

Boltzmann n'avait-il pas raison ?

CHRISTIAN CORMIER-DELANOUE

2 Route de Ferpicloz, CH 1731 Ependes, Suisse
e-mail : ccd@bluewin.ch

RÉSUMÉ. L'expérience quotidienne nous suggère que le temps s'écoule dans une seule direction, du passé vers le futur. Dans ce sens, la thermodynamique montre que tous les systèmes isolés évoluent vers un état d'équilibre avec augmentation de leur entropie, révélant ainsi une flèche du temps. D'autre part, des théories fondamentales de la physique comme la dynamique hamiltonienne, l'électrodynamique classique, la relativité, et la mécanique quantique n'affichent aucune quantité qui augmente dans un seul sens du temps. Ces théories prédisent donc un comportement de la nature symétrique par rapport au sens du temps. Un examen plus approfondi montre toutefois qu'en fait il en est tout autrement. Tous les phénomènes physiques réels présentent une irréversibilité par rapport au temps.

ABSTRACT. By physical experience it seems that time flows in only one direction. Thermodynamics, in particular, indicates that all closed systems evolve towards equilibrium with an increase of their entropy, thus showing an arrow of time. On the other hand, basic theories of physics imply no arrow of time. Newtonian Mechanics, Electrodynamics, Relativity, and Quantum theory show no quantities that increase in a single time direction. These theories predict a time-reversible behaviour of nature, but a closer scrutiny shows that actual processes occur differently. Time-irreversibility appears as the rule for all physical phenomena.

1 Introduction

L'évolution des systèmes physiques ne peut être décrite que par les lois, classiques ou quantiques, de la dynamique des entités matérielles, et par celles de la thermodynamique.

Dans cette dernière branche de la physique, le deuxième principe indique que tous les systèmes fermés, qui n'échangent ni matière ni énergie avec l'extérieur, doivent évoluer dans tout processus vers un état d'équilibre thermodynamique, par une augmentation de leur entropie.

Cette dernière quantité, d'une définition très abstraite, fut proposée par Clausius [1] en 1851. Dans une description unifiée des phénomènes physiques, une telle quantité devrait pouvoir être reliée aux propriétés dynamiques du système.

La première tentative dans ce sens fut celle de Boltzmann [2] en 1872, mettant en jeu le mouvement des molécules d'un gaz dans une enceinte fermée. Ces molécules étant en perpétuelle agitation, Boltzmann imagina que leur mouvement pouvait être décrit classiquement par la dynamique hamiltonienne. Ceci l'amena à définir une certaine quantité \mathcal{H} fonction des positions et vitesses moléculaires.

$$\mathcal{H} = \int f(v, t) \log f(v, t) dv \quad (1)$$

Un examen plus poussé de cette fonction \mathcal{H} montra, d'une part, qu'elle avait tendance à diminuer du seul fait des collisions moléculaires, et d'autre part, qu'elle était proportionnelle à l'entropie changée de signe, $S = -k\mathcal{H}$, k étant une constante à laquelle est resté attaché le nom de Boltzmann.

Le tour semblait ainsi joué, puisque dans l'enceinte fermée et isolée, l'entropie du gaz ne pouvait qu'augmenter jusqu'à ce que l'équilibre thermodynamique soit atteint, et ce, du seul fait des chocs moléculaires.

Cette théorie de Boltzmann souleva un tollé d'objections tant elle paraissait surprenante. L'une de ces objections sur un plan purement logique fut énoncée par Poincaré [3].

Comment la démonstration du théorème \mathcal{H} pouvait-elle conclure à une évolution irréversible, en ne s'appuyant que sur des prémisses réversibles. En effet, la dynamique de Newton, la seule connue à l'époque, est parfaitement réversible par inversion du temps de $+t$ à $-t$. Nous savons aujourd'hui que non seulement la dynamique de Newton, mais aussi l'électromagnétisme de Maxwell, la relativité d'Einstein, et la théorie quantique de Schrödinger sont des théories réversibles dans leur formalisme, alors que la thermodynamique conduit à des évolutions irréversibles, révélant ainsi une "flèche du temps".

Selon la même ligne de pensée, on peut rappeler un raisonnement de Fer [4] qui démontre que la dynamique hamiltonienne est radicalement incapable de rendre compte de l'irréversibilité.

La physique apparaîtrait donc comme divisée en deux parties absolument incompatibles entre elles, et malgré les nombreux efforts pour réconcilier ces deux visions de la nature, le problème demeure à ce jour, et est mentionné par de nombreux auteurs [5, 6, 7, 8, 9].

Un moyen pour sortir de cette situation paradoxale serait un réexamen des théories réputées réversibles, de la dynamique en particulier, pour vérifier que les processus réels qui en découlent, et que l'on peut observer, sont aussi réversibles que le formalisme des théories le laisserait entendre.

Ceci avait d'ailleurs été pressenti par Lochak [10] qui avait exprimé sa conviction que l'irréversibilité macroscopique ne pouvait trouver sa cause profonde que dans une irréversibilité microphysique encore cachée.

Ce sera le sujet de la présente étude dans laquelle on n'utilisera qu'un nombre limité de postulats :

- L'uniformité et l'homogénéité de l'espace qui entraînent comme on le sait la conservation de l'impulsion, du moment angulaire, et de l'énergie,
- Les deux postulats qui permirent à Einstein [11] d'établir la Relativité restreinte, à savoir :.
 - Tous les systèmes galiléens sont équivalents dans la description des lois physiques.
 - Dans le vide, la lumière se propage de façon isotrope, à la vitesse c dans tous les systèmes galiléens.

2 L'interaction Electromagnétique

Dans l'ignorance de sa nature, une radiation électromagnétique ne sera considérée dans ce qui suit que comme une énergie E_r , se propageant depuis le vide environnant vers un absorbeur atomique avec une vitesse c . L'absorption ultérieure de cette radiation résultera en une augmentation E_r de l'énergie globale de l'absorbeur ainsi que de sa masse propre, simultanément à la prise d'une impulsion E_r/c . Cette dernière affirmation traduit le fait que l'interaction de toute radiation avec la matière doit être strictement directionnelle en accord avec la démonstration d'Einstein [9]

Une augmentation de la masse propre de l'absorbeur est obligatoire si la radiation doit être totalement absorbée. L'énergie de la radiation

ne peut se transformer seulement en énergie cinétique de recul de l'absorbeur.

Soit en effet M_0 la masse au repos supposée constante d'une entité matérielle libre dans son référentiel de repos S_0 . Un tel référentiel S_0 existe toujours à un instant donné. Si l'on tient compte de l'indétermination quantique exprimée par $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$, comme $\Delta p = 0$ par hypothèse, la position de l'entité matérielle est complètement indéterminée, elle se trouve "quelque part" dans le référentiel S_0 .

L'absorption de l'énergie E_r et de l'impulsion E_r/c d'une radiation incidente donnerait à cet absorbeur une vitesse de recul βc . L'invariance éventuelle de la masse au repos entraînerait alors pour respecter l'équilibre des énergies et impulsions :

$$M_0 \beta c \gamma = E_r / c \quad (2)$$

$$M_0 c^2 (\gamma - 1) = E_r \quad (3)$$

qui combinées donnent

$$\beta \gamma = \gamma - 1 \quad (4)$$

$$\sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}} = 1 \quad (5)$$

seulement vérifiée pour $\beta = 0$, contrairement aux hypothèses initiales.

Si l'énergie et l'impulsion absorbées doivent apparaître totalement dans l'état final du système, il est nécessaire que la masse propre de l'absorbeur augmente par un facteur $R > 1$. Ceci exclut toute absorption complète d'une radiation par des corpuscules élémentaires dont la masse au repos invariable n'autorise qu'une diffusion Compton. Des particules composées comme des atomes peuvent voir leur masse propre varier par suite d'un changement de leur structure interne, et par conséquent elles peuvent éventuellement absorber des radiations par des transitions entre états quantifiés.

Dans le référentiel S_0 dans lequel un atome absorbeur est supposé au repos dans son état initial, l'énergie de celui-ci va donc évoluer de son état de repos initial $M_0 c^2$ à un état final $R_0 M_0 c^2 \gamma_0$ par suite de l'absorption de l'énergie $E_{r,0}$, et simultanément il y aura recul avec la

vitesse $\beta_0 c$ ce qui s'écrit :

$$E_{r0} = R_0 M_0 c^2 \gamma_0 - M_0 c^2 \quad (6)$$

$$E_{r0}/c = R_0 M_0 \beta_0 c \gamma_0 \quad (7)$$

Comme il a été dit plus haut, $P_r = E_r/c$ peut être considéré comme une condition de directivité absolue de l'interaction, ce qui peut s'écrire

$$\frac{R_0 M_0 c^2 \gamma_0 - M_0 c^2}{R_0 M_0 \beta_0 c \gamma_0} = c \quad (8)$$

Si tel n'était pas le cas, par raison d'une convergence éventuelle de la radiation, ce qui entraînerait que $\overline{P}_r < E_r/c$, l'égalité ci-dessus deviendrait :

$$\frac{R_0 \gamma_0 - 1}{R_0 \beta_0 \gamma_0} > 1 \quad (9)$$

suggérant que \overline{v} , la vitesse moyenne de propagation de la radiation selon la direction de l'interaction totale pourrait être $\overline{v} < c$. Dans un tel cas, il existerait toujours un référentiel S_1 dans lequel on aurait $\overline{v}_1 = 0$ et $P_{r1} = 0$ malgré l'absorption d'énergie car (6) indique que $R > 1$ pour toute valeur de β . Ce serait là une situation impossible et jamais observée de radiation convergente symétriquement. Selon Einstein il ne peut exister de radiation sphérique, qu'il avait baptisée "Kugelstrahlung".

Par substitution entre (6) et (7) on obtient :

$$\beta_0 = \frac{R_0^2 - 1}{R_0^2 + 1} \quad (10)$$

$$\gamma_0 = \frac{R_0^2 + 1}{2R_0} \quad (11)$$

$$E_{r0} = M_0 c^2 \frac{R_0^2 - 1}{2} \quad (12)$$

Si au lieu d'être initialement au repos, l'absorbeur possédait une vitesse initiale Bc selon une direction faisant un angle ϕ_0 avec la direction de transfert de l'impulsion dans S_0 , le même processus devrait être étudié dans un autre référentiel d'observation, soit S_1 , par rapport auquel le référentiel S_0 aurait une vitesse uniforme Bc .

L'absorption de l'énergie radiante E_{r1} devrait augmenter l'énergie globale de l'absorbeur, énergie propre plus énergie cinétique, de telle façon que :

$$E_{r1} = R_0 M_0 c^2 \gamma_1 - M_0 c^2 \Gamma \quad \Gamma = (1 - B^2)^{-1/2} \quad (13)$$

où γ_1 est le facteur γ_0 transformé du référentiel S_0 au référentiel S_1 . La transformation relativiste des vitesses donne :

$$\beta_1 = \beta_0 \frac{\sqrt{1 + (B/\beta_0)^2 - 2B/\beta_0 \cos \phi_0 - B^2 \sin^2 \phi_0}}{1 - \beta_0 \cos \phi_0} \quad (14)$$

$$\beta_1^2 = \frac{\beta_0^2 + B^2 - 2B\beta_0 \cos \phi_0 - B^2 \beta_0^2 + B^2 \beta_0^2 \cos^2 \phi_0}{(1 - B\beta_0 \cos \phi_0)^2} \quad (15)$$

$$1 - \beta_1^2 = \frac{1}{(1 - B\beta_0 \cos \phi_0)^2} \left[(1 - B\beta_0 \cos \phi_0)^2 - \beta_0^2 - B^2 + 2B\beta_0 \cos \phi_0 + B^2 \beta_0^2 - B^2 \beta_0^2 \cos^2 \phi_0 \right] \quad (16)$$

$$1 - \beta_1^2 = \frac{(1 - B^2)(1 - \beta_0^2)}{(1 - B\beta_0 \cos \phi_0)^2} \quad (17)$$

$$\gamma_1 = (1 - B\beta_0 \cos \phi_0) \Gamma \gamma_0 \quad (18)$$

Par substitution de β_0 , et γ_0 de (10) et (11) dans (18) l'équation (13) devient

$$E_{r1} = M_0 c^2 \Gamma \left[\left(1 - \frac{R_0^2 - 1}{R_0^2 + 1} B \cos \phi_0 \right) \frac{R_0^2 + 1}{2} - 1 \right] \quad (19)$$

$$E_{r1} = M_0 c^2 \Gamma \frac{R_0^2 + 1 - B(R_0^2 - 1) \cos \phi_0 - 2}{2} \quad (20)$$

$$E_{r1} = M_0 c^2 \frac{R_0^2 - 1}{2} \Gamma (1 - B \cos \phi_0) \quad (21)$$

$$E_{r1} = E_{r0} \Gamma (1 - B \cos \phi_0) \quad (22)$$

Ces calculs ne donnent que la quantité d'énergie radiante absorbée à partir d'un état initial de l'absorbeur jusqu'au même état final du même absorbeur, c'est à dire pour la même valeur du facteur R_0 affectant la masse au repos de l'absorbeur.

L'équation (22) a la même forme que la transformation de fréquence due à l'effet Doppler pour une onde progressive entre les référentiels S_0 et S_1 , ce dernier ayant une vitesse relative Bc par rapport à S_0 et formant un angle ϕ avec la direction de propagation d'une onde [12, 13].

$$\nu_1 = \nu_0 \gamma (1 - \beta \cos \phi) \quad (23)$$

Ceci laisse à penser que la radiation libre a une nature proche de celle d'une onde, et comme deux quantités ayant la même variance de Lorentz sont linéairement proportionnelles l'une à l'autre, l'énergie E_r devrait être proportionnelle à la fréquence ν d'une onde progressive étendue.

$$E_r = Q\nu \quad (24)$$

Q étant une constante, évidemment identique à h .

3 Durée de l'absorption

Dans ce qui suit. le temps est considéré comme continu, les instants consécutifs formant une série compacte, c'est à dire qu'entre deux instants quelconques il existe toujours un instant intermédiaire.

Si l'absorption, seulement définie jusqu'à présent par l'état initial et l'état final de l'absorbeur matériel selon (6) et (7), était étendue dans le temps comme un processus classique, elle pourrait de façon équivalente être divisée en fractions, l'absorption globale étant supposée se produire dans le temps comme une suite d'un nombre arbitraire N d'absorptions partielles mais rigoureusement consécutives, et égales entre elles d'énergie δE_{r0} , fractions de l'énergie totalement absorbée E_{r0} définie par (12), ce qui pourrait s'écrire : $N(\delta E_{r0}) = E_{r0}$.

Selon (12) la première absorption serait :

$$E_{r1} = \delta E_{r0} = \frac{M_0 c^2}{2} [(\delta R_1)^2 - 1] \quad (25)$$

avec une vitesse de recul $\delta\beta_1 c$ comme dans (10)

$$\delta\beta_1 = \frac{(\delta R_1)^2 - 1}{(\delta R_1)^2 + 1} \quad (26)$$

Comme la masse au repos de l'absorbeur augmenterait du fait de cette première absorption de M_0 à $(\delta R_1)M_0$, et comme $\delta\beta_1 c$, la vitesse

de recul, est dirigée comme celle de l'interaction globale, la seconde absorption serait selon (21)

$$E_{r2} = \delta E_{r0} = \frac{(\delta R_1) M_0 c^2}{2} [(\delta R_2)^2 - 1] \sqrt{\frac{1 - (\delta \beta_1)}{1 + (\delta \beta_1)}} \quad (27)$$

mais (26) donne aussi

$$\delta R_1 = \sqrt{\frac{1 + (\delta \beta_1)}{1 - (\delta \beta_1)}} \quad (28)$$

si bien que cette deuxième absorption peut s'écrire

$$E_{r2} = \delta E_{r0} = \frac{M_0 c^2}{2} [(\delta R_2)^2 - 1] \quad (29)$$

d'où il s'ensuit que

$$\delta R_2 = \delta R_1 \quad (30)$$

et comme toutes les fractions δE_{r0} sont égales entre elles par hypothèse, tous les δR doivent être égaux.

Pour N absorptions on devrait obtenir

$$N \delta E_{r0} = \frac{M_0 c^2}{2} N [(\delta R)^2 - 1] \quad (31)$$

et selon les définitions initiales, on devrait avoir les deux égalités

$$N [(\delta R)^2 - 1] = R_0^2 - 1 \quad (32)$$

$$(\delta R)^N = R_0 \quad (33)$$

R_0 étant le facteur R défini par (6) et (7). Cette dernière égalité exprime l'augmentation pas à pas de la masse propre de l'absorbeur par le facteur δR en N pas.

Par substitution ces deux égalités donnent :

$$N [(\delta R)^2 - 1] = (\delta R)^{2N} - 1 \quad (34)$$

qui ne peuvent être satisfaites que pour $N = 1$, toute autre valeur de N donnant $\delta R = 1$, c'est à dire pas d'absorption.

Ceci prouve déjà que le processus d'absorption précédemment étudié ne peut être divisé en un certain nombre de fractions consécutives.

En utilisant les mêmes raisonnements qui conduisent aux équations (25) et (29), si l'absorption de radiation se produisait selon un certain processus étendu dans le temps, l'énergie absorbée augmenterait progressivement, ce qui pour une valeur arbitraire R_i du facteur R , donnerait :

$$E_{r_i} = \int_1^{R_i} \frac{M_0 c^2}{2} (R^2 - 1) dR \quad (35)$$

et à la fin de cette absorption progressive, E_{r_0} deviendrait :

$$E_{r_0} = \frac{M_0 c^2}{2} \left[\frac{R^3}{3} - R \right]_1^{R_0} \quad (36)$$

montrant bien qu'un processus continu d'absorption étendu dans le temps ne peut-être envisagé car contredisant les résultats précédemment obtenus en ne définissant que l'état initial et l'état final.

C'est bien l'extension du processus dans le temps qui pose problème, quel que soit le mode d'absorption. La seule issue à cette situation paradoxale est que l'absorption d'une radiation par un atome soit un phénomène instantané, de durée nulle.

Le raisonnement ci-dessus qui ne concerne que l'absorption de radiation par un atome, peut s'appliquer parfaitement symétriquement au cas de l'émission d'une radiation par un atome excité.

Dans le référentiel de repos initial d'un atome excité, et donc doué d'une masse propre RM_0 , les équations (6) et (7) deviendraient dans le cas d'émission spontanée à partir de cet état d'énergie supérieure :

$$R_0 M_0 c^2 = M_0 c^2 \gamma_0 + E_{r_0} \quad (37)$$

$$M_0 \beta_0 c \gamma_0 = E_{r_0} / c \quad (38)$$

donnant les mêmes résultats que (10) et (11) pour β_0 et γ_0 .

4 Conséquences Immédiates

Si comme il vient d'être démontré il apparaît que toute interaction entre un champ électromagnétique et un système matériel ne peut se produire que de façon instantanée, cela entraîne quelques conséquences. D'une manière générale le raisonnement sur l'instantanéité de l'interaction électromagnétique ne concerne que les entités matérielles. Comme l'énergie

propre de ces entités doit pouvoir être variable, et que l'énergie propre d'un corpuscule élémentaire est invariable, il ne peut s'agir que d'un système composé de deux ou plus de ces entités élémentaires. C'est donc d'un système matériel qu'il s'agit, et non d'une particule matérielle unique.

Si l'énergie propre d'un système composé est variable, ce ne peut être que du fait de la variation des propriétés dynamiques de ses composants. Si donc, l'énergie propre du système fait un saut instantané, il correspond à celui-ci un saut dynamique instantané.

On peut examiner ce point dans deux exemples : la stabilité atomique, et le rayonnement de freinage des particules chargées.

4.1 *L'électron orbital de Rutherford*

On considère le cas d'un électron en orbite autour d'un proton, comme dans l'atome d'hydrogène, selon le modèle de Rutherford. La masse propre de chacun des deux composants de ce système matériel est invariante.

L'énergie totale de ce système, à la correction relativiste près, est donc la somme de l'énergie potentielle négative, et de l'énergie cinétique positive de l'électron en orbite. Par contre, l'électromagnétisme classique prévoit que l'électron émette un rayonnement du fait de l'accélération centripète qu'il subit, et que de ce fait, l'énergie totale du système diminue de façon continue. Cette énergie totale ne peut cependant varier que par sauts discrets comme on vient de le voir.

Comme l'énergie potentielle, qui ne dépend que de la distance entre l'électron et le proton, ne peut varier de façon instantanée, il faut que ce soit l'énergie cinétique orbitale qui varie par sauts instantanés. Ceci signifie aussi un changement brutal de moment angulaire.

4.2 *Le Bremsstrahlung*

On peut aussi considérer le cas d'une particule chargée comme un positron, se dirigeant avec une certaine vitesse initiale vers une autre particule élémentaire de masse plus élevée, portant une charge de même signe, comme un proton par exemple.

La particule projectile subit une force de répulsion de la part de la particule cible. Dans ces conditions, l'électrodynamique classique prévoit que le système doit émettre de façon continue une radiation due au freinage du projectile.

L'énergie propre des corpuscules élémentaires, tant celle du positron projectile, que celle du proton cible, est invariable. Par contre, l'énergie totale du système matériel | projectile + cible | est variable, et est la somme de l'énergie potentielle, positive dans ce cas, et de l'énergie cinétique.

Comme la masse de la cible est très supérieure à celle du projectile, on peut considérer la cible comme pratiquement immobile. D'ailleurs, le rayonnement Bremsstrahlung considéré classiquement est exclusivement celui émis par le projectile.

On a vu que tout système matériel ne peut émettre ou absorber une radiation que de façon instantanée, l'énergie totale du système subissant des sauts discontinus. Comme l'énergie potentielle, l'une des composantes de l'énergie totale du système, ne peut varier instantanément, puisqu'elle dépend des positions instantanées des deux corpuscules chargés, c'est donc l'énergie cinétique du projectile qui doit varier instantanément dans une transition radiative d'émission d'un quantum d'énergie.

Ceci est tout à fait contraire à la dynamique classique, selon laquelle la force de freinage subie par la particule projectile doit entraîner une décélération progressive de la vitesse de cette dernière.

Au vu de ce qui précède, on voit que ce schéma classique n'est pas envisageable. La dynamique hamiltonienne n'est pas plus applicable ici que l'électromagnétisme maxwellien.

5 Dynamique Instantanée

Reprenant le raisonnement développé précédemment pour l'absorption de radiation, l'énergie E_a de l'atome absorbeur dans son état de repos initial, avant absorption, serait $E_a = m_0c^2$. Dans son état final, où il serait animé de la vitesse de recul β_0c , son énergie totale serait $E_a = R_0m_0c^2\gamma_0$. L'énergie totalement absorbée serait donc :

$$E_{r0} = R_0m_0c^2\gamma_0 - m_0c^2 \quad (39)$$

$$E_{r0} = m_0c^2(R_0\gamma_0 - 1) \quad (40)$$

ce que l'on peut encore écrire

$$E_{r0} = m_0c^2(\gamma_0 - 1) + m_0c^2(R_0\gamma_0 - 1 - \gamma_0 + 1) \quad (41)$$

$$E_{r0} = m_0c^2(\gamma_0 - 1) + m_0c^2\gamma_0(R - 1) \quad (42)$$

Si l'on qualifie de fondamental l'état de l'atome dans son état énergétique m_0c^2 , et de chargé l'état du même atome dans son état énergétique

$R_0 m_0 c^2$, l'énergie totale de l'absorbeur est donc après interaction égale à la somme de l'énergie cinétique acquise par l'atome dans l'état fondamental, et de l'énergie supplémentaire de l'atome dans l'état chargé et en mouvement. Dans ce processus d'absorption électromagnétique, il y a donc prise instantanée par l'atome dans son état fondamental d'une énergie cinétique, et absorption d'une énergie supplémentaire animée de la vitesse $\beta_0 c$.

Selon le principe fondamental de la mécanique de Newton, on doit pouvoir écrire

$$f = m_0 A \quad (43)$$

A étant l'accélération de l'atome de masse m_0 sous l'influence de la force f .

$$f = m_0 \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} \quad (44)$$

où D est une distance parcourue.

Comme dans le cas étudié ici $\partial t = 0$, on voit que la force devrait être infinie puisque la masse est finie. C'est le concept d'accélération qui a perdu toute signification. Que veulent alors dire les mots "masse inerte" ? Il s'agit donc bien d'un processus particulier.

Il ne peut s'agir d'un choc comme celui de deux billes parfaitement rigides | atome + photon ponctuel de masse nulle |. A quelle distance se produirait l'interaction ? En allant plus loin, si l'on supposait le photon et l'électron ponctuels, la probabilité de capture d'un photon par un électron serait quasi-nulle. Or l'effet photoélectrique et l'effet Compton sont tous deux observables.

L'instantanéité de l'interaction électromagnétique est strictement déduite d'un raisonnement relativiste. Force est donc de constater que, dans ce cas particulier tout au moins, la Relativité contredit la mécanique classique au sens de Newton. Celle-ci semble s'appliquer, sans nul doute, à l'approximation relativiste, dans les cas macrophysiques.

On voit toutefois, qu'il a suffi d'étudier un phénomène très simple, et plus qu'usuel, comme l'interaction électromagnétique pour établir la nécessaire instantanéité de ce processus.

Il ne peut y avoir deux dynamiques distinctes, l'une qui serait instantanée comme décrite ci-dessus, et une autre analogue à la dynamique

hamiltonienne classique. Si cette instantanéité était généralisée à toutes les interactions dynamiques, on devrait penser que les quantités figurant dans les lois de la dynamique newtonienne ne sont que des moyennes, car elles ne peuvent varier de façon continue, mais uniquement par sauts élémentaires brutaux au niveau microphysique, selon une dynamique instantanée.

6 Irréversibilité de la Dynamique Instantanée

Comme il a été rappelé dans l'introduction, on considère généralement que la dynamique classique, tout comme l'électromagnétisme, est une théorie réversible. Cette réversibilité veut dire que si dans les équations de la dynamique, on change $+t$ en $-t$, on inverse les vitesses [14], mais les phénomènes décrits par la théorie seront toujours cohérents. C'est là une réversibilité formelle.

Si, comme il a été montré ci-dessus, le temps de l'évolution dynamique disparaît, quelle signification cette réversibilité conserve-t-elle ?

Un instant sans aucune durée ne peut être défini que par l'avant et l'après. Si les déterminations de l'avant et l'après sont elles-mêmes instantanées, il existe forcément une certaine durée entre ces deux déterminations.

Un phénomène instantané peut se produire pendant une telle durée, mais ne peut être plus précisément déterminé. La connaissance que l'on peut avoir d'un phénomène instantané ne peut donc être que probabiliste, et ceci montre l'irréversibilité de ces processus instantanés.

Pour illustrer cette irréversibilité, on peut considérer l'exemple simple suivant.

L'émission spontanée d'une radiation par un atome n'intervient qu'un certain temps après que l'atome ait été excité à un niveau d'énergie élevée par absorption d'un rayonnement. Ce délai de relaxation correspond à la durée de vie de l'atome dans l'état excité. Du fait de l'absorption préalable, l'atome étudié est doué d'un mouvement de recul par rapport à son état initial.

L'émission spontanée est le même processus que l'absorption mais avec inversion du temps. Elle se produit de façon aléatoire sous l'influence du champ de zéro, indétectable directement. c'est donc un processus déterministe, mais dont on ne peut observer la cause.

Qui plus est, la direction selon laquelle on pourrait observer la radiation émise, est elle-même aléatoire, pour les mêmes raisons.

Ainsi donc, non seulement l'instant, mais aussi la position instantanée de l'émetteur, et la direction d'émission ne peuvent être déterminés d'avance. Il s'agit bien d'un phénomène irréversible qui en aucun cas ne peut être équivalent au processus réel d'absorption vu dans un miroir de temps.

7 Conclusion

Sans autres postulats que les deux stipulations d'Einstein, et les propriétés d'homogénéité de l'espace, on peut montrer que les interactions électromagnétiques doivent être instantanées, quantifiées, et qu'elles ne peuvent être déterminées temporellement que de façon statistique.

Ces résultats établissent assurément un lien entre la relativité et la théorie quantique.

Cette propriété d'instantanéité implique également celle de certains processus dynamiques, et si l'on recherche une dynamique unifiée, cette branche de la physique doit être irréversible à tous les niveaux, de la macrophysique à la microphysique.

L'objection logique de Poincaré tombe donc. L'objection de Loschmidt au théorème \mathcal{H} est également erronée, car même si les instants réels de collision moléculaire pouvaient être connus avec précision, les instants du même processus envisagé avec inversion du temps de $+t$ à $-t$ ne pourraient être identiques. Si les instants microphysiques ne peuvent être déterminés que statistiquement, on ne peut créer l'image-miroir d'un processus réel par une inversion du temps. En ce sens, l'argument de Loschmidt apparaît contrafactuel.

Boltzmann n'avait donc pas tort dans sa démonstration, et le chaos moléculaire irréversible est donc bien une réalité.

Cet article est dédié à Georges Lochak à l'occasion de ses 70 ans, et en amical hommage pour son travail dévoué à la tête de la Fondation Louis de Broglie.

Références

- [1] Clausius R. *Ann. Phys.*, **125**, (1865), 353.
- [2] Boltzmann L. *Lectures on Gas Theory*, reprint University of California Press, Berkeley, (1964).
- [3] Poincaré H. "La Mécanique et l'Expérience" in *Revue de Métaphysique et de Morale*, **1**, (1893), 534.
- [4] Fer F. *L'irréversibilité fondement de la stabilité du monde physique*, Bordas, Paris (1977) 96.

- [5] Reichenbach H. *The Direction of Time*, University of California Press, (1971).
- [6] Prigogine I. Stengers I. *La Nouvelle Alliance*, Gallimard, Paris (1979) 205.
- [7] Penrose R. *The Emperor's New Mind*, Oxford University Press, Oxford (1989) 394.
- [8] Rothman T. Sudarshan G. *Doubt and Certainty*, Perseus Books, Reading Massachetts, (1998) 101-125.
- [9] Grecos A. *Statistique thermodynamique*, in Encyclopédie Universalis France 2000.
- [10] Lochak G. *Ann. Fond. L. de Broglie*, **13**, (1988) 423.
- [11] Einstein A. *Phys. Z.* **18**, (1917), 121.
- [12] Cormier-Delanoue C. *Found. Phys.* **25**, (1994), 465.
- [13] Cormier-Delanoue C. *Ann. Fond. L. de Broglie*, **22**, (1997) 169.
- [14] Canals-Frau D. *Ann. Fond. L. de Broglie*. **12**, (1987) 475.

(Manuscrit reçu le 8 octobre 2001)