

# Compte Rendu : Les Démons qui hantent la Thermodynamique

Yohann Bertrand

BERY77060100

3<sup>e</sup> année au baccalauréat

Université du Québec à Trois-Rivières

Département de physique

## Introduction

La thermodynamique a toujours été une théorie particulière de la physique. En outre, les lois qui la composent ont de très étranges implications philosophiques. Ces implications ont été longuement débattues et étudiées sous toutes leurs coutures principalement par les pionniers de la mécanique statistique dont notamment Ludwig Boltzmann, James Clerk Maxwell et certaines d'entre elles étaient tellement problématiques qu'on leur a donné le nom de démon. Un peu comme le démon de Descartes, ces démons remettent en cause toute notre perception de la thermodynamique et du monde tel qu'on le conçoit. Malgré cela, jusqu'à l'arrivée de la mécanique quantique, il nous était impossible de conjurer ces démons, mais aujourd'hui nous avons les outils nécessaires pour le faire.

L'article se divise en plusieurs parties, on introduit d'abord le principe des démons de la thermodynamique. Ensuite, on présente le démon de Loschmidt qui porte sur la réversibilité de l'écoulement du temps et du paradoxe entre la mécanique classique ou quantique et la thermodynamique. Puis, on rencontre le démon de Maxwell qui pourrait briser la seconde loi de la thermodynamique et des expériences pour l'appliquer en pratique. On nous parle alors de la thermodynamique quantique qui s'inspire du fonctionnement du démon de Maxwell. Vient alors une section discutant de l'anthropocentrisme de la thermodynamique. Ce qui nous amène au dernier démon : le démon de Laplace et son savoir parfait de la position et quantité de mouvement de toutes les molécules de l'univers qui menace de briser le concept d'entropie. Et l'on finit par un exemple qui réconcilie mécanique quantique et thermodynamique, en plus de bannir le démon de Laplace.

Le but de cet article est de nous faire réfléchir sur les portées philosophiques des théories comme la thermodynamique et la mécanique statistiques. Et cela, tout en montrant que notre connaissance d'aujourd'hui nous permet de répondre au questionnement d'hier et qu'il est crucial pour nous de rechercher toutes les implications de ce qu'on peut découvrir et observer.

Katie Robertson est une chercheuse à l'université de Birmingham au Royaume-Uni, ses recherches se concentrent sur les implications philosophiques de la thermodynamique. Elle a obtenu en 2012 une maîtrise en physique et philosophie à l'université de Bristol en Angleterre avec les « Honneurs de première classe ». En 2015, elle obtient un baccalauréat en philosophie à l'université d'Oxford avec sa thèse « Doing Away With the Details: Realism, Coarse-Graining and Time-Asymmetry in Statistical Mechanics » supervisée par le professeur Harvey Brown. En 2018, elle obtient un doctorat en philosophie à l'université de Cambridge avec sa thèse « Reductive Aspects of Thermal Physics » supervisée par le Dr Jeremy Butterfield et le professeur Huw Price. Aujourd'hui, elle donne de nombreuses conférences et séminaires sur la physique thermique (thermodynamique, mécaniques, statistiques et théories cinétiques des gaz) en général.



## Synthèse :

Les démons de la thermodynamique et de la mécanique statistique sont des expériences de pensée créées par des physiciens en tentant de comprendre les implications de la thermodynamique. Tout comme le démon de Descartes lui a permis d'imager son raisonnement du doute absolu qui lui a permis de trouver sa célèbre Maxime : « **ego cogito, ergo sum** » (« Je pense, donc je suis »). Les démons de la thermodynamique ont bouleversé la conception générale de la thermodynamique et ont même fait douter certains de sa véracité. Malgré tout aujourd'hui, nous pouvons utiliser nos connaissances plus avancées en physique pour comprendre la problématique que chaque démon a soulevée et comment pouvons-nous conjurer ces démons pour de bon. Dans cet article, Katie Robertson nous présente 3 démons : **le démon de Loschmidt, le démon de Maxwell et le démon de Laplace.**

## Le démon de Loschmidt

Dans la mécanique classique, le temps est complètement réversible. En effet, nous pouvons voir la mécanique classique comme une série de collision de particule, rien ne peut nous dire qu'un sens du temps semble plus approprié plutôt qu'un autre. La même chose est vraie pour la mécanique quantique qui est indépendante de la direction d'écoulement du temps. Cependant, une chose étrange semble se produire lorsqu'on augmente le nombre de particules dans un système pour arriver à un système qu'on décrit avec la thermodynamique ou la mécanique statistique, la physique perd soudainement sa réversibilité. Un exemple concret de cela est l'équilibre thermique, un café chaud sur une table ne deviendra jamais plus chaud, il se refroidira pour se stabiliser avec la température de la pièce. Pourtant, l'échange de chaleur n'est qu'affaire de collision et d'échange d'énergie entre chaque particule, ce qui est selon la mécanique classique et quantique un processus complètement indépendant du temps. Pourquoi lorsqu'on augmente le nombre de particules, cette réversibilité semble-t-elle disparaître ?

Johann Josef Loschmidt, le célèbre physicien et chimiste autrichien était convaincu qu'il était possible de renverser la quantité de mouvement d'une particule, mais que cela n'était pas pratiquement réalisable pour le moment. Il imagina donc un démon capable de renverser la quantité de mouvement de toutes les particules d'un système et ainsi qui pourrait faire retourner le système dans son état original. D'ailleurs, Erwin Hard en 1950 avec son expérience d'écho du spin a prouvé qu'il était possible de ramener un spin atomique qui se déphase à un état précédent où il est complètement en phase avec une pulsation RF (Radio Fréquence).

Malgré tout, dans la grande majorité des cas, il est encore impossible de faire retourner un système à son état ordonné, le cas de l'écho du spin étant une exception pour l'instant. Mais pourquoi ne voit-on pas des systèmes retourner à leur état originel plus souvent ? Pourquoi, par exemple, un café ne se réchauffe-t-il pas spontanément au lieu de s'équilibrer avec la température de la pièce ? La réponse réside dans les conditions initiales. En effet, les lois de la physique et même celle de la thermodynamique disent que l'écoulement du temps est réversible, mais les conditions initiales sont tout

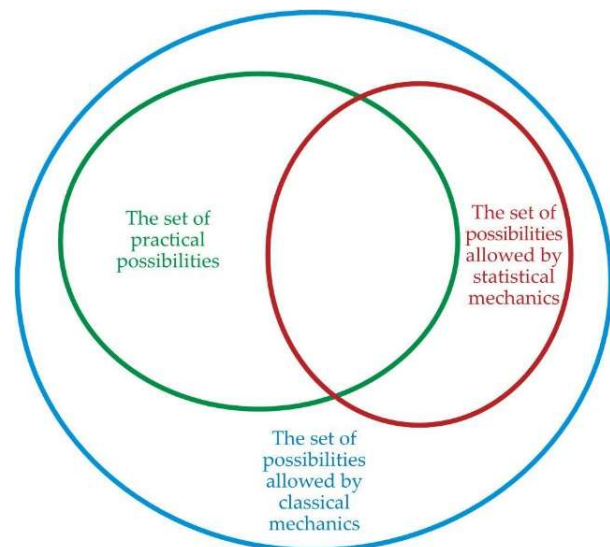
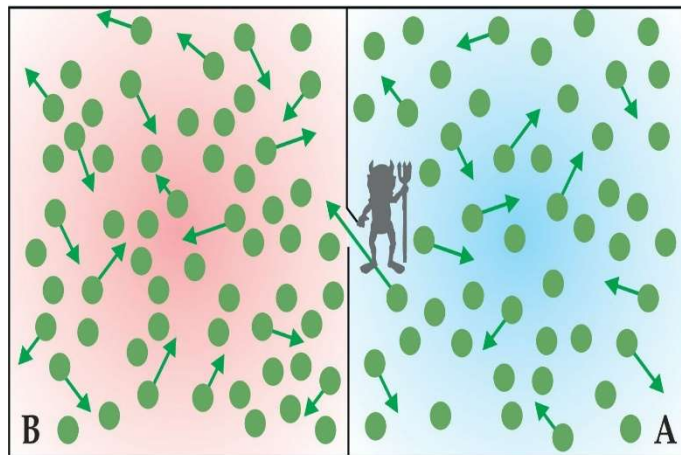


Figure 1 : possibilité des différentes théories comparées à nos possibilités pratiques

simplement très difficiles à mettre en œuvre pour qu'un système quitte son équilibre spontanément. Un bon exemple de ce phénomène est les piscines à vague concentrique utilisées pour faire des simulations de vague. Ces piscines sont capables de produire des vagues impossibles à voir naturellement, qui ressemblent presque à une vidéo que l'on aurait inversée. Ces vagues sont possibles à cause de l'agencement spécial des parois qui bougent en synchronicité, ce qui est très improbable à rencontrer dans la nature.

## Le démon de Maxwell

Ce démon fut conjuré en 1867 par James Clerk Maxwell. Maxwell imagina un système composé de 2 boîtes collées l'une à l'autre avec une petite fente entre les deux. Le démon serait à côté de la fente et pourrait l'ouvrir ou la fermer à volonté. Dans l'expérience de pensée, le démon n'ouvrirait la fente que si des particules qui ont une assez grande vitesse voulaient aller dans la boîte de gauche et il ne laisserait pas passer les particules trop lentes. Dans un même temps, il laisserait passer les particules trop lentes dans la boîte de droite et non les particules à grande vitesse. Si le démon répétait ce processus assez longtemps, il se créerait un déficit de température entre les deux boîtes, qui pourrait ensuite être utilisé par une machine thermique pour faire du travail. Dans ce cas, le démon briserait la deuxième loi de la thermodynamique, car il enlèverait de l'entropie en séparant les particules lentes et faiblement énergétiques et les rapides qui ont plus d'énergie.



*Figure 2 : démon de Maxwell agissant comme un « videur »*

Encore une fois, Maxwell pensait qu'un tel démon était possible à créer, mais que leur inhabilité à le faire était temporaire. D'ailleurs, il avait raison, car en 2010 des chercheurs menés par le professeur Masaki Sano ont réussi à créer une expérience avec un démon de Maxwell. Cette expérience consistait à créer un système de réseau optique composé de 4 lasers qui rentrent en interférence qui créerait des puits de potentiels ou les atomes voudraient rester. L'astuce est d'incliner ce réseau pour créer des puits de potentiel de plus grande énergie. Dans un tel plan incliné, les particules en fluctuant auront tendance à plus descendre dans un puits de potentiel plus bas que de monter dans un plus haut, créant une sorte d'escalier en spirale. Ensuite, chaque fois qu'une particule « monte une marche », on change la phase des lasers pour qu'elle tombe dans un nouveau puits de potentiel. Elle ne peut alors plus descendre, la piégeant dans cette nouvelle « marche ». Au bout d'un certain temps, la particule montera lentement l'escalier sans qu'on n'ait fait aucun travail pour la monter, ses fluctuations ne coûtant pas de travail. Dans cette expérience, on peut alors se poser les questions suivantes : « brise-t-on la 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique ? » et « Est-ce que l'activité du démon à un cout entropique ? ». Des questions assez subtiles, mais heureusement pour nous et la physique ont comme réponse : Non et oui. En effet, le démon crée bel et bien de l'entropie et cela à cause du principe de Landauer de l'effacement de la mémoire.

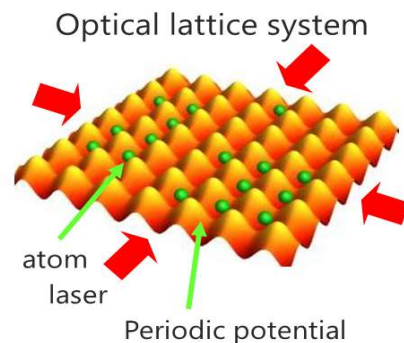


Figure 4 : potentiel périodique créé par un système de réseau optique

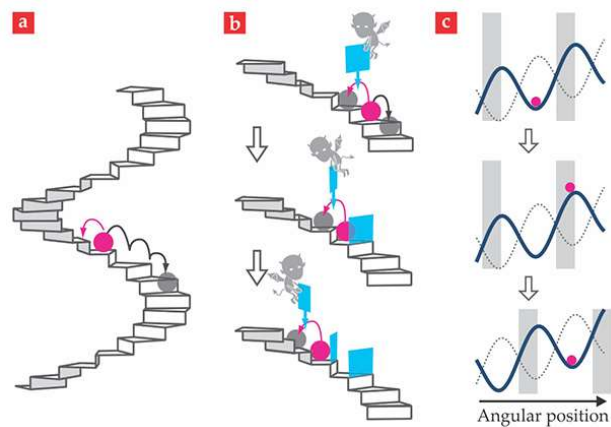


Figure 3 : escalier en spirales représentant les « marches » d'énergies et illustration du piégeage de l'atome par le déphasage des lasers

Pour que le démon puisse décider ou non de laisser passer une particule, il doit analyser la vitesse de cette particule et déterminer si celle-ci est suffisamment grande, ensuite il ouvre ou non la porte en conséquence. Mais quand le démon analyse une seconde particule, il doit supprimer de sa mémoire la vitesse de l'ancienne particule pour stocker celle de la nouvelle et faire son choix. Et réinitialiser la mémoire à un cout d'entropie de  $k_b \ln(2)$  par bit selon Rolf Landauer. Cette équation provient directement du calcul d'entropie selon la formule  $S = k_b \ln(\Omega)$  où  $\Omega = 2$  pour (0,1), elle se démontre facilement avec un simple exemple :

prenez deux bits et calculé leur entropie chaque bit à 2 états possible donc  $\Omega = 2^2$  et  $S = 2 k_b \ln(2)$  ensuite, faites-les passer dans une porte logique à deux entrées et une sortie. Avec seulement le bit résultant, il serait impossible de retrouver la valeur des deux bits intrants, on a donc perdu 1 bit d'information et si nous calculons l'entropie à la sortie de la porte logique nous obtenons  $S = 2 k_b \ln(2)$  ce qui donne une différence de  $k_b \ln(2)$  Par bit d'information. Donc au total, la 2<sup>e</sup> loi sera conservée, car l'entropie du système et son environnement augmenteront toujours. Il est à noter que même si on développait une expérience utilisant la mécanique quantique au lieu de la mécanique classique, on ne pourrait échapper au principe de Landauer. De plus, les calculs quantiques ajoutent aujourd'hui beaucoup de couts entropiques supplémentaires, ce qui nous éloigne encore plus de la limite théorique de Landauer.

En plus de son démon, Maxwell avait fait plusieurs spéculations philosophiques pour concilier la mécanique statistique/la thermodynamique et leur nature probabiliste et la mécanique classique traditionnelle. La première était : « La thermodynamique ne s'applique qu'au système avec plusieurs degrés de liberté » et la deuxième : « La thermodynamique est anthropocentrique et dépend de notre vision

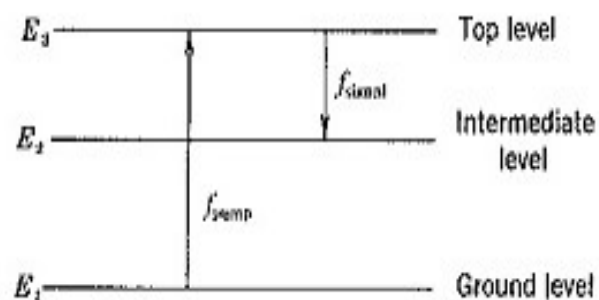


Figure 5 : niveaux d'énergie d'un maser

humaine du monde ». Pour répondre à sa première spéculation, on peut regarder l'expérience de Derrick Scovil et Erich Schulz-Dubois qui ont montré en 1959 qu'un maser à 3 niveaux pouvait fonctionner comme une machine thermique. Un maser est l'ancêtre du laser et l'acronyme vient de : **M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation. Son fonctionnement est similaire à celui d'un laser conventionnel, à la différence qu'il émet dans les micro-ondes. Aussi, un maser à trois niveaux est un système qui ne contient qu'un seul degré de liberté, ce qui vient infirmer la première spéculation de Maxwell.

Depuis l'expérience de Scovil et Dubois, plusieurs ont saisi l'opportunité d'adapter par la thermodynamique à des systèmes quantiques créant un nouveau domaine le « Quantum SteamPunk ». En effet, il est maintenant possible d'utiliser des niveaux d'atomes, des qubits ou des points quantiques pour faire le travail de machines thermiques quantiques. Ces machines utilisent des phénomènes comme l'intrication et la cohérence comme « carburant ». On peut toutefois se demander : pourquoi tenter de fabriquer des machines thermiques quantiques ? La réponse tient dans l'efficacité de Carnot. L'efficacité de Carnot est l'efficacité maximale qu'il est possible d'atteindre pour une machine thermique avec un différentiel de température. Cette limite n'est atteinte en mécanique classique que dans le mythe quasi statique où la puissance tend vers 0. L'avantage de la thermodynamique quantique c'est qu'elle permet de se rapprocher beaucoup plus de la limite de Carnot que la thermodynamique traditionnelle sans toutefois pouvoir la franchir.

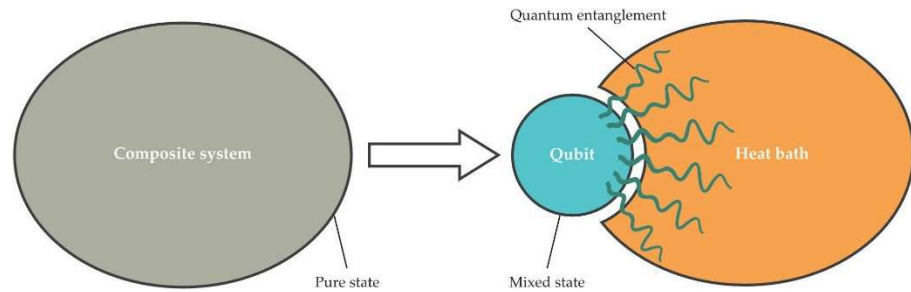
Pour ce qui est de la deuxième spéculation, on entre dans un domaine beaucoup plus pointu et difficile à tester. En effet, il est très difficile de savoir si la thermodynamique est un concept réel ou si c'est seulement notre perception humaine du monde qui nous entoure qui nous fait croire qu'elle existe. Sur la même lancée, on peut se demander si l'entropie existe vraiment ou si ce n'est là qu'encore une illusion de notre vision limitée. Est-ce que l'être humain, en raison de sa connaissance réduite, voit-il une certaine forme d'énergie comme accessible et une autre comme dissipée alors qu'elles ne forment qu'un pour un être suffisamment évolué ?

### **Le démon de Laplace**

Nous savons qu'en physique statistique, l'hypothèse que tous les états possibles sont équiprobables est à la base de tous les calculs classiques. Aussi, plusieurs physiciens dont Edwin Jaynes a argumenté que c'était un constat qui provient de notre ignorance et de tous les détails microscopiques d'un système et non une réalité physique. On pourrait donc croire que la thermodynamique est bien anthropocentrique. Vient alors le démon conjuré par Pierre-Simon Laplace, un démon qui connaîtrait chaque position et quantité de mouvement de chaque particule dans l'univers. Ainsi dans un monde déterministe il saurait tout sur le présent, le passé et l'avenir. Dans notre cas, il cause un problème lorsqu'on tente de calculer l'entropie selon la formule de Gibbs. L'entropie de Gibbs est donnée par :  $S_G = - \int \rho \ln(\rho) d^N p d^N q$ . Où  $\rho$  est une distribution de probabilité comme celle en microcanonique  $\rho = 1/\Omega$  ( $\Omega =$  *tous les états disponibles*). Mais  $\rho(p, q) = 1$  si l'on connaît avec certitude le micro-État occupé, donc si l'on calculait l'entropie de Gibbs on obtiendrait 0. Cela revient à dire que plus on en sait sur le monde, moins l'entropie de Gibbs est grande. L'entropie serait alors sans nul doute une conception anthropocentriste. Heureusement, ceci n'est vrai qu'en mécanique classique, si nous étudions le même problème d'un point de vue quantique, le démon de Laplace ne pose plus de problème. En effet, en mécanique statistique classique, lorsque nous calculons les états occupés d'un système, nous ajoutons des probabilités pour combler notre ignorance de l'état réellement occupé. Cependant, en mécanique statistique quantique, les probabilités sont inhérentes à la théorie. Il est jusqu'à preuve du contraire impossible de dissocier les probabilités de la mécanique quantique, et cela n'a rien à avoir avec notre ignorance. Si le démon de Laplace avait connaissance de toutes les positions et quantité de mouvement d'un système quantique, il ne saurait que les probabilités des événements quantiques et ne serait pas vraiment plus avancé que nous.



Pour démontrer que les probabilités des états quantiques sont intrinsèquement reliées aux probabilités de la mécanique statistique, on peut utiliser un



exemple composé d'un système dans un état pur. On prend en premier lieu un système entièrement isolé et dans un état pur : un état qui n'a qu'une seule valeur possible. Si l'on mesure ce système, on obtiendra toujours cet état. En revanche, si l'on mesure seulement un qubit dans ce système, il sera dans un état mixte : un état qui peut avoir plusieurs valeurs possibles. Mais puisqu'au total le système dans son entier doit toujours arriver dans le même état, chaque qubit est donc intriqué avec les autres. L'intrication des qubits fait en sorte que la valeur d'un qubit dépend de la valeur de tous les autres qubits. Donc le qubit qu'on mesure qui est dans un état complètement mixte dépend de la valeur commune de tous les autres qubits. Si l'on imagine que tous les autres qubits forment un bain thermal assez grand et que dans ce cas on imagine que leur valeur mesurée devrait être très près de ce que prédit la mécanique statistique. Le qubit n'aura d'autre choix que de prendre la valeur lui aussi de la valeur attendue de la mécanique statistique. On voit donc que la mécanique quantique et statistique ne fait qu'un en réalité et que dans ce même cas, le démon de Laplace n'aurait pu connaître plus d'information sur le système que nous. En fait, la règle de Born nous indique que tout ce qu'on peut savoir sur un état quantique mixte est les probabilités de chaque mesure, donc le démon ne pourrait qu'au plus savoir précisément ces probabilités, mais cela ne lui permettrait pas d'évaluer une entropie différente de celle que l'on pourrait mesurer en tant que simple être humain.

## Analyse :

L'article a pour but de nous faire revisiter les démons de la thermodynamique et d'enfin trouver une explication logique à leur dilemme. Il prend le temps d'expliquer en détail le cheminement de pensée des physiciens qui ont inventé ces démons tout en résumant la problématique qu'il engendrait à l'époque et pourquoi ils n'ont pu être conjurés. Ensuite, on nous explique comment notre savoir d'aujourd'hui nous permet de comprendre en détail la nature des démons et de finalement voir qu'il ne pose plus de problème pour notre physique d'aujourd'hui. Katie Robertson, dans son article, cherche à nous faire réfléchir aux implications philosophiques qu'avaient et qu'ont toujours ces démons en plus de nous faire réaliser l'importance de comprendre les implications sur la nature de notre monde de nos nombreuses théories physiques. Aussi, elle tente de faire réfléchir le lecteur sur le sujet en laissant plusieurs questions rhétoriques pour enrichir les nombreux débats philosophiques encore présents dans la physique. D'ailleurs, ses études en philosophie de la physique donnent du poids à ses



arguments et l'on voit clairement la logique utilisée derrière son raisonnement. Bien qu'elle soit assez jeune dans le milieu, son parcours académique est très prestigieux et elle présente déjà plusieurs conférences et séminaires dans son domaine d'expertise : la physique thermique. Elle travaille en ce moment à l'université de Birmingham en Angleterre où elle effectue des recherches sur les implications philosophiques de la thermodynamique, elle a d'ailleurs déjà publié 7 articles sur différents sujets qu'on aborde en partie dans cet article-ci. Son article dans l'ensemble est très clair, la formule d'entropie de Gibbs pourrait ne pas parler à tous, mais son concept général est expliqué assez clairement pour ne pas déranger la compréhension. L'exemple sur le qubit et le bain thermique était quant à lui assez intimidant à premier abord, mais en révisant les termes employés on le comprend relativement facilement, car l'article nous explique le raisonnement pas à pas. L'article se lit très facilement, en commençant par le démon de Loschmidt qui se fait « bannir » par les conditions initiales, puis celui de Maxwell qui est vaincu par le principe de Landauer. On fait ensuite un petit détour pour parler des spéculations de Maxwell qui sans être des démons en tant que tels sont très pertinentes dans la discussion. La première spéculation sur la thermodynamique et ses degrés de liberté, qui est démentie par le masher à trois niveaux, nous introduit à la thermodynamique quantique. La deuxième sur l'anthropocentrisme qui nous emmène naturellement au démon de Laplace qui pousse l'idée à l'extrême est finalement expliquée par la nature probabiliste fondamentale de la mécanique quantique. Chacun des démons est très bien expliqué et le raisonnement qui le « conjure » est lui aussi très clair.

## **Partie critique :**

Nous avons personnellement assez apprécié l'utilisation du champ lexical des « démons » utilisé dans l'article pour exprimer les problèmes de la thermodynamique, sans rien apporter de plus au raisonnement, cela rendait la lecture plus agréable et reflétait bien l'aspect historique des démons de la thermodynamique. L'article explique clairement comment on bannit les démons de manière très logique et sans faire d'hypothèse. Il se base sur des théorèmes ou des lois physiques très établies qui ont peu de chance d'être invalidés. Un bon exemple est la nature probabiliste de la mécanique quantique qui est en ce moment un consensus très établi et qui a peu de chance de changer au point d'invalidité le raisonnement bannissant le démon de Laplace. La thermodynamique quantique est quand-à-elle une voie assez prometteuse pour le développement de machines thermiques plus efficaces, mais l'article ne faisant qu'introduire ce domaine, on n'en apprend malheureusement pas beaucoup plus sur le sujet. L'article étant de nature plus philosophique qu'expérimentale ou théorique, insiste moins sur des travaux futurs ou le développement d'une nouvelle physique. Néanmoins, il remplit un travail essentiel : revisiter les problèmes non résolus du passé. En effet, Katie Roberson dans son article a utilisé l'expression : « shut up and calculate » (ferme-la et calcule) en référence à l'utilité de la

physique. Nous avons trouvé très pertinent qu'elle soulève ce point. De nos jours, les sciences sont souvent enseignées à la jeunesse de cette méthode, mettant en second plan la compréhension au profit de l'apprentissage par cœur. C'est donc encore plus important de prendre le temps de pousser la compréhension d'une théorie, d'une loi ou même simplement d'une formule à son extrême si on veut comprendre le monde qui nous entoure et développer des idées nouvelles. C'est pourquoi prendre le temps de résoudre des problèmes d'une vieille théorie comme la thermodynamique peut sembler inutile pour certains, mais c'est en faisant cela qu'on arrive à enrichir la physique et notre compréhension du monde. D'ailleurs, cela permet aussi de découvrir de nouveaux domaines de la physique, comme la thermodynamique quantique, qui est simplement l'application d'une vieille théorie sur un nouveau contexte. Ce domaine est né grâce à une simple hypothèse sur la dépendance de la thermodynamique aux degrés de liberté de Maxwell, mais pourrait un jour révolutionner notre conception des machines thermiques.

## **Conclusion :**

Finalement, Katie Robertson nous propose de revisiter les démons du passé avec nos connaissances d'aujourd'hui pour mieux comprendre notre monde et ses règles. Cet article touche à un domaine qui est trop souvent abandonné dans les sciences de nos jours. Dans une ère où les scientifiques sont de plus en plus spécialisés, il est important que des personnes prennent le temps de repasser derrière pour tenter de comprendre le fondement de ce qu'on découvre. Ça nous rappelle que plusieurs théories sont conçues pour expliquer ce qu'on observe dans la nature, mais que plusieurs d'entre elles ont des implications souvent inconnues ou incomprises. Encore aujourd'hui, malgré nos connaissances, plusieurs domaines de la physique semblent encore tellement mystérieux à nos yeux. Aussi, il faudra se rappeler lorsque nous trouverons une autre théorie révolutionnaire comme la mécanique classique, la thermodynamique, la mécanique quantique et la relativité de penser à remettre en question chaque détail et implication comme l'on fait nos prédécesseurs avant nous.

## **Bibliographies :**

- 1: The demons haunting thermodynamics: Physics Today: Vol. 74, No. 11 (scitation.org)  
<https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.3.4881>
- 2: Katie Robertson (wordpress.com)  
<https://katierobertsonphilosophy.wordpress.com/>