



HAL
open science

Sur la discontinuité de la chaleur, de l'énergie, du temps ... et de la ville

Michel Planat

► **To cite this version:**

Michel Planat. Sur la discontinuité de la chaleur, de l'énergie, du temps ... et de la ville . Gwiazdzinski L. La ville 24h/24. Regards croisés sur la société en continu, Editions de l'Aube, pp.95-102, 2003. halshs-01711293

HAL Id: halshs-01711293

<https://shs.hal.science/halshs-01711293>

Submitted on 17 Feb 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Sur la discontinuité de la chaleur, de l'énergie, du temps ... et de la ville

In Gwiazdzinski L., 2003, *La ville 24h/24*,
La Tour d'Aigues, L'Aube, pp.95-102

Michel Planat (*)

*Celui qui s'arrête fait remarquer
l'empâtement des autres, comme un point fixe*
Pascal

La physique statistique peut-elle être utile aux modélisateurs et aménageurs du territoire, lorsque ceux-ci s'intéressent aussi à la dimension temporelle ? Le deuxième principe de la thermodynamique qui signifie que l'énergie mécanique se dégrade sans retour en chaleur ; c'est-à-dire aussi en désordre, se relie-t-il au thème de « la ville en continu » ? N'est-ce pas aussi le point de vue de certains penseurs, pessimistes sur le devenir des sociétés capitalistes et laïques, sur la perte des valeurs culturelles, du travail rythmé, de l'école de la République et de la famille bicéphale ?

La quantification de l'énergie nécessaire pour rendre compte des propriétés optiques et électriques des corps n'implique-t-elle pas plutôt des discontinuités temporelles, et quelle structure ce temps possède-t-il ? Est-il aussi celui des cycles et ruptures technologiques, et donc économiques, et comment s'inscrit-il dans l'espace géographique ?

Entropie

En 1824, Carnot formule, pour les machines à vapeur (et les futures automobiles), le principe d'équivalence entre les deux formes d'énergie que sont la chaleur et le travail mécanique. Le travail peut se dissiper en chaleur, mais l'inverse n'est pas possible : pour produire un travail, il faut disposer d'une source chaude et d'une source froide. L'entropie : le contenu de transformation d'un corps ne peut que croître. C'est le second principe de la thermodynamique, énoncé en 1865 par Clausius et Lord Kelvin.

Après que s'est imposée la vision discontinue de la matière, avec molécules et atomes, électrons (les grains d'électricité) et photons (les grains de lumière), il revient à Boltzmann de préciser en 1902 la nature discrète de la chaleur. Le modèle est celui d'un gaz de miniboules effectuant des collisions incessantes et possédant par conséquent une mobilité réduite. Puisque ces miniboules doivent satisfaire individuellement aux lois mécaniques du mouvement, cela implique qu'elles possèdent des degrés de liberté, et une énergie associée multiple d'un quantum élémentaire. $\frac{1}{2} kT$ où T est la température et k la constante dite de Boltzmann. Par exemple, la chaleur spécifique d'un gaz de N particules est $\frac{3}{2} NkT$, où le 3 correspond aux trois dimensions de l'espace ordinaire. Essayons de fixer les idées sur l'ordre de grandeur d'une telle énergie. Un gaz macroscopique possède typiquement la taille d'une mole avec $N = 10^{23}$ particules, cela représente à la température ordinaire une chaleur de 3600 joules. Un moteur parfait, c'est-à-dire sans la consommation d'énergie inhérente à l'application du second principe de la thermodynamique, peut transformer cette chaleur en mouvement

d'un objet d'une tonne à environ 10 kilomètres à l'heure. Avec un peu de combustible, c'est bien ce que réalisent nos moteurs de voiture.

Boltzmann donne aussi une nouvelle représentation de l'entropie, qu'il associe à la flèche du temps. Considérons le phénomène quotidien où l'on mélange le café et le lait: le liquide évolue vite vers un équilibre de couleur marron; il est très improbable que l'on revienne à la situation initiale où le café et le lait se séparent, ou à des situations intermédiaires d'agglomérats de café ou de lait. L'effet irréversible est uniquement dû à la loi des grands nombres que les situations ordonnées sont peu nombreuses par rapport aux situations désordonnées où le mélange a été réalisé. Pour rendre compte de ces observations, l'entropie de Boltzmann est définie par la relation $S = k \log P$, c'est-à-dire en proportion du logarithme du nombre d'états accessibles au système. En conséquence, l'entropie des deux substances est la somme des entropies des substances prises séparément, et cette entropie est supérieure après le mélange à celle d'avant le mélange, car le volume accessible à chacune a été augmenté. La loi de croissance statistique de l'entropie est aussi assimilée par Boltzmann à une direction du temps.

Le moins que l'on puisse dire est que cette tentative de voir le deuxième principe de la thermodynamique comme la flèche du temps a échoué. L'une des critiques est que la flèche disparaîtrait au niveau microscopique puisqu'on peut alors retrouver l'ordonnement des particules; mais on entre là dans un domaine où la physique statistique classique ne s'applique plus et où d'autres notions de quantification et d'indétermination sont à prendre en compte comme on va le voir maintenant. Le lien possible entre la statistique des nombres et le temps est évoqué plus loin.

Statistique des ondes, les quanta d'énergie et leur mesure

Le XIX^{ème} siècle a aussi découvert que la lumière était une onde : il y a des ondes radio (jusqu'à 1 kilomètre en longueur d'onde), la lumière visible (avec une longueur d'onde un milliard de fois plus courte, de l'ordre de 10^{-6} mètre), les rayons X et les rayons γ (où la longueur d'onde est encore un million de fois plus courte, et peut atteindre 10^{-12} mètre). Toutes ces ondes, dites électromagnétiques, car elles transportent simultanément un champ électrique et magnétique, sont décrites par la relation $\lambda = c/\nu$ qui lie la longueur d'onde λ à la fréquence ν , via une constante universelle, la vitesse de la lumière $c = 3 \times 10^8$ mètres/seconde.

Considérons un corps en équilibre thermique avec un rayonnement électromagnétique et supposons que l'énergie de ce rayonnement est tout entière absorbée, d'où le nom de corps noir. En 1900, Max Planck découvre, en étudiant l'émission issue du corps noir, que l'énergie ne peut être échangée que par sauts d'énergie, multiples du quantum $E = h\nu$. La constante de Planck, $h = 10^{-34}$ joule.sec, possède la dimension d'une action, c'est-à-dire d'une énergie mesurée sur un temps fini. Il faut se rendre compte de l'ordre de grandeur extrêmement petit de ce quantum d'énergie. Pour les ondes lumineuses, par exemple l'ultraviolet, la longueur d'onde est $\lambda = 0.3 \mu\text{m}$, la fréquence est $\nu = c/\lambda = 10^{15}$ Hz et le quantum de l'ordre de 10^{-19} joule, c'est-à-dire un facteur 10^{-23} plus petit que l'énergie molaire en jeu dans un moteur à explosion. Le facteur 10^{-23} est aussi à peu près le nombre de particules dans une mole, ce qui nous prouve que ces phénomènes ont lieu à l'échelle atomique.

D'autre part, 10^{-19} joule correspond à peu près à l'énergie d'un électron accéléré entre les deux électrodes d'une pile d'un volt. On voit désormais à quel point une observation

macroscopique sur l'intensité de rayonnement du corps noir correspond à la présence d'échelles d'énergie extraordinairement plus petites à l'échelle atomique. Même le cosmos lointain nous envoie un rayonnement de corps noir (certes de très basse température : 3 degrés Kelvin, soit -270 degrés Celsius).

Le quantum d'action se retrouve aussi dans une autre relation fondamentale due à W. Heisenberg en 1927. La relation d'indétermination $\Delta E \Delta t \geq h$ relie la résolution d'énergie au temps pendant lequel l'observation est faite. Par exemple, si la particule observée vit pendant un temps très court, son énergie ne peut être obtenue que grossièrement : c'est le cas pour les particules hautement énergétiques créées dans les accélérateurs de particules, ou celles provenant du cosmos lointain. Dans ces observations, le temps est présent comme durée de vie, non comme flèche.

Il ne semble pas que la mécanique quantique, que nous venons d'esquisser, puisse donner une indication sur la source de la flèche du temps. Pour la définir, nous avons besoin de systèmes mettant en jeu de nombreuses particules élémentaires. Toute observation de la flèche du temps dépend de l'interaction de systèmes quantiques avec des appareils de mesure macroscopiques. À cette échelle microscopique, l'observation influence le devenir du système et, un peu comme pour le deuxième principe de la thermodynamique, l'entropie croît avec la connaissance que nous acquérons de ce système, au cours de mesures répétées. C'est en tout cas le sens donné par Brillouin en 1962 de la formule de Shannon, pour l'entropie d'un système de communication.

Statistique du temps

Bien que ni l'irréversibilité thermodynamique ni les phénomènes à l'échelle quantique ne nous renseignent sur la flèche du temps, l'homme a de tout temps recherché la périodicité temporelle dans les phénomènes naturels pour rythmer et synchroniser son activité: le cadran solaire, la clepsydre à l'époque agricole, puis l'horloge à balancier à l'âge industriel, les oscillateurs à quartz dans les années cinquante, et enfin les horloges atomiques dont la régularité provient de la transition du quantum d'énergie entre deux niveaux d'énergie électroniques de l'atome. Aujourd'hui, « la seconde se définit comme la durée de 9192631770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de Césium 133 ».

Ce temps capturé est-il vraiment enchaîné? À vrai dire non, car la haute stabilité des horloges contemporaines est principalement due à la finesse considérable des raies spectrales. Par exemple un oscillateur à quartz est construit à partir d'une cavité de coefficient de qualité Q (le rapport entre la fréquence, typiquement 10 MHz et la largeur de raie 10 Hz) égal à un million; la cavité Ramsey de l'horloge atomique produit un coefficient Q égal à un milliard. Le résidu d'instabilité de fréquence revêt toujours les mêmes habits, il a pour nom « le bruit en $1/f$ », ou bruit de scintillation.

Il convient d'abord de saisir la signification de la densité spectrale de Fourier. Un oscillateur tout à fait périodique de période T produit une raie isolée à la fréquence $f = 1/T$... s'il est non linéaire on peut trouver aussi les fréquences $2f, 3f \dots$ ou $f/2, f/3, 3f/2 \dots$ Plus souvent le spectre est quasi périodique avec de nombreuses raies, dont l'amplitude est du même ordre de grandeur. C'est par exemple le cas, emprunté à l'astrophysique, du spectre des rayons X issus d'une galaxie binaire. Les galaxies binaires contiennent une étoile à neutrons qui accrète de la masse provenant d'une étoile compagne. On pense que la quasi-périodicité se

produit à la fréquence de battement entre la fréquence de rotation de l'étoile à neutron et la fréquence orbitale du disque d'accrétion. Le bruit en $1/f$ quant à lui se produit dans le cas d'une accumulation résonnante de raies autour de la fréquence zéro, avec une densité hyperbolique, c'est-à-dire en $1/f$. Dans ce dernier cas on préfère utiliser les échelles logarithmiques et le résultat est à peu près une droite de pente -1. De très nombreux systèmes physiques possèdent cette densité: les fluctuations de la fréquence cardiaque, le niveau des crues du Nil, le montant cumulé des opérations boursières, la fréquence des horloges, la résistance des composants électroniques, la densité du trafic routier. .. On peut aussi penser, en astrophysique, aux rayons X issus d'une galaxie de Seyfert, c'est-à-dire un noyau galactique. Ces noyaux sont probablement des trous noirs, de la taille de notre soleil, mais de la masse d'une galaxie, accrétant le gaz interstellaire ou intergalactique.

Dans une horloge métrologique la stabilité ultime est fixée par le bruit en $1/f$; si la densité spectrale des fluctuations relatives de fréquence est du type $S(f) = A/f$, l'instabilité de fréquence est Df/f environ A indépendamment du temps Dt de la mesure. Ce résultat est en contradiction avec la relation d'indétermination d'Heisenberg $DE = h/Dt$. Son explication doit donc relever d'une autre théorie applicable aux temps longs. Cette théorie pourrait bien être une théorie des nombres eux-mêmes. En effet, prenons nos trois astres familiers : le soleil, la terre et la lune, que plusieurs civilisations ont utilisés pour mesurer le temps. L'année tropicale possède 365,242191 jours, l'année lunaire 29,53058 jours. Le rapport est 12,4952 environ, 12.1/2. On peut établir un calendrier en ajoutant un mois tous les deux ans aux douze mois lunaires. De fait, les corrections suivantes s'obtiennent, non pas par le développement décimal, c'est-à-dire 4/10, 49/100 (il ne serait d'ailleurs pas commode d'attendre 10 ans pour corriger de 4 mois, ou 100 ans pour corriger de 49 mois), mais par un développement dit en fractions continues $\{0;2, 1, 2,1,1, 17 \dots\}$, la première troncature donne 1/2, la seconde $1/(2+1/1)=1/3$, la troisième $1/(2+1/(1+1/2)) = 3/8$ (c'est-à-dire que l'on corrige 1 mois tous les 3 ans, ou 3 mois tous les 8 ans) ... Toutes ces troncatures ont successivement servi, pour le calendrier grec par exemple. Le temps était ainsi parfaitement géré, sans l'intervention des lois de la dynamique céleste, découvertes par Galilée et Newton seulement au XVII^e siècle.

Revenons au XX siècle et à la découverte par Armstrong de la détection hétérodyne pour les transmissions radio; elle consiste à comparer deux oscillateurs entre eux par mélange non linéaire, et à filtrer autour du continu. Il se trouve que ce dispositif réalise aussi le développement en fractions continues; c'est en quelque sorte un calendrier électronique qui réalise une synchronisation complexe entre toutes les fréquences présentes [Planat, 2001]. Si, de plus, les deux oscillateurs sont détectés en phase, il se produit autour du continu une fluctuation en $1/f$. L'interprétation du phénomène relève de la théorie des nombres: la phase et l'amplitude de la mesure semblent évoluer au gré de discontinuités gérées par la fonction arithmétique $\Omega(t) = \log p$, si t est la puissance d'un nombre premier p et 0 sinon. L'amplitude et la fréquence moyennes possèdent en effet une fluctuation en $1/f$. Si cette théorie est confirmée, cela signifie que les grandeurs physiques issues de systèmes complexes ressemblent à l'entropie de Boltzmann, avec des états accessibles codés par les nombres premiers. Le temps se déploie sur une échelle logarithmique, avec une complexité relevant de la structure des nombres, encore loin d'être tout à fait comprise.

Quanta et statistique de la ville

Que sont donc les quanta d'énergie de la ville? Comment s'agrègent-ils et fluctuent-ils? Peut-on donner une représentation entropique « à la Boltzmann » de la ville, ou quantique « à

la Planck » ? La ville est-elle plutôt comme ces trous noirs cosmologiques qui accrètent les agglomérats périphériques et dont les rayonnements scintillent ? La première idée est que les humains sont ces quanta, machines thermodynamiques de très faible rendement, dont l'action modèle le territoire. Leur travail devient technologie et temps, ainsi que l'a bien décrit B. Stiegler [1994, 1996]. Il y a la diachronie et la statistique du « je », et le global et la synchronie du « nous » [Datar, 2001]. Ces synchronies sont hors équilibre, l'homme, le « je », est certes soumis et synchronisé aux temps naturels au sens chronobiologique du terme décrit par B. Millet, mais le groupe, le « nous », crée la technique, les villes et le temps, et les synchronies fluctuent à l'échelle de la ville, ou de la nation ou de la planète.

La transposition physique du concept « ville en continu » évoque pour moi le concept d'entropie croissante. Les physiciens ont aussi inventé le principe anthropique: l'homme est certes adapté à l'univers, l'univers aussi est adapté à l'homme [Barrow, Tipler, 1974]. Dans un univers de constantes physiques (k , c , ou les autres, la charge de l'électron, la masse du proton ...) altérées d'à peine un pour cent, l'homme ne pourrait pas naître. Un facteur produisant la vie est au centre de toute la machinerie de l'univers. Selon Boltzmann, il n'y a que deux explications à l'état improbable de l'univers actuel : l'interprétation créationniste, selon laquelle l'univers a été créé dans un état improbable, ou l'interprétation anthropique faible, où l'on observe le second principe car la vie intelligente ne saurait exister que dans une région où les conditions initiales sont telles que le deuxième principe fonctionne. Le temps est anthropique au sens de Boltzmann, puis de Heidegger, Barrow et Stiegler.

La ville doit être anthropique, je crains que certains aménagements ne soient eux-mêmes entropiques.

(*) Physicien, Laboratoire de physique et métrologie des oscillateurs du CNRS, Besançon