De quelques enjeux philosophiques du phénomène chaos

par Éric Bois*

suivi de remarques de Jean-Michel Alimi

Les concepts du chaos et sa phénoménologie traversent aujourd'hui une large variété de champs scientifiques. La dynamique non-linéaire, la mécanique céleste, l'hydrodynamique, la physique expérimentale ou encore la chimie ont notamment rencontré et développé la phénoménologie du chaos. Ne serait-ce qu'en restant sur le terrain des sciences de la nature, le chaos s'avère un objet d'étude éminemment pluridisciplinaire. Mais de cet aspect pluridisciplinaire à ses invitations transdisciplinaires tout azimut, il s'est produit comme un "emballement", comme un phénomène de mode. Il s'ensuit que la grande diversité des discours, des techniques, expériences et approches théoriques qui conduisent à l'affirmation d'un comportement chaotique n'aide pas nécessairement à se forger une idée claire de sa signification épistémologique.

Le chaos dynamique se manifeste par une *limite de prédictibilité*. Ceci, tout le monde le sait ou presque. Est-il pour autant réductible à une limitation du calcul, une conjoncture pratique ? Que deviendrait la fameuse sensibilité numérique aux conditions initiales si les ordinateurs avaient une infinité de décimales !? La limite de prédictibilité, est-elle le signe d'une spécificité dynamique ? Le chaos est-il réductible à de la non-prédictibilité ? Autrement dit, au-delà de la limite de prédictibilité, trouve-t-on *immédiatement* et *nécessairement* une phénoménologie particulière ? Et si ce n'est pas le cas, qu'est-ce donc que le chaos ?

Aux entrailles du chaos, quelques clefs de lecture

À la base de la quintessence du chaos, se trouve l'enseignement apporté par l'étude approfondie des systèmes dynamiques. Les *systèmes dynamiques* sont par définition des systèmes dont l'évolution temporelle est décrite par un nombre fini d'équations *déterministes*. Les systèmes dynamiques, conservatifs ou dissipatifs[1], sont déterministes. Mais il existe une autre catégorie de systèmes où tel n'est pas le cas. Ces systèmes et leurs processus associés sont dits stochastiques. Dans les systèmes stochastiques, le déterminisme et le hasard sont volontairement et astucieusement mêlés ; ce qui ouvre le champ des combinaisons du chaos et du hasard. Les systèmes

* *Observatoire de Bordeaux*. *UMR CNRS 5804*. B.P. 89, F-33270 Floirac

[1] Les systèmes dynamiques peuvent être conservatifs ou dissipatifs suivant que l'énergie totale se conserve ou se dissipe (par perte ou par transfert). Les systèmes dynamiques conservatifs se caractérisent — et ceci rend spécifique leur étude — par l'existence de points fixes dans l'espace des phases (points stables et instables) et de solutions quasi-périodiques.

conservatifs, dissipatifs et stochastiques constituent très généralement *les trois différents cadres d'étude* des comportements des systèmes potentiellement chaotiques. Mais les systèmes dynamiques étant déterministes et suffisants pour produire du chaos[2], ils se présentent alors comme étant philosophiquement les plus sobres et scientifiquement les plus économiques — en particulier les systèmes conservatifs — pour cerner de façon sûre les ingrédients stricts qui font du chaos. Or, il s'agit d'interroger le rapport de l'impossibilité à produire des prédictions vis-à-vis de l'imprévisibilité réelle et intrinsèque.

Le cœur du chaos dynamique découle d'une propriété mathématique, celle de *non-intégrabilité* au sens de Poincaré.[3] Le chaos est conventionnellement défini par un comportement non quasi-périodique lié à l'instabilité, la non-linéarité et les résonances dans les systèmes non-intégrables. En conséquence, la signification épistémologique du chaos dynamique est fondée sur son essence mathématique. La relation entre l'instabilité et la chaoticité est alors que le système manifeste une *haute sensibilité* aux changements de conditions initiales: de petites causes ont de grands effets.[4] .

Ainsi, si le chaos issu des systèmes dynamiques conservatifs et dissipatifs se caractérise par une *limite de prédictibilité* et un apparent désordre des points, sur les coupes, aux allures de "fait du hasard", il n'est pas sans dissimuler un *déterminisme* très fort. Dans les systèmes dynamiques non-linéaires à plusieurs degrés de liberté, le chaos se produit assez généralement autour des résonances[5], mais ni les données d'entrée aléatoire, ni la complexité ne sont nécessaires à produire du chaos. Nulle intervention du hasard ne peut être invoquée. Le chaos dynamique est fondamentalement une conséquence de la nature non-intégrable des systèmes dynamiques de ce genre. Or les phénomènes de la nature sont généralement mieux représentés par des systèmes non-intégrables ! Il faut dire que la variété des équations intégrables, apprises à la Grande École, ne constitue qu'une infime sous-classe de l'immense variété des systèmes d'équations qui tisse le quotidien des chercheurs en dynamique non linéaire.

---

[2] Par exemple, le problème des 3 corps. Sa mise en équations demeure étonnamment simple compte tenu de tout l'enseignement dont il est porteur.

[3] Un système est dit *intégrable* s'il possède une intégrale indépendante du mouvement pour chacun de ses degrés de liberté. Cette intégrale est dite intégrale première; elle correspond à une loi de conservation d'une grandeur de la physique. Dans ses *Méthodes Nouvelles de la Mécanique Céleste,* Henri Poincaré montre que le problème des trois corps en interaction gravitationnelle n'est pas *intégrable.*

[4] Un exemple populaire est celui de l'effet dit "papillon" en météorologie dynamique via les équations de Lorenz (Lorenz, E., 1963, "Deterministic Nonperiodic Flow", *Journal of the Atmospheric Sciences* ***20***, 130-141).

[5] Les interactions mutuelles répétées peuvent déformer les trajectoires au point de perdre la stabilité.

Le « syndrome du chaos »

La grande vogue du chaos ne s'est pas développée sans répandre une certaine pathologie associée. Ce que j'appelle le « syndrome du chaos » correspond au fait qu'un phénomène peut présenter les symptômes du chaos sans pour autant procéder de cette pathologie. Ce syndrome prend sa source dans le fait d'identifier imprudemment les *indicateurs* du chaos avec les *preuves* du chaos. Dans ces conditions, l'on comprendra comment, se contentant des apparences du chaos, l'on passe à sa "prolifération".

Que la non-prédictibilité cache ou annonce un chaos ne répond pas du statut de ce dernier en regard des épreuves ordinaires de tout objet de science, c'est-à-dire schématiquement : la pratique, la théorie et l'observation, ou encore l'ordinateur, les mathématiques appliquées et l'expérimentation. *L'impossibilité pratique de calculer*, c'est-à-dire l'existence de limitations aux prévisions, renvoie aux propriétés mathématiques des équations qui sont intégrées. La sensibilité numérique aux conditions initiales résulte de l'instabilité intrinsèque dans les zones chaotiques des systèmes non intégrables. À l'essence mathématique du chaos correspond une *manifestation en pratique*. Mais ces équations peuvent approcher une réalité et ce chaos signifier quelque chose de naturel, tout du moins des aspects dynamiques comme la *perte de la permanence de la stabilité*.[6] Il est par conséquent à souligner que la limite de prédictibilité peut être soit pratique, soit "modèle-dépendant" mais elle peut aussi annoncer l'imprévisibilité naturelle. De la sorte, il est nécessaire de distinguer plusieurs degrés de signification du chaos déterministe, liés à ses protocoles de mise en œuvre : [7]

1. Un calcul « modèle-dépendant » conduisant à la seule affirmation d'une limite de prédiction, définit un premier niveau.
2. Un comportement dynamiquement chaotique, dûment établi selon une propriété interne au système dynamique, définit le second niveau.
3. Dans le troisième niveau, cette propriété interne est réellement en acte dans le « morceau » de nature représenté par le système.

Le chaos dynamique, deuxième et troisième niveau, signifie essentiellement qu'un mouvement chaotique peut explorer une large portion de l'espace des mouvements, ce qui correspond à un facteur naturel de *déploiement des possibilités dynamiques de la nature*. Au niveau macroscopique, le chaos dynamique n'est ni le hasard, ni le n'importe quoi, il

[6] À ce titre, le chaos traduit l'instabilité de la stabilité !

[7] Bois, E., 1997, "Le chaos, sens, contresens et cohérence", Comptes-Rendus de l'Ecole Thématique du CNRS *Chaos et Fractales dans l'Activité Solaire*, J.P. Rozelot (Ed.), 8-24.
Bois, E., 2000, "Les trois niveaux de signification du chaos dynamique", *Revue des Questions Scientifiques* (à paraître).

est cohérent, il est déterministe et, à son niveau le plus fort, signifie l'existence d'un *processus exploratoire* du mouvement, lequel traduit une réalité possible. Et cela même si, à ses niveaux inférieurs de signification, il n'en est assurément pas ainsi.

Le chaos et l'intention du chaos

L'intention du chaos**,** c'est ce que l'on voudrait faire dire au chaos, c'est-à-dire les raisons plus ou moins cachées d'un chaos non plus phénomène, mais érigé en vecteur d'idéologie plus ou moins philosophique. Ici, ce n'est plus le chaos qui instruit, mais l'idée du chaos qui attire et séduit. C'est pourquoi j'appelle ce phénomène socio-anthropologique *« le chaos et l'intention du chaos »* au point que l'on puisse parler aujourd'hui d'une sorte de phénoménologie du chaos.

Situons au préalable cette phénoménologie dans une approche plus vaste et actuelle de philosophie des sciences. La question du *réalisme*, par exemple, se voit aujourd'hui graduer de multiples genres tels *le réalisme abstrait, le réalisme lointain, le réalisme de principe,* et d'autres encore.[8] Le réalisme, même s'il ne sait plus très bien dé-corréler les strates de la réalité de celui qui la mesure ou qui la pense, le réalisme, c'est de toute façon l'accueil du réel tel qui l'est, incluant tout, tout acte, tout être, y compris soi-même. Aux notions classiques, en Science, de *réduction*, *maîtrise*, *prédictibilité*, *exhaustivité*... se substituent des notions et des concepts balayant aujourd'hui le champ des sciences, à savoir *irréductibilité*, *incertitude*, *imprédictibilité*, *incomplétude*, *indécidabilité*... La similitude de cohérence de ces nouvelles notions peut certainement contribuer à amorcer la question de savoir s'il ne s'agirait pas là, d'un nouveau paradigme en élaboration. Aussi pour mieux asseoir cette idée, l'on voudrait voir la chute du déterminisme et proclamer dans cette même veine l'*in*déterminisme ! Et bien non ! En tout cas pas avec le chaos !

Autre chose, l'on voudrait de ci de là que le chaos alimente la thèse du hasard érigé en système explicatif. Or c'est tout le contraire, le chaos se présente plutôt comme un territoire d'intelligibilité conquis à l'empire du hasard ! Michel Bounias, professeur de Toxicologie et de Biomathématiques à l'Université d'Avignon, l'a très bien compris lorsqu'il intitule l'un de ses articles *« Le hasard : battu par chaos ! »* [9] Le chaos, tout comme le hasard, exploite le possible, rien que le possible, jamais l'impossible.[10] Le chaos dynamique déploie les possibilités dynamiques d'un système dynamique.

---

[8] Lire à ce propos l'article de Delahaye (Delahaye, J.-P., 1991, "Le réalisme en mathématiques et en physique", *Pour La Science* ***159***, 34-42).
[9] *Science Frontières* ***30***, pp. 18-23.
[10] Qu'on se le dise dans les sciences de la vie !

Je conclurai en disant que l'apport de la science du chaos en Philosophie de la Nature est que le dualisme « *prédictibilité-imprédictibilité* » n'est pas l'alternative « *déterminisme-indéterminisme* ».

Remarques de Jean–Michel Alimi

Le chaos qui a été principalement évoqué ici est le chaos déterministe. Nous n'avons pas parlé du chaos quantique qui est de nature différente. Le chaos déterministe est particulièrement intéressant, il pose fondamentalement la question de la différence entre déterminisme et prévisibilité. Dans le chaos déterministe, les lois restent déterministes, ce qui est chaotique, ce sont les systèmes. En désaccord sur ce point avec Eric Bois, je crois donc que l'on peut définir le chaos déterministe comme une sensibilité extrême aux conditions initiales; et par-là même nous comprenons pourquoi nous devons distinguer déterminisme et prévisibilité.

Mon second commentaire concerne l'idée de chaos et d'évolution temporelle. Nous avons, je crois dans nos propos, toujours supposé que le chaos apparaissait après une évolution temporelle longue du système considéré. C'est effectivement le cas en mécanique céleste, où la nature chaotique est mise en évidence par le calcul d'exposant de Lyapunov, qui estime typiquement le temps sur lequel le système solaire exhibe des aspects chaotiques. Mais il n'est pas toujours possible de procéder de cette façon. Par exemple, en relativité générale où apparaissent également des systèmes chaotiques, cette théorie étant covariante dans le système des coordonnées la mise en évidence du chaos d'un système relativiste — comme par exemple l'univers mixmaster — à l'aide d'un exposant de Lyapunov ne tient plus. Une simple redéfinition du temps suffit à modifier sa valeur. Je crois qu'il vaut mieux parler de paramètre de contrôle au-delà duquel un système est chaotique et en deçà duquel il ne l'est pas.