

Le principe d'incertitude, d'indétermination ou de dispersion

Normand Beaudoin
Département de physique et d'astronomie
Université de Moncton, Canada

“Tout est relatif!” Combien de fois n'avons nous pas entendu cette sentence qui, bien placée, coupe court à tout argument. Après tout, une telle assertion n'est-elle pas appuyée par une des plus solides théories de la physique, la Théorie de la Relativité? Fini les certitudes, fini les absolus, tout serait donc relatif! Ce qui est drôle c'est que la Relativité, malgré son nom, repose sur deux des absolus les plus sûrs de la physique : la constance de la vitesse de la lumière pour tout observateur et, l'équivalence, pour toutes les lois physiques, de tous les systèmes de référence inertiels.

Il en va de même pour cet autre pilier de la physique moderne, la Mécanique Quantique, (probablement la plus précisément vérifiée des théories physiques), et son fameux Principe d'Incertainité. Si quelqu'un invoque ce principe pour vous convaincre que rien ne peut être connu avec certitude absolue, que tout est vague et que la vraie connaissance est impossible, répondez-lui que c'est plutôt son assertion qui est plutôt vague! Le principe d'incertitude n'est pas un principe d'ignorance mais un principe de connaissance. Il ne signifie pas que nos connaissances sont incertaines ou vagues au point où tout ce que nous pensons savoir ne serait qu'un édifice fragile et prêt à s'écrouler à tout moment.

Dans leur quête pour comprendre comment fonctionne la matière, les physiciens ont découvert diverses grandeurs physiques, comme l'énergie, la quantité de mouvement et la quantité de mouvement angulaire. En mécanique classique, ces grandeurs prennent des valeurs nettes et uniques en tout temps. Ainsi, on peut déterminer la position d'une particule ou sa vitesse à tout instant. Ceci fonctionne assez bien tant et aussi longtemps que nous étudions des systèmes idéalisés, c'est à dire des systèmes où, par exemple, chaque corps matériel ou chaque partie de ce corps est considéré comme un point infiniment petit et où toute la masse en question est concentrée en ce point et où chacun de ces points, s'il n'est soumis à aucune force, se déplace strictement en ligne droite et, si soumis à des forces, adopte une trajectoire assimilable à une ligne courbe parfaitement définie et infiniment fine.

Mais quand on regarde les choses de plus près, nous nous éloignons de la mécanique classique pour entrer dans le domaine de la mécanique quantique et il

apparaît alors de drôles de choses. Il apparaît que ce que nous pensions être des particules très petites, très localisées, presque des points massifs infiniment petits et donc compatibles avec notre mécanique classique, eh bien, elles n'en sont pas! Il apparaît que nos *particules* sont des ondes! Rassurons-nous tout de suite. Il ne s'agit pas ici d'élucubrations de penseurs perdus; cela a été vérifié expérimentalement plusieurs fois. N'importe qui peut le faire d'ailleurs.

Des ondes, donc! Mais la notion même d'onde est en contradiction avec le concept de point infiniment petit. Une onde, vous en avez certainement déjà vu une, a forcément une extension spatiale. Une onde est constituée d'oscillations qui se situent dans l'espace. En général donc, (sauf dans un cas limite très particulier de superposition d'une infinité d'oscillations harmoniques) une onde occupe un volume d'espace qui n'est pas infiniment petit. Si donc, un élément de matière que nous sommes habitués à nommer *particule* n'est pas une particule mais une onde, alors, cet élément de matière (que nous ne savons plus trop comment nommer) occupe un volume d'espace qui n'est pas nécessairement très petit. Nous voyons immédiatement qu'il devient impossible pour notre élément de matière d'occuper, comme dans la théorie classique, *une* position bien précise de l'espace. Notre élément de matière occupe, à la fois, tout un volume d'espace. Il est en quelque sorte *dispersé*! Sa position n'est pas exactement *déterminée*.

(Un petit aparté s'impose ici avant de poursuivre afin d'éviter d'être pourfendu, peut-être de bon droit d'ailleurs, par certains puristes. Nous avons dit plus haut qu'un élément de matière *est* une onde. Il serait plus prudent de dire se '*comporte*' au lieu de '*est*'. Mais quand quelque chose se comporte comme une pomme, ressemble à une pomme, goûte la pomme et nous tombe sur la tête sous l'effet de la gravitation comme une pomme, il est très tentant de dire que *c'est* une pomme. Quoiqu'un bon scientifique, malgré ce potentiel abus de langage, garde toujours dans un coin de sa tête meurtrie que ce pourrait ne pas être une pomme. Nous avons dit aussi: «Notre élément de matière occupe, à la fois, tout un volume d'espace.» Certains diront que nous n'en savons rien et que nous ne devons avoir aucune image mentale de la chose. D'autres diront que la particule se propage comme une onde, mais qu'au moment de la détection, elle se comporte comme une particule avec une position bien précise (cette position ayant une probabilité d'occurrence donnée par le module au carré de l'onde). Toutes ces conceptions sont discutables et discutées; il est difficile de trancher quand elles donnent toutes les mêmes résultats pratiques. Bien que passionnant, ce débat nous entraîne à d'autres niveaux. Mettons donc fin ici à notre aparté et poursuivons.)

Notre élément de matière disions-nous, est *dispersé*, sa position n'est pas exactement *déterminée* en tout temps. Il en découle forcément que sa vitesse ne sera pas non plus déterminée puisque sa position ne l'est pas et que l'une dépend de l'autre. Mais comment cette dispersion de la vitesse est-elle reliée à celle de la position? De même que la mécanique classique établie des relations entre les différentes grandeurs, la mécanique quantique le fait aussi mais de façon différente. Elle le fait, pourrions-nous

dire, avec plus de réalisme, en tenant compte de la nature inéluctablement ondulatoire de la matière. Par exemple, dans le cas de la position et de la vitesse, la mécanique quantique relie ces deux grandeurs par une opération assez formidable que nous appelons la transformée de Fourier. Disons simplement qu'ici encore il se passe de drôles de choses. La relation entre position et vitesse¹ est telle que si la dispersion de la position est grande, alors la dispersion de la vitesse sera d'autant petite et réciproquement. Autrement dit, plus la position d'un élément de matière est dispersée, indéterminée, moins sa vitesse sera dispersée ou indéterminée. Moins la position d'un élément de matière est dispersée, indéterminée, plus sa vitesse sera dispersée, indéterminée.

Cela est tout à fait fascinant. Ce qui ajoute encore à l'intérêt de la chose est qu'il est possible de définir une mesure précise de la dispersion autant pour la position que pour la vitesse. On aura donc un nombre pour la dispersion de la position et un autre nombre pour la dispersion de la vitesse. Eh bien, ce qui arrive alors c'est que le produit de ces deux nombres est toujours plus grand qu'une constante, laquelle fait intervenir la fameuse constante de Planck. Que signifie cela? Cela signifie que si on prépare un système physique qui place un élément de matière dans un état de position très peu dispersé, c'est à dire assez bien localisé dans l'espace, alors une mesure de la position de cet élément donnera une certaine position. Si on répète l'expérience plusieurs fois nous obtiendrons toujours assez précisément la même position. Mais si au cours de ces expériences nous mesurons aussi la vitesse, nous trouverons que nous obtenons des valeurs de vitesse éparpillées. Réciproquement, si on prépare un système physique qui place un élément de matière dans un état de vitesse très peu dispersé, c'est à dire ayant une vitesse assez précise, alors une mesure de la vitesse de cet élément donnera une certaine valeur. Si on répète l'expérience plusieurs fois nous obtiendrons toujours assez précisément la même valeur. Mais si au cours de ces expériences nous mesurons aussi la position, nous trouverons que nous obtenons des valeurs de position éparpillées. Nous ne pourrons jamais avoir les deux à la fois dans des intervalles très étroits de valeurs puisque le produit des deux mesures de dispersion doit dépasser la constante dont nous parlions plus haut. La seule façon d'avoir une vitesse assez précise est de relâcher notre exigence sur la position et réciproquement.

Voilà. C'est cela le principe d'incertitude. On constatera qu'il serait sans doute préférable de parler du principe de dispersion ou d'indétermination que d'incertitude. Pourquoi? Parce que ce phénomène n'est pas dû à des incertitudes ou à des erreurs de mesures mais parce qu'il prend sa source dans la nature profonde des choses, dans le fait que la matière est onde.

¹ Habituellement on considérera la quantité de mouvement au lieu de la vitesse, mais comme la quantité de mouvement est le produit de la masse par la vitesse et quand la masse est constante alors les deux se comportent, à une constante près, de la même façon dans ce contexte.

Ce qui nous sauve ou nous condamne, c'est que la constante limite est très petite. Pour les systèmes nanoscopiques -- les atomes, les particules élémentaires -- ce principe est incontournable et il conditionne aussi la structure de la matière à grande échelle. Cela étant dit, pour bien des choses de la vie courante et encore plus pour des systèmes astronomiques, les indéterminations sont globalement extrêmement petites relativement aux grandeurs observées. La terre n'ira pas cuire au soleil en vertu de fluctuations inhérentes de sa position dû au principe d'incertitude. Vous ne lancerez jamais une rondelle de hockey à 1000 km/h simplement parce que vous n'arrivez pas à la lancer précisément, et il serait maladroit de plaider devant un juge qui vous accuse d'avoir roué à 198 km/h dans une zone de 50 km/h qu'en vertu de la précision de son accusation il soit peu probable que vous vous soyez trouvé dans la dite zone!