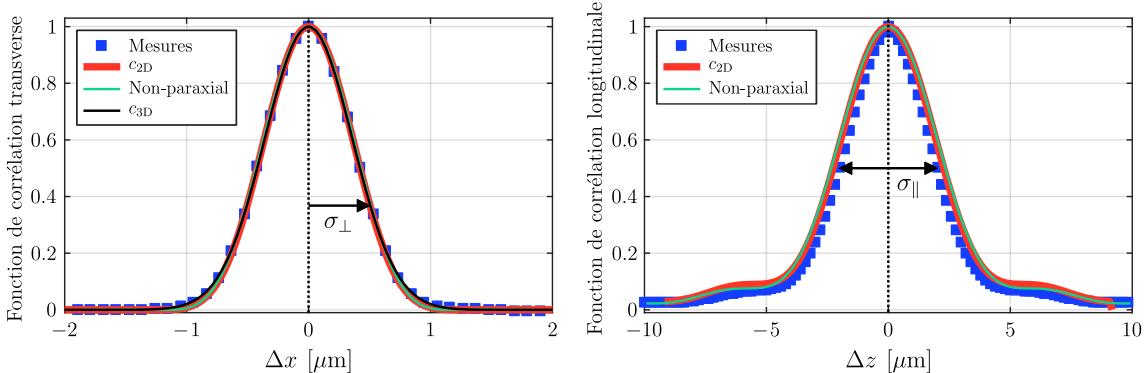
$$\mathcal{P}(\mathbf{k}) = \delta(|\mathbf{k}| - k_L) \exp\left(-\frac{\tan^2\theta}{(w_0/d)^2}\right) \Theta\left(\frac{D}{2d} - \tan|\theta|\right), \quad (4.23)$$

où  $k_L = 2\pi/\lambda$  est le nombre d'onde du faisceau laser, et  $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$  est l'angle entre le vecteur d'onde  $\mathbf{k}$  et l'axe optique.  $d$  correspond à la distance entre le plan du diffuseur et le plan de focalisation. Le second facteur traduit le profil gaussien du faisceau laser incident, tandis que le troisième facteur décrit quant à lui la présence du diaphragme. Notamment, ce modèle doit décrire l'effet du diaphragme sur les fonctions de corrélation dont le comportement dévie des formes gaussienne et lorentzienne pour les directions transverses et longitudinale respectivement.

Le champ rayonné s'écrit alors comme la somme des champs émis modulés par le masque 4.23 :

$$E(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{k}} E_u(\mathbf{k}) \mathcal{P}(\mathbf{k}) e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}}, \quad (4.24)$$

12. Cette notion sera discutée dans le chapitre ??.



**FIGURE 4.8 – Corrélations spatiales du speckle.** Les données expérimentales (carrés bleus) sont comparés aux différents modèles. Le modèle non-paraxial (courbes vertes) développé par l'équipe de Dominique Delande permet de correctement décrire les corrélations expérimentales. Le modèle paraxial à ouverture numérique effective (courbes rouges) permet lui aussi de décrire correctement les corrélations mesurées. La fonction de corrélation transverse est similaire à une gaussienne (courbe noire), dont l'ajustement permet d'extraire la longueur de corrélation transverse  $\sigma_{\perp} = 0.50 \pm 0.01 \mu\text{m}$  définie par le rayon à  $1/e$ . On définit la longueur de corrélation longitudinale  $\sigma_{\parallel} = 4.1 \pm 0.1 \mu\text{m}$  par la largeur totale à mi-hauteur des données expérimentales.

où les  $E_u$  sont des champs complexes décorrélés dont les parties réelle et imaginaire sont des variables gaussiennes centrées<sup>13</sup>. En utilisant les paramètres de l'expérience, on reproduit ainsi les bonnes propriétés statistiques du champ de tavelures, et la fonction de corrélation normalisée  $c_{\text{num}}$  simulée permet de correctement décrire celles mesurées expérimentalement, comme illustré figure 4.8.

### Modèle à ouverture numérique effective

Cependant, la mise en œuvre du modèle décrit par les équations 4.23 et 4.24 est une procédure complexe autant numériquement qu'analytiquement, en particulier pour la détermination du spectre des fréquences spatiales du désordre  $\tilde{C}(\mathbf{k})$ , déterminant pour décrire la dynamique du système. Ainsi, l'équipe a développé un modèle plus simple, basé sur l'approximation paraxiale et faisant usage d'un facteur d'échelle géométrique  $x_{\text{scale}}$  permettant de décrire une *ouverture numérique effective* [Richard et al., 2019].

Dans le cadre de l'approximation paraxiale, on montre alors que la fonction de corrélation 4.22 aux alentours du plan de Fourier s'écrit

$$c_{3D}(\Delta\mathbf{x}_{\perp}, \Delta z) \propto \left| \text{TF} \left[ I'_0(\mathbf{x}_0) e^{i\pi\mathbf{x}_0^2 \Delta z / \lambda d} \right] \frac{\Delta\mathbf{x}_{\perp}}{\lambda d} \right|^2, \quad (4.25)$$

où le profil  $I'_0(\mathbf{x}_0)$  d'intensité dans le plan du diffuseur vu sous l'ouverture numérique effective ON<sub>eff</sub> est donné par

$$I'_0(\mathbf{x}_0) = \exp \left( -\frac{2\mathbf{x}_0^2}{w_{\text{eff}}^2} \right) \Theta \left( |\mathbf{x}_0| - \frac{D_{\text{eff}}}{2} \right) \quad (4.26)$$

13. Le fait que ces champs soient décorrélés induit une extension infinie du champ de speckle. Ceci n'est pas en contradiction avec l'expérience dans la limite où l'extension du champ de speckle reste très grande devant les tailles de nos nuages, nuages se trouvant aux alentours du plan de Fourier.

avec  $\Theta(x)$  la fonction de Heaviside, et  $D_{\text{eff}} = x_{\text{scale}}D$  et  $w_{\text{eff}} = x_{\text{scale}}w$  les tailles caractéristiques effectives du faisceau.

L'optimisation de la fonction de corrélation  $c_{3D}$  sur les données expérimentales permet de reproduire de manière fidèle les détails de notre désordre. De cette manière, on détermine que  $x_{\text{scale}} = 0.875 \pm 0.005$ , donnant une ouverture numérique effective de  $\text{ON}_{\text{eff}} = 0.48 \pm 0.02$ <sup>14</sup>.

Le champ de speckle étant très étendu, la fonction de corrélation est très allongée selon la direction longitudinale comme décrit section 4.2.3. La forme de la fonction de corrélation étant compliquée, la longueur de corrélation longitudinale est définie par la largeur totale à mi-hauteur<sup>15</sup>  $\sigma_{\parallel} = 4.1 \pm 0.1 \mu\text{m}$ . Cette définition entraîne alors un rapport d'aspect d'environ 8, témoignant de la forme très allongée des grains de speckle.

Pour terminer, précisons que les définitions des longueurs de corrélation utilisées dans ce manuscrit ne sont pas uniques. Notre présent choix est motivé pour des raisons de simplicité lors de l'étude du temps de diffusion élastique (voir chapitre ??), cependant cette convention n'est pas celle la plus adaptée à l'étude des fonctions spectrales par exemple [Volchkov et al., 2018][Pasek et al., 2017].

## 4.3 Propriétés du potentiel de type speckle

Jusqu'à ce point, nous nous sommes attachés à décrire le champ lumineux d'un speckle. En particulier, nous avons montré le caractère granulaire de celui-ci, granularité dont la taille est donnée par la limite de diffraction.

À présent, nous allons décrire comment les propriétés du champ de speckle se traduisent en terme de potentiel pour les atomes.

### 4.3.1 Propriétés du potentiel

Comme annoncé en introduction de ce chapitre, le désordre nécessaire à l'étude de la propagation d'ondes de matière en milieux désordonnés est réalisé à l'aide du champ de speckle décrit précédemment, dont l'effet sur les atomes est décrit par le potentiel dipolaire présenté section 2.2.3. En effet, l'effet d'un champ laser de pulsation  $\omega$  et d'intensité  $I(\mathbf{x})$  sur un atome à deux niveaux séparés par  $\hbar\omega_0$  est donné par 2.19, que l'on peut écrire plus simplement

$$V(\mathbf{x}) \propto I(\mathbf{x}) \left( \frac{1}{\omega - \omega_0} - \frac{1}{\omega + \omega_0} \right). \quad (4.27)$$

Comme décrit précédemment, le laser utilisé pour créer ce champ de speckle est accordable autour de 780 nm, c'est à dire proche de la résonance de la raie  $D_2$  du  $^{87}\text{Rb}$ . Dans ces conditions, il est possible d'appliquer l'approximation de l'onde tournante et de négliger le terme en  $1/(\omega + \omega_0)$  devant le terme co-rotatif en  $1/(\omega - \omega_0)$ , le potentiel ressenti par les

14. Cette réduction de l'ouverture numérique provient des termes d'ordres supérieurs du développement limité de  $\sin\theta$ . Puisque  $|\sin\theta| < |\theta|$ , il convient d'utiliser un nouvel angle  $\theta' < \theta$  de telle sorte que l'on retrouve la véritable valeur de l'ouverture numérique lorsque l'on utilise à nouveau l'approximation paraxiale  $\sin\theta' \approx \theta'$

15. Le choix de cette définition a été fait par consistance avec le cas d'une illumination purement gaussienne, résultant en une fonction de corrélation longitudinale de forme lorentzienne.

atomes s'exprimant alors

$$V(\mathbf{x}) \propto \frac{I(\mathbf{x})}{\delta} , \quad (4.28)$$

où  $\delta = \omega - \omega_0$  est le désaccord du faisceau par rapport à la transition.

Le potentiel désordonné ressenti par les atomes étant proportionnel à l'intensité lumineuse, il apparaît alors que les propriétés statistiques spatiales du potentiel sont exactement celles de l'intensité lumineuse du speckle. Notamment, le potentiel généré par un speckle est anisotrope et la taille typique des fluctuations de potentiel aux alentours du plan de Fourier est donnée par  $\sigma_{\perp} = 0.5 \mu\text{m}$  dans le plan transverse et  $\sigma_{\parallel} = 4.1 \mu\text{m}$  dans la direction longitudinale, les fonctions de corrélations du potentiel et de l'intensité lumineuse étant identiques.

De plus, il a été montré dans la section précédente que le champ de speckle n'est pas homogène, mais qu'il possède une extension finie. En particulier, l'équation 4.13 stipule que le profil d'intensité moyenne est une gaussienne de waist  $\sigma_{\text{ex}} \approx 1.5 \text{ mm}$ , dont l'intensité au centre du faisceau dépend la puissance du laser  $P$  selon

$$\bar{I}(\mathbf{x}_f = 0) = \frac{2P}{\pi\sigma_{\text{ex}}^2} , \quad (4.29)$$

d'après les lois de l'optique gaussienne. Les tailles typiques des nuages utilisés étant au maximum de quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ , on peut supposer qu'à cette échelle, le potentiel moyen ressenti par les atomes est homogène et que sa valeur est fixée par l'intensité lumineuse au centre de la figure de speckle :  $V_R = \bar{V} \propto \bar{I}(\mathbf{x}_f = 0)/\delta$ .

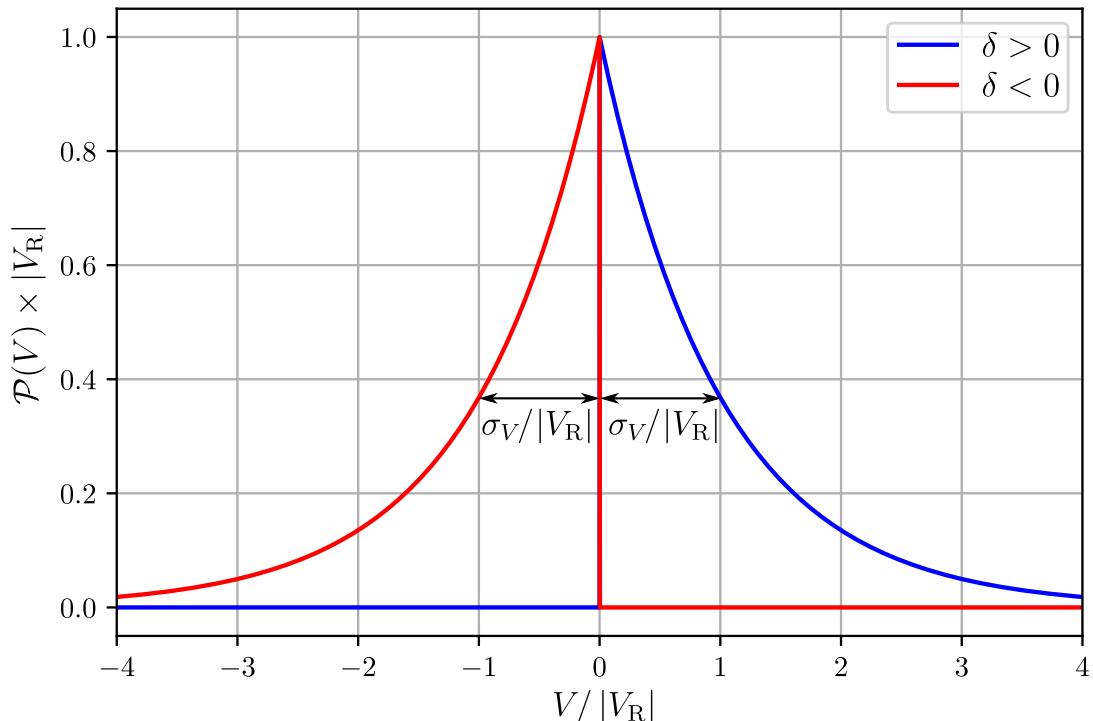
Une autre conséquence de l'expression 4.28 est qu'il est possible de créer un potentiel désordonné sur les atomes qui soit répulsif ( $\delta > 0$ ) ou bien attractif ( $\delta < 0$ ) selon le signe du désaccord  $\delta$ . Cette dernière possibilité nous permet d'avoir un degré de liberté expérimental supplémentaire, celui de la distribution de potentiel, dont l'importance sera illustrée dans les chapitres ?? et ?. En effet, si la distribution de la norme du potentiel est fixée par celle de l'intensité lumineuse 4.3, ces deux quantités étant proportionnelles, le signe du désaccord nous permet de retourner la distribution de potentiel par rapport au potentiel nul  $V = 0$  (voir figure 4.9)

$$\mathcal{P}(V) = \frac{1}{|V_R|} e^{-V/V_R} \cdot \Theta(V/V_R) , \quad (4.30)$$

où  $\Theta$  est la fonction de Heaviside valant 1 pour  $V/V_R > 0$ , et 0 sinon.  $V_R$  est le potentiel moyen, proportionnel à l'intensité lumineuse moyenne et dont le signe peut changer suivant celui du désaccord. L'amplitude du désordre est quant à elle donnée par l'écart-type de la distribution de potentiel  $\sigma_V = (\bar{V}^2 - \bar{V}^2)^{1/2} = |V_R| > 0$  et sera toujours positive. Ainsi, sur notre dispositif, changer l'amplitude du désordre revient simplement à faire varier la puissance du faisceau speckle rayonné sur les atomes.

### 4.3.2 Possibilité d'un potentiel dépendant de l'état interne

L'étude de la transition d'Anderson, en particulier du régime critique, nécessite de pouvoir adresser sélectivement les différents niveaux d'énergie liés au désordre. Il s'agit donc de procéder à une spectroscopie du désordre. Pour cela, nous devons disposer d'un état libre dans lequel nous préparons notre condensat de Bose-Einstein, c'est à dire insensible



**FIGURE 4.9 – Distributions de potentiel pour un désordre optique de type speckle.** La distribution de potentiel suit celle de l'intensité lumineuse. Pour des désaccords positifs  $\delta > 0$ , le potentiel créé est positif et sa distribution est une exponentielle décroissante (courbe bleue). Pour des désaccords négatifs  $\delta < 0$ , le potentiel est alors attractif et ne peut dépasser 0. La distribution de potentiel est alors une exponentielle croissante (courbe en rouge).

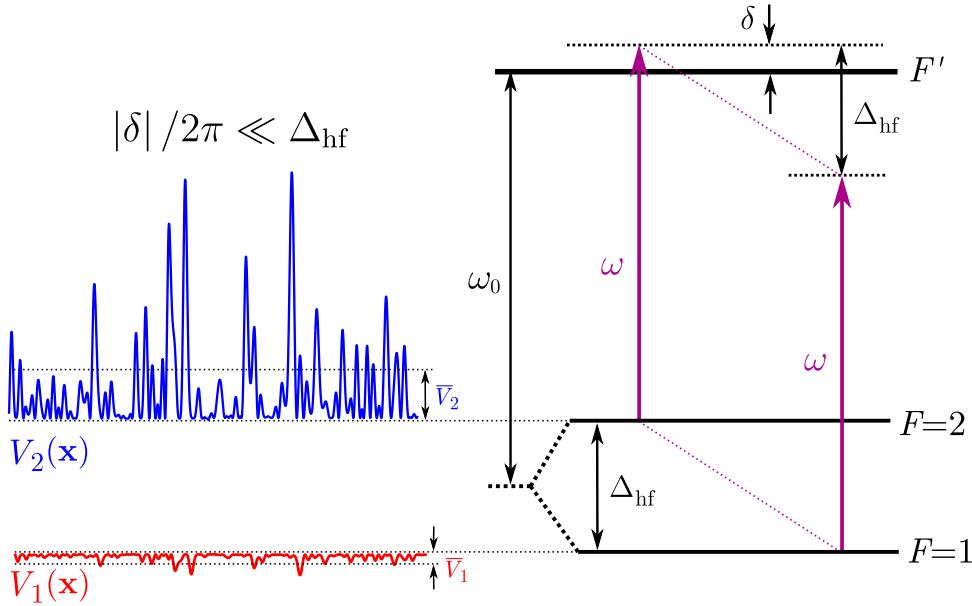


FIGURE 4.10 – **Réalisation d'un potentiel dépendant de l'état interne.** Le choix d'un désaccord par rapport à la transition  $|F = 2\rangle \rightarrow |F'\rangle$  qui soit petit devant la séparation hyperfine des états  $|F = 1\rangle$  et  $|F = 2\rangle$  permet de soumettre un potentiel aux atomes dans l'état  $|F = 2\rangle$  tout en perturbant peu ceux dans l'état  $|F = 1\rangle$ . Plus de blabla ici.

au potentiel désordonné, et d'un second état couplé au désordre. Dans cette section, on s'attachera donc à décrire la notion de potentiel dépendant de l'état interne des atomes.

### Principe du désordre dépendant de l'état interne

Comme explicité section 2.2.3, la formule 2.19 décrivant le potentiel dipolaire a été obtenue dans la limite des grands désaccords pour un système à deux niveaux, ne tenant donc compte ni de la structure fine, ni de la structure hyperfine du  $^{87}\text{Rb}$ . En particulier, la structure hyperfine de l'état fondamental  $5^2S_{1/2}$  possède deux niveaux  $|F = 1\rangle$  et  $|F = 2\rangle$  séparés de  $\Delta_{\text{hf}} = 6.83\text{GHz}$  très grande devant la largeur de la transition  $\Gamma/2\pi = 6.07\text{MHz}$ .

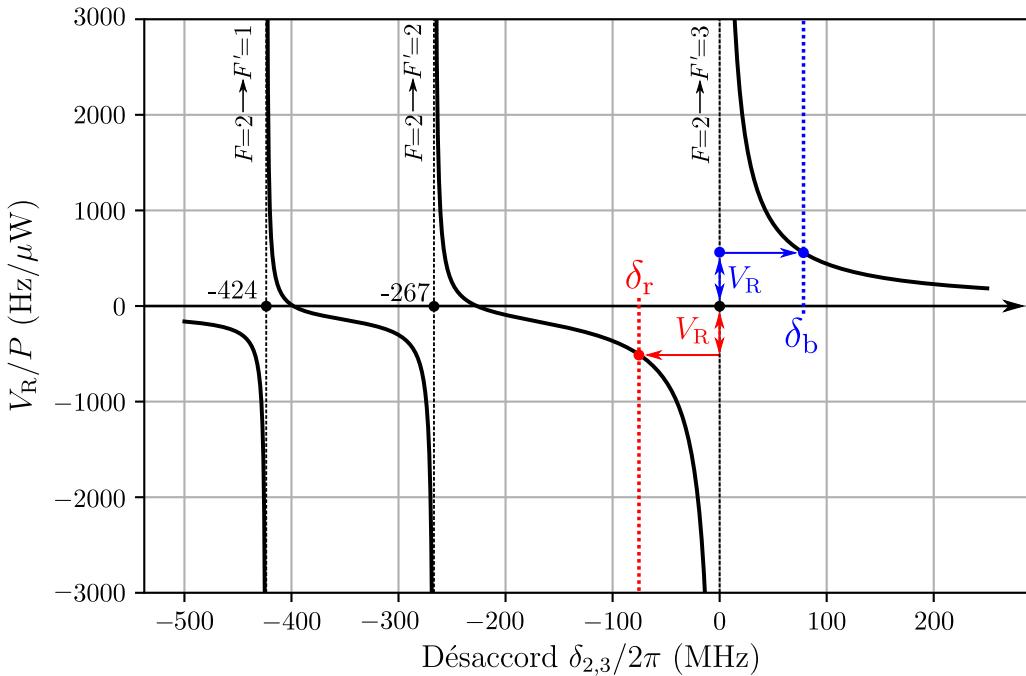
En fixant le désaccord  $\delta_{2,F'}$  par rapport à la transition  $|F = 2\rangle \rightarrow |F'\rangle$  de telle sorte que celui-ci soit très petit devant la séparation hyperfine des états fondamentaux  $|\delta_{2,F'}|/2\pi \ll \Delta_{\text{hf}}$ , on peut réaliser un potentiel dont la valeur moyenne dépend de l'état interne :

$$\bar{V}_2 \propto \frac{\bar{I}}{\delta_{2,F'}} \quad \text{et} \quad \bar{V}_1 \propto \frac{\bar{I}}{\delta_{2,F'} + \Delta_{\text{hf}}} . \quad (4.31)$$

Avec la condition d'un petit désaccord, on obtient alors  $|\bar{V}_1| \ll |\bar{V}_2|$ , comme illustré figure 4.10. On dispose donc d'un moyen de réaliser un potentiel conséquent sur l'état  $|F = 2\rangle$  tout en perturbant peu l'état  $|F = 1\rangle$  dans lequel on prépare notre condensat de Bose-Einstein.

### Détails du potentiel dipolaire

Cependant, à l'échelle des désaccords typiques recherchés dans une telle situation (de l'ordre de 100 MHz), il est aussi nécessaire de tenir compte de la structure hyperfine de l'état excité  $5^2P_{3/2}$  du  $^{87}\text{Rb}$ , qui se décompose en quatre états hyperfins  $|F' = \{0, 1, 2, 3\}\rangle$ .



**FIGURE 4.11 – Potentiel dipolaire dû à la structure hyperfine du  $^{87}\text{Rb}$ .** En fixant la puissance du faisceau speckle d'extension  $\sigma_{\text{ex}}$ , le potentiel moyen  $V_R$  ressenti par l'état  $|F = 2\rangle$  évolue avec le désaccord  $\delta_{2,3}$  par rapport à la transition  $|F = 2\rangle \rightarrow |F' = 3\rangle$ . Les trois divergences de potentiel observées correspondent aux trois transitions  $\pi$  possibles.

On peut alors montrer que le potentiel dipolaire ressenti par les états fondamentaux  $|F = 1\rangle$  et  $|F = 2\rangle$  est la somme des contributions de chacune des transitions vers un état excité [Grimm et al., 1999].

De plus, le faisceau speckle étant polarisé linéairement suivant l'axe du champ magnétique  $\vec{y}$ , les contributions au potentiel dipolaire se restreignent aux transitions  $\pi$  ( $\Delta m_F = 0$ ) et on peut alors montrer à l'aide d'un calcul attentif de la polarisabilité atomique que le potentiel dipolaire ressenti par les états fondamentaux hyperfins est donné par [Grimm et al., 1999][Steck, 2001][Denechaud, 2018] :

$$V_2(\mathbf{x}) = \frac{3\pi c^2 \Gamma I(\mathbf{x})}{\omega_0^3} \left( \frac{1}{40 \delta_{2,1}} + \frac{1}{24 \delta_{2,2}} + \frac{4}{15 \delta_{2,3}} \right) \quad (4.32)$$

et

$$V_1(\mathbf{x}) = \frac{3\pi c^2 \Gamma I(\mathbf{x})}{\omega_0^3} \left( \frac{5}{24 \delta_{1,1}} + \frac{1}{8 \delta_{1,2}} \right), \quad (4.33)$$

où les  $\delta_{F,F'}$  correspondent aux désaccords en  $\text{rads}^{-1}$  associés à chacune des transitions  $|F, m_F\rangle \rightarrow |F', m'_F = m_F\rangle$ . En prenant la transition  $|F = 2\rangle \rightarrow |F' = 3\rangle$  comme référence, on peut tracer l'évolution du potentiel dipolaire pour l'état  $|F = 2\rangle$  en fonction du désaccord  $\delta_{2,3}$ , les autres désaccords étant déductibles de la structure hyperfine des états excités. Cette évolution est représentée figure 4.11, qui comporte trois divergences du potentiel correspondant aux trois transitions  $\pi$  possibles  $|F = 2\rangle \rightarrow |F' = \{1, 2, 3\}\rangle$ .

À l'instar du cas d'un potentiel réalisé à l'aide d'un désaccord suffisamment grand devant la structure hyperfine du  $^{87}\text{Rb}$  présenté dans la section 4.3.1 précédente, la figure 4.11 illustre

la possibilité de réaliser des potentiels qui soient attractifs ou répulsifs en sélectionnant soigneusement le désaccord du laser par rapport à la transition  $|F=2\rangle \rightarrow |F'=3\rangle$ <sup>16</sup>. Dans cet exemple, les désaccords  $\delta_{2,3} = \delta_r = -2\pi \times 73\text{MHz}$  et  $\delta_{2,3} = \delta_b = 2\pi \times 81\text{MHz}$  choisis permettent tous deux d'obtenir un potentiel moyen  $|V_R|/P = h \times 0.53\text{kHz}/\mu\text{W}$  où  $V_R = \bar{V}_2$  est le potentiel moyen ressenti par l'état  $|F=2\rangle$ . Le choix de tels désaccords pour des désordres attractifs ( $\delta_r < 0$ ) ou bien répulsifs ( $\delta_b > 0$ ) donne alors un rapport de potentiels sur les états  $|F=1\rangle$  et  $|F=2\rangle$  de l'ordre de

$$|V_1|/|V_2| \approx 0.01 , \quad (4.34)$$

montrant donc la très forte différence entre les potentiels ressentis par les deux états fondamentaux de notre atome. La mise en œuvre expérimentale d'un tel désordre dépendant de l'état interne des atomes a permis la mesure des fonctions spectrales [Volchkov et al., 2018], dont les grandes lignes de ce procédé seront décrites dans le chapitre ?. L'ensemble des détails de ces mesures est documenté dans la thèse de Vincent Denechaud [Denechaud, 2018].

### Implémentation expérimentale

L'utilisation d'un tel potentiel proche de résonance impose certaines contraintes quant à la puissance et à la fréquence du laser utilisé. En particulier, il est nécessaire de stabiliser la fréquence du laser afin de réduire au maximum les fluctuations du potentiel étant donné le faible désaccord ( $|\delta_{2,3}|/2\pi \sim 80\text{MHz}$ ).

Une spécificité de notre montage réside dans sa capacité à stabiliser des très faibles puissances optiques<sup>17</sup>. Pour cela, le montage de mise en forme du faisceau est très similaire à celui présenté section 4.1.3 où l'accent a été mis sur la contrainte de l'utilisation de très faibles puissances optiques, voir figure 4.12. La lame séparatrice utilisée pour la stabilisation de puissance permet de dévier 90% de la puissance vers la photodiode, permettant ainsi d'obtenir une grande sensibilité aux fluctuations de puissance. Les 10% transmis sont ensuite atténués à l'aide d'une densité optique *Thorlabs NE30A-B* permettant de diviser la puissance d'un facteur 1000. Les puissances alors obtenues sont stabilisées et contrôlables entre typiquement 30 nW et 15 μW.

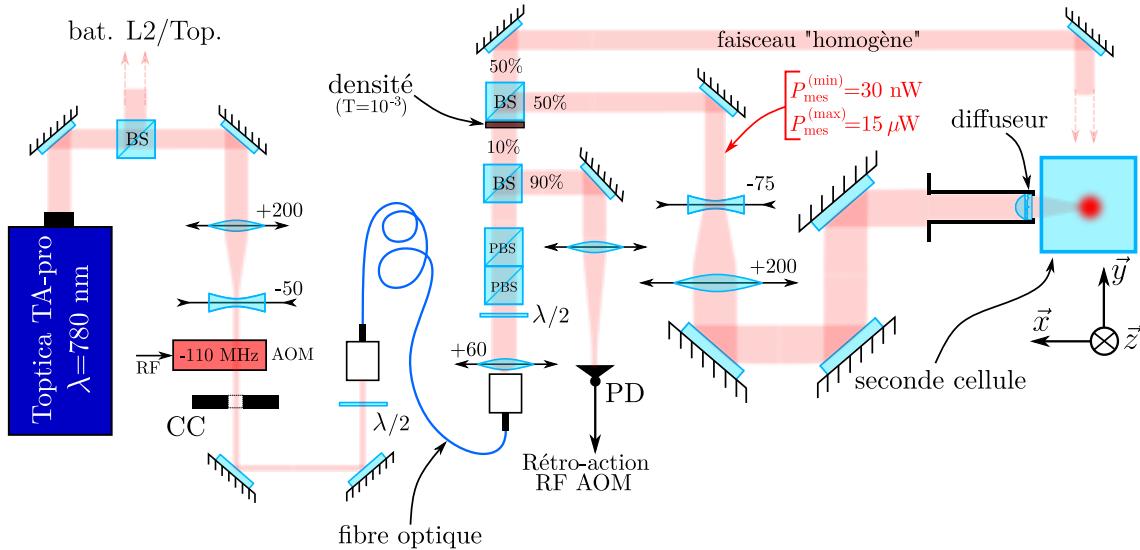
### Limitation du potentiel résiduel sur l'état $|F=1\rangle$

Une conséquence de l'équation 4.34 est la suivante. Bien que le potentiel moyen  $\bar{V}_1$  ressenti par l'état  $|F=1\rangle$  soit faible, celui-ci ne s'annule pas exactement. Quelle limite peut-on alors donner à la force du désordre  $V_R$ ? Pour cela intéressons-nous à la limite que l'on peut donner au potentiel résiduel  $V_1$ .

Nous avons vu section 2.1.2 que pour un condensat de Bose-Einstein dans le régime de Thomas-Fermi, les interactions entre particules écrivent le potentiel externe soumis aux atomes. Il en résulte que sur l'ensemble du condensat, l'énergie des atomes est constante et

16. La sélection de cette transition comme référence s'explique par sa forte contribution au potentiel ressenti par l'état  $|F=2\rangle$  comme explicité équation 4.32. Ceci est aussi visible sur la figure 4.11 où l'effet de cette transition apparaît sur une bande d'environ ±200 MHz, bien plus large que pour les deux autres transitions.

17. L'exemple du paragraphe précédent montre que des fluctuations de puissance de l'ordre de 1 μW peuvent engendrer des fluctuations de potentiel de 500 Hz.



**FIGURE 4.12 – Montage speckle pour un désordre dépendant de l'état interne.** L'approche de désordre dépendant de l'état interne nécessitant de très faibles puissances optiques, le montage précédent a été adapté afin de pouvoir stabiliser des puissances de l'ordre du  $\mu\text{W}$  à l'aide d'une densité optique atténuant fortement le faisceau. L'utilisation de 90% de la puissance du faisceau pour la stabilisation en puissance permet d'obtenir une meilleure sensibilité aux fluctuations de puissance. De plus, la fréquence du faisceau laser est stabilisée par battements avec le laser repompeur  $L2$ .

égale au potentiel chimique  $\mu$ . Ainsi, pour un potentiel désordonné résiduel d'amplitude faible  $\bar{V}_1 \ll \mu$ , une petite modulation de densité du condensat permet de compenser l'effet de ce potentiel. Ainsi, l'énergie potentielle de chaque atome reste constante et égale au potentiel chimique. Dans ces conditions, le potentiel résiduel  $\bar{V}_1$  ne perturbe pas l'état libre  $|F=1\rangle$ .

Augmentons alors la force du désordre : le potentiel résiduel augmente jusqu'à ce que celui-ci dépasse par endroits le potentiel chimique. À ces endroits, l'énergie d'interaction n'est plus suffisante pour écranter l'énergie potentielle du désordre et on crée un trou dans le condensat. Notons de plus que localement l'énergie ne sera plus égale au potentiel chimique. La conséquence la plus néfaste est l'apparition de nouvelles énergies dans la distribution d'énergie de l'état libre, dégradant ainsi la spectroscopie recherchée.

Le caractère limitant du désordre résiduel apparaît donc lorsque celui-ci est de l'ordre du potentiel chimique  $\bar{V}_1 \lesssim \mu \approx h \times 40\text{Hz}$ . En utilisant le rapport 4.34, on estime alors que le désordre maximal applicable à l'aide de cette technique est de l'ordre de  $h \times 4\text{kHz}$ <sup>18</sup>.

## 4.4 Potentiel composé d'un speckle bichromatique

Si l'approche décrite dans la section précédente permet de réaliser une spectroscopie du potentiel désordonné appliquée aux atomes, celle-ci ne permet pas d'étudier la transition d'Anderson dans la mesure où celle-ci nécessite de réaliser des expériences d'expansion du

18. Cet effet a été observé lors de la mesure des fonctions spectrales. [Volchkov et al., 2018][Denechaud, 2018]

nuage suite à la spectroscopie.

La principale limitation de cette approche provient du faible désaccord du faisceau speckle. En effet, les désaccords utilisés étant de l'ordre de  $|\delta| \approx 12\Gamma$ , le taux d'émission spontanée est relativement grand conduisant à un temps de vie maximal des atomes habillés par le désordre d'une centaine de millisecondes, très insuffisant pour les temps d'expansions visés de plus d'une seconde.

Il est donc nécessaire de compléter la procédure expérimentale utilisée lors de la mesure des fonctions spectrales pour pouvoir procéder à des expériences d'expansion.

#### 4.4.1 S'éloigner de résonance

L'approche intuitive pour diminuer le taux d'émission spontanée consiste à s'éloigner de la transition atomique, et donc à augmenter le désaccord. En effet, il est possible d'obtenir une estimation du taux d'émission spontanée  $\Gamma_2$  de l'état  $|F = 2\rangle$  à l'aide de

$$\Gamma_2 \approx \frac{1}{\hbar} |V_R| \frac{\Gamma}{|\delta|}, \quad (4.35)$$

où  $\Gamma = 2\pi \times 6.07\text{MHz}$  correspond à la largeur de la transition  $D_2$  du  $^{87}\text{Rb}$  et  $\delta$  est le désaccord.

Afin d'obtenir un temps de vie  $\Gamma_2^{-1}$  de l'ordre de la seconde pour un désordre d'environ 500 Hz typiquement utilisé sur l'expérience, il est nécessaire d'utiliser un désaccord de plusieurs GHz. Cette condition est donc incompatible avec celle de désordre dépendant de l'état interne  $\delta/2\pi \ll \Delta_{\text{hf}}$ .

La question est alors la suivante : est-il possible de réaliser un désordre dépendant de l'état interne tout en ayant un taux d'émission spontanée suffisamment faible pour permettre l'étude de la localisation d'Anderson ?

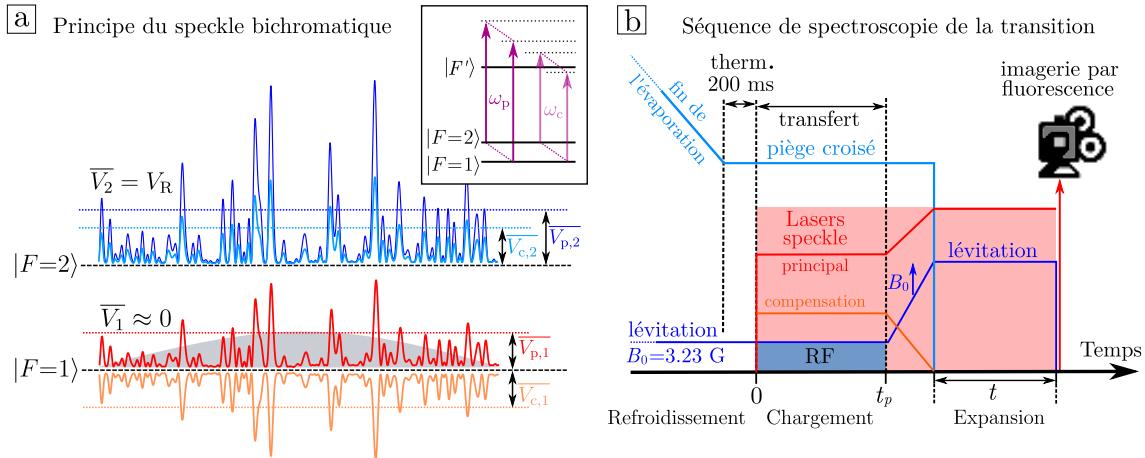
#### Speckle bichromatique

La réponse apportée par l'équipe pour augmenter le temps de vie des atomes vis-à-vis de l'émission spontanée consiste à utiliser des désaccords plus importants, de l'ordre de 100 GHz. Cependant, l'utilisation de désaccords aussi grands ( $\delta/2\pi \gg \Delta_{\text{hf}}$ ) ne permet plus la sélectivité en état interne recherchée pour réaliser une spectroscopie du désordre. L'idée est alors de compenser le potentiel ressenti par l'état  $|F = 1\rangle$  à l'aide d'une seconde fréquence optique, comme illustré figure 4.13. Une étude quantitative et détaillée de cette approche peut être retrouvée dans le manuscrit de thèse de Musawwadah Mukhtar [Mukhtar, 2019], aussi nous nous contenterons de décrire les grandes lignes de cette approche.

Dans le cadre de la théorie de la réponse linéaire, on montre à l'aide de la partie réelle de la polarisabilité atomique que le potentiel moyen total ressenti par chaque état est la somme des potentiels générés par chaque faisceau. Ces potentiels sont alors donnés par :

$$\overline{V_1} = \overline{V_{P,1}} + \overline{V_{C,1}} = 0 \quad \text{et} \quad \overline{V_2} = \overline{V_{P,2}} + \overline{V_{C,2}} = V_R, \quad (4.36)$$

avec  $\overline{V_{P,i}}$  ( $\overline{V_{C,i}}$ ) le potentiel moyen créé par le laser principal (de compensation) sur l'état  $|F = i\rangle$ . Nous avons de plus fait apparaître la contrainte que le potentiel moyen total



**FIGURE 4.13 – a : Principe de speckle bichromatique.** Un laser principal très désaccordé soumet les deux états fondamentaux à un potentiel. Afin d'obtenir un potentiel dépendant de l'état interne, on utilise une seconde fréquence optique dans le but de compenser le potentiel créé par le laser principal sur l'état  $|F = 1\rangle$ . Dans le cas d'un désordre répulsif comme illustré ici, il est de plus possible d'additionner les effets répulsifs des potentiels créés par ces lasers sur l'état  $|F = 2\rangle$ . **b : Séquence expérimentale d'étude de la transition d'Anderson.** Après refroidissement et obtention d'un condensat de Bose-Einstein, une étape de chargement du désordre à énergie résolue est réalisée à l'aide d'un transfert radio-fréquence. Celle-ci est suivie d'une expansion du nuage dans le désordre qui constitue l'expérience de localisation d'Anderson à proprement parler.

appliqué à l'état  $|F = 1\rangle$  soit nul. De même, les taux d'émission spontanée s'additionnent, ceux-ci étant issus de la partie imaginaire de la polarisabilité atomique :

$$\Gamma_{\text{sp},1} = \Gamma_{\text{sp,P},1} + \Gamma_{\text{sp,C},1} \quad \text{et} \quad \Gamma_{\text{sp},2} = \Gamma_{\text{sp,P},2} + \Gamma_{\text{sp,C},2}, \quad (4.37)$$

avec  $\Gamma_{\text{sp},i}$  le taux d'émission spontanée pour l'état  $|F = i\rangle$ .

Afin de pouvoir étudier la dynamique des atomes dans le désordre pendant de très longs temps d'expansions, il est nécessaire de maximiser le temps de vie de l'état  $|F = 2\rangle$ . Cependant, cette procédure tend à diminuer le temps de vie de l'état  $|F = 1\rangle$ , qui doit être suffisamment long pour pouvoir réaliser l'étape de *chargement* du désordre. Le but de cette étude est alors d'optimiser les temps de vie 4.37 des deux états pour un désordre  $V_R$  fixé, tout en respectant les contraintes 4.36 du potentiel. Expérimentalement, nous disposons de quatre degrés de liberté (la puissance et le désaccord de chaque speckle) pour atteindre la configuration optimale. En particulier, les désaccords des deux faisceaux doivent satisfaire des conditions afin de permettre l'approche de désordre dépendant de l'état interne.

Considérons d'abord le cas d'un désordre répulsif sur l'état  $|F = 2\rangle$ . Le laser principal étant très désaccordé, le potentiel moyen induit sur les états  $|F = 1\rangle$  et  $|F = 2\rangle$  est similaire et vaut  $V_R > 0$ . En prenant comme référence la transition fictive  $|F = 1\rangle \rightarrow |F' = 3\rangle$ <sup>19</sup>, le désaccord du laser principal doit alors satisfaire la condition  $\delta_p > 0$ <sup>20</sup>. Afin de compenser le potentiel répulsif induit par le laser principal sur l'état  $|F = 1\rangle$ , il est nécessaire que le laser de compensation réalise un potentiel attractif, impliquant alors que le désaccord soit

19. Bien que cette transition n'existe pas en pratique, cela ne nous empêche pas de définir les désaccords par rapport à cette référence de fréquence.

20. En prenant comme référence la transition  $|F = 2\rangle \rightarrow |F' = 3\rangle$ , cette condition devient  $\delta_p/2\pi > \Delta_{\text{hf}}$

négatif  $\delta_c < 0$ <sup>21</sup>. De plus, le choix d'un désaccord inférieur à la séparation hyperfine des états fondamentaux permet de générer un potentiel répulsif sur l'état  $|F = 2\rangle$ . On retiendra alors

$$\delta_p > 0 \quad \text{et} \quad -\Delta_{hf} < \delta_c/2\pi < 0 . \quad (4.38)$$

Considérons à présent le cas d'un potentiel attractif pour l'état  $|F = 2\rangle$ . De même que dans le cas répulsif, le laser principal est très désaccordé, mais son désaccord doit être négatif pour les deux états fondamentaux  $\delta_p/2\pi < -\Delta_{hf}$  en prenant la transition  $|F = 1\rangle \rightarrow |F'\rangle$  comme référence<sup>22</sup>. La principale différence provient ici du laser de compensation, qui ne peut pas générer à la fois un potentiel attractif pour l'état  $|F = 2\rangle$  et un potentiel répulsif qui pourrait compenser le potentiel attractif du laser principal sur l'état  $|F = 1\rangle$ . La contrainte d'annulation du potentiel sur l'état initial impose alors le choix d'un désaccord positif  $\delta_c > 0$  du laser de compensation par rapport à la transition fictive  $|F = 1\rangle \rightarrow |F' = 3\rangle$ . Le choix d'un potentiel total attractif sur l'état  $|F = 2\rangle$  impose donc :

$$\delta_p/2\pi < -\Delta_{hf} \quad \text{et} \quad \delta_c > 0 . \quad (4.39)$$

Contrairement au cas répulsif, la sélectivité en état interne dans le cas attractif provient donc d'un déséquilibrage des potentiels sur l'état  $|F = 2\rangle$ .

La table 4.1 présente les résultats de la détermination des paramètres optimisant la temps de vie  $\Gamma_2^{-1}$  de l'état  $|F = 2\rangle$  avec la contrainte  $\Gamma_1^{-1} \geq 10\text{ ms}$  permettant l'étape de chargement du désordre. Cette étude a été menée pour un désordre d'amplitude  $V_R/h = 4\text{ kHz}$  qui correspond au désordre le plus extrême utilisé lors de la mesure des fonctions spectrales. Le choix du désaccord  $\delta_p = 2\pi \times 100\text{ GHz}$  permet de fixer déterminer la valeur des trois autres grandeurs expérimentales  $\delta_c$ ,  $P_p$  et  $P_c$ , et permet d'obtenir un temps de vie  $\Gamma_2^{-1}$  de l'ordre de 150 ms. Comparé au temps de vie de 0.4 ms obtenu avec un speckle monochromatique, ceci représente une amélioration de près de trois ordres de grandeur.

	Désordre attractif	Désordre répulsif
Paramètres fixés		
Amplitude du désordre $V_R$	$-h \times 4\text{ kHz}$	$h \times 4\text{ kHz}$
Désaccord du laser principal $\delta_p$	$-2\pi \times 100\text{ GHz}$	$2\pi \times 100\text{ GHz}$
Temps de vie $\Gamma_1^{-1}$	10 ms	10 ms
Désaccord du laser de compensation $\delta_c$	$2\pi \times 1.354\text{ GHz}$	$-2\pi \times 1.622\text{ GHz}$
Puissance du laser principal $P_p$	8.14 mW	5.16 mW
Puissance du laser de compensation $P_c$	130.2 $\mu\text{W}$	69.6 $\mu\text{W}$
Temps de vie $\Gamma_2^{-1}$	165 ms	149 ms

TABLE 4.1 – Paramètres expérimentaux optimisés pour un désordre de 4 kHz. La détermination de ces paramètres est détaillée dans la thèse Musawwadah Mukhtar [Mukhtar, 2019]. Cette étude est menée pour le désordre le plus extrême utilisé pour la mesure des fonctions spectrales [Volchkov et al., 2018] pour lequel le temps de vie  $\Gamma_2^{-1}$  n'était que 0.4 ms. On remarque que les conditions 4.38 et 4.39 sont vérifiées.

21. Pour les désaccords supérieurs au GHz utilisés, on peut négliger le détail de la structure hyperfine de l'état excité, large de 229 MHz pour les états accessibles.

22. En choisissant un désaccord de 100 GHz, on peut négliger la structure hyperfine de l'état excité.

### Augmenter encore plus le temps de vie

Si les potentiels générés par les deux faisceaux sont d'amplitudes semblables (l'annulation du potentiel sur  $|F = 1\rangle$  ne serait pas possible autrement), on comprend aisément que le laser de compensation contribue fortement à la dissipation par émission spontanée compte-tenu de son petit désaccord en comparaison de celui du laser principal.

Cependant, après l'étape de chargement, une fois les atomes transférés dans l'état  $|F = 2\rangle$  habillé par le désordre, il n'est plus nécessaire de compenser le potentiel vu par l'état  $|F = 1\rangle$ . Il est alors possible de s'affranchir du laser de compensation. Un moyen simple d'augmenter le temps de vie  $\Gamma_2'^{-1}$  consiste alors à diminuer progressivement la puissance du laser de compensation tout en augmentant celle du laser principal de manière à garder  $V_R$  constant, comme illustré figure 4.13b. Il s'agit, après chargement dans le désordre, d'un moyen de s'éloigner encore plus de résonance.

On montre alors que le nouveau temps de vie  $\Gamma_2'^{-1}$  de l'état  $|F = 2\rangle$  après extinction du laser de compensation est donné par :

$$\Gamma_2'^{-1} = \Gamma_2^{-1} \frac{\overline{V_{p,2}}/V_R}{\Gamma_{p,2}/\Gamma_2}. \quad (4.40)$$

L'application à un désordre d'amplitude  $|V_R|/h = 4\text{kHz}$  fournit alors un temps de vie de 0.68 s pour un désordre attractif et de 0.69 s pour un désordre répulsif, soit un gain de plus de trois ordres de grandeur par rapport au cas d'un speckle simple.

Notons de plus que cette étude a été menée pour le cas le plus défavorable d'un désordre d'amplitude  $h \times 4\text{kHz}$ , l'utilisation de désordres plus modérés conduisant à des temps de vie plus bien grands. Un désordre d'amplitude  $h \times 400\text{Hz}$  possède ainsi un temps de vie supérieur à 6 s, permettant donc des temps de propagation extrêmement longs.

#### 4.4.2 Étude de la similitude de deux speckles

Nous avons ainsi montré que l'utilisation d'un speckle bichromatique permettait d'étendre l'applicabilité du désordre dépendant de l'état interne à l'étude de la transition d'Anderson grâce à l'augmentation du temps de vie des atomes dans le désordre de plus de trois ordres de grandeurs.

Cependant, cette approche repose sur une hypothèse cruciale jusqu'à présent passée sous silence. L'approche de l'utilisation d'une seconde fréquence optique afin de compenser le potentiel ressenti par l'état  $|F = 1\rangle$  n'est valable que si nous pouvons compenser le potentiel du laser principal en chaque point de l'espace. Il est donc nécessaire que les variations spatiales du profil d'intensité lumineuse du speckle de compensation soient exactement celles du speckle principal :

$$V_{c,1}(\mathbf{x}) = -V_{p,1}(\mathbf{x}) \quad (4.41)$$

#### Cohérence temporelle d'une figure de speckle bichromatique

De manière générale, un champ de speckle résulte de phénomènes d'interférence, et dépend donc fortement de la longueur d'onde du champ incident. Plus particulièrement, nous avons vu dans les sections 4.2.2 et 4.2.3 que la taille des grains de speckle est donnée

par la limite de diffraction du système et dépend donc linéairement de la longueur d'onde.

On comprend donc que si les deux profils d'intensité lumineuse sont semblables au point de focalisation des faisceaux, la superposition des grains de lumière se dégrade en s'éloignant de ce point, comme illustré figure 4.14. Cette question de superposition des figures d'interférences de plusieurs fréquences optiques est un problème bien connu en optique : il s'agit ici d'étudier l'influence de la cohérence temporelle sur notre désordre bichromatique. Cette influence est quantifiée par le degré de cohérence temporelle

$$\overline{\delta I_p(\mathbf{x})\delta I_c(\mathbf{x})} = \left| \overline{E_p(\mathbf{x})E_c^*(\mathbf{x})} \right|^2, \quad (4.42)$$

qui fait apparaître la fonction de corrélation en amplitude entre les deux champs évalués au même point. En effet, l'objet de notre étude est de quantifier la mesure dans laquelle les deux motifs de speckle sont similaires en un point donné.

De même que dans le cas d'un speckle monochromatique, l'expression de la fonction de corrélation en amplitude  $\overline{E_p(\mathbf{x})E_c^*(\mathbf{x})}$  fait apparaître la fonction de corrélation du diffuseur, définie à l'aide de sa transmission :

$$C_{\text{diff}}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}'_0, \lambda_p, \lambda_c) = \overline{t_{\text{diff}}(\mathbf{x}_0, \lambda_p)t_{\text{diff}}^*(\mathbf{x}'_0, \lambda_c)}, \quad (4.43)$$

dont l'expression a été généralisée au cas bichromatique qui nous intéresse à présent. On montre annexe ?? que l'expression 4.7 se généralise alors à

$$C_{\text{diff}}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}'_0, \lambda_p, \lambda_c) = \exp\left(-\frac{\delta\phi^2}{2}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2\theta_{\text{diff}}^2(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}'_0)^2}{2\lambda_p\lambda_c}\right), \quad (4.44)$$

avec  $\delta\phi = |\sigma_{\phi,p} - \sigma_{\phi,c}|$  la différence des largeurs des distributions de phases induites par le diffuseur aux deux longueurs d'onde d'intérêt  $\lambda_p$  et  $\lambda_c$ , et  $\theta_{\text{diff}}$  est l'angle de diffusion, indépendant de la longueur d'onde.

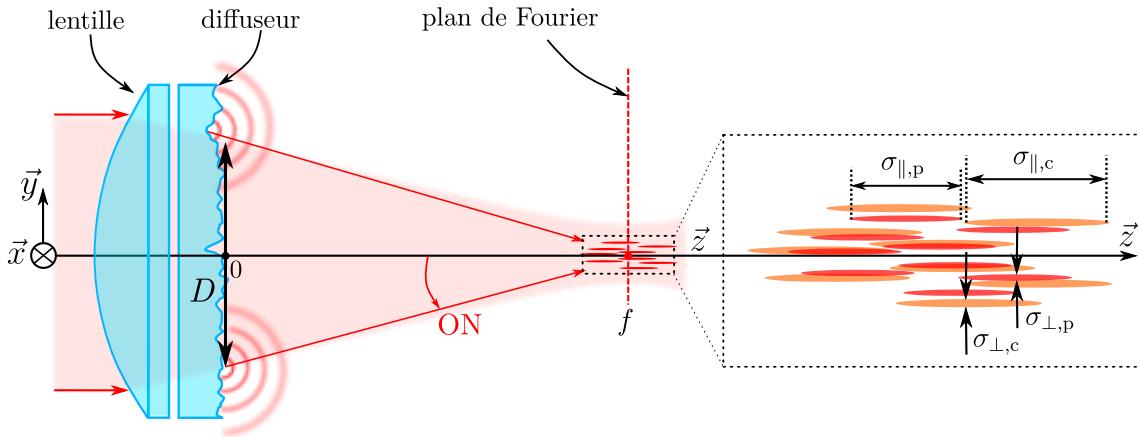
Supposons à présent que les modes de chacun des lasers soient identiques et parfaitement superposés<sup>23</sup>, de telle sorte que tous deux soient décrits par le même profil d'intensité  $I'_0(\mathbf{x}_0)$  de l'équation 4.26. On montre annexe ?? que, aux alentours du plan de Fourier, la fonction de corrélation normalisée des fluctuations d'intensité à trois dimensions entre les deux speckles générés par le même diffuseur est donnée par

$$\begin{aligned} c_{2\lambda}(\mathbf{x}_\perp, \delta z) &= \frac{\overline{\delta I_p(\mathbf{x}_\perp, \delta z)\delta I_c(\mathbf{x}_\perp, \delta z)}}{\sqrt{\overline{\delta I_p^2(\mathbf{x}_\perp, \delta z)}\overline{\delta I_c^2(\mathbf{x}_\perp, \delta z)}}} \\ &= \exp\left(-\delta\phi^2\right) \times c_{3D}\left(\mathbf{x}_\perp \frac{\delta\lambda}{\lambda_p}, \delta z \frac{\delta\lambda}{\lambda_p}\right), \end{aligned} \quad (4.45)$$

où  $c_{3D}$  correspond à la fonction de corrélation 4.25 des fluctuations d'intensité d'un speckle unique aux alentours du plan de Fourier.  $\delta\lambda = \lambda_p - \lambda_c$  correspond à la différence entre les deux longueurs d'ondes des deux lasers.

La décorrélation des deux champs vis-à-vis de la cohérence temporelle est donc due à deux contributions :

23. On satisfait expérimentalement cette hypothèse en injectant les deux faisceaux dans la même fibre optique, voir figure 4.15.



**FIGURE 4.14 – Illustration de la cohérence temporelle d'une figure de speckle.** La taille des grains de speckle dépendant linéairement de la longueur d'onde, ceux-ci ne pourront se superposer que sur une zone restreinte de l'espace. La distance  $l_c$  sur laquelle les grains sont corrélés est obtenue à l'aide du degré de cohérence temporelle, et peut être estimée à quelques millimètres.

- Le premier terme en  $\exp(-\delta\phi^2)$  décrit l'effet de la propagation dans le diffuseur. Le déphasage accumulé localement dépendant de la longueur d'onde, la distribution de phases diffère entre le laser principal et celui de compensation. Le diffuseur ne se comportant pas exactement de la même manière en fonction de la fréquence de l'onde laser (la transmission  $t_{\text{diff}}(\mathbf{x}_0, \lambda)$  dépend de la longueur d'onde), il en résulte une décorrélation générale entre les profils d'intensité de deux speckles.
- Le second terme traduit le déphasage accumulé lors de la propagation du laser, et décrit l'effet de la longueur d'onde du laser sur la taille des grains. Celle-ci étant proportionnelle à la longueur d'onde, les grains des deux figures de speckle seront donc de tailles différentes et ne pourront se superposer que dans une zone réduite de l'espace autour du point de focalisation.

Une conséquence remarquable de l'équation 4.45 est que la forme de cette fonction, donnée par le degré de cohérence temporelle, est identique à celle de la corrélation spatiale d'un unique speckle, donnée par le degré de cohérence spatiale.

La présence du facteur d'échelle  $\lambda_p/\delta\lambda \equiv \mathcal{F}$ , que l'on appellera *finesse*, s'interprète néanmoins aisément. En effet, la taille  $\sigma$ <sup>24</sup> d'un grain de speckle est donnée par la largeur de la fonction de corrélation  $c_{3D}$ , et est proportionnelle à la longueur d'onde du laser. La largeur de la fonction de corrélation  $c_{2\lambda}$  est donc donnée par  $l_c = \sigma\mathcal{F}$  et correspond à la distance pour laquelle les grains des deux speckles ne se superposent plus<sup>25</sup>.

En choisissant le désaccord précédent d'environ 100 GHz et une longueur d'onde proche de la transition  $D_2$  du  $^{87}\text{Rb}$ ,  $\lambda_p \approx 780.2\text{ nm}$ , l'ordre de grandeur de cette longueur de corrélation est donc de plusieurs millimètres. Cette taille étant très grande devant la taille

24. Il n'est pas nécessaire de tenir compte de l'anisotropie des grains de speckle pour ce raisonnement, les longueurs de corrélation transverse et longitudinale étant toutes deux proportionnelles à la longueur d'onde.

25. Déterminons la distance  $L$  sur laquelle deux grains de speckle ne se superposent plus. On définit cette distance comme correspondant à un nombre  $N$  de grains du speckle du laser principal  $L = N\sigma_p$ , et un nombre  $N+1$  de grains du laser de compensation  $L = (N+1)\sigma_c$ . Alors  $N = \sigma_c/(\sigma_p - \sigma_c) \approx \lambda_p/\delta\lambda = \mathcal{F}$ .

de nos nuages, la décorrélation par décalage des grains des deux speckles ne nous limitera donc pas<sup>26</sup>.

### Estimation du potentiel résiduel sur $|F = 1\rangle$

Si les profils d'intensité des speckles sont varient de manières similaires à l'échelle des atomes, ceux-ci ne sont pas totalement corrélés, comme le montre le premier terme de l'équation 4.45. Ainsi, cela signifie que le potentiel généré par le laser de compensation ne peut annuler le potentiel généré par le laser principal *qu'en moyenne*. Le potentiel total  $V_1(\mathbf{x}) = V_{p,1}(\mathbf{x}) + V_{c,1}(\mathbf{x})$  est donc de moyenne nulle  $\overline{V_1(\mathbf{x})} = 0$  et possède une variance  $\sigma_V^2$  non nulle.

Simplifions l'étude en remplaçant les potentiels  $V_{p,1}(\mathbf{x})$  et  $V_{c,1}(\mathbf{x})$  par leurs intensités respectives  $I_p(\mathbf{x})$  et  $I_c(\mathbf{x})$  de telle sorte que

$$V_1(\mathbf{x}) \propto I_p(\mathbf{x}) - I_c(\mathbf{x}), \quad (4.46)$$

et que  $\overline{I_p(\mathbf{x})} = \overline{I_c(\mathbf{x})} = I_0(\mathbf{x})$ <sup>27</sup>. En définissant la différence de ces intensités par la variable  $I = I_p - I_c$ , l'étude de la variance du potentiel revient à étudier la quantité

$$\sigma_I^2(\mathbf{x}, \lambda_p, \lambda_c) = 2I_0^2(\mathbf{x})(1 - c_{2\lambda}(\mathbf{x})) \quad \text{avec} \quad c_{2\lambda}(\mathbf{x}) = \frac{\overline{\delta I_p(\mathbf{x})\delta I_c(\mathbf{x})}}{I_0^2(\mathbf{x})}, \quad (4.47)$$

en faisant apparaître la fonction de corrélation 4.45. L'interprétation de cette équation est directe : si les deux intensités sont parfaitement corrélées, celles-ci se compensent exactement et  $\sigma_I = 0$ . Dans le cas où celles-ci sont totalement décorrélées, la variance totale est alors la somme des variances de chaque intensité, comme attendu dans le cas de variables aléatoires indépendantes.

Étant donné la taille de nos nuages, on peut considérer que les atomes sont insensibles aux variations spatiales de la fonction de corrélation 4.45, que l'on approxime alors par sa valeur au centre  $c_{2\lambda}(0) = \exp(-\delta\phi^2)$ . On peut alors estimer les variations statistiques du potentiel ressenti par les atomes à  $|\sigma_V/\overline{V_{p,1}}| = \sqrt{\sigma_I^2/I_0^2}$ , soit

$$\sigma_V \sim \sqrt{2} |\overline{V_{p,1}} \delta\phi|, \quad (4.48)$$

avec  $\delta\phi \approx 2\pi(n-1)\sigma_e/\lambda_p F \ll 1$ . Il apparaît donc que l'ordre de grandeur des fluctuations du potentiel bichromatique ne sont qu'une fraction du potentiel généré par chaque laser.

Estimons l'ordre de grandeur de ces fluctuations de potentiel dans la configuration présentée section 4.4.1, dans laquelle la différence de fréquence entre les deux lasers est de l'ordre de 100 GHz pour une longueur d'onde proche de 780 nm. La finesse associée est donc d'environ  $F \approx 4000$ . En supposant que l'épaisseur typique de la granularité du diffuseur  $\sigma_e$  est de l'ordre de quelques longueurs d'onde  $\lambda_p$ <sup>28</sup>, on estime ainsi que les fluctuations du

26. À l'aide d'un banc de test similaire à celui présenté dans la thèse de Jérémie Richard [Richard, 2015], aucune décorrélation n'a pu être observée expérimentalement dans la limite de résolution du système optique dans une zone de 100 µm autour du centre de la figure de speckle.

27. En réalité, les intensités des deux speckles ne sont pas de mêmes valeurs moyennes, cependant il est possible de se ramener formellement à cette situation en tenant compte du fait que les différents désaccords des faisceaux équilibrivent les potentiels associés.

28. L'utilisation d'un diffuseur avec  $\sigma_e \approx 5\lambda_p$  suffit à générer un speckle pleinement développé, la partie déterministe étant très fortement atténuée ( $\overline{t_{\text{diff}}} \sim e^{-100}$ ).

potentiel résiduel sont de l'ordre de

$$\sigma_V \sim 0.01\overline{V}_{p,1} \quad (4.49)$$

De même que dans la section 4.3.2, le désordre résiduel que ressent l'état  $|F = 1\rangle$  possède une borne supérieure pour laquelle le condensat devient perturbé. Ainsi, si les fluctuations du potentiel résiduel sont de l'ordre du potentiel chimique  $\mu = 40\text{Hz}$ , les modulations de densité ne pourront plus écranter le potentiel désordonné. La condition  $\sigma_V \lesssim \mu$  se traduit donc en terme de potentiel maximal applicable aux atomes<sup>29</sup>

$$V_R \lesssim 4\text{kHz} , \quad (4.50)$$

semblable à la limite observée dans le cas d'un potentiel dépendant de l'état interne réalisé à l'aide d'une unique fréquence optique. Insistons sur le fait que si la limite du désordre applicable est comparable à celle dans le cas d'un potentiel monochromatique, ce nouveau désordre bichromatique permet l'amélioration du temps de vie dans le désordre de trois ordres de grandeurs, et ouvre donc la voie aux expériences d'expansion et à l'étude de la transition d'Anderson.

### Implémentation expérimentale préliminaire

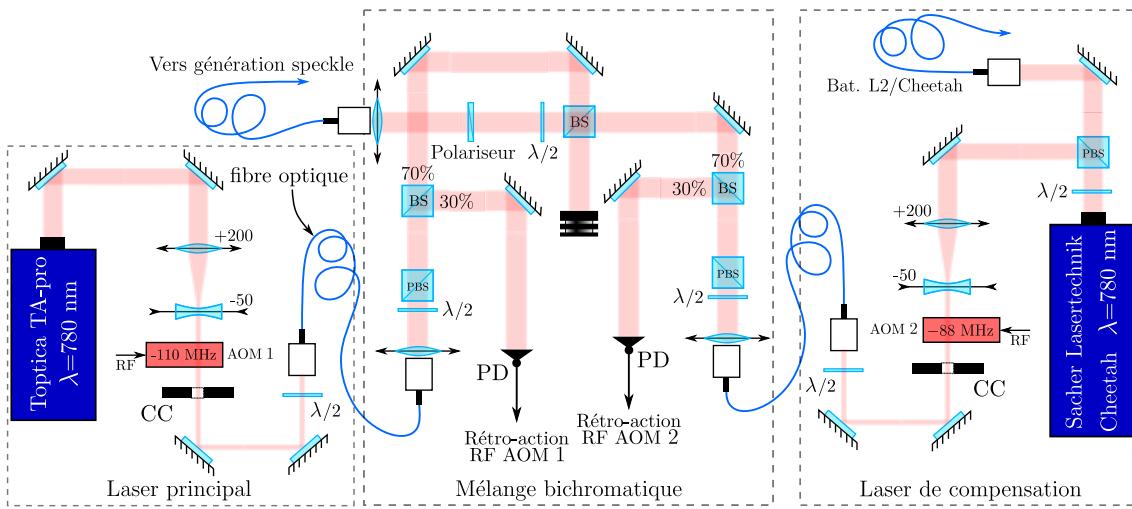
Comme annoncé section 4.1.3, la structure du montage optique du speckle bichromatique suit la même philosophie que les montages présentés précédemment. Dans sa version préliminaire<sup>30</sup>, celui-ci est composé d'un premier étage de mise en forme du faisceau, suivi de la partie générant le speckle rayonné sur les atomes.

Dans le cas de notre nouveau potentiel bichromatique, une étape supplémentaire de superposition des faisceaux est nécessaire afin d'obtenir les mêmes modes laser au niveau du diffuseur. L'ensemble de la partie *mise en forme* est représentée figure 4.15, et comporte trois zones relatives aux différentes étapes de la mise en forme du faisceau :

- Une première zone est dédiée à la mise en forme du laser principal et est similaire aux montages précédents. Le faisceau du laser principal est généré par le laser Toptica TA-Pro, et son mode et sa polarisation sont filtrés à l'aide d'une fibre optique à maintien de polarisation et d'un cube séparateur de polarisation. Sa puissance est stabilisée à l'aide d'une boucle de rétroaction réalisée à l'aide d'un modulateur acousto-optique et d'une photodiode, et permet de plus de s'affranchir des fluctuations de puissance liées aux fluctuations de polarisation du laser, comme précédemment. Ce laser étant désaccordé d'environ 100 GHz, il n'est pas nécessaire d'en asservir la fréquence.
- Une seconde zone, similaire à la première, permet de mettre en forme le faisceau du laser de compensation. Celui-ci est émis par un laser *Sacher Lasertechnik Cheetah* d'une puissance maximale de 380 mW, et subit le même traitement que le faisceau principal. Cependant, la fréquence de ce laser est stabilisée par battement sur le laser repompeur *L2* étant donné son désaccord modéré.

29.  $V_R$  et  $\overline{V}_{p,1}$  ne sont pas identiques, mais sont du même ordre de grandeur. La limite que nous présentons ne se veut pas quantitative étant donné que nous ne donnons qu'une estimation de  $\sigma_e$  et que la condition  $\sigma_V \lesssim \mu$  reste phénoménologique.

30. À l'heure de l'écriture de ces lignes, seuls des tests préliminaires de stabilité ont pu être effectués. Si ceux-ci sont encourageants, il n'est pas exclu que ce montage soit modifié après essai en présence des atomes.



**FIGURE 4.15 – Montage optique du speckle bichromatique.** De même que pour les montages précédents, le montage optique consiste en une partie de manipulation des faisceaux avant de générer le speckle. À présent, un étage supplémentaire de mélange des faisceaux est nécessaire, et la présence d'une fibre optique commune assure la parfaite superposition des faisceaux sur le diffuseur.

- Enfin, une troisième zone permet de mélanger les lasers. Pour cela, les faisceaux sont superposés à l'aide d'une lame séparatrice 50/50, et un polariseur permet de superposer les polarisations des deux lasers. Ceux-ci sont ensuite injectés dans la même fibre optique à maintien de polarisation, garantissant une superposition parfaite des modes pour la génération du speckle.

La partie de génération du speckle est très similaire à celle présentée figure 4.12. La puissance nécessaire sur les atomes étant environ trois ordres de grandeur plus grande que celle utilisée pour la mesure des fonctions spectrales (voir section 4.3.2 et table 4.1), la densité optique de transmission 1/1000 n'est plus nécessaire. Le reste du montage optique est inchangé<sup>31</sup>.

31. La photodiode précédemment utilisée pour l'asservissement de puissance d'un unique faisceau ne sert plus qu'à titre d'information. En effet, les deux faisceaux étant superposés, il est difficile de les contrôler indépendamment.

## Bibliographie

[Akkermans and Montambaux 2007] AKKERMANS, Eric ; MONTAMBAUX, Gilles : *Mesoscopic physics of electrons and photons*. Cambridge university press, 2007

[Anderson et al. 1995] ANDERSON, Mike H. ; ENSHER, Jason R. ; MATTHEWS, Michael R. ; WIEMAN, Carl E. ; CORNELL, Eric A. : Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor. In : *science* (1995), S. 198–201

[Ashcroft and Mermin 2010] ASHCROFT, Neil W. ; MERMIN, N D. : Solid state physics (saunders college, philadelphia, 1976). In : *Appendix N* 166 (2010)

[Barrett et al. 2001] BARRETT, MD ; SAUER, JA ; CHAPMAN, MS : All-optical formation of an atomic Bose-Einstein condensate. In : *Physical Review Letters* 87 (2001), Nr. 1, S. 010404

[Basdevant et al. 2002] BASDEVANT, Jean-Louis ; DALIBARD, Jean ; JOFFRE, Manuel : *Mécanique quantique*. Editions Ecole Polytechnique, 2002

[Bernard 2010] BERNARD, Alain : *Transport quantique d'ondes atomiques ultrafroides : localisation d'Anderson et laser à atomes guidé.*, Université Pierre et Marie Curie, Dissertation, 2010

[Boyer 2000] BOYER, Vincent : *Condensation de Bose-Einstein avec un électroaimant à noyau ferromagnétique : stratégies de refroidissement dans des champs magnétiques intenses*, Paris 11, Dissertation, 2000

[Brantut 2009] BRANTUT, Jean-Philippe : *Manipulation d'atomes froids dans des potentiels lumineux*, Paris 11, Dissertation, 2009

[Burt et al. 1997] BURT, EA ; GHRIST, RW ; MYATT, CJ ; HOLLAND, MJ ; CORNELL, Eric A. ; WIEMAN, CE : Coherence, correlations, and collisions : What one learns about

- Bose-Einstein condensates from their decay. In : *Physical Review Letters* 79 (1997), Nr. 3, S. 337
- [Cohen-Tannoudji 1996] COHEN-TANNOUDJI, Claude : Atomes ultrafroids : Piegeage non dissipatif et refroidissement évaporatif. In : *Cours au Collège de France* 1997 (1996)
- [Davis et al. 1995] DAVIS, Kendall B. ; MEWES, M-O ; ANDREWS, Michael R. ; DRUTEN, Nicolaas J. van ; DURFEE, Dallin S. ; KURN, DM ; KETTERLE, Wolfgang : Bose-Einstein condensation in a gas of sodium atoms. In : *Physical review letters* 75 (1995), Nr. 22, S. 3969
- [Denechaud 2018] DENECHAUD, Vincent : *Vers une étude spectroscopique de la transition d'Anderson*, Université Paris Saclay, Dissertation, 2018
- [Diu et al. 1989] DIU, Bernard ; ROULET, Bernard ; GUTHMANN, Claudine ; LEDERER, Danielle : *Eléments de physique statistique*. Hermann, 1989
- [Fauquembergue 2004] FAUQUEMBERGUE, Marie : *Réalisation d'un dispositif de condensation de Bose-Einstein et de transport d'un échantillon cohérent d'atomes*, Paris 11, Dissertation, 2004
- [Gatti et al. 2008] GATTI, A ; MAGATTI, D ; FERRI, F : Three-dimensional coherence of light speckles : theory. In : *Physical Review A* 78 (2008), Nr. 6, S. 063806
- [Goodman 2007] GOODMAN, Joseph W. : *Speckle phenomena in optics : theory and applications*. Roberts and Company Publishers, 2007
- [Grimm et al. 1999] GRIMM, Rudolf ; WEIDEMÜLLER, Matthias ; OVCHINNIKOV, Yurii B. : Optical dipole traps for neutral atoms. In : *arXiv preprint physics/9902072* (1999)
- [Hu et al. 2017] HU, Jiazhong ; URVOY, Alban ; VENDEIRO, Zachary ; CRÉPEL, Valentin ; CHEN, Wenlan ; VULETIĆ, Vladan : Creation of a Bose-condensed gas of  $^{87}\text{Rb}$  by laser cooling. In : *Science* 358 (2017), Nr. 6366, S. 1078–1080
- [Hung et al. 2008] HUNG, Chen-Lung ; ZHANG, Xibo ; GEMELKE, Nathan ; CHIN, Cheng : Accelerating evaporative cooling of atoms into Bose-Einstein condensation in optical traps. In : *Physical Review A* 78 (2008), Nr. 1, S. 011604
- [Jendrzejewski 2012] JENDRZEJEWSKI, Fred : *Quantum transport of ultracold atoms in disordered potentials*, Paris 11, Dissertation, 2012
- [Jendrzejewski et al. 2012] JENDRZEJEWSKI, Fred ; BERNARD, Alain ; MUELLER, Killian ; CHEINET, Patrick ; JOSSE, Vincent ; PIRAUD, Marie ; PEZZÉ, Luca ; SANCHEZ-PALENCE, Laurent ; ASPECT, Alain ; BOUYER, Philippe : Three-dimensional localization of ultracold atoms in an optical disordered potential. In : *Nature Physics* 8 (2012), Nr. 5, S. 398–403
- [Keshet 2008] KESHET, Aviv : *Cicero Word Generator Technical and User Manual*. 2008.  
– URL <http://akeshet.github.io/Cicero-Word-Generator/>
- [Keshet and Ketterle 2013] KESHET, Aviv ; KETTERLE, Wolfgang : A distributed, graphical user interface based, computer control system for atomic physics experiments. In : *Review of Scientific Instruments* 84 (2013), Nr. 1, S. 015105
- [Ketterle and Van Druten 1996] KETTERLE, Wolfgang ; VAN DRUTEN, NJ : Evaporative cooling of trapped atoms. In : *Advances in atomic, molecular, and optical physics* Bd. 37. Elsevier, 1996, S. 181–236

- [Luiten et al. 1996] LUITEN, OJ ; REYNOLDS, MW ; WALRAVEN, JTM : Kinetic theory of the evaporative cooling of a trapped gas. In : *Physical Review A* 53 (1996), Nr. 1, S. 381
- [Magatti et al. 2009] MAGATTI, D ; GATTI, A ; FERRI, F : Three-dimensional coherence of light speckles : experiment. In : *Physical Review A* 79 (2009), Nr. 5, S. 053831
- [Mukhtar 2019] MUKHTAR, Musawwadah : *State-dependent disordered potential for studies of Anderson transition with ultracold atoms*, Université Paris-Saclay, Dissertation, 2019
- [Muller 2015] MULLER, Kilian : *Coherent transport of ultracold atoms in disordered potentials : Manipulation of time-reversal symmetry in weak localization experiments*, Paris 11, Dissertation, 2015
- [Murthy et al. 2014] MURTHY, PA ; KEDAR, D ; LOMPE, T ; NEIDIG, M ; RIES, MG ; WENZ, AN ; ZÜRN, G ; JOCHIM, S : Matter-wave Fourier optics with a strongly interacting two-dimensional Fermi gas. In : *Physical Review A* 90 (2014), Nr. 4, S. 043611
- [O'hara et al. 2001] O'HARA, KM ; GEHM, Michael E. ; GRANADE, SR ; THOMAS, JE : Scaling laws for evaporative cooling in time-dependent optical traps. In : *Physical Review A* 64 (2001), Nr. 5, S. 051403
- [Pasek et al. 2017] PASEK, Michael ; ORSO, Giuliano ; DELANDE, Dominique : Anderson localization of ultracold atoms : Where is the mobility edge ? In : *Physical review letters* 118 (2017), Nr. 17, S. 170403
- [Pethick and Smith 2008] PETHICK, Christopher J. ; SMITH, Henrik : *Bose-Einstein condensation in dilute gases*. Cambridge university press, 2008
- [Piraud 2012] PIRAUD, Marie : *Localisation d'Anderson d'ondes de matière dans un désordre corrélé : de 1D à 3D*, Paris 11, Dissertation, 2012
- [Richard 2015] RICHARD, Jérémie : *Propagation d'atomes ultra-froids en milieu désordonné-Étude dans l'espace des impulsions de phénomènes de diffusion et de localisation*, Université Paris-Saclay, Dissertation, 2015
- [Richard et al. 2019] RICHARD, Jérémie ; LIM, Lih-King ; DENECHAUD, Vincent ; VOLCHKOV, Valentin V. ; LECOUTRE, Baptiste ; MUKHTAR, Musawwadah ; JENDRZEJEWSKI, Fred ; ASPECT, Alain ; SIGNOLE, Adrien ; SANCHEZ-PALENCIA, Laurent et al. : Elastic scattering time of matter waves in disordered potentials. In : *Physical review letters* 122 (2019), Nr. 10, S. 100403
- [Riou 2006] RIOU, Jean-Félix : *Etude des propriétés de propagation d'un laser à atomes*, Paris 11, Dissertation, 2006
- [Söding et al. 1999] SÖDING, J ; GUÉRY-ODELIN, D ; DESBIOLLES, P ; CHEVY, F ; INAMORI, H ; DALIBARD, J : Three-body decay of a rubidium Bose-Einstein condensate. In : *Applied physics B* 69 (1999), Nr. 4, S. 257–261
- [Steck 2001] STECK, Daniel A. : *Rubidium 87 D line data*. 2001
- [Stellmer et al. 2013] STELLMER, Simon ; PASQUIOU, Benjamin ; GRIMM, Rudolf ; SCHRECK, Florian : Laser cooling to quantum degeneracy. In : *Physical review letters* 110 (2013), Nr. 26, S. 263003

[Volchkov et al. 2018] VOLCHKOV, Valentin V.; PASEK, Michael; DENECHAUD, Vincent; MUKHTAR, Musawwadah; ASPECT, Alain; DELANDE, Dominique; JOSSE, Vincent : Measurement of spectral functions of ultracold atoms in disordered potentials. In : *Physical review letters* 120 (2018), Nr. 6, S. 060404

[Walraven 2010] WALRAVEN, JTM : Elements of quantum gases : Thermodynamic and collisional properties of trapped atomic gases. In : *Les Houches-predoc lectures* 2010 (2010), S. 207