

L'ENTROPIE CRÉATRICE

Thermodynamique fractale et quantique
de l'Univers, de la Vie et des Sociétés



Diogo Queiros-Condé

Jean Chaline

Ivan Brissaud

ellipses

Introduction

« Hélas ! dit la souris, le monde devient plus étroit chaque jour. Il était si grand autrefois que j'ai pris peur, j'ai couru, j'ai couru, et j'ai été contente de voir, enfin, de chaque côté, des murs surgir de l'horizon ; mais ces longs murs courent si vite à la rencontre l'un de l'autre que me voici déjà dans la dernière pièce, et j'aperçois là-bas [dans le coin] le piège dans lequel je vais tomber.

“Tu n’as qu’à changer de direction”, dit le chat en la dévorant. »
Kafka, fable écrite vers 1920. *Œuvres complètes de Kafka*, Gallimard.

Nous assistons aujourd’hui à une intégration systémique de nos sociétés par un flux planétaire d’informations qui opère à la vitesse de la lumière. Il s’agit d’une mise en connexion généralisée des espaces-temps humains, ce que le sociologue Jean Baudrillard nommait, la *Réalité intégrale*¹. Tout cela s’est accompagné par le développement d’une logistique d’accès aux produits de consommation et aux ressources de plus en plus mondialisés, dont l’entreprise Amazon est l’un des aboutissements actuels. Le monde se fait plate-forme. Cette distribution mondialisée ne peut se faire que par des technologies d’information de plus en plus rapides et sophistiquées. Tout cela semble évident.

Ce qui l’est moins, c’est que la mise en information du monde (*numérisation* selon certains) exige en contrepartie une perte d’espace, une forme de renoncement à ce qui nous entoure, un *sacrifice* de type social et spatial. Les confinements et le balisage urbain en liaison au contexte pandémique ont montré, partout dans le monde, de quel abandon de spatialité il peut s’agir. Il y a une liberté et une portée spatio-temporelle à laquelle les groupes humains sont poussés à se priver et même à renoncer s’ils désirent s’aligner sur une logistique d’échelle globale pilotée

1. Baudrillard écrit : « J’appelle *Réalité Intégrale* la perpétration sur le monde d’un projet opérationnel sans limites » (Baudrillard, *Le pacte de lucidité ou l’intelligence du mal*. Galilée, 2004).

par une puissance numérique qui les y invite fortement. Les boucles humaines sociales, économiques et politiques, boucles forgées au cours du temps sont mises sous pression pour se serrer, s'effacer et s'offrir, corps et âme, à une logistique externalisée.

Cette dynamique entre perte d'espace-temps et gain d'information structure profondément nos sociétés depuis le début du xx^e siècle grâce à l'industrie informatique dont les produits innervent de plus en plus notre espace-temps. Comprendre ce lien profond entre *perte d'espace* et *gain d'information* est l'un des objectifs principaux de notre ouvrage. C'est pourquoi nous avons décidé d'interroger l'évolution des sociétés humaines à travers le temps pour tenter de dégager une dynamique entre les logistiques spatiales qu'elles déploient et les réseaux informationnels qui les tissent de l'intérieur. Mais là où notre ouvrage se veut radicalement nouveau, c'est qu'il montre que ce balancement entre perte d'espace et gain d'information est de nature physique et peut se retrouver aussi bien dans l'analyse d'une particule relativiste ou celle des écosystèmes, que dans celle de la révolution industrielle en Grande-Bretagne. C'est pourquoi notre ouvrage s'inscrit résolument dans une quête scientifique d'ordre fondamental.

Depuis que l'idée darwiniste d'*évolution graduelle* des espèces à travers le temps a été remise en cause partiellement, notamment à travers l'idée d'une *évolution ponctuée* des espèces, alternant stases, sauts évolutifs, parfois abrupts et phases graduelles. Les chercheurs du vivant (paléontologues, anthropologues, écologues, biologistes, généticiens) se sont penchés sur l'évolution temporelle des systèmes vivants. Ces sauts évolutifs rappellent le domaine de la physique quantique avec ses fameux sauts quantiques entre deux états d'un système physique. Mais les sociétés humaines sont elles aussi soumises à des sauts évolutifs, des sauts radicaux qui les propulsent d'un état à un autre en un temps extrêmement court. L'Histoire humaine est émaillée de ce type d'événements. Y aurait-il un point commun entre ces différents domaines, entre évolution du vivant, mécanique quantique et sociétés ? Et si c'est le cas, alors existe-t-il une quantité physique qui pourrait embrasser dans un seul geste ces trois domaines ?

Mettant à profit une grande masse d'observations et de connaissances, la science récente s'est intéressée à l'occurrence temporelle de ces sauts et à la manière dont ils émaillent l'évolution des systèmes vivants et celle des sociétés humaines.

En travaillant sur les séquences temporelles définissant les étapes importantes d'un système physique, vivant ou humain, une *log-périodicité temporelle* a été mise en évidence dans de nombreux domaines.

L'origine de cet ouvrage réside dans une volonté de mieux comprendre le sens de la structure log-périodique temporelle des espèces mise en évidence en 1999 par Laurent Nottale, Jean Chaline et Pierre Grou¹. Une structure log-périodique avait peu avant été découverte dans les signaux sismiques (temporels) par Didier Sornette², une étude qui avait alors inspiré la grande communauté des chercheurs liés aux systèmes complexes.

Mais qu'entend-on par log-périodicité ? Il s'agit d'une périodicité temporelle, mais en coordonnées logarithmiques. Soit la date d'émergence (ou de naissance du système) T_0 , un système évolutif est défini par des états (stases) notés n , mais il est soumis à des sauts évolutifs qui interviennent à des dates notées T_n qui le propulse d'un état n à un état $n+1$. La structure log-périodique est définie par la relation suivante :

$$T_n = T_c + (T_0 - T_c)g^{-n}$$

avec deux paramètres T_c et g qui peuvent être déterminés à partir des dates données. La date T_c est une date limite critique qui a été interprétée comme marquant la saturation des capacités évolutives du système. Le paramètre g apparaît comme un facteur d'échelle donnant la mesure de la vitesse à laquelle se feraient ces sauts évolutifs, une sorte de hauteur de marche sur un escalier évolutif. Nous verrons dans cet ouvrage qu'il est possible d'aller beaucoup plus loin et d'inscrire la log-périodicité au cœur même de la physique fondamentale, puisque nous établirons, entre autres, un lien inattendu et fascinant entre la Relativité restreinte d'Einstein et la log-périodicité. Dans le sillage des travaux de Grou³ sur les systèmes économiques, la contribution d'Ivan Brissaud appliquée aux systèmes sociétaux, culturels et historiques est venue s'ajouter et nous a convaincus que la thermodynamique *via* une approche fractale et quantique pouvait nous mener à une interprétation physique et spatiale de la log-périodicité temporelle. Quel est donc le chemin scientifique qui nous a conduit à cette idée ?

1. Chaline, J., Nottale, L. & Grou, P. 1999. *L'arbre de la vie a-t-il une structure fractale ?* Le Point sur... C. R. Ac. Sc. Paris, 328 (IIa) : 717-726.

2. Sornette, D. & Sammis, C.G. 1995. Complex critical exponents from renormalization group theory of earthquakes: implications for earthquake predictions. *J. Phys. I France*, 5: 607-619.f.

3. Grou, P., Nottale, L., & Chaline, J. 2003. Log-periodic laws applied to geosciences. *Miscelanea en homenaje a E. Aguirre*, Zona Arqueologica, Arqueologia, 4 : 230-237.

Dans le sillage de la révolution fractaliste initiée par Benoît Mandelbrot, de nombreuses recherches ont montré des déviations à la fractalité pure dans des systèmes qui ont été qualifiés de *fractals dépendant d'échelle*. Dans le but de décrire ces dynamiques dans l'espace des échelles, la notion d'*entropie d'échelle* a été introduite par Diogo Queiros-Condé, une notion qui a permis de dériver une équation de diffusion de l'entropie d'échelle avec de nombreuses applications en physique. La question s'est rapidement posée de savoir quels étaient les liens de cette quantité avec l'entropie de Clausius, celle de Boltzmann, celle de Planck et celle de Gibbs-Shannon, ce qui impliquait aussi de bien comprendre les liens profonds entre ces trois entropies. Une passerelle a également été établie avec l'entropie non extensive de Tsallis¹. Cette réflexion nous a menés vers une interprétation spatiale de l'entropie. Ce sera l'objet de notre Partie I.

Un des objectifs principaux de cet ouvrage est en effet de proposer une nouvelle grille de lecture des systèmes complexes qui repose sur une interprétation géométrique thermo-fractale de la notion d'*entropie*. Historiquement, l'entropie a souvent été interprétée comme une mesure interne du *désordre* d'un système. C'est une interprétation qui aujourd'hui a trouvé ses limites et mène à de tristes impasses. Nous proposons dans cet ouvrage une interprétation physique qui dépasse ces limites et donne à l'entropie une valeur positive. *L'entropie devient alors créatrice !* Sans elle, nous le verrons, il n'y a pas de vie.

Au sortir de la Seconde Guerre mondiale, notre monde – saisi par la violence de l'accélération humaine générée par cette guerre – construit et s'intéresse fortement à ce qu'on nomme aujourd'hui les théories de la complexité. On observe ainsi l'émergence de la cybernétique, des fractales, de la théorie du chaos et de la criticalité auto-organisée. Dans ce mouvement, la thermodynamique et surtout la notion d'entropie sont toujours là : Von Neumann avec l'entropie des états quantiques, Shannon avec son entropie statistique et, bien avant de devenir le *père des fractales*, Mandelbrot avec sa quête d'un principe d'incertitude en thermodynamique. On peut aussi citer Tsallis avec la thermodynamique non extensive. L'entropie du trou noir introduite par Stephen Hawking et Jacob Bekenstein dans les années 1970 a revigoré le domaine de l'astrophysique et donné un espoir aux grands théoriciens de la gravitation quantique. Penrose y fait abondamment appel pour décrire ce qu'il appelle une cosmologie cyclique conforme de l'Univers. Enfin, Carlo

1. Un grand nombre de ces aspects sont développés dans un ouvrage récent : D. Queiros-Condé & M. Feidt, *Fractal and trans-scale nature of entropy*, Iste-Elsevier, 2019.

Rovelli, théoricien de la *gravitation quantique*, introduit la notion de *temps thermique* dans son approche des *boucles quantiques* et remet la thermodynamique au cœur de ses préoccupations.

En d'autres termes, la thermodynamique – science des transformations de l'énergie – et plus particulièrement la notion d'entropie rend de grands services au domaine de la complexité. Mais depuis toujours quelque chose rebute dans le concept d'entropie et tient à distance. Elle conserve un côté mystérieux et flou qui éloigne de toute compréhension claire des phénomènes. Et pourtant, l'entropie est omniprésente en sciences et pas seulement. Depuis Boltzmann, c'est un mot qui a largement diffusé hors du domaine des sciences : les philosophes, les historiens, les économistes en font aussi grand usage, mais dans un sens (*entropie = désordre*) qui ne convient pas, comme si l'usage maladroit de l'entropie générerait sa propre entropie. On rappelle que c'est sa maîtrise du Second Principe de la thermodynamique qui a permis à Planck d'aboutir à la loi de rayonnement du corps noir, ce qui a marqué la naissance de la physique quantique. Nous verrons d'ailleurs en fin de notre partie 1 les liens et les différences entre l'entropie de Boltzmann et l'entropie de Planck.

Plus notre monde se fait complexe à travers la multiplication des échelles d'observation accessibles aux instruments modernes, plus l'arsenal intellectuel nécessaire à sa description doit s'enrichir. Ces outils ne peuvent qu'être transversaux, afin précisément de saisir un grand nombre de cas et d'échelles. Nous savons désormais que cet arsenal doit contenir les géométries fractales et, plus généralement, les géométries trans-échelles. Nous savons aussi qu'il doit être capable de décrire une dualité inhérente à tout système qui est celle de son maintien et de sa dispersion dans le temps et l'espace. Tout système répond à cette double exigence qui paraît antinomique : *se maintenir et se perdre*. Il faut bien noter que la conjonction reliant le maintien et la perte est « *et* » et pas, « *ou* », ce qui relèverait d'une logique binaire. On découvre que le système, pour perdurer, doit vivre dans une troisième voie, dans un troisième état logique (une sorte de *tiers inclus* pour reprendre le concept du philosophe Lupasco) qui est tissé de dynamique entre un intérieur qui tire vers lui en quête d'un ancrage et un extérieur qui s'étire en quête de respiration et d'ouvertures sur le large. On imagine ainsi une sorte d'interface de l'être qui se plie et se déplie. Les géométries trans-échelles (et plus spécifiquement fractales) sont particulièrement utiles pour décrire une telle dynamique.

Mais elles ne suffisent pas, car l'énergie d'un système et celle qu'il échange avec son extérieur ne sont pas homogènes et possèdent une différenciation ou un dégradé interne. L'énergie peut, selon sa qualité, avoir une nature mécanisable, capable de produire du mouvement, une énergie orientée selon un axe de travail. On la nomme alors *exergie*. L'énergie peut aussi avoir une nature plutôt diffuse et dispersive sans capacité mécanisable, une énergie orientée transversalement ou latéralement à l'axe de travail. On la nomme parfois *anergie* mais, pour des raisons que nous expliciterons dans l'ouvrage, nous la nommons *dispergie* en référence à sa nature dispersée et dispersive. On comprend ainsi que l'orientation d'une énergie relativement à ce qui est défini comme un axe de travail possède une grande importance. Il suffit d'introduire un angle de dispersion entre l'énergie considérée et son axe de travail. Nous découvrons alors que cette façon de voir l'énergie peut se décliner en une approche géométrique dite des *chenilles thermiques* qui nous a permis de donner une interprétation simple et nouvelle de l'entropie. Notre ouvrage comporte 8 parties.

Dans notre partie 1, nous retraçons les principaux éléments de la thermodynamique avec un rappel des deux Principes de la thermodynamique. Nous nous focaliserons sur des représentations géométriques des phénomènes à travers la méthode des *chenilles thermiques*. L'entropie est décrite comme étant une mesure de la dispersion latérale de l'énergie. L'énergie apparaît comme formée de dispergie et d'exergie. L'exergie est l'équivalent mécanique d'une énergie, orientée selon l'axe de travail, tandis que la dispergie est le complémentaire formé par l'entropie, orientée selon un angle plus ou moins élevé avec l'axe de travail. Nous définissons donc la notion d'*angle entropique*, ce qui nous permet d'interpréter la constante de Boltzmann comme étant la plus petite déviation de l'axe de travail, le plus petit angle possible. Nous donnerons de nombreux exemples relevant des systèmes énergétiques où la notion d'entropie se révèle utile. Ceci nous conduira à interpréter la production interne d'entropie par l'intermédiaire de ce que nous nommerons l'*exergie-tampon*. Nous retracerons l'aventure de Planck dans sa découverte de la loi du corps noir et son utilisation de l'entropie pour y parvenir et ainsi permettre la naissance de la physique quantique. Nous spatialiserons l'entropie de Shannon de façon à bien se la représenter. Nous terminerons par une mise en relation de l'entropie de Boltzmann et de l'entropie d'échelle.

La partie 2 propose une théorie thermo-fractale qui a pour but de décrire la structure géométrique interne d'une particule relativiste en termes de géométrie fractale. Elle s'inscrit sur un chemin proche de la

thermodynamique de la particule isolée de Louis de Broglie mais, grâce à la spatialisation de l'entropie par la géométrie fractale, il nous a été possible de développer plus avant cette thermodynamique de la particule. Nous définirons une température de la particule relativiste ainsi que son contenu exergétique et dispergique. Notre hypothèse principale est de considérer que l'augmentation de vitesse d'une particule a pour effet de réduire la gamme d'échelles sur laquelle se déploie la structure fractale interne de la particule, ce qui implique aussi une variation de ses caractéristiques fractales. La masse relativiste est décrite par une longueur interne repliée. La masse devient ici une quantité purement géométrique, ce qui permet de comprendre simplement la loi du quantum $E = h\nu$ postulée par Planck, par un modèle fractal. On se souvient de la phrase d'Einstein s'arrachant les cheveux sur les paradoxes quantiques : « *si au moins on pouvait comprendre $E = h\nu$* ». Nous présenterons un modèle fractal de la particule qui nous permettra de comprendre de manière géométrique ce que sont la dilatation relativiste du temps et celle de la masse.

La partie 3 propose un modèle fractal du fonctionnement des écosystèmes dans ses aspects liés à la logistique d'accès aux ressources. Nous commencerons par rappeler les aspects multi-échelles spécifiques aux écosystèmes. Pour cela, nous introduirons la notion de *boucle logistique*. Nous proposerons, à travers l'exemple de la mise en logistique d'un archipel, une représentation du réseau d'accès aux ressources par une hiérarchie de boucles logistiques. Nous proposerons ensuite un modèle thermo-fractal quantique de la log-périodicité qui permet de donner à la log-périodicité temporelle une inscription spatiale particulièrement utile pour comprendre le fonctionnement des écosystèmes. La quantité physique de base est le temps d'interaction fractale entre le système et son environnement. Ce modèle nous mène à une interprétation claire du paramètre g qui devient le rapport de deux temps caractéristiques. Ce modèle fractal est directement inspiré de celui utilisé pour décrire la structure interne de la particule relativiste ce qui implique une étonnante proximité entre le facteur de gain g et le célèbre facteur de Lorentz de la Relativité restreinte.

La partie 4 porte sur les aspects énergétiques et informationnels du vivant. Nous y analysons les conditions physiques d'émergence du vivant, les éléments utilisés et les formes mises en place. Nous verrons que le vivant est profondément multi-échelles et tend, dans bien des cas, vers une forme de fractalité. Nous nous intéresserons aux différents métabolismes permettant au vivant de capter une énergie (à basse

entropie) et de la dissiper (*i.e.* disperser) sous forme de structures. Nous aborderons les domaines de la reproduction et celle de la transmission de l'information par le génome.

Notre partie 5 procède à un état de l'art sur l'application des fractales et de la log-périodicité aux systèmes vivants. Nous y rappelons les contributions de Erwin Schrödinger et celles, plus récentes, de Laurent Nottale et de Jeremy England.

La partie 6 s'intéresse aux conditions d'émergence de la révolution industrielle et des vecteurs d'invention qui en furent à l'origine. Nous tenterons d'expliquer pourquoi la révolution industrielle est partie de Grande-Bretagne. Nous montrerons qu'une structure log-périodique sous-tend la révolution industrielle. Nous donnerons des exemples d'évolutions log-périodiques dans divers domaines scientifiques comme ceux de la découverte des éléments chimiques, les accélérateurs de particules et celui des réseaux de communication. Une étude très particulière (aux accents sociologiques) de la dynastie Becquerel montre l'importance de la mémoire dans une dynamique log-périodique. Enfin, des dynamiques log-périodiques seront également présentées dans le domaine des aménagements et infrastructures techniques telles que les canaux et les remontées mécaniques sur les pistes de ski.

La partie 7 tente de comprendre les dynamiques territoriales d'expansion des empires et de montrer une structure log-périodique sous-jacente. Elle s'intéresse à l'évolution de la surface totale annexée par un empire au cours du temps. Nous commencerons par une étude de l'Empire romain *via* ses annexions territoriales, mais aussi une étude de ses voies de circulation. Dans une seconde étape, nous étudierons la séquence temporelle de l'unification de la France entre l'an 1000 et 1789. Nous aborderons le cas très différent de l'unification de l'Allemagne, puis celui des États-Unis, ainsi que l'expansion de la Russie. Nous analyserons le déploiement dans le temps de l'Empire colonial français. Enfin, nous proposerons une étude log-périodique des systèmes économiques de la Chine et de l'URSS. Nous finirons par analyser l'évolution des grands pôles économiques à travers le temps.

La partie 8 s'intéresse au domaine des arts et de la religion. Nous y étudions l'évolution des courants artistiques en peinture, des styles dans l'évolution du jazz et l'évolution temporelle des ordres religieux en France. Nous montrerons l'existence d'une dynamique log-périodique dans ces divers systèmes.