

De la création d'images dans les théories physiques :

*Images dans les théories des gaz
chez Krönig, Clausius et Gibbs*

par R. LOCQUENEUX
Université de Lille I

En physique, l'image peut servir à la représentation du monde, pourvu que l'apparence des choses soit privilégiée. Elle peut aussi servir de fondement aux calculs qui permettent de rendre compte des phénomènes. Plusieurs images d'un même objet peuvent ainsi sortir de l'imaginaire du physicien, celui-ci est confronté au problème de leur cohérence, chacune de ces images ayant ses propres critères de pertinence.

L'image peut aussi être une représentation géométrique des propriétés des systèmes physiques.

Les modèles des gaz de Krönig et de Clausius, les représentations géométriques des propriétés thermodynamiques des substances par Gibbs permettent d'esquisser des processus de création d'images en physique théorique.

1. LES IMAGES, REPRÉSENTATIONS DES ÊTRES PHYSIQUES

Dans ce cas, l'image entretient une connivence plus ou moins étroite avec l'apparence réelle ou imaginée des êtres et de leur devenir. Mais, parce qu'elle ne retient que quelques aspects du réel, dont elle ne peut épouser l'inépuisable complexité l'image rend ostensible à l'intellect la « chose » à laquelle elle se substitue [1, 2].

L'image peut démontrer en montrant ; mais le plus souvent, le physicien cherche à lui associer des lois physiques, c'est-à-dire une structure mathématique. Encore faut-il que par sa complexité, l'image ne déjoue pas toute tentative de mathématisation.

A une image jugée fidèle c'est-à-dire conforme à l'apparence réelle ou imaginée de l'objet, mais gratuite, le physicien peut préférer une image plus schématique, plus pauvre encore, qui se prête à l'analyse mathématique, voire même, il peut rechercher une image qui s'éloigne du réel pourvu qu'elle reste convaincante.

Les modèles introduits par Krönig et par Clausius pour rendre compte de «cette sorte de mouvement qu'on nomme chaleur» nous semblent propres à illustrer ces jeux de l'imaginaire.

1.1. Modèle du gaz de Krönig

En 1856, Krönig imagine qu'un gaz est constitué de particules ponctuelles perpétuellement agitées. Il rend compte de l'équation d'état des gaz parfaits en supposant que dans une enceinte ayant la forme d'un parallélépipède rectangle, des particules ponctuelles se déplacent toutes à la même vitesse parallèlement aux arêtes de la boîte (figure 1). Krönig justifie comme suit cette schématisation «Le parcours de chaque molécule doit être si irrégulier qu'il défie tout calcul. Cependant suivant les lois de la théorie probabiliste, nous pouvons supposer un mouvement absolument régulier au lieu d'un mouvement complètement irrégulier» [3].

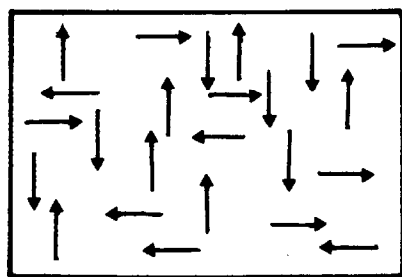


Figure 1

Selon Krönig, la pression est l'effet du bombardement des particules sur les parois du réservoir. Il démontre que la pression P d'un gaz est proportionnelle à l'énergie cinétique de ces particules : $P = N mc^2 / V$, où N est le nombre de particules dans le volume V du gaz, m est la masse d'une particule et c , sa vitesse. En rapprochant cette dernière équation de l'équation d'état des gaz parfaits $PV \sim t$, où t désigne la température absolue du gaz, Krönig peut proposer une interprétation atomiste de la température : $t = mc^2$ à un facteur multiplicatif près.

1.2. L'image des mouvements moléculaires admis pour l'explication de la chaleur

1.2.1.

La justification du schéma de Krönig : en 1857, Clausius [4, 5] imagine que les gaz sont constitués de molécules qui volent et tournoient dans l'espace et que ces molécules se composent de plusieurs atomes qui oscillent les uns par rapport aux autres. A partir de cette image complexe des gaz, Clausius se propose de retrouver, au terme d'une série d'abstractions qu'il s'efforce de justifier, la schématisation proposée par Krönig, laquelle permet une mathématisation simple des phénomènes.

[1] Lorsque leur densité devient très faible, tous les gaz acquièrent le même comportement thermo-élastique : celui des gaz parfaits. Ce comportement suppose que la forme géométrique des molécules n'a aucune influence et qu'il n'y a pas d'interaction dans la matière, puisque formes et interactions particularisent le comportement de substances diverses. Aussi, dans l'état «gaz parfait» l'encombrement des molécules est négligeable comparé à l'espace dont elles disposent. Clausius propose alors un modèle des gaz parfaits où des particules sphériques et parfaitement élastiques s'agitent pêle-mêle dans l'espace.

[2] Cependant la chaleur contenue dans un gaz ne peut s'interpréter par la seule force vive de translation des molécules, il faut donc admettre des mouvements de leurs parties constituantes : mouvements de rotation et de vibration. Pour justifier la pertinence de la schématisation de Krönig, Clausius montre que, les différents mouvements s'égalisent du fait des chocs des molécules «de telle sorte qu'en somme le mouvement de translation n'est plus ni accru ni diminué par les mouvements des parties constituantes» [4] et que la pression dépend seulement du mouvement de translation des molécules puisqu'elle résulte du choc de ces molécules contre l'enclôture du réservoir qui les enclôt. Il admet l'indépendance des degrés de liberté de translation des molécules et montre en outre que l'on peut faire comme si ces molécules avaient toutes la même vitesse : leur vitesse moyenne (figure 2). Dans ses calculs, Clausius s'abstient de supposer, comme Krönig, que les molécules ne se déplacent que suivant les trois directions de l'espace, et retrouve cependant les résultats de ce dernier, justifiant ainsi la schématisation outrancière qui les fonde.

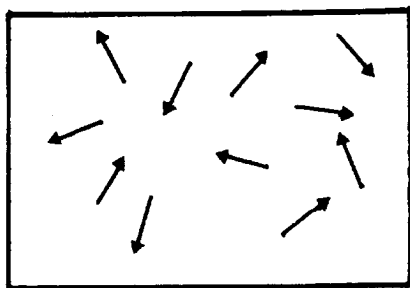


Figure 2

1.2.2.

Les nécessaires modifications de l'image : si les molécules d'un gaz ont réellement des vitesses proches de celles que prédit la théorie de Clausius, «comment se fait-il que la fumée de tabac se répand si longtemps dans les chambres en traînées immobiles?» [6]. A cette objection de Buys Ballot, Clausius entreprend de répondre dans un article «Sur les longueurs moyennes des chemins qui sont parcourus par des molécules dans le mouvement moléculaire des corps gazeux» en 1858 [7]. Il introduit alors la notion de sphères d'action des molécules et détermine les longueurs moyennes des chemins parcourus par une molécule entre deux chocs successifs, chocs qui se produisent lorsque le centre de gravité de la molécule arrive dans la sphère d'action d'une autre molécule.

Pour effectuer le calcul du libre parcours moyen, Clausius substitue à l'image de particules en agitation incessante, une représentation où toutes les particules sauf une sont immobiles et partiellement ordonnées. Il passe ainsi d'une image qui vise à suggérer - à défaut d'épouser - la complexité du gaz, à une image qui ne semble élaborée que pour le calcul et qui, pour ce faire, s'éloigne de la réalité. L'équivalence des modèles mis en œuvre est supposée établie lorsqu'il semble intuitivement, que la substitution de l'un à l'autre n'est pas de nature à modifier les résultats de l'analyse mathématique, lesquels rendent compte des phénomènes. Mais ici, seule l'intuition, le sens physique, entre en jeu puisque l'un des modèles repose sur une image trop complexe pour se prêter aux calculs. Clausius fait d'abord comme si les molécules immobiles étaient réparties aux nœuds d'un réseau de maille cubique, d'arête λ ; chaque molécule dispose ainsi d'un espace $\lambda^3 = V/N$. Ensuite, il découpe, par la pensée, l'espace en couches d'épaisseur λ ; perpendiculaires à la direction de la seule molécule en mouvement. Les molécules occupant une couche sont supposées

réparties sur le plan par lequel la molécule en mouvement aborde la couche, ces molécules sont disposées aux nœuds d'un réseau carré de côté λ et chacune dispose d'une surface (Σ_m) égale à λ^2 .

Si ρ désigne le rayon de la sphère d'action des molécules immobiles, la molécule en mouvement interagit avec une molécule immobile du plan si elle tombe dans le grand cercle de sa sphère d'action (Σ_a) sur le plan ; soit $\pi\rho^2$ la mesure de la surface intérieure au grand cercle tracé par la sphère d'action sur le plan (figure 3).

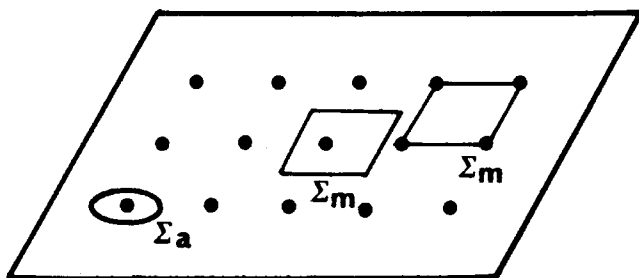


Figure 3

La probabilité pour que cette particule entre en interaction avec une molécule du plan est $\pi\rho^2 / \lambda^2$. On conçoit, intuitivement, que la probabilité de collision est la même que les molécules soit régulièrement ou aléatoirement distribuées sur le plan.

La probabilité pour que cette particule entre en interaction avec une molécule immobile lorsqu'elle traverse une épaisseur δ du gaz est proportionnelle au nombre des couches traversées donc à δ / λ d'où une probabilité $\pi\rho^2 \delta / \lambda^3$. La probabilité qu'a la particule de traverser sans collision une épaisseur δ de gaz est donc : $W_\delta = 1 - \frac{\pi\rho^2}{\lambda^3} \delta$.

Il va sans dire que les réseaux carrés de molécules immobiles doivent être disposés de manière quelconque sur les plans limitant les couches d'épaisseur λ et qu'ils ne s'inscrivent pas dans un réseau cubique. Puisqu'alors, si la molécule traversait la première couche sans entrer en collision, la probabilité de collision serait ensuite nulle. On peut considérer que les plans portant les réseaux carrés sont décalés les uns par rapport aux autres de manière aléatoire, c'est ce décalage

aléatoire qui réintroduit dans le modèle, le désordre supposé des particules dans le gaz (figure 4). L'élaboration du modèle du gaz a fourni une image mentale du gaz et aussi une relation mathématique qui permet une détermination analytique du libre parcours moyen ; soit $l = \lambda^3 / \pi \rho^2$, l'expression du libre parcours moyen. Mais la probabilité de collision est augmentée lorsque toutes les molécules sont en mouvement. En considérant que toutes les molécules ont une même vitesse, la vitesse moyenne, ce qui la ramène au modèle précédemment utilisé - Clausius corrige son estimation du libre parcours moyen $l = 3/4 \cdot l'$.

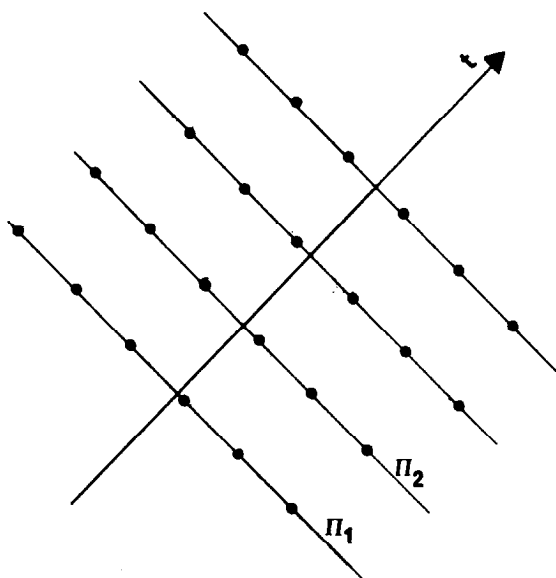


Figure 4

Ainsi la mathématisation des phénomènes peut elle contraindre à la fois au recours à l'image et à la manipulation de celle-ci. Le calcul du libre parcours moyen effectué par Maxwell donne un résultat différent : $l = l' / \sqrt{2}$; Clausius pense découvrir une erreur dans les calculs de Maxwell. Il ne voit pas qu'en recourant à la distribution des vitesses, Maxwell s'affranchit d'un modèle trop limitatif dans lequel toutes les particules ont la même vitesse [8].

2. LES IMAGES, ILLUSTRATIONS DES LOIS PHYSIQUES

Si l'image en physique peut être au point de départ de la mathématisation des phénomènes et avoir un rôle explicatif, l'image peut aussi servir à illustrer les lois physiques qui relient des grandeurs physiques observables.

Ainsi par exemple, dans deux articles publiés en 1873, Gibbs [10] propose une formalisation analytique de la thermodynamique phénoménologique, laquelle est fondée sur des axiomes (conservation de l'énergie, etc...) et des définitions validés par l'expérience. En adoptant un tel point de vue les propriétés d'une substance peuvent être déduites grâce à quelques lois ou relations qui la définissent ; telles, l'équation d'état et la relation qui lie l'énergie interne U au nombre de moles n et à la température absolue t : $PV = n R t$, $u = n k R t$, peuvent définir le gaz parfait.

Dans ces travaux, Gibbs développe «une méthode de représentation géométrique des propriétés thermodynamiques des substances au moyen de surface». Les images naissent ici de la théorie et de l'expérience et servent aux calculs et à l'interprétation des phénomènes. Ces surfaces frappèrent l'imagination de Maxwell qui en réalisa de nombreuses maquettes en bois (figure 5, d'après Weinhold [10]). Gibbs conçoit ainsi la thermodynamique comme une sorte de géométrie.

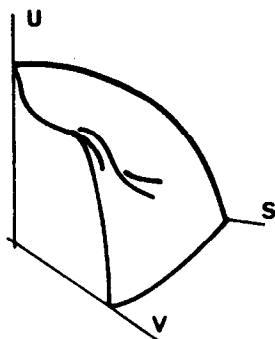


Figure 5

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. LOCQUENEUX - «Intérêt de l'histoire dans l'analyse épistémologique des modèles en physique», in «Modèle et simulation» - (ed by A Giordan, J.-L. Martinand) Actes des 9^{èmes} journées internationales sur l'éducation scientifique - 1987, p. 315-320.

- [2] R. LOCQUENEUX - «Analyse épistémologique de la modélisation en physique», *Fundamenta Scientiae*, 9, 1 - 1988, p. 21-42 (en particulier p. 25).
- [3] A.-K. KRÖNIG - «Grundzüge einer Theorie der Gase», A.W. Hayn, Berlin - 1856 ; *Annalen der Physik*, 2, 99, 1856, 315.
- [4] R. CLAUSIUS - «Sur la nature du mouvement auquel nous donnons le nom de chaleur», in «Théorie mécanique de la chaleur», trad de F. Folie, 1^{ère} éd., J. Hetzel, Paris - 1868-1869, volume 2, mémoire 14 - p. 185-216.
- [5] R. CLAUSIUS - «De la nature de la chaleur comparée à la lumière et au son», trad de Feltz, *Revue des cours scientifiques* 3, 8, - 1866, p. 121-131.
- [6] C.H.D. BUIJS BALLOT - «Ueber die Art von Bewegung, welche wir Wärme und Elektrizität nennen», *Annalen der Physik*, 103, - 1858, p. 240-259.
- [7] R. CLAUSIUS - «Sur les longueurs moyennes des chemins qui sont parcourus par les molécules dans le mouvement moléculaire des corps gazeux» in «Théorie mécanique de la chaleur» loc. cit., volume 2, mémoire 15 - p. 217-234.
- [8] R. CLAUSIUS - loc. cit, mémoire 15, (commentaires et suppléments de 1866) et R. Clausius - «On the dynamical theory of gases», *Philosophical Magazine* 4, 19, - 1860, p. 434-436.
- [9] J.W. GIBBS - «The scientific papers» Longmans, Green and Co, 1906 - (Dover reprint 1961) traduction française de G. Roy - «Diagrammes et surfaces thermodynamiques» Gauthier-Villars Paris, 1903.
- [10] F. WEINHOLD - «Thermodynamics and geometry» - *Physics today*, 29, 3, - 1976, 7 pages.