

STAGE - T0

LE PARADOXE DE BRILLOUIN

19 janvier 2017

Philippe Karan

Supervisé par
M. Bertrand Reulet et
M. Keyan Bennaceur

Résumé

Le paradoxe de Brillouin est une expérience qui regroupe plusieurs domaines en physique, de la thermodynamique à l'électromagnétisme. Il met la lumière sur certains phénomènes typiques de ces domaines, tout en offrant une approche différente à ce qu'on appelle la thermoélectricité. Il permet d'entrevoir les possibilités offertes par l'étude des fluctuations électriques, le bruit.

Introduction

La thermodynamique

Le moteur est une invention importante dans l'histoire de l'humanité, permettant souvent à l'humain de se faciliter la vie. Tout au cours de l'évolution du moteur, une science a pris forme dans le but d'étudier et d'améliorer ces engins. C'est ainsi que la thermodynamique commença à décrire ce qui touche à la température et à la chaleur, ainsi que le lien qui existe entre ces concepts et l'énergie. La thermodynamique permet donc d'expliquer les phénomènes liés à la température pour des objets macroscopiques en se basant sur des concepts de physique microscopique, regroupés au sein de la physique statistique. De nombreux physiciens ont travaillé sur l'élaboration de cette statistique thermodynamique, dont James Clerk Maxwell, Ludwig Boltzmann et Max Planck. La thermodynamique est basée sur quatre grandes lois universelles :

- Si deux systèmes sont chacun en équilibre thermique avec un troisième, alors ils sont aussi en équilibre thermique entre eux. C'est le principe d'équivalence, qui stipule simplement l'existence des thermomètres.

- L'énergie interne d'un système isolé (système n'interagissant d'aucune manière avec son environnement) est constante. C'est le principe de conservation d'énergie.
- La chaleur ne peut pas spontanément s'en aller d'un endroit froid vers un endroit plus chaud. Cette loi est mieux connue sous le nom du second principe de la thermodynamique.
- Lorsqu'un système approche le zéro absolu (0 Kelvin), l'entropie du système approche une valeur minimale. Cela implique l'impossibilité d'atteindre le zéro absolu. L'entropie peut souvent être vu comme le désordre du système.

La thermoélectricité

Quelques applications telles que la thermométrie (mesure de la température), la réfrigération et la génération d'électricité sont nées d'une combinaison de la thermodynamique et de l'électricité. Ces applications font toutes parties du domaine de la thermoélectricité, qui décrit le lien entre les différences de température et les tensions électriques. Ainsi, un matériau thermoélectrique crée une tension électrique lorsqu'une différence de température est présente d'un bout à l'autre. Inversement, si une tension est appliquée, cela créera une différence de température. C'est ainsi que l'on peut utiliser de tels matériaux comme thermomètres, réfrigérateurs ou même générateurs d'électricité.

La thermoélectricité comprend trois principaux phénomènes, connus sous le nom d'effet Seebeck,

effet Peltier et effet Thomson. L'effet Seebeck décrit la conversion de chaleur en électricité, alors que l'effet Peltier décrit la différence de température qui apparaît aux jonctions de deux matériaux soumis à un courant électrique. L'effet Thomson est un cas particulier des deux autres qu'il n'est pas nécessaire d'expliquer ici.

Le bruit

Les lois de la thermodynamique s'appliquent à des systèmes possédant un grand nombre de particules microscopiques, en s'intéressant aux caractéristiques de ces particules (entropie, énergie interne, température, volume, etc.). Dans ce cadre, la température d'un système peut être comprise comme l'agitation moyenne des particules qui composent ce système. Tout comme un thermomètre mesure l'agitation moyenne, une mesure du courant thermoélectrique permet de connaître l'agitation moyenne des électrons d'un système, due à une différence de température. Cependant, les électrons n'ont habituellement pas tous la même agitation. L'étude des fluctuations électriques, que l'on nomme bruit, permet d'obtenir la distribution statistique de l'énergie des électrons et ainsi d'en apprendre sur les processus physiques en jeu. En plus de nous en apprendre sur la physique d'un système, le bruit des électrons peut permettre d'extraire du travail, comme le montre l'expérience de Brillouin. Le travail est une forme d'énergie étant définie comme le produit scalaire d'un vecteur force et d'un vecteur déplacement.

Le second principe de la thermodynamique

Une autre formulation du second principe de la thermodynamique stipule que l'entropie d'un système isolé ne diminue jamais dans le temps. Ainsi, un système qui n'échange pas d'énergie ou de particules avec l'extérieur ne va jamais spontanément s'organiser en quelque chose de plus ordonné. Au cours de l'histoire, certains grands physiciens ont tenté sans succès de trouver des expériences qui défieraient ce principe.

Le rochet de Feynman

En 1964, Richard Feynman proposa un système de rochet et de pale qui utiliserait une différence de température entre deux milieux pour effectuer un travail. En effet, la pale, dans un cube rempli de gaz à une température T_1 , serait liée par un essieu à un système de rochet, qui serait dans un gaz à température T_2 . L'objectif du rochet est de bloquer le mouvement de la pale dans un sens, tout en la laissant tourner dans l'autre.

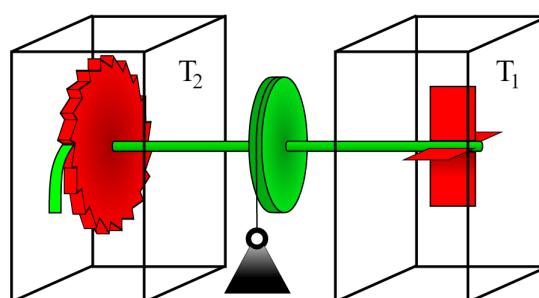


FIGURE 1 – Schéma du système proposé. (réf : <http://www.manuel-strehl.de/thesis/thesis.xhtml>)

La pale subit de nombreuses collisions avec les molécules de gaz présentes dans la boîte, ce qui ne résulte normalement pas en un mouvement puisque la somme de toutes les accélérations

procurées par le gaz est nulle. Par contre, si on empêche la pale de tourner dans un sens, alors on recueille uniquement le mouvement des collisions qui font tourner la pale dans le sens alloué. La pale devrait donc tourner dans le sens que permet le rochet, sous l'effet des collisions avec le gaz. Ce concept d'énergie (mouvement de rotation) créée par la simple agitation thermique défie le second principe de la thermodynamique, puisque celui-ci stipule, dans un contexte appliqué aux machines thermiques (comme le rochet de Feynman), qu'une telle machine ne peut fonctionner si elle fournit un travail et que sa chaleur ne provient que d'un seul réservoir (système avec une certaine capacité calorifique). Effectivement, selon le montage de la figure 1, le cube T_1 verrait sa température diminuer et ainsi les molécules du gaz s'ordonnerait, l'entropie diminuerait donc ! Une étude plus profonde et d'autres arguments thermodynamiques permettent de démentir cette expérience de pensée.

Le paradoxe de Brillouin

S'inspirant du problème de Feynman, le français Léon Brillouin pensa à l'équivalent du rochet en électricité : la diode. Ainsi, il proposa une autre expérience de pensée sur la base des circuits électriques. L'idée était d'utiliser une diode pour redresser le bruit thermique d'une résistance, créant ainsi un courant continu. En effet, la résistance émet du bruit thermique également dans toutes les directions, mais la diode ne laisse passer que le bruit dans un sens, résultant en un courant continu.

En effet, une diode est une composante électrique qui ne laisse passer le courant que dans un

seul sens, comme le rochet ne laissait tourner la pale que dans un sens. De plus, une résistance émet un bruit thermique, qui comme le gaz, est égal dans toutes les directions en moyenne.

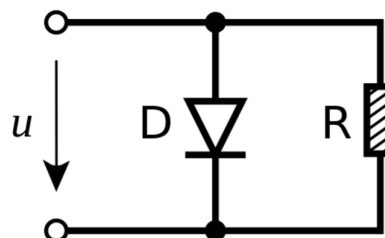


FIGURE 2 – Schéma du système proposé. (réf : <https://de.wikipedia.org/wiki/Brillouin-Paradoxon>)

Le bruit thermique, aussi appelé bruit de Johnson-Nyquist, est causé par l'agitation thermique des électrons dans le matériau, et sa distribution statistique a une forme particulière (gaussienne) qui permet de calculer les fluctuations.

Le paradoxe a été aussi démenti, mais il demeure possible (théoriquement) de créer un courant continu en forçant une différence de température. Évidemment, maintenir une composante électrique à une certaine température requiert un travail et donc on ne crée pas d'énergie à partir "de rien". Il demeure tout de même intéressant de voir s'il est possible d'obtenir un courant continu simplement en créant une différence de température entre la diode et la résistance et en redressant le bruit thermique de celle-ci.

L'expérience de Brillouin

Cette expérience vise à obtenir un courant électrique à partir d'une différence de température. Il s'agit donc d'une application de l'effet Seebeck de la thermoélectricité. Cependant, l'expérience va

plus loin que cela, en utilisant le bruit thermique d'une résistance. C'est donc une toute nouvelle vision de l'effet Seebeck, qui prend une tournure différente en y introduisant la notion de bruit thermique.

La théorie

L'idée est de maintenir une diode à une température T_d et une résistance à une température T_o . En créant une différence entre les deux températures, on pourra obtenir un signal redressé par la diode. Cependant, cette différence de température cause aussi un courant direct qui traverse le circuit, c'est l'effet thermoélectrique classique (Seebeck). Pour éliminer ce phénomène, on utilise un bias-T (composante électrique constituée d'un ensemble de capacité, inductance et résistance), qui sert à bloquer le courant direct allant de la diode à la résistance, et à laisser passer la plupart du bruit thermique de la résistance.

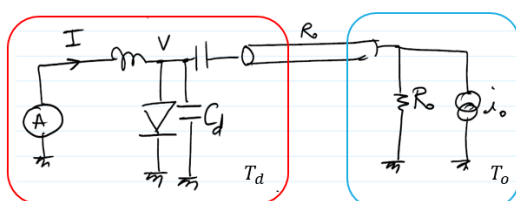


FIGURE 3 – Schéma du montage utilisé.

Le courant traversant une diode est donné par :

$$I = I_d(e^{\beta eV} - 1) \approx I_d(\beta eV + \frac{1}{2}(\beta eV)^2) \quad (1)$$

où e est la charge élémentaire, k_B est la constante de Boltzmann et $\beta = \frac{1}{k_B T_d}$. De plus, I_d est une caractéristique importante de la diode, de même que T_d qui est sa température.

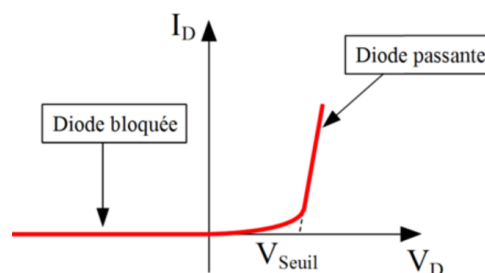


FIGURE 4 – Exemple de graphique caractéristique des diodes, qu'on appelle courbe I-V. (réf : <https://openclassrooms.com/forum/sujet/question-de-debutant-7>)

Ainsi, le courant moyen est donné par :

$$\langle I \rangle = \frac{1}{2} I_d (\beta e)^2 \langle V^2 \rangle \quad (2)$$

Il est bien important de comprendre que le signal mesuré est le bruit thermique de la résistance, donné en courant par :

$$S_T = \frac{4k_B T_o}{R_o} \quad (3)$$

Puisque la résistance de la diode est égale à :

$$R_d = \frac{k_B T_d}{e I_d} \gg R_o = 50\Omega \quad (4)$$

on peut approximer que la tension aux bornes de la diode est donnée par le courant i_o en parallèle dans la résistance R_o et la capacité de la diode C_d . Le bruit thermique est un bruit blanc, c'est-à-dire qu'il est indépendant de la fréquence, mais le montage coupe certaines de ces fréquences alors le signal n'est mesuré que sur une certaine largeur de bande, la plage de fréquences ($f = \frac{1}{2\pi R_o C_d}$). Voici donc le résultat de la tension moyenne au carré, après quelques manipulations mathématiques :

$$\langle V^2 \rangle = \frac{k_B T_o}{C_d} \quad (5)$$

En remplaçant dans l'équation (2), on obtient :

$$\langle I \rangle = I_d \frac{E_c}{k_B T_d} \frac{T_o}{T_d} \quad \text{où} \quad E_c = \frac{e^2}{2C_d} \quad (6)$$

Mais puisque le second principe de thermodynamique dicte que $\langle I \rangle = 0$ pour $T_o = T_d$, il faut plutôt écrire :

$$\langle I \rangle = I_d \frac{E_c}{k_B T_d} \left(\frac{T_o}{T_d} - 1 \right) \quad (7)$$

Le courant obtenu serait donc une fonction linéaire de la température de la résistance.

Paramètres à mesurer

Pour vérifier la théorie, il faut mesurer plusieurs caractéristiques de la diode. Il faut connaître son I_d , qu'on mesure à l'aide d'une courbe I-V, et sa capacité C_d que l'on peut obtenir en faisant un balayage en fréquence pour en tirer la largeur de bande. La résistance de la diode se calcule ensuite grâce à l'équation (4).

La mesure

Pour s'assurer que la mesure du courant n'est pas simplement causée par la dérive des appareils, on prend les mesures sur deux résistances en alternance, l'une à la température de la diode (représentant le zéro) et l'autre à froid. La différence entre les deux représente le courant provenant du bruit thermique. Plusieurs tests peuvent être effectués pour vérifier le bon fonctionnement du montage, comme des mesures avec les deux résistances à la même température (cela donnerait $\langle I \rangle = 0$) ou une comparaison de résultats avec des filtres qui réduisent la bande passante, et donc la capacité.

La vraie mesure s'effectue à l'aide d'un cryostat, qui permet de passer suffisamment de temps

à une température donnée (allant de 4 à 300 Kelvins). Une plaque chauffante peut aussi être utilisée pour augmenter la température de la diode ou de la résistance au dessus de 300K. Des programmes informatiques s'occupent de traiter toutes ces données pour finalement faire ressortir le résultat final : le courant continu produit.

Conclusion

La figure 5 en annexe montre un résultat obtenu pour l'expérience de Brillouin. Cela respecte bien les attentes théoriques et confirme la possibilité de produire un courant d'une différence de température avec le bruit d'une résistance. Cependant, le courant est très petit et la méthode ne pourrait pas être appliquée à quelque technologie que ce soit. Il s'agit simplement d'une expérience intrigante poussant la thermoélectricité à un autre niveau en la liant à un aspect tout autre de la physique, un sujet qui reste encore à découvrir.

Annexe

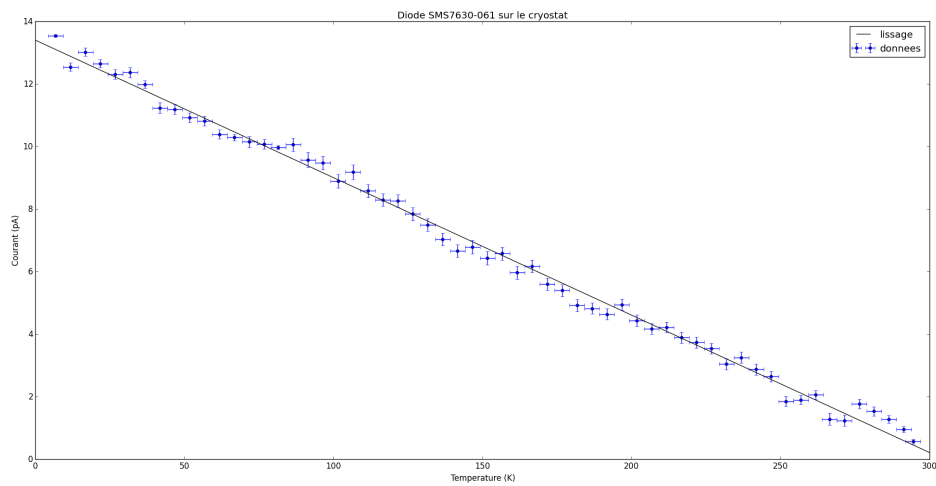


FIGURE 5 – Graphique du courant redressé $\langle I \rangle$ en fonction de la température.