



L'Étonnante diversité du temps

Dans une perspective pluridisciplinaire, les « Carrefours d'idées », créés et animés par Hédi Aboueleze et Jean-Pierre Otte, présentent, autour du thème du temps, un ensemble de savoirs et de passions jouant comme à l'intérieur d'un kaléidoscope.

Chaque mardi, découvrons un texte nouveau, comme une pièce ajoutée au puzzle, avant de comprendre ce que signifie leur somme, et de nous faire une idée multiple, fertile et diversifiée de la façon dont on appréhende le temps à l'heure où il n'est question, dans les médias, que des grands dérèglements climatiques.

CHRISTOPHE LETELLIER

TEMPS ET MOUVEMENT : UNE DUALITÉ INCONTOURNABLE

*Le temps, ce mouvement, ce cycle,
cet engrenage dans lequel nous sommes pris
depuis toutes ces années qu'il y a des hommes sur terre.*
Krishnamurti

À l'aube du XX^e siècle, les travaux relatifs à la propagation de la lumière conduisent à relier intimement l'espace et le temps dans le cadre de la relativité restreinte où s'illustrèrent Hendrick Lorentz, Henri Poincaré, Albert Einstein ou encore Hermann Minkowski. Depuis l'Antiquité, l'espace est le lieu de description des objets et de leur position. La notion de temps a été introduite avec la socialisation des hommes, qu'ils aient voulu non seulement synchroniser leurs actions mais également établir une chronologie des événements. Le temps est un référent indispensable à toute synchronisation, mais il n'émerge pas naturellement détaché de réalité physique. Comme le mentionne Krishnamurti, le temps est à l'origine de la pensée, à la source de notre activité intellectuelle ; il n'est donc pas surprenant que les difficultés inhérentes au concept de temps se manifestent dès que nous commençons à y penser (Saint-Augustin). Il est tel une entité immatérielle qui ne se manifeste que par l'évolution d'autres entités matérielles. L'apparente régularité des corps célestes a initialement favorisé le décompte de ce temps qui s'écoule en fonction des lunaisons, des éclipses, des conjonctions, etc. Ce

n'est que lorsque des moyens plus raffinés de quantifier ce temps qui s'écoule que le monde céleste a perdu sa belle régularité au profit d'anomalies que les astronomes se devaient de décrire : de fait, les astres sont désormais rarement utilisés comme marqueurs du temps et des phénomènes a priori plus réguliers comme des processus nucléaires font désormais référence. Sans référent extérieur, l'homme ne dispose pas d'une horloge biologique indépendante à la régularité irréprochable. Son cœur bat pourtant une pulsation, mais elle n'est pas régulière, fluctuant au gré des activités, des événements, laissant ainsi place à une impression toute subjective de la chronologie des événements. Selon le contexte, l'écoulement du temps lui apparaît lent ou rapide.

Une fois encore cette perception fluctuante de l'écoulement du temps se relie au mouvement. Le temps n'existe que lorsqu'il y a mouvement ; sans mouvement, pas de temps. Nous retrouvons ceci avec le zéro absolu des températures (-273°C) : à cette température, il n'y a plus aucun mouvement, tout est figé. Il n'est alors plus possible de définir le temps car il n'y a plus aucun processus possible qui permette de le mesurer, c'est-à-dire de disposer d'instantanés différents les uns des autres. Ensuite, la théorie de la relativité nécessite l'introduction d'un temps local lié à l'observateur : en d'autres termes, il n'y a pas de temps absolu universel. Ceci résulte du fait qu'il serait alors nécessaire de synchroniser toutes les horloges simultanément ; or ceci ne peut se faire, au mieux, qu'à la vitesse de la lumière, c'est-à-dire de manière non rigoureusement simultanée. À cela s'ajoute l'état psychologique et d'action de l'individu : de là, il en résulte une perception incroyablement individualisée du temps.

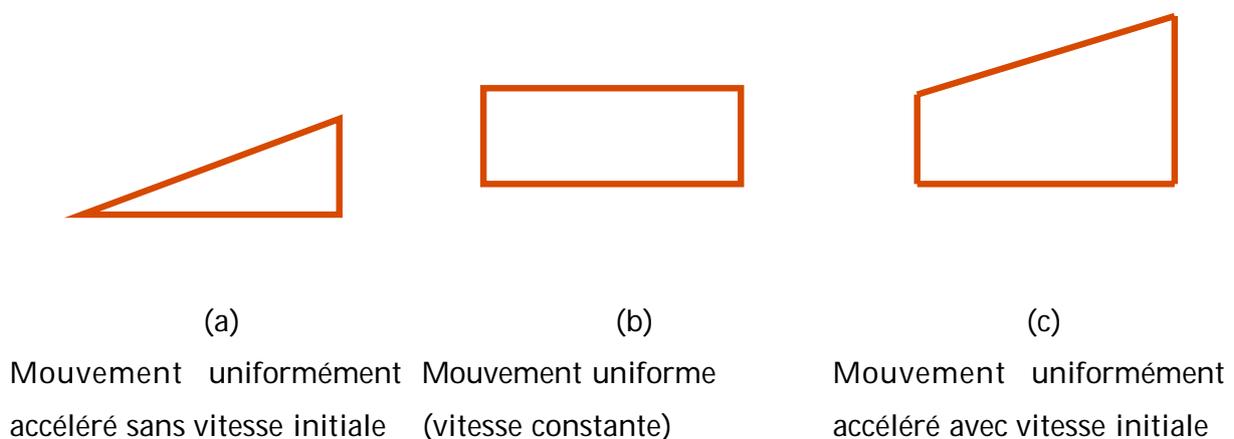


Fig. 1 : Représentation géométrique de l'évolution du mouvement. L'extension (le temps) est figurée par une droite horizontale. En chaque point de cette droite, on élève une verticale dont la hauteur est proportionnelle à l'intensité de la qualité (la vitesse).

Ce n'est qu'au Moyen-Âge tardif que Nicole Oresme (1325-1382 – évêque de Lisieux), partant du fait que « *toute chose mesurable doit pouvoir être imaginée à la manière d'une quantité continue* », commença à décrire – représenter – le mouvement en fonction du temps ¹. En construisant une représentation géométrique de l'évolution de la vitesse en fonction du temps (Fig. 1), Oresme parvint à la première loi sur le mouvement uniformément accéléré : « *La distance parcourue est égale à la moitié du*

¹ N. Oresme, *Tractatus de figuracione potentiarum et mesurarum difformitatum*.

produit de la vitesse maximale par la durée du parcours. » Ce théorème fut utilisé, entre autres, par Galilée dans sa démonstration de la loi de la chute libre.

Ce n'est pas par hasard que le temps ne fut que tardivement introduit dans la grande famille des grandeurs utilisées dans la description des phénomènes naturels, car le temps se mesure difficilement. Galilée utilisait des clepsydres dont la précision était loin d'égaliser la précision des observations astronomiques de Tycho Brahe : c'est l'une des raisons pour lesquelles l'astronomie se développa avant la mécanique. Par ailleurs, une longueur se mesure avec un objet inanimé – une règle ou un mètre – tandis que le temps nécessite un mécanisme complexe produisant d'une manière ou d'une autre une pulsation. Le temps se bat ! Le musicien bat la mesure... Ce battement, cette pulsation, est assuré, par exemple, par le balancier d'une horloge. Ceci illustre un constat indéniable : le temps ne peut exister, ne peut être défini, sans mouvement.

La dualité temps-mouvement commence à se préciser : le temps n'émerge qu'accompagné du mouvement. La description du mouvement requiert la notion de vitesse, c'est-à-dire une distance parcourue entre deux points et un temps de parcours. La vitesse se présente déjà comme le produit d'une relation entre positions – espace – et temps. Pour être calculée, la vitesse nécessite de « figer » le mouvement à deux instants différents : le mouvement devient connaissable par les états successivement visités. Prendre conscience de l'écoulement du temps implique par conséquent, la différenciation de deux états différents (de mouvement) à des instants distincts. Le temps, dont l'écoulement est continu, ne s'appréhende ainsi que par l'intermédiaire d'une perception discrète et ponctuelle. Le mouvement réel est continu – au moins lorsqu'il s'agit de phénomènes macroscopiques – et le principe du déterminisme impose que l'état présent permette la connaissance de l'état futur. Ceci se fait grâce à l'existence de relations définissant la vitesse à partir de la connaissance de l'état présent : ce sont des équations différentielles. Ces équations décrivent, pas à pas, l'évolution du système étudié à partir d'un état initial donné. La succession des états forme alors le mouvement du système.

Tout système évoluant dans le temps définit un système dynamique. Lorsqu'il est décrit par des équations mettant en relation l'état présent avec la vitesse correspondante, ce système dynamique est continu, dans le sens où la progression peut se faire par pas infiniment petit. Dans certaines circonstances, la description du mouvement se fait en reliant l'état présent à l'état qui lui succède après un intervalle de temps donné : c'est par exemple ce qui se passe lorsque nous regardons l'évolution d'une population en effectuant un comptage au 1^{er} Janvier de chaque année. L'écoulement du temps est alors discontinu, le système est dit « discret ». Le système demeure déterministe dans la mesure où le futur reste déterminé par le présent.

Le déterminisme est traditionnellement associé à une prédiction d'un état futur du système à partir d'un état présent ; la prédiction peut être réalisée dans le passé ou dans le futur. Cette acception résulte essentiellement de la remarque donnée par Laplace : « *Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée, et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'Univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à nos yeux.* » Laplace ayant réussi à décrire des variations séculaires du mouvement de Jupiter et Saturne sur des durées de l'ordre de quelques milliers d'années,

soit de l'ordre de grandeur de l'âge de la terre alors estimé, il faisait preuve d'une confiance inconsidérée et attendait de la description des mouvements plus qu'il n'était permis. De ce point de vue, passé et futur présentent une certaine symétrie par rapport au présent qui se révèle comme une singularité. Précisons que, si la prédiction des états futurs garde une réalité limitée dans le temps, ce n'est pas le cas de celle dans le passé ; en effet, les systèmes dissipant de l'énergie sous forme de chaleur interdisent toute prédiction dans le passé. Une telle propriété résulte du fait que deux états présents peuvent donner le même état futur. Ainsi, si le déroulement du temps est renversé, un état présent peut donner deux états futurs, il y a violation du principe du déterminisme. Notons que le mouvement des planètes ne présente pas cette propriété le plus souvent rencontrée dans les processus naturels : il est ainsi possible de renverser le temps comme l'avait fait Laplace pour dater à 3102 avant Jésus-Christ des observations indiennes.

Ainsi, pour la plupart des processus naturels, le déterminisme se construit de manière asymétrique selon la flèche du temps dans la mesure où il assure la détermination du futur sur la base du présent ; mais ceci ne peut se faire que si la connaissance du passé a permis l'élaboration des relations entre présent et futur. Pour revenir à la notion de système dynamique, les équations qui le définissent sont identifiées sur la base d'un passé préservé, et agissent sur l'état présent pour prédire le futur. Aussi, le présent n'est pas suffisant pour prédire puisque le passé est requis pour l'élaboration des équations. La chaîne causale des événements est donc inévitablement orientée du passé vers le futur. De ce point de vue, notre futur est déterminé par les relations entre présent et futur qui émergent de notre passé. Passé et futur ont ceci de commun qu'ils ne sont pas réels : l'un n'existe plus, l'autre n'existe pas encore. Le futur ne peut exister qu'en tant que possible à travers la prédiction. Seul le présent existe sans restriction. Sa valorisation par les philosophies orientales – Zen, Bouddhisme, etc. – n'est pas anodine : seul le présent est directement accessible à nos sens et à nos actes. S'il est évident que nous ne pouvons agir sur le passé, il en est de même sur le futur. Présomptueux, nous pensons en être capables, mais ce n'est toujours que via le présent. L'action prévue sur le futur dépend toujours des actes présents et, lorsque ce futur devient présent, c'est finalement la succession des présents passés qui déterminent ce futur présent. Comme l'a fort bien écrit Oscar Wilde, « *Méfie-toi de ce que ton passé te réserve !* »

De cette lecture des trois temps – passé, présent et futur – il ressort que le passé est base de toute connaissance, le présent de toute action et le futur de tout espoir. Passé et futur sont datés et, par-là même, figés. Seul le présent offre un statut dynamique. Il reste que, puisque la datation requiert de figer le temps, le présent, dynamique n'est pas daté, par essence ! Le présent apparaît alors comme une singularité temporelle, carrefour des passés se croisant pour influencer notre évolution, et à l'origine des futurs possibles (Fig. 2). Notre présent est ainsi une réalité très locale gouvernée par le passé.

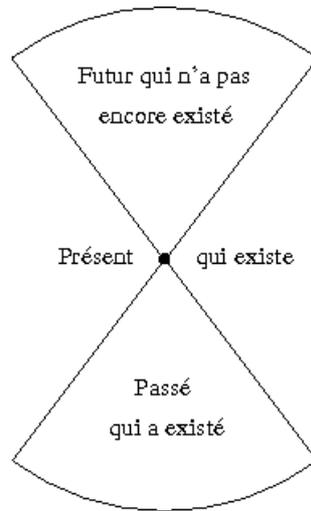


Fig. 2. Asymétrie entre passé et futur : croisement au niveau du présent, singularité spatio-temporelle, qui contribue à rendre locale la définition du temps.

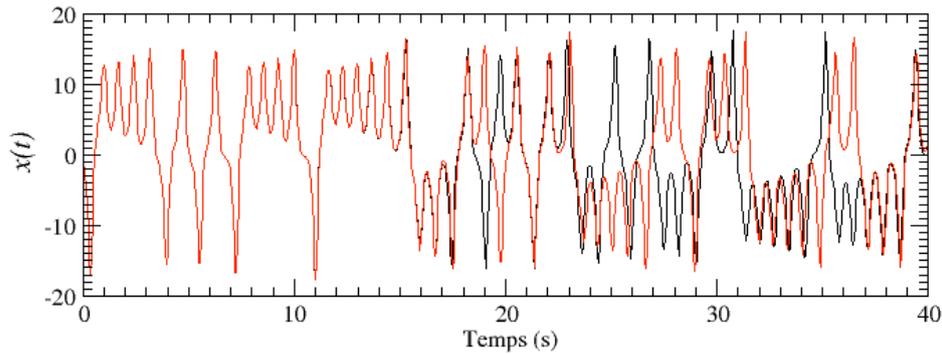
Le passé est constitué d'images, datées, qui font référence à un temps discret. Le présent s'ancre dans l'évolution des sensations, du concret où le temps n'apparaît qu'implicitement. Le passé n'œuvre que par les images, les affectations que nous renvoient nos pensées : mais la pensée est construite et ne correspond jamais à la réalité. Seul le présent est réalité et ce, bien que nos sens soient immédiatement interprétés et traduits en termes de pensées. Le futur est inaccessible : nous pouvons bien le concevoir, le prévoir sur un court instant. Mais dès que nous nous perdons sur des échelles de temps trop importantes, il nous devient impossible de dire avec certitude ce que demain sera. Ceci peut être relié directement aux limites de transmission de l'information. Dans la mesure où nous supposons que tout signal se déplace, au plus, à la vitesse de la lumière, il nous est alors possible de connaître notre passé avec une certaine extension spatiale : plus nous remontons dans le passé éloigné, plus nous pouvons connaître un passé spatialement éloigné. En effet, il nous est relativement aisé de connaître notre propre passé ; il l'est moins du passé d'un ami vivant à quelques kilomètres. Un laps de temps, lié à la transmission de l'information par quelque moyen que ce soit, est toujours nécessaire pour que nous soyons – très imparfaitement – informé du passé de notre ami. Déjà le passé nous offre un accès limité – sans compter les aveuglements dont nous faisons régulièrement preuve pour l'appréhender.

Le futur ne peut être accessible en raison de la flèche du temps : pour assurer un retour à notre présent, il nous faudrait remonter dans notre futur ! Connaître aujourd'hui notre futur impliquerait d'être capable de renverser l'écoulement du temps, de se projeter dans cet état futur puis de rajeunir. Or, nous savons tous que ceci est impossible. De ce point de vue, le futur n'a aucune réalité, il n'est que pure conjecture ou, en d'autres termes, il existe en puissance mais ne nous est pas accessible ! Aussi, au lieu de nous tourner aveuglément vers notre futur qui demeure à jamais inaccessible, concentrons-nous sur notre présent qui regorge de notre passé.

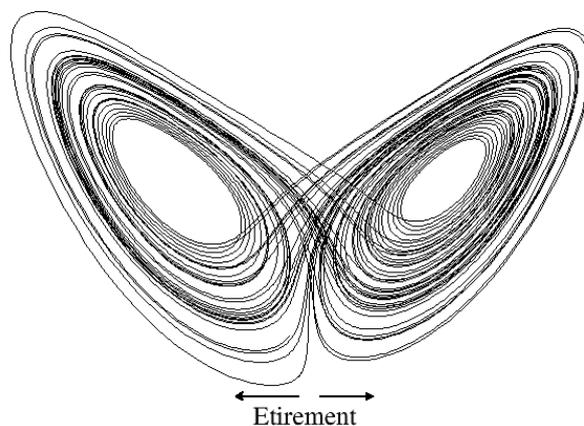
La notion de déterminisme peut se traduire par le fait que les mêmes causes produisent toujours les mêmes effets. Traditionnellement, nous y associons implicitement la contrainte que les effets sont toujours proportionnels aux causes. Si ceci est vrai pour les systèmes dits linéaires, cela ne l'est plus lorsque les systèmes sont non-linéaires. La propriété de non-linéarité se traduit justement par le fait que les effets ne

sont pas proportionnels aux causes comme cela est le cas pour les systèmes linéaires. Une conséquence d'importance est que de petites causes peuvent avoir de grands effets ; c'est l'effet papillon si galvaudé. De manière plus précise, une telle propriété se traduit par le fait qu'un système dynamique, dont l'évolution en fonction du temps est connue à partir d'un état initial, soit très sensible aux conditions initiales. En d'autres termes, si l'évolution d'un système non linéaire à partir d'un état donné est comparée à l'évolution de ce même système, mais à partir d'un état très légèrement différent du précédent, il est observé qu'à court terme l'évolution est quasi-semblable à la précédente mais qu'au-delà d'un temps donné, l'évolution est très différente de l'évolution précédente. Ainsi, les systèmes non linéaires, bien qu'ils soient déterministes, ne peuvent voir leur évolution prédite à long terme. De telles évolutions sont dites chaotiques. L'évolution de l'atmosphère répond à ces critères de déterminisme non linéaire : ainsi, nous savons tous que les conditions météorologiques ne peuvent être prédites de manière fiable très longtemps à l'avance.

Comme l'avait bien compris Henri Poincaré dès sa thèse de 1878, l'étude des systèmes non linéaires ne peut être réalisée sans introduire une nouvelle approche de l'évolution temporelle – le mouvement. Pour cela, plutôt que d'utiliser des équations mathématiques, Poincaré eut recours à une trajectoire représentative de l'évolution du système qui était tracée dans un espace défini par l'ensemble des grandeurs physiques nécessaires à la description complète des états du système ; cet espace est appelé *espace des phases*. De manière à illustrer la rupture conceptuelle alors introduite, prenons l'exemple du premier système chaotique qui ait été découvert, celui du météorologiste Edward Lorenz. Au début des années 1960, Lorenz voulait comprendre pourquoi les prédictions des conditions météorologiques échouaient toujours de manière aussi évidente. Pour cela, deux réponses étaient possibles : soit les modèles utilisés pour l'évolution de l'atmosphère étaient trop simples, soit les processus physiques sous-jacents possédaient une propriété intrinsèque qui faisait obstacle à ces prédictions. Utilisant un modèle simplifié du phénomène principal gouvernant les mouvements de l'atmosphère – la convection, processus selon lequel l'air chaud monte et l'air frais descend – il montra que les échecs répétés dans la prédiction des conditions atmosphériques prenaient leur source dans la nature même des phénomènes convectifs, la « simplicité » des modèles n'étaient pas la cause de ces échecs. L'évolution du phénomène convectif qu'il modélisa présentait une grande sensibilité aux conditions initiales malgré la nature déterministe évidente. Utilisant les recommandations de Poincaré, il étudia l'évolution du système à l'aide d'une trajectoire tracée dans l'espace des phases. Ainsi, Lorenz traça le premier attracteur chaotique. Cet attracteur, maintenant connu sous le nom d'attracteur de Lorenz (Fig. 3), se présente comme deux ailes, séparées par une zone extrêmement sensible aux conditions initiales : une légère perturbation appliquée lorsque la trajectoire redescend au milieu de l'attracteur, et au lieu d'aller à droite, elle va à gauche ou vice versa. La moindre perturbation appliquée dans cette zone rend immédiatement la prédiction impossible. Appliquée dans des zones plus éloignées de cette région centrale, une prédiction relativement correcte de l'évolution du système peut se développer jusqu'à ce que la trajectoire visite la zone centrale. Cette variabilité dans la capacité à prédire des météorologues se traduit par les indices de confiance qui nous sont donnés avec les prévisions météorologiques quotidiennes.



(a) Evolution temporelle de l'une des variables du système de Lorenz à partir de deux conditions initiales différentes.



Étirement = grande sensibilité aux conditions initiales

(b) Attracteur de Lorenz dans l'espace des phases pour deux conditions initiales différentes.

Fig. 2. Attracteur solution du système de Lorenz. Avec une structure typique en forme de deux ailes de papillon, il présente une zone centrale très sensible aux conditions initiales.

Avec la représentation dans l'espace des phases, Lorenz fut le premier à représenter non seulement l'évolution d'une solution chaotique mais encore de la représenter non plus en fonction du temps mais sous la forme d'une trajectoire dans l'espace des phases. Si deux conditions initiales très proches l'une de l'autre sont utilisées successivement, les deux évolutions d'une variable en fonction du temps divergent rapidement l'une de l'autre et deviennent rapidement très différentes (Fig. 3 a). Toutefois, lorsque les deux trajectoires résultantes sont représentées dans l'espace des phases, les structures ainsi décrites sont clairement équivalentes : globalement, les deux attracteurs ne peuvent être distingués l'un de l'autre. Ce qui différencie ces deux trajectoires, c'est la manière dont l'attracteur est visité. En d'autres termes, les deux trajectoires visitent de manière différente la même structure. Lorsqu'une variable est représentée en fonction du temps, il est plutôt délicat d'établir si les deux trajectoires sont régies par une seule et même dynamique sous-jacente, ou non. Cette difficulté repose essentiellement sur le fait que l'évolution temporelle ne présente aucun degré évident de permanence. Dès que l'espace des phases est utilisé, la structure de l'attracteur – globalement invariante sous l'action du temps (elle demeure inchangée au cours du

temps) – se révèle permanente et peut, par conséquent, être décrite. La nécessité de disposer d'une représentation permanente pour en autoriser la description avait déjà été comprise par Platon. Le passage de la description en fonction du temps (Fig. 3a) à une représentation dans l'espace des phases (Fig. 3b) permet donc de s'affranchir du temps. Passer de la représentation d'une variable en fonction du temps à une trajectoire dans l'espace des phases permet de commuter le statut du temps d'explicite à implicite. L'attracteur se présente donc comme un objet figé dans le temps : l'évolution temporelle se manifeste par le déroulement de la trajectoire sur cette structure. La rupture épistémologique de la théorie du chaos réside donc dans le passage à une description globale du mouvement, et non plus en le suivant pas à pas au fur et à mesure que le temps s'écoule.

Le mouvement avait commencé à être décrit lorsque Nicole Oresme avait introduit la représentation de l'évolution d'une grandeur (la position) en fonction du temps. Tant que les systèmes considérés se comportaient relativement simplement (mouvement périodique), cette représentation suffisait. Avec la généralisation de la prise en compte des termes non linéaires, c'est-à-dire une description plus fine des processus, une telle description ne pouvait suffire. Le temps, qu'il avait été si difficile d'introduire, faisait obstacle, par sa présence, à une compréhension fine du mouvement. Il fallait donc passer à un degré d'abstraction supplémentaire en introduisant une représentation ne dépendant plus explicitement du temps : dans l'espace des phases, la trajectoire se développe alors que le temps s'écoule mais ce dernier n'a aucun rôle privilégié puisque c'est la structure permanente qui est étudiée.

Malheureusement, il arrive que cette structure évolue encore dans le temps ; les difficultés de description resurgissent et le travail du « chaoticien » se complique, c'est le problème de la non-stationnarité des processus. Cela veut dire que certains paramètres du système évoluent dans le temps, entraînant une dérive du mouvement. Par exemple, un pendule dont la tige s'allongerait avec le temps verrait ses oscillations se modifier au cours du temps : au lieu d'être périodique – en l'absence de tout frottement – le mouvement du pendule pourrait décrire des structures variées dépendant directement de la loi d'évolution de l'allongement de la tige. Une évolution erratique de la longueur de la tige entraînerait irrémédiablement la perte du déterminisme, pourtant présent dans le cas du pendule « classique ».

Comme nous l'avions vu lors de l'estimation de la vitesse, il était nécessaire de figer le temps pour la décrire. Dans l'espace des phases, le niveau de description est global : l'attracteur permet de figer le mouvement non pas à un instant donné mais sur un intervalle de temps. Seul l'attracteur permet la récupération d'une structure permanente et, par conséquent, la description du mouvement.

Christophe Letellier, physicien et chaoticien, est professeur à l'Université de Rouen et dirige un Groupe de Recherche sur la dynamique des ensembles complexes. Ses travaux de recherches portent sur la théorie du chaos depuis plus de quinze ans, avec un intérêt particulier pour les applications au secteur bio-médical (système cardio-respiratoire notamment). Animé par une fascination pour les symétries héritée de la physique des particules, il a récemment publié avec Robert Gilmore (Drexel University, Philadelphie) un livre intitulé The Symmetry of Chaos (Oxford University Press). Il est également l'auteur de l'ouvrage, plus accessible, Le chaos dans la nature (Vuibert).