

LOI, HISTOIRE...ET DESERTION

Ilya PRIGOGINE

Il y a quelques années, j'ai essayé à plusieurs reprises de nouer un dialogue avec Jacques Monod pour qui j'ai toujours eu une grande admiration. Mes tentatives sont restées vaines; une fois pour toutes, j'avais été classé parmi les "animistes", au nombre de ceux qui croient à la nécessité de l'apparition de l'homme sur la terre. Il est donc assez piquant de me retrouver aujourd'hui sur le banc des accusés à côté de Jacques Monod.

L'accusation est grave : nous glorifions "outrageusement" le hasard, le bruit, la fluctuation. La condamnation est à la mesure de l'accusation: attitude anti-scientifique, confusionnisme mental, apôtre de la désertion. Sentence sans équivoque, mais où est donc le dossier?

J'ai lu et relu le texte de René Thom. J'y ai surtout trouvé, -et je ne parle ici qu'au nom des auteurs de "La Nouvelle Alliance"-, des affirmations péremptoires qui ne peuvent s'expliquer que par l'attitude émotionnelle de l'auteur. J'analyserai d'abord certaines de ces affirmations, spécialement celles qui pourraient jeter le trouble chez un lecteur non averti(1). La source du conflit est, je crois, que René Thom juge "désagréable"* le développement de conceptions nouvelles dans lesquelles nous voyons au contraire

* Les guillemets renvoient à des expressions figurant dans l'article de René Thom.

une libération par rapport à ces préjugés et fausses certitudes qui ont hanté nos cultures. Dans la seconde partie de ma réponse, je reprendrai ce que je crois être le fond du problème, à savoir la situation actuelle proprement inouïe des sciences de la nature à la suite des progrès accomplis dans une variété de domaines qui va de l'astrophysique à la biologie.

Nous ne nous appesantirons pas sur la tactique déplaisante qui consiste à faire la leçon en rappelant des vérités que nous avons pourtant pris grand peine à exposer en détail dans notre ouvrage (l'étincelle ne crée pas la forêt, les fluctuations restent insignifiantes au sein d'un système stable, les brisures de symétrie ne sont pas arbitraires). Une lecture un tant soit peu attentive de "La Nouvelle Alliance" aurait pu l'éclairer. Essayons cependant d'interpréter la caricature esquissée par Thom: l'étincelle, selon nous, ~~créerait la forêt qu'elle fait brûler. Nul ne doute que la forêt~~ existe indépendamment de l'étincelle. Mais est-il aussi évident que le diagramme des bifurcations existe indépendamment, non pas de "la" fluctuation, mais de la population fluctuante d'événements dont les équations déterministes décrivent seulement la résultante moyenne?

On est en fait tenté d'interpréter le jugement porté par Thom à propos des aspects stochastiques des bifurcations -y compris les erreurs qu'il commet à cet égard- comme le résultat d'un refus fondamental d'accepter les distinctions admises par les physiciens entre les différentes lois déterministes établies par la physique. Contrairement aux équations de la dynamique classique qui visent à une description complète de leur objet, les lois cinétiques qui servent à déterminer les instabilités et les bifurcations ne concernent généralement que des moyennes. Ces lois décrivent le

résultat d'une multitude de processus tels que les collisions
 -stochastiques au sens que Thom dit spinoziste- entre molécules, et
 les réactions que ces collisions entraînent parfois. La "dynamique
 déterministe" n'est donc qu'une description approximative et l'étude
 des fluctuations ne constitue pas une "graisse statistique sur un
 squelette déterministe" mais au contraire la réalisation d'une
 description plus fine, plus précise que la description
 déterministe. Certes les équation déterministes désignent le point
 de bifurcation, mais de manière approchée seulement. Dans certains
 cas (transitions de phase d'équilibre à une dimension) les
 fluctuations peuvent aller jusqu'à détruire les bifurcations, et
 dans d'autres elles modifient considérablement les valeurs critiques
 (modèle d'Ising à 2 et 3 dimensions). D'autre part c'est l'étude,
 stochastique, des mécanismes d'amplification des fluctuations qui
 ~~permet de comprendre l'existence de transitions de phase même là où~~
 les équations déterministes semblent les exclure. Enfin, lorsqu'on
 tient compte des fluctuations externes (c'est-à-dire du fait que le
 flux qui traverse le système et le maintient loin de l'équilibre est
 lui-même fluctuant), le diagramme des bifurcations peut se trouver
 transformé: des états stationnaires multiples apparaissent par
 exemple dans des régions où il n'y en avait pas.

René Thom affirme que le déterminisme est une conquête, et il a
 raison. Mais il ne peut traiter de déserteurs ceux qui soulignent la
 fécondité et l'intérêt des formalisations de l'aléatoire (depuis la
 mécanique quantique jusqu'aux chaînes de Markov) ni faire de la
 conquête du déterminisme l'unique enjeu de la science. On peut
 penser que telle est pourtant sa position, ce qui l'entraîne à
 mettre, d'une manière pour le moins abusive, la rationalité dans son

camp. Nous sommes ici dans le domaine de l'affectif: pour René Thom, tout modèle non déterministe est un péché, impardonnable si l'on y persévère.

Tout au long de son texte, Thom revient sur ce thème: le hasard ne peut recevoir de définition que "négative", il est l'expression d'un renoncement à comprendre, l'affirmation "qu'il y a des phénomènes que nous ne pourrions jamais décrire, donc jamais comprendre". Certes, reconnaît-il, il y a les difficultés liées à la mécanique quantique, où le hasard, s'il n'est qu'un possible, figure "malheureusement" dans un éventail où toutes les options sont pareillement "désagréables". Mais pour tout le reste, une description statistique "grossière, globale" peut, à la rigueur, s'avérer pratique par suite de la "dégradation statistique du ~~déterminisme", mais elle doit, pour ceux qui ne sont pas des~~ "apôtres de la désertion", rester avant tout un programme pour de nouvelles conquêtes du déterminisme. A la fin de son article, Thom va jusqu'à nous proposer une recette visant à "réinstaurer le déterminisme là où il tombe apparemment en défaut". Malheureusement, cete recette, vieille de plus de cent ans, a toujours échoué jusqu'ici. Déjà Helmholtz avait fait appel à des paramètres cachés pour tenter de justifier le second principe de la thermodynamique, mais Henri Poincaré devait mettre en évidence la faiblesse de cette argumentation dans ses "Leçons de Thermodynamique".

La situation n'est guère plus favorable aujourd'hui pour les partisans des variables cachées en mécanique quantique, comme l'a montré le récent livre de d'Espagnat. Quant au cas classique, mes collègues et moi avons pu montrer que le passage d'une description déterministe à une description statistique peut se faire d'une manière rigoureuse sans laisser de place à des paramètres cachés et sans introduire ce "flou statistique" cher à René Thom. Il n'y a là aucun aveu d'incompréhension ou d'ignorance: c'est la théorie physique elle-même qui désigne de manière parfaitement intelligible les classes de systèmes dynamiques pour lesquels une description statistique proprement dite est possible. Toute distinction entre l'"herméneutique" statistique et l'"élucidation effective" déterministe est donc ici particulièrement artificielle.

~~René Thom paraît accepter l'idée d'évolution chaotique, ce qu'il~~
appelle l'émergence de "l'indescriptible" à partir du "descriptible". Nous supposons qu'il accepte aussi la transformation du "descriptible" en "descriptible". L'enjeu est donc la genèse du "descriptible" à partir de "l'indescriptible", ou, pour éviter toute équivoque, de l'organisation macroscopique à partir du fluctuant. Ici, nous reconnaissons bien volontiers que le lecteur pourrait éprouver quelques difficultés à se retrouver dans une terminologie assez confuse. Ainsi, l'ordre par le bruit introduit par Von Foester signifie tout autre chose que l'ordre par fluctuation tel que nous l'entendons. L'examen des exemples donnés par Von Foester (voir, par exemple livre d'Atlan paru chez Hermann en 1972, "L'organisation biologique et la théorie de l'information") montre bien qu'il se réfère à un phénomène d'organisation dans le domaine de l'équilibre. Mais, en tout état de cause, il ne s'agit pas de spéculations liées à l'inspiration de tel ou tel individu; il suffit

d'assister à un film sur l'agrégation des acrasiales ou sur l'apparition des ondes chimiques pour voir une population désordonnée s'organiser à partir d'interactions élémentaires(2). De tels phénomènes, et avec eux, les lois des fluctuations loin de l'équilibre, sont actuellement étudiés dans le monde entier: il faut croire que "l'épistémologie populaire française" a un intense pouvoir de contamination.(3)

Face à cette situation, que nous propose Thom? Va-t-il, avec Auguste Comte (par rapport auquel sa position a plus d'une ressemblance), interdire au physicien d'outrepasser les schémas déterministes? C'est ce qu'il semble faire au moment où il affirme que la thermodynamique n'est qu'une thermostatique. De fait, sans l'interprétation statistique de la stabilité de l'état d'équilibre, ~~sans l'étude de son comportement par rapport aux fluctuations, un~~ tel état n'aurait que peu d'intérêt. Nous ne pourrions établir la distinction essentielle entre d'une part, l'équilibre et son voisinage et, d'autre part, la situation loin de l'équilibre où la distinction entre fluctuations et valeurs moyennes revêt des formes nouvelles. Ce n'est certainement pas la considération des schémas déterministes qui nous révélera l'ampleur des fluctuations, ou les phénomènes de communication et d'interdépendance spatiale, qui sont d'un intérêt fondamental pour le chimiste et le biologiste.

En ce moment où la physique est confrontée avec les problèmes passionnants du rapport entre le macroscopique et l'élémentaire, entre le global et le local, et est amenée à remettre en question les idées qu'inspirait le sens commun à propos des lois des grands nombres, il est vraiment affligeant de rencontrer des jugements péremptoires comme celui de Thom. Surtout lorsqu'ils s'accompagnent

de la distinction trop connue entre les thermodynamiciens "qui continuent à jouer" avec des méthodes éculées et les mathématiciens à qui l'on doit les "idées nouvelles". Là encore, il convient sans doute de ne pas s'attarder. Tournons nous plutôt vers les questions de principe qui devraient constituer l'axe du débat.

Ni dans "La Nouvelle Alliance" ni ailleurs, mon propos n'a jamais été de glorifier la fluctuation ou le bruit. Je suis, bien au contraire, persuadé que nous avons besoin à la fois de schémas déterministes et de schémas aléatoires pour décrire la complexité inattendue des phénomènes telle qu'elle nous a été révélée au cours des dernières décennies.

~~Il est de tradition d'opposer les schémas déterministes et les~~
 schémas aléatoires, d'où d'ailleurs la possibilité de deux dogmatismes opposés: le dogmatisme du hasard dont Monod n'était pas exempt, et le dogmatisme du déterminisme dont l'exposé de René Thom est imprégné. Or, s'il existe une surprise dans ce domaine des sciences c'est que ces deux vues sur la nature se complètent bien plus qu'elles ne s'opposent. Je voudrais en donner deux exemples, l'un dans le cadre de la description phénoménologique, l'autre dans celui de la description microscopique.

Dans le cadre de la description phénoménologique, un système homogène peut présenter loin de l'équilibre des phénomènes d'auto-organisation. L'état homogène (la "branche thermodynamique") cesse d'être stable et deux formes inhomogènes stables peuvent émerger au delà du point de bifurcation. C'est la situation à laquelle j'aime appliquer le qualificatif d'"ordre par

fluctuation". Alors que les équations macroscopiques déterministes définissent l'éventail des régimes stables accessibles au système, le mécanisme d'amplification de la fluctuation précise la manière dont le système choisit l'un de ces régimes. Si le diagramme est symétrique, en répétant l'expérience nous avons autant de chances de rencontrer une structure que l'autre. Supposons maintenant que nous fassions agir sur le système un champ extérieur, par exemple un champ gravifique, l'équivalence des deux structures pourra être détruite et le système sélectionnera de manière déterministe l'une d'entre elles. Nous passons ainsi, par une très légère modification des conditions de l'expérience d'un schéma probabiliste à un schéma déterministe.

Au niveau microscopique la situation est assez analogue. L'addition d'un petit terme à l'énergie du système peut donner aux trajectoires ce caractère aléatoire qui en fait des idéalizations inaccessibles à toute expérience concevable. Ici encore, nous passons insensiblement d'un schéma déterministe à un schéma probabiliste. L'existence de schémas probabilistes est étroitement liée aux concepts d'irréversibilité et d'évolution. La conception traditionnelle de la science était basée sur la notion de lois immuables pour lesquelles il n'y avait pas de distinction entre passé et avenir. Mais le fait le plus surprenant est que nous vivons dans un univers évolutif dont la fuite des nébuleuses et le rayonnement résiduel du corps noir nous apportent des témoignages qui semblent décisifs. Le temps tel qu'il apparaît dans les équations déterministes de la mécanique classique ou de la physique quantique n'est qu'un paramètre. Passé et futur y jouent le même rôle. L'irréversibilité ne peut apparaître que lors du passage à une description statistique. C'est un résultat que Boltzmann avait

déjà obtenu. Aujourd'hui, cent ans plus tard, on comprend mieux le rôle fondamental des phénomènes irréversibles. En dernière analyse, toute transformation chimique, toute cinétique, y compris celle qui englobe des particules élémentaires, correspond à des processus irréversibles. Nous ne pouvons dès lors nous limiter à des conceptions qui ne voient dans cette irréversibilité que la "dégradation statistique du déterminisme".

Bien au contraire, nous ne sommes qu'au début d'un élargissement des concepts traditionnels(4). Comment, en effet, concilier la notion de loi et la notion d'histoire étendue aujourd'hui à l'univers tout entier? On parle des lois de la biologie. Encore faut-il, bien sûr, qu'il y ait des êtres vivants. De même pour parler des lois de la matière il faut préciser les conditions dans ~~lesquelles celle-ci se trouve. Les conditions actuelles semblent~~ très différentes de celles qui régnaient dans l'univers au moment où il formait un milieu dense à température très élevée. Curieusement, c'est au début de l'histoire de l'univers et non à sa fin que nous sommes maintenant amenés à situer la célèbre mort thermique postulée par le second principe, c'est à ce moment que l'univers était proche d'un équilibre thermique que son expansion ultérieure allait rompre(5). Cette rupture de l'équilibre avec le passage progressif au non équilibre nous apparaît comme indissolublement liée à la genèse de la "complexité" que nous observons autour de nous. Devant l'ampleur de tels problèmes nous devons à la fois faire appel à des structures mathématiques qui soulignent le permanent, le stable et à d'autres qui permettent de prendre en compte l'éphémère, le fluctuant.

Ernest Renan, dans ses "Souvenirs d'enfance et de jeunesse" s'adressait au prêtre qui déclare "Je verrai toujours comme j'ai vu par le passé, et je ne verrai pas autrement", pour lui dire qu'on "respecte plus la vérité en se tenant dans une position telle qu'on puisse lui dire: "Traîne-moi où tu voudras; je suis prêt." " Peut-être une telle position est-elle déplaisante pour ceux des mathématiciens qui choisissent de continuer, dans le calme de leur bureau, à rêver d'un univers dans lequel il n'y aurait ni temps ni devenir, dans lequel une structure mathématique s'identifierait à l'intelligible. Ce détachement n'est pas permis au physicien. Sa quête comprend la recherche d'une adéquation des structures théoriques au réel; c'est presque malgré lui qu'il se voit obligé d'introduire des méthodes ou des concepts nouveaux.

Que l'extension du cadre conceptuel auquel nous assistons

aujourd'hui heurte certaines habitudes de pensée et conduite à agiter le spectre de l'irrationalisme et de l'antiscientisme, c'est là un phénomène bien compréhensible sur le plan psychologique et qui s'est déjà produit maintes fois au cours de ce siècle. Mais il devient particulièrement regrettable lorsque des mathématiciens de la valeur de René Thom s'en trouvent prisonniers.

Je remercie Mademoiselle Isabelle Stengers de l'aide qu'elle m'a apportée dans la rédaction de cette note.

3) La qualification d'épistémologie populaire française est fort curieuse. Nous pourrions couvrir des pages entières de citations d'auteurs de toutes nationalités. Nous nous limiterons à en produire deux, émanant de personnalités scientifiques éminentes, l'un allemand, l'autre américain. Manfred Eigen écrit dans "Das Spiel" : "L'homme n'est pas une erreur de la nature, mais sa conservation n'est pas assurée par celle-ci d'une manière automatique et nécessaire. L'homme participe à un grand jeu dont l'issue, pour lui, est ouverte" ... "Le hasard et la règle sont les éléments du jeu". Quant à l'américain Wheeler, il porte les considérations probabilistes à l'échelle de l'univers: "Il n'y a pas une histoire unique de l'univers. Il y a plutôt une certaine probabilité pour telle, telle, ou encore telle autre histoire de l'univers" (in "Our Universe: The known and the unknown" in The American Scholar, vol 37, P. 248-274, 1968).

4) Cette situation ouverte et problématique me fait profondément regretter le ton polémique que la nature des reproches qui m'ont été adressés m'a contraint à adopter. René Thom n'a-t-il pas lui-même contribué de manière éminente à détruire l'idée traditionnelle selon laquelle seul vaut un problème "bien posé", un problème qui n'admet qu'une seule solution? Or, c'est la fin de ce préjugé qui permet de penser l'articulation, et non plus l'opposition irréductible, entre loi et histoire. En vérité, le débat méritait mieux.

5) Il faut nuancer quelque peu l'affirmation selon laquelle l'Univers à son stade initial ait été proche de l'équilibre thermique. L'équilibre se rapporte essentiellement au rayonnement et aux

Notes

1) Il en est ainsi, par exemple, de l'identification entre système formalisable et système mécanisable, pour la justification de laquelle la thèse de Church est invoquée. René Thom a bien raison d'écrire que cette thèse a un caractère problématique. En fait, il est généralement accepté aujourd'hui que la notion de hasard ou d'aléatoire peut être formalisée de manière rigoureuse (voir, par exemple, CHAITIN G., "Randomness and Mathematical Proof", in Scientific American, mai 1975, p. 47-52; voir aussi l'article de Martin Gardner in Scientific American, novembre 1979, p. 20-34)

Le problème qui reste posé est celui de décider si telle suite de nombres est ou non aléatoire. Comme l'écrit Chaitin "Quoique le caractère aléatoire puisse être défini de manière précise, et puisse même être mesuré, on ne peut prouver qu'un nombre donné est aléatoire. Cette énigme établit une limite à ce qui est possible en mathématique". On peut remarquer au passage que cette position du problème est très proche de notre propre position épistémologique qui tend à rapprocher les concepts du déterminisme et de l'aléatoire. La physique mène à conclure à la vanité de l'opposition forte qui était traditionnelle entre ces concepts. Mais, en tout état de cause, le problème de la formalisation des théories stochastiques ou déterministes telle qu'il est traité en physique est très éloigné des problématiques auxquelles Thom fait ainsi allusion.

2) Les fluctuations donnent lieu à des phénomènes spectaculaires même dans le domaine de l'équilibre. Il suffit de rappeler l'opalescence qui apparaît au voisinage du point critique, étudiée dans les travaux classiques de Smolochovski.

Notes (suite)

leptons (particules légères). Par contre, la dominance de la matière sur l'antimatière, telle que la présente l'Univers que nous connaissons et qui semble s'être établie dès les stades initiaux, pose un problème non encore résolu qui, d'une certaine manière, rattache la théorie des particules élémentaires à l'origine de l'irréversibilité. La rupture de symétrie particule/antiparticule a libéré lors du refroidissement global de l'Univers des protons en excédent, qui allaient, à travers les transformations nucléaires, permettre la genèse de molécules complexes et, finalement, de la vie.
