

Cet article de vulgarisation aura comme but d'expliquer ce qu'est le bruit, ainsi que le paradoxe de Brillouin et comment régler ce dernier. Ce qui mène au projet auquel j'ai participé.

Pour commencer revenons sur ce qu'est une variable aléatoire. Une variable aléatoire est une variable dont nous pouvons associer un ensemble d'éléments dont la variable peut être, auquel chaque élément a une probabilité associée. La somme de toutes les probabilités d'une variable aléatoire est 1. Ceci nous dit pas grande chose toute seule, mais considérons ceci dans le cas de distributions tel une distribution gaussienne, ceci nous permet alors de définir la déviation standard entre autres en considérant l'espérance moyenne de la variable aléatoire. Nous pouvons alors considérer ce qui se passe pour une variable aléatoire ayant une distribution gaussienne, considérons que nous mesurons un courant nul à une température de pièce sur un fil résistif simple ayant une résistance. Une mesure instantanée donnera un résultat dans les alentours de 0, mais nous ne pourrions pas prédire avec une simple mesure. Considérons par contre que nous prenons plusieurs points, dans ce cas en faisant la moyenne nous devrions avoir de quoi qui se rapproche de zéro à quelques variations standards de différence. Ce que nous appelons le bruit est la variation des mesures instantanées, de plus nous pouvons voir qu'il y a différents types de bruit dépendant de la distribution de la variable, tel le bruit gaussien dont la distribution est celle bien évidemment d'une gaussienne.

Nous pouvons alors commencer à nous poser la question de qu'est-ce qui cause le bruit dans un fil. Alors comme nous savons tous le courant est composé de quanta nommés électrons, qui sont des leptons c.-à-d. des particules avec charge $1/2$ ayant une charge électrique et n'interagissant pas avec la force forte. Étant des fermions les électrons sont contraints à respecter le principe d'exclusion de Pauli, il ne peut pas avoir deux électrons au même endroit. Alors un courant à notre échelle est composé de plusieurs électrons dans les alentours de 10^{18} électrons. Considérons ensuite que le courant n'est pas généralement causé par le déplacement d'un électron en particulier mais plutôt un déplacement minime collectif qui se transmet. Les électrons se déplacent peu, mais il y a une onde qui se déplace à grande vitesse. En regardant ceci nous pouvons alors déduire que le bruit électrique est causé par des variations instantanées de la position d'électrons sur une échelle locale. Mais il est nécessaire de considérer alors comment ce fait se déplace ainsi que pourquoi. Rappelons-nous que les électrons subissent la force électromagnétique ce qui veut dire qu'ils sont contraints à des puits de potentiels autour des noyaux, de plus ils doivent être dans certaines bandes d'énergies permises. Alors avec cela nous voyons alors le deuxième élément nécessaire, de l'énergie. Plus particulièrement dans le cas d'un fil qui n'a pas de courant cette énergie vient de la température ambiante. Quand l'électron a assez d'énergie il peut alors sauter à un puit de potentiel différent qui n'a pas d'électrons à son énergie. Le bruit qui est généré par ces variations aléatoires est nommé le bruit de Johnson-Nyquist.

Pour la suite un rappel du deuxième principe de la thermodynamique est nécessaire. Alors le deuxième principe de la thermodynamique dit que l'entropie doit toujours augmenter ou rester pareil, ceci a des conséquences pour l'irréversibilité d'un processus. Si le processus augmente l'entropie le processus est dit irréversible, mais dans le cas d'un processus qui n'augmente pas l'entropie le processus est dit réversible. Notons que le processus le plus efficace qui nous permet de tirer du travail est nommé le cycle de Carnot. Celui-ci est composé de deux détente et deux compressions, soit une détente isotherme, ou la température ne change pas, réversible, une détente adiabatique, ou la température change mais qu'il n'y a pas d'échange thermique à l'extérieur, encore une fois réversible, suivi d'une compression isotherme et une compression adiabatique. Ce cycle est le cycle ayant le plus grand rendement théorique, c'est alors une façon simple de voir si le rendement d'un processus est réaliste.

Une possibilité très attirante sa serait de pouvoir tirer du travail du bruit de Johnson-Nyquist, c'est-à-dire tirer un courant de ce bruit. Mais le bruit en question est un bruit gaussien centré à zéro, alors comment faire ? La solution la plus simple serait de redresser le courant créé du bruit avec une diode, ainsi apportant la moyenne du bruit par-dessus zéro. Par contre ceci pose problème étant donné que ceci pourrait fonctionner même sans différence de température. Ce problème a été relevé dans un article de Brillouin¹ étant donné qu'un courant pourrait être créé sans différence de température nous pourrions extraire un travail de ceci, ce qui serait contre le deuxième principe de la thermodynamique. La solution de ce problème est pourtant simple, nous devons considérer le bruit généré par la diode. En considérant ceci nous venons au fait que le courant serait compensé et la moyenne redeviendrait nulle. Par contre la situation peut être d'intérêt si nous considérons qu'il y a une différence de température. Dans un article de I.M. Sokolov le cas où la résistance et la diode sont à des températures est exploré. Et ce qui est intéressant est que nous pouvons alors avoir une génération de courant avec une efficacité théorique en dessous du cycle de Carnot ce qui implique que ce serait possible. Ce courant est créé par la différence des bruits de la résistance et de la diode. Étant donné que le courant qui compensait est plus de la même grandeur que le courant compensé nous voyons un courant donné par la différence entre ces deux bruits. Ce courant varie en ordre dépendant de la différence de température mais pour donner un exemple une différence de température de l'ordre de 200 Kelvin donne un courant de l'ordre des centaines de femto ampères avec une résistance et une diode.

Pourquoi est-ce que ceci est intéressant ? Ce cas est un exemple d'un cas relativement anodin où les lois classiques de l'électricité ne fonctionnent pas et que nous devons considérer d'autres variables tel la température. Nous pouvons alors voir qu'il y a des cas où des propriétés quantiques ont des effets mesurables. L'intérêt de comprendre comment le bruit fonctionne et d'où il vient est alors aussi évoqué. Les cas où des propriétés quantiques ont des effets directs peuvent être de grand intérêt surtout pour comprendre comment fonctionne la physique. Étant donné que dans ces cas une propriété peut avoir un effet direct sur une mesure. Un autre exemple serait en étudiant la supraconductivité où la transition entre un état non supraconducteur et un état supraconducteur est très abrupte et influencé par divers facteurs dont la température, le courant et le champ magnétique. Dans ce cas, nous pouvons regarder ce qui se passe si nous avons un courant légèrement sous le courant critique, le courant où la supraconductivité arrête, et voir la stabilité de la supra considérant qu'il y a du bruit sur le courant. Nous pouvons aussi utiliser ces propriétés pour faire des dispositifs divers tel des photo détecteurs, étant donné que les photons, le boson qui compose la lumière et aussi les champs magnétiques, peuvent monter le champ par-dessus une limite nous pouvons faire qu'un photon crée une transition du supraconducteur et ainsi pouvoir détecter s'il y a un photon.

¹ L. BRILLOUIN 'Can the Rectifier Become a Thermodynamical Demon?' PhysRev.78.678.2