Hasard, contingence, chaos, incomplétude et autres curiosités : le monde ne serait-il pas profondément incertain ?[1]

Version 1 (Alain Pavé, le 14 octobre 2012)

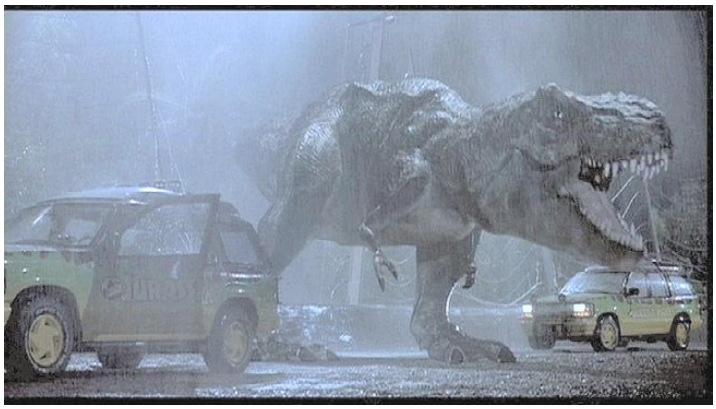
Un jour tu verras
On se rencontrera
Quelque part, n'importe où
Guidés par le hasard…
Chanson : « un jour tu verras »,
paroles Mouloudji, Musique Georges Van Parys1954

Résumé : Nos sociétés sont à la recherche d'un ordre où tout serait comme une mécanique bien huilée et prédictible à l'image du Cosmos des Grecs. Or, plus nous avançons dans la connaissance de notre monde force est de constater que ce n'est pas le cas et que ce ne le sera peut-être jamais. Une explication possible est que les systèmes dits complexes qui composent ce monde, et le monde lui-même, ont une propension à engendrer spontanément des aléas. C'est tout particulièrement le cas des systèmes vivants. Ces aléas peuvent leur être bénéfiques ou, au contraire, gravement dommageables. La présence, l'émergence ou la mise en place de régulations voire d'autorégulations permettent de limiter l'occurrence et les conséquences de ce hasard endogène et de n'en garder que les effets considérés comme favorables. C'est aussi le cas pour les aléas de l'environnement, pour lesquels des régulations individuelles ou collectives évitent souvent les conséquences néfastes. Dans ce texte, nous examinons comment le couple hasard - régulation intervient chez les êtres vivants, dans les objets de la physique, puis dans les systèmes technologiques, économiques et sociaux. Nous noterons que même des systèmes formels, comme les mathématiques, n'échappent pas à une forme d'incertitude. Pour ce qui relève des initiatives et des volontés humaines, il faut garder à l'esprit la double nécessité, d'une part d'un hasard créatif et innovant et, d'autre part, du contrôle de son expression pour éviter que les systèmes qui l'engendrent ne soient mis en danger, comme c'est peut-être le cas aujourd'hui pour le système économique mondial, suite aux politiques de dérégulation.

1. Introduction : un hasard omniprésent

Dans « Jurassic Park », réalisé par Steven Spielberg à partir du roman éponyme de Michael Crichton, un système très sophistiqué dérive brusquement. Avant les incidents majeurs, le personnage Ian Malcolm, spécialiste de la théorie du chaos, prévient les participants à la « visite test » des risques d'insécurité liés à la complexité du système que constitue ce parc. On connaît la suite, le *Tyrex* et les *Velociraptors* s'en donneront à cœur joie ! Ce film présente de façon plaisante ce qu'il peut se passer si un système comportant une part de nature, une autre de technologie, conçu et géré par des humains, n'est pas suffisamment régulé. La seule prévision possible est que l'imprévu est forcément prévisible.

[1] Dans « un petit voyage au pays des quantas », Etienne Klein critique l'emploi du mot « incertitude » pour le célèbre principe physique d'Heisenberg. J'ai d'abord été convaincu que ce que je voulais dire était plus proche du concept d'indétermination (d'un système) que de celui d'incertitude (liée à la mesure de variables de ce système). L'incertitude dépend bien sûr de l'indétermination intrinsèque, mais aussi des caractéristiques du dispositif de mesure et de son interaction avec le système observé. E. Klein signale que la confusion est en partie liée à la traduction, tout en soulignant qu'Heisenberg a lui même hésité. Après discussion, je suis cependant revenu à l'idée d'incertitude, sans doute plus immédiatement compréhensible, car perceptible dans « notre vie de tous les jours ».



Jurassic Parc : Ian expliquant à Ellis les raisons de l'indétermination d'un système complexe, et le premier résultat, la libération du Tyrex !

Au-delà du roman, l'histoire de notre planète, celle de la vie sur la terre, celle de nos sociétés, même celle de nos machines, aussi sophistiquées soient-elles, montre que des phénomènes qualifiés d'aléatoires sont fréquents. Le hasard, la contingence qui en découlent les rendent incertains et jouent un rôle décisif dans le fonctionnement de notre monde. On peut alors supposer raisonnablement que *tout système un peu complexe, non linéaire, est indéterminé*[2]*.* Un tel système est aussi soumis à des perturbations aléatoires externes venant de son environnement. Ces perturbations peuvent amplifier sa propre indétermination et l'incertitude des observations faites sur lui. Réciproquement, il est aussi générateur d'aléas pour son environnement. Pour ces raisons, on imagine déjà que l'avenir de ce type de système et de ce qui l'entoure est difficile à prévoir.

1.1. Hasard et histoire

Sans hasard, un système ne changera pas au cours du temps, ou il le fera, mais d'une façon progressive, continue et prévisible. Le hasard ponctue ce système d'événements imprévisibles *a priori*, tant dans leur nature que dans leur fréquence d'occurrence, et cela même si l'on peut identifier des tendances lourdes. Il le munit ainsi d'une histoire. C'est aussi à cette condition qu'on peut parler d'évolution.

Par exemple, un extraterrestre observant les débuts de la vie sur la Terre aurait pu deviner que le « système vie » de notre planète donnerait lieu à une évolution biologique ; il aurait peut-être pu faire l'hypothèse d'émergence, un jour, d'une intelligence. En revanche, la forme humaine dépositaire de l'expression la plus sophistiquée de cette intelligence est purement conjoncturelle. Il n'aurait pas pu prévoir non plus la succession d'événements qui a construit l'histoire de la vie, les aléas environnementaux exogènes aux systèmes vivants, mais aussi les événements endogènes à ceux-ci.

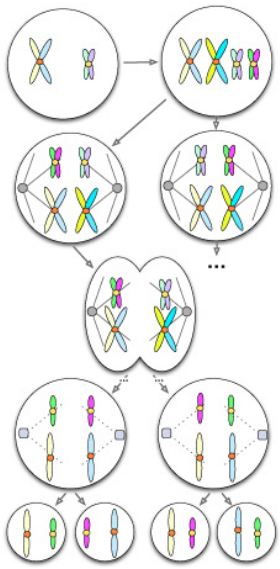
[2] Pour quelques précisions sur ce qu'on entend par cette expression, le lecteur pourra se reporter à l'annexe.

Plus généralement, il apparaît que notre monde et même_notre univers ne peuvent être connus d'une façon précise et exhaustive. Une partie nous est irrévocablement inaccessible et la simple définition de cette partie est difficile, même si certains de ses éléments peuvent être identifiés. Comme l'écrit Michael Brooks (2011) : « Ce que l'on ne saura jamais », mais cela n'empêche pas de tenter d'en savoir le plus possible. L'histoire n'est pas écrite à l'avance, si ce n'est éventuellement qu'en moyenne et globalement, mais pas dans le détail. Par exemple, on peut anticiper certains grands phénomènes, comme la durée de vie du soleil, les positions relatives des planètes sur le long terme. À un niveau plus microscopique, cette histoire est accessible *a posteriori* et c'est l'un des grands enjeux que de la reconstruire pour mieux comprendre les évolutions passées et les mécanismes à l'origine de ces évolutions.

1.2. Expression de l'incertitude et ses limites

L'incertitude est aussi plus ou moins importante selon le système observé. Par exemple, elle peut être limitée grâce à des effets statistiques, comme dans le cas des fluides où les molécules qui les constituent sont soumises au mouvement brownien très aléatoire : les propriétés microscopiques sont très incertaines, alors que des propriétés macroscopiques sont presque parfaitement prévisibles ; c'est ce que traduit la « loi des gaz parfaits ». La limitation de l'incertitude peut également résulter de processus d'interactions ou de rétroactions apparus spontanément pour les systèmes naturels, par exemple chez les êtres vivants, ou avoir été conçus afin d'assurer la permanence et le « bon fonctionnement » d'un système construit par l'homme ou sous son contrôle, comme les systèmes technologiques.

1.3. L'exemple du vivant



Méiose : mélange aléatoire des chromosomes dans les gamètes résultant de cette division cellulaire.

Chez les êtres vivants, lors de la division cellulaire, les chromosomes se dupliquent puis se distribuent aléatoirement, anciens et nouveaux, entre les deux cellules filles, mais de façon à ce que la formule chromosomique soit conservée dans chacune d'entre elles pour assurer leur bon fonctionnement (chez une espèce diploïde, donc munie de n paires de chromosomes, le tirage aléatoire est semblable à un pile ou face pour chaque paire et leurs copies). C'est l'une des multiples issues de l'évolution : la distribution aléatoire engendre une variabilité génétique (rôle du hasard) et la répartition équilibrée permet d'assurer un bon fonctionnement (nécessité de survie). Il n'empêche que lors de telles divisions, il peut se produire diverses erreurs, des copies non conformes. Le plus souvent, les cellules produites ne sont pas viables. Elles sont éliminées dès le départ, ou ne donnent pas lieu à des lignées persistantes.

C'est une forme de sélection darwinienne dont certains auteurs disent qu'elle est très importante (Kupiec, 2009). Une autre issue est la formation de lignées pathologiques, c'est par exemple le cas pour les cellules cancéreuses. Pour les cellules germinales, les erreurs de division non létales peuvent conduire à des descendances qualifiées d'anormales, généralement non fécondes. Il reste que ces erreurs peuvent aussi avoir des effets favorables. Il est bon de souligner que nous sommes peu outillés pour détecter ces effets. C'est sans doute normal, l'urgence est dans la détection des pathologies, des dysfonctionnements mettant en jeu la vie de l'organisme. En revanche, en s'inscrivant dans un terme plus long, il serait important d'identifier les effets favorables, les erreurs positives, les copies non conformes, plus efficaces, les mieux adaptées et non pathologiques. Il serait tout aussi important de faire la part des processus darwiniens dans le fonctionnement des organismes, de s'intéresser aux lignées somatiques, à la part d'aléas qui les concerne et de régulations de l'expression de ces aléas.

Pour continuer sur cet aspect aléatoire, on remarque plus généralement que les systèmes vivants peuvent engendrer du hasard à leur propre bénéfice, ce qui leur permet de résister collectivement à des perturbations environnementales et de leur conférer des capacités évolutives. Mais ce hasard endogène se traduit aussi par une incertitude irréductible sur l'état de ces systèmes vivants et donc des difficultés à prévoir leur avenir, sauf dans des cas extrêmes de pathologies incurables ou à très long terme et en moyenne.

Cette incertitude dépend du système en question, des variables que l'on observe ainsi que des processus endogènes de régulation. Pour les systèmes vivants, elle n'est pas très grande et limitée à quelques fonctions pour les organismes dont les paramètres physiologiques sont assez précisément régulés, elle l'est plus pour les populations, notamment pour assurer une diversité génétique, facteur de résistance collective aux fluctuations environnementales, et encore plus pour les communautés et les écosystèmes, aussi pour résister à ces fluctuations, voire à de véritables accidents (épidémie, conséquences d'éruptions volcaniques ou de chute de météorites, etc.). Ainsi, incertitude et indétermination, filles du hasard endogène, produit par des processus biologiques et écologiques, plus ou moins autorégulées dans leur amplitude et leur fréquence, ont comme conséquence directe la résilience des systèmes vivants. On retiendra qu'un effet incident des aléas sur la structure et la dynamique des écosystèmes est le maintien de leur biodiversité. Et ces aléas leur confèrent, et c'est peut-être le plus important, des capacités évolutives.

Plus encore, les mécanismes darwiniens, basés sur le triplet : « variation - reproduction – sélection », semblent s'exprimer à tous les niveaux d'organisation du vivant, de l'intracellulaire à

la biosphère. Les régulations modulant la dynamique de ces processus. On aurait alors là une lecture unifiée du vivant.

Pour une discussion détaillée et approfondie de ces divers aspects, on pourra se reporter aux dernières publications de l'auteur : 2007[a], 2007[b], 2010 et 2011.

1.4. La biodiversité est-elle prédictible ?

Quand on s'intéresse à la biodiversité, ce concept globalisant, comme nous l'avons déjà souligné, sa dynamique est fortement dépendante du hasard produit par les êtres vivants. En effet il est à l'origine de leur diversification et à une augmentation corrélative de la biodiversité. Celle-ci est ensuite limitée par des processus de sélection naturelle, eux aussi en grande partie aléatoires[3]. La prévision des états futurs de cette biodiversité est donc très difficile, surtout à long terme. De plus, à l'indétermination fondamentale due à la nature des processus en cause, il faut ajouter l'incertitude liée à la démarche scientifique. Par exemple, la majorité des problématiques liées à ce concept de biodiversité est accaparée par une discipline, à savoir l'écologie. Elle n'en donne qu'une vision partielle au niveau des populations et de communautés, alors que de nombreux processus sont d'origine moléculaire[4]. La référence presque unique à l'espèce pose aussi problème si tant est que cette notion soit arbitraire, définie par les scientifiques, et sur des critères arbitraires qu'ils ont choisis[5], même si elle recouvre une certaine réalité biologique (fonctionnelle et évolutive). La notion d'espèce est même fluctuante au cours du temps avec des changements de critères ou même simplement de terminologie, comme l'a montré par exemple Paul Arnoult (2006) : un changement de nom est parfois assimilé à la disparition d'une espèce. Lors du regroupement de ce qui était identifié comme plusieurs espèces différentes sous un même nom, les autres peuvent être considérées comme représentant des espèces disparues. Enfin, si le mot hasard fait partie du vocabulaire courant des biologistes et écologues, reconnaissant par là même son importance, il n'est jamais défini et son origine n'est pas réellement recherchée. En revanche, la statistique et le calcul des probabilités nous permettent d'en analyser et même de prévoir certaines conséquences, mais « en probabilité » (la génétique des populations nous en fournit d'excellents exemples).

Pour toutes ces raisons, on imagine les difficultés et même les risques des prédictions. Et quand on en fait, il faut en évaluer l'incertitude. Néanmoins, tenter de le faire est essentiel, notamment en construisant des modèles qui seront au moins des outils d'accumulation des connaissances sur

---

[3] La sélection est aussi artificielle, pilotée par l'homme. Elle conduit à limiter la variabilité dans les descendances successives pour optimiser un ou plusieurs critères lies à la production ou à la résistances des organismes sélectionnés. L'expérience montre néanmoins que les performances des organismes sélectionnés continûment diminuent au bout d'un certain temps. On est alors oblige de reconstituer une variabilité génétique.

[4] Attention, ce n'est pas parce que l'écologie utilise avec bonheur des outils moléculaires comme des micro séquences d'ADN pour évaluer la biodiversité, que cette discipline en propose une vision intégrée, notamment des mécanismes biologiques qui la gouvernent Par exemple, elle ignore encore largement, les dynamiques moléculaires et cellulaires ainsi que beaucoup des aspects génétiques.

[5] On pourra se référer aux travaux de Guillaume Lecoîntre pour mieux comprendre la démarche des systématiciens et les limites de cette démarche (cf. par exemple, Lecoîntre 2008).

ce sujet central, mais aussi en tentant d'avoir des données les plus fiables et précises possibles. On en est encore loin.

2. Discours sur l'incertitude

Importance du hasard, des processus le produisant, des régulations qui en limitent sa portée pour éviter de sortir des conditions de vie, et pour en garder « la partie utile », notre raison a longtemps refusé ces idées en cherchant derrière les faits des causalités multiples, donc des déterminismes. L'indétermination et l'incertitude qui en découlent sont alors vues comme un manque de connaissances et comme la conséquence de l'indépendance des causes menant à un effet donné. À la limite, si l'on pouvait connaître tous les facteurs impliqués, il n'y aurait plus d'indétermination. Tout serait précisément explicable, tout serait prévisible, voire maîtrisable et contrôlable. Cette vision scientifique déterministe nous influence encore largement.

Une autre façon est de voir le hasard comme contingent, un phénomène dont on ignore l'origine, mais observable par ses effets. Une explication encore différente réside dans l'intervention d'une volonté divine, insondable : les voies du Seigneur sont impénétrables[6]. Notre propos étant scientifique, cet aspect des choses sort du cadre de cette réflexion.

Cependant, dans la vision déterministe, nous réalisons vite que la recherche des causes peut être longue et peut-être même inutile. Mais devrions-nous pour autant rester les bras croisés ? Aussi a-t-on inventé le calcul des probabilités qui a permis de raisonner sur l'incertain, sur les « causes fortuites », comme les nommait Pascal, sans pour autant faire d'hypothèses sur les origines du hasard. C'est le cas par exemple des jeux de hasard, souvent utilisés à des fins pédagogiques, qui utilisent des dispositifs mécaniques, comme le simple pile ou face, le jeu de dés ou la roulette des casinos. La description du dispositif et de la manipulation donne une illusion de simplicité alors que le processus est complexe et donne des résultats difficilement prévisibles, qu'on peut qualifier comme des produits du hasard. Le calcul des probabilités traite bien de ces résultats, mais il ne dit rien sur ce qui les produit. Par ailleurs, l'idée des causes multiples, des facteurs inconnus, ne pose aucun problème particulier pour développer la théorie des probabilités, ni pour son utilisation pratique. Si bien que ces mathématiques du hasard font preuve d'une grande efficacité et de brillants mathématiciens, physiciens et biométriciens s'y illustrent[7]. Mais au bout du compte, on soigne les symptômes sans rechercher les mécanismes producteurs, les petits génies farceurs fabriquant du hasard.

En résumé, on a d'un côté la vision déterministe avec de jolis modèles efficaces permettant de représenter et de prévoir des situations physiques « simples », et, d'un autre côté, un excellent

[6] « Quelqu'un disait que la Providence était le nom de baptême du Hasard, quelque dévot dira que le Hasard est un sobriquet de la Providence » (Chamfort)

[7] Rappelons que la première médaille d'or du CNRS a été remise à un probabiliste, Emile Borel, en 1954, et que la première médaille Field couronnant à un probabiliste a été décernée en 2006. Il s'agit de Wendelin Werner, professeur à l'université de Paris-Sud.

outil de traitement de l'incertain, de l'aléatoire, les deux domaines étant mis en relation par la présumée multiplicité des causes. En gros, si l'on identifiait toutes les causes et tous les processus, tout serait prévisible avec une précision aussi grande qu'on le veut. Mais, nous allons voir que, dès le début du XXe siècle, tout ce beau schéma est ébranlé.

2.1. Du côté de la physique et des mathématiques : du certain à l'incertain, du déterminé à l'indéterminé, du démontrable à l'indémontrable

Dans les années 1920, les physiciens montrent qu'il existe une indétermination fondamentale. C'est l'énoncé d'Heisenberg sur l'« incertitude », qui a donné lieu à des débats animés, scientifiques et philosophiques. De fait, Heisenberg montre qu'on ne peut pas simultanément déterminer la position et la quantité de mouvement d'un électron orbitant autour d'un noyau, et cela avec la plus grande précision possible, et que le modèle probabiliste de la mécanique quantique, proposé par de Broglie est mieux adapté pour représenter les phénomènes aux niveaux atomique et sub atomique, que le modèle planétaire des électrons orbitant autour du noyau, comme des planètes autour du soleil (le modèle de Bohr). La littérature sur le sujet est suffisamment importante pour ne pas insister dessus.

Par ailleurs, dès le début du XXe, on voit émerger une grande ambition chez les mathématiciens, celle de construire un grand édifice théorique, une cathédrale formelle, où tout serait démontrable à partir d'un nombre limité d'axiomes et de règles de dérivations bien construites. C'était l'ambition de l'école de Hilbert. Même si certains comme Henri Poincaré sont alors dubitatifs, on aimerait y croire, sinon en rêver. Simultanément, Bertrand Russell et Alfred North Whitehead tentent d'établir les principes de bases des mathématiques (*Principia mathematica*). Pour cela, ils complètent la formalisation de la logique, ce qui permet ensuite à Kurt Gödel d'aller plus loin et de démontrer que la construction de cette cathédrale et d'une machine à démontrer des théorèmes n'est pas possible : pour un système formel un peu compliqué, en l'occurrence l'arithmétique, on ne peut pas assurer qu'il soit à la fois non contradictoire et « complet », c'est-à-dire que tout énoncé vrai est démontrable. Si l'on admet qu'il n'est pas contradictoire, et il a été construit pour, en éliminant progressivement les paradoxes, il existe donc potentiellement des énoncés vrais, mais indémontrables. Peu de temps après, Alonzo Church et Alan Turing, indépendamment l'un de l'autre, prouvent qu'on ne peut pas non plus décider *a priori* si un énoncé vrai, en l'occurrence une conjecture, est démontrable ou pas. En quelque sorte, même un système formel complètement conçu par l'homme, s'il est un peu complexe, présente une part d'indétermination. En effet, un énoncé, dont l'exactitude a été vérifiée un grand nombre de fois ne peut pas être considéré comme vrai en toute généralité tant que la démonstration n'en a pas été faite. Là réside toute la puissance des mathématiques, mais aussi leurs limites : on ne pourrait décider de la non-démontrabilité d'un énoncé qu'après avoir essayé une infinité de démonstrations, ce qui est évidemment impossible. On notera au passage que les méthodes et techniques mises au point

par Alan Türing pour ses démonstrations sont à l'origine de l'informatique. En effet, pour cela il invente un outil original : une « machine » formelle dénommée « Machine de Turing » qui sert de modèle pour la construction des premiers ordinateurs.

Dans les années 1960, le météorologue Edward Lorenz met en évidence ce que l'on appelle le « chaos déterministe ». Simulant numériquement un modèle mathématique météorologique simplifié, il constate que les résultats sont bizarres, erratiques et extrêmement sensibles aux conditions initiales. Début des années 1970, dans un but pédagogique, il baptise ce phénomène « effet papillon » : les phénomènes météorologiques étant de nature chaotique, une très faible perturbation à un endroit, par exemple un battement d'ailes de lépidoptère, pourrait être à l'origine d'un cyclone à l'autre bout de la planète. Après avoir vérifié qu'il ne s'agissait pas d'une erreur dans les calculs, il en vient à admettre les résultats : un modèle déterministe, c'est-à-dire n'incluant pas de termes probabilistes, peut exhiber une cinétique erratique, irrégulière, oscillante, mais apériodique. Un tel comportement est considéré comme inhabituel à l'époque. En définitive, le mot chaotique est choisi, il est médiatique. Commence alors l'aventure du chaos déterministe. Il faut néanmoins noter que l'existence de telles propriétés, et plus particulièrement la sensibilité aux conditions initiales, avait été avancée par Henri Poincaré, puis Jacques Hadamard au début du XXe siècle. Au bout du compte, ces résultats balayent alors l'idée préconçue que la trajectoire calculée, avec le type d'équations utilisé, change peu en partant de deux conditions initiales voisines. C'est ce qu'on avait souvent observé et l'on en avait fait une généralité alors que ce n'est observable que dans des cas simples, linéaires ou presque. En introduisant des non-linéarités et en augmentant la dimension des équations, le chaos devient possible.

Parmi les phénomènes physiques, ceux relatifs à la circulation des fluides sont importants. On peut en observer dans la vie courante : la circulation de l'eau dans une rivière quand le courant est rapide et qu'il y a des obstacles ou les mouvements d'air soudains d'amplitudes et de directions variables, aussi bien au ras du sol qu'en altitude. Ces derniers peuvent perturber la tranquillité de l'équipage et des passagers d'un avion. Ces phénomènes appartiennent à la catégorie des turbulences, dont les modèles ont des propriétés de type chaotique. En revanche, si les courants sont faibles et ne rencontrent pas d'obstacles, le système est alors linéaire et le flux est alors un « long fleuve tranquille ».

2.2. Le hasard et le monde vivant

Il est bon d'y revenir. En effet, dès que l'on s'attaque à l'étude scientifique du monde vivant, il faut se rendre à l'évidence, nous entrons dans un monde où le hasard règne en maître, avec son corollaire : la production d'une grande diversité. On en arrive rapidement à la constatation que la vie a pu apparaître, se maintenir et évoluer grâce à sa propension à se diversifier. Puis il devient de plus en plus évident que le hasard, la variabilité et la diversité qu'il produit ne sont pas que la conséquence d'événements fortuits, extérieurs aux systèmes vivants, mais résultent de

processus endogènes, biochimiques, biologiques ou écologiques. De plus, il apparaît rapidement que ces processus ne peuvent résulter que de l'évolution et la rendent alors possible. Le vivant engendre donc du hasard, et il en a besoin, y compris pour faire face à celui auquel il est soumis, celui de son environnement.

Il a fallu du temps pour se rendre à cette idée et ce n'est pas encore gagné parce que l'image qu'on se fait de l'évolution est encore celle d'une production de machines vivantes bien ordonnées, bien structurées, avec des organes et des fonctions très sophistiquées, des régulations multiples. On va même jusqu'à chercher des ordres sous-jacents aux « écosystèmes » et comme c'est plutôt le désordre qui les caractérise, on espère que grâce aux processus d'auto-organisation, un ordre va émerger. Le hasard serait donc un résidu d'évolution, appelé même à disparaître, inutile alors d'en chercher l'origine.

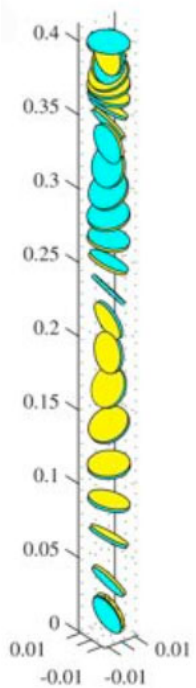
Or, ces beaux schémas sont mis à mal : le hasard apparaît comme le moteur principal de l'évolution, il est même au cœur du vivant. Pour les écosystèmes, il est un facteur de résilience et de maintien de leur biodiversité. C'est un changement total de paradigme qui est en jeu : faire la part du hasard nécessaire, des processus qui le produisent. Cela étant, il existe des réseaux multiples d'interrelations, certains d'entre eux participent à des régulations. Nous en avons trouvé beaucoup. Il s'agit par exemple des associations entre végétaux et micro-organismes qui facilitent la croissance de certaines plantes. Inversement, le parasitisme et la prédation en limitent l'expansion. Il est essentiel de mieux comprendre les processus, pour les utiliser, voire les contrôler. En revanche, il ne faut pas partir dans une quête effrénée pour expliquer ce qui l'est plus simplement par le hasard et plutôt partir à la recherche de ce hasard, de ce qui le produit et de voir ce que nous pouvons en faire.

Tout cela posé, l'on observe une grande diversité d'êtres vivants qui sont soumis au filtre de la sélection, elle-même très aléatoire. Il faut maintenant s'éloigner de la vision mécanique des systèmes vivants, très efficace pendant plusieurs siècles, au moins depuis Descartes : les organismes ne sont pas des automates remplis de rouages, encore moins les écosystèmes (Dorit, 2011, Hubbell, 2001, Pavé, op.cit. , Lévêque et al., 2010). On peut imaginer ces derniers comme constitués d'objets en relations constituant des réseaux locaux, conjoncturels. De proche en proche, ces réseaux forment un tissu occupant un espace. Les relations écologiques relient des objets, en l'occurrence des organismes, constituant respectivement des liens et des nœuds d'un réseau écologique. Les objets et les relations sont continuellement changeants de façon principalement aléatoire, mais peuvent exhiber des préférences locales, caractérisées par la distribution des possibles, qu'on appelle le filtrage environnemental. Par exemple, une jeune pousse d'arbre sera plus ou moins favorisée selon les conditions environnementales locales. C'est cette souplesse dans l'arrangement qui explique la résilience, la permanence et la capacité adaptative des écosystèmes naturels.

Le hasard s'exprime aussi dans de nombreuses autres situations biologiques : fuite d'une proie devant un prédateur (Drivers et Humphries, 1988 et 1967), division cellulaire déjà évoquée, choix de partenaires pour la reproduction dans une population, etc.

2.3. Les probabilités et les mécanismes générateurs d'aléas

Quand on fait du calcul des probabilités et quand on l'enseigne, on utilise les exemples parlants des jeux de hasard (le pile ou face, le jeu de dés, la roulette des casinos, le loto, etc.). Pascal lui-même se sert de ce support intellectuel pour mener à bien ses raisonnements (cf., par exemple, l'ouvrage de Philippe Picard, 2007). Or ces jeux mettent en œuvre des « lois de la mécanique », dont on pourrait penser que les systèmes qui y sont soumis sont prévisibles. En fait, nous savons maintenant que certaines équations que l'on qualifiera donc de déterministes, comme celles de la mécanique newtonienne, au sens où elles n'incluent pas de termes probabilistes, peuvent engendrer des solutions erratiques à condition qu'elles soient non linéaires. Quand elles sont des modèles de systèmes réels, cela signifie que, pratiquement, la prévision d'un résultat particulier est presque impossible en actionnant ce système.



C'est le cas du chaos déterministe ou de solutions avec de multiples bassins d'attraction très proches, comme pour le jeu de pile ou face pour lequel il est pratiquement impossible de prévoir la position d'arrêt de la pièce pour un lancer « correct », c'est-à-dire produisant plusieurs rotations en l'air et de nombreux rebonds sur une surface dure. Très curieusement, il faut attendre 2008 pour avoir une première modélisation de ce jeu, une expérimentation contrôlée et l'énoncé des conditions qui mènent à un résultat théoriquement prévisible, mais pratiquement imprévisible (Cf. Strzałko et al. 2008: la figure à droite est tirée de cet article et montre la trajectoire d'une pièce de monnaie lance au cours d'une expérience de "pile ou face").

Par ailleurs, des algorithmes « générateurs de nombres aléatoires » permettent de faire des simulations de phénomènes stochastiques. Mieux encore, ils sont intégrés dans d'autres algorithmes plus généraux pour aborder des problèmes numériques parfaitement déterministes, mais trop difficiles à résoudre autrement (calculs d'aires ou de volumes de géométrie complexes, problèmes d'optimisation, etc.).

2.4. Les systèmes technologiques et leur prévisibilité

Observons maintenant les systèmes technologiques. Même les plus sophistiqués peuvent dériver du fonctionnement prévu au point qu'on peut parfois aboutir à des catastrophes. C'est en essayant de comprendre le cœur des mécanismes en jeu, les « lois » auxquelles ils sont censés obéir et le désir des les utiliser pratiquement, qu'on a pensé concevoir des procédés sûrs, se suffisant à eux-mêmes. Puis, on s'est aperçu que les lois n'étaient pas aussi parfaites qu'on le croyait et les connaissances souvent incomplètes. Et même dans les meilleures conditions, nous ne sommes pas à l'abri de dysfonctionnements, de mutations de bits dans les ordinateurs et les réseaux informatiques, de dynamiques imprévues dans les procédés chimiques, d'écarts par rapport à la trajectoire nominale pour un lanceur de satellites. Pour améliorer les fonctionnements et éviter les accidents, des régulations et des contrôles ont été mis en place. Cependant, cela n'a pas empêché tous les errements. Le système est aussi conçu et contrôlé par des humains, ils peuvent compléter les automatismes, suppléer à leurs imperfections, sauver quelquefois de situations périlleuses. Mais malgré toutes les précautions, le « facteur humain » est aussi source d'erreurs, depuis la conception du système lui-même jusqu'à la prise de décision en cas de mauvais fonctionnement. Le couplage homme - machine n'est pas toujours parfait, il peut même se révéler paradoxal. Des exemples récurrents nous conduisent à plus de modestie.

Au-delà de l'exposé général, notre histoire recèle de nombreux exemple de dérives parfois catastrophiques de systèmes technologiques liées aux réactions des acteurs humains dans la gestion de ces crises. Dans un ouvrage, Christian Morel présente plusieurs décisions absurdes qui non seulement n'ont pas évité la catastrophe, mais l'ont, au contraire, rendue inévitable voire empirée (Morel, 2002). Parmi les derniers évènements de ce genre, on pense évidemment à l'accident nucléaire majeur de Fukushima qui, au-delà des explications en termes d'erreurs dans le choix du site d'implantation, dans la conception de la centrale et dans le pilotage quotidien, est dû aussi à de graves erreurs de gestion. Ce désastre remet au premier plan la question de l'utilisation du nucléaire, au moins dans sa conception actuelle. Autre exemple, les accidents aériens comme celui du vol AF447 sont la conjonction de problèmes technologiques et de défaillances humaines, alors que beaucoup s'accordent à dire que l'Airbus 330 est un remarquable avion et que les équipages d'Air France sont parmi les meilleurs du monde. De toute façon, quel que soit le système technologique, on ne peut assurer ni une fiabilité à 100 %, ni une gestion parfaite en cas de crise. Il nous revient de mettre en place les systèmes de régulation et les « pare-feux », technologiques et humains, pour faire face à l'imprévu potentiellement dangereux.

Les systèmes technologiques, incluant les hommes qui les utilisent, ont donc une capacité à engendrer des situations imprévues, des aléas. Ces aléas sont plus ou moins grands. De petites amplitudes, ils sont catalogués dans un « bruit de fond ». Ils ne gênent pas le fonctionnement

moyen et dans certains cas peuvent même l'améliorer. De grandes amplitudes et non voulus, ils peuvent engendrer des dysfonctionnements majeurs pouvant mettre en danger l'existence même du système et de ce qui l'entoure. C'est alors que des dispositifs sont conçus pour détecter les aléas nocifs et des processus, par exemple des rétroactions, pour limiter leurs occurrences et leurs effets.

Cela étant, on traite plus souvent le symptôme que la cause, d'où l'importance de comprendre l'origine des aléas, soit pour les éviter, soit pour en limiter la portée ou, au contraire, pour en tirer partie. Sur ce dernier point, notons que les systèmes fonctionnant en régime chaotique sont modélisables et sont prévisibles sur un terme assez court. Alors les effets d'une action, modifiant une ou plusieurs variables d'état, peuvent être calculés. Ensuite, la comparaison de la trajectoire calculée avec celle observée permet de recaler la commande en fonction de l'objectif visé. C'est ainsi que des véhicules spatiaux peuvent être pilotés dans des champs gravitationnels complexes où la trajectoire devient chaotique, comme ce fut le cas pour la sonde ISEE-3/ICE au voisinage d'une comète (Shinbrot et al. 1993). De fait, la sensibilité aux conditions initiales, qui se traduit par une sensibilité aux modifications d'une ou plusieurs variables d'état, permet un pilotage économique. Un chaos vu comme gênant peut parfois se révéler bénéfique.

2.5. Un ordre économique en perpétuel désordre ?

L'histoire de nos systèmes économiques apparait ponctuée de crises plus ou moins graves. Ces crises ne sont-elles pas dues à l'absence de régulations suffisantes et même à des volontés de dérégulations ? Il est probablement illusoire de penser que des contrôles vont émerger spontanément, au moins dans un espace de temps raisonnable. Par exemple, si l'on prend le paradigme évolutionniste, des mécanismes de régulation peuvent apparaître spontanément, mais il faut beaucoup de temps et de nombreux « essais et erreurs ». Beaucoup d'êtres vivants sont restés au bord du chemin. Pouvons-nous accepter, en laissant évoluer spontanément les marchés, que cela se traduise par une marginalisation, un appauvrissement, voir une mise au rebut d'un grand nombre d'hommes, de femmes et d'enfants de nos sociétés ?

Si oui, laissons faire, encore que l'on puisse émettre des doutes quant à la spontanéité : certains n'ont-ils pas élaboré des mécanismes pernicieux d'enrichissement ?

Sinon, et c'est la position de l'auteur, il vaut mieux se référer au paradigme technologique, inventer et mettre en place des régulations, comme de nombreux économistes l'ont proposé. Cette référence n'est pas nouvelle. Ainsi, dans les années 1970-1980 des automaticiens ont modélisé des systèmes économiques et étudié les propriétés de ces systèmes en fonction de régulations qu'on pouvait définir et leur appliquer.

Nous ne partons pas de rien, mais plus encore : un tel système, très peu linéaire, donc potentiellement très incertain, peut aussi dériver et diverger indépendamment de notre volonté.

Pour y faire face, nous pourrions mettre en place les dispositifs d'alerte et les mécanismes économiques adéquats. C'est ce qui n'a pas été fait malgré les déclarations tonitruantes de certains politiques, après les premières secousses. La conséquence ne risque-t-elle pas d'être un Tchernobyl plus un Fukushima financier, et cela à l'échelle planétaire ?

Enfin, il ne faut sûrement pas envisager un système trop contraint. Là, le paradigme évolutionniste peut être utile : identifier la part d'incertitude permettant un fonctionnement souple et évolutif, tout en le surveillant et le contrôlant pour éviter des dérives dangereuses.

2.6. Une gestion souple et adaptative

Si le rêve des financiers se traduit par un minimum de régulations, celui des gestionnaires est plutôt un contrôle parfait d'une organisation sociale et économique. Or, avec ce qui a déjà été dit, on peut déjà avancer que la suppression de toute incertitude est illusoire, et même qu'il faut en préserver pour garder des possibilités d'évolution, d'adaptation et d'innovation.

C'est ce qu'écrivent avec beaucoup de conviction Eric Abrahamson et David Freeman dans leur ouvrage : « Un peu de désordre = beaucoup de profit(s) ». À une époque où les gestionnaires sont en train de prendre le pouvoir dans de nombreux secteurs d'activités aux dépens des professionnels des secteurs concernés, par exemple industriels, c'est une leçon à méditer. Et cela d'autant plus qu'on assiste, dans de nombreuses entreprises, à une prise de pouvoir par les financiers et les gestionnaires.

Par exemple, vouloir « piloter la recherche scientifique » sur des objectifs de rentabilité économique n'est-il pas contreproductif, et cela alors qu'il n'y a pas de secteur plus rentable sur le long terme, non seulement en termes économiques, mais aussi culturels et sociaux ? Bien entendu, s'il s'agit de faire que l'argent soit bien dépensé, non détourné des objectifs généraux pour lesquels il a été attribué, on ne peut qu'être d'accord. Il ne s'agit pas non plus de refuser l'évaluation qui permet non seulement de produire des indicateurs, mais surtout de détecter les idées nouvelles. Le résultat se traduisant au niveau de la politique de recherche. En revanche, contraindre à la rentabilité la plus immédiate conduit à appauvrir cette recherche, à la « linéariser ». La nature même de la recherche, notamment l'imprévisibilité des résultats majeurs, demande au contraire d'assurer une gestion souple, adaptative, intégrant le long terme et de couvrir largement tous les champs de la science, ou du moins la plus grande partie possible de ces champs. Bien entendu, il ne s'agit pas d'exclure cette partie « linéarisée » qu'est la recherche incrémentale et finalisée, mais il ne faut absolument pas lui réserver tous les moyens, une tendance très actuelle.

3. Les systèmes complexes sont-ils par nature indéterminés et imprévisibles ?

Les systèmes complexes sont des ensembles d'objets en relations non linéaires. Ils constituent l'essentiel de notre monde, qu'ils soient naturels, spontanés, ou artificiels, conçus par l'homme.

À en faire l'examen, il apparaît que la plupart d'entre eux sinon la totalité sont de cette nature et qu'ils présentent tous une part d'incertitude. Cela limite nos possibilités de compréhension, de prévision et d'action. Il est alors légitime de se poser la question : tout système complexe n'engendre-t-il pas de l'incertitude ? La réponse est non. En effet, si la non-linéarité est le seul critère retenu, on connaît des modèles non linéaires parfaitement déterminés de tels systèmes. En revanche, on en connaît aussi qui sont pratiquement imprévisibles.

C'est pourquoi il faut définir la *complexité* non seulement par la non-linéarité en général, mais par le fait que les non-linéarités concernées peuvent engendrer de l'incertitude. Pour en revenir aux modèles, ceux qui peuvent représenter des systèmes complexes sont ceux qui sont susceptibles de produire des comportements erratiques et, en plus, qui peuvent changer de comportements sous certaines conditions, ce qu'on appelle des bifurcations. Et cela de façon plus ou moins prévisible.

3.1. Les régulations nécessaires

L'une des conséquences est la possibilité pour un *système complexe* de sortir de ce qu'on appelle son *domaine de viabilité*, là où il continue à exister spontanément. Donc, si l'on souhaite le préserver, il faut prévoir des régulations pour éviter cette « excursion », pouvant être fatale. Et pour savoir quand et comment activer ces régulations, ou pour les moduler, il faut des dispositifs de suivi et de détection des « anomalies ».

Néanmoins, quoiqu'on fasse il en restera toujours une partie irréductible d'incertitude : nous ne serons jamais à l'abri de surprises. Il faut tout simplement s'y préparer et bien observer et suivre les fonctionnements avec des indicateurs permettant de détecter les écarts porteurs de risques.

Enfin, l'incertitude, le bruit de fond, ce hasard intrinsèque, constitue aussi une source d'adaptation spontanée à l'imprévu et d'opportunités évolutives dans un univers en perpétuel changement.

3.2. Un monde aléatoire souple, adaptatif et évolutif

Nous pouvons maintenant nous représenter notre monde en généralisant ce que nous avons proposé pour les écosystèmes, mais avec un nombre et une diversité plus grands d'objets et de relations, à savoir : un espace rempli d'objets divers en relations plus ou moins fortes et nombreuses. Certains sont continûment mobiles et d'autres non. La nature des objets et de leurs relations change dans le temps d'une façon plus ou moins aléatoire, et plutôt plus que moins, le tout constituant un réseau souple et adaptatif. On peut même généraliser à plusieurs échelles, les objets à une échelle, par exemple les organismes constituant un écosystème, sont eux-mêmes constitués de divers objets en interactions « fortes » : des cellules et aussi des structures intermédiaires spécialisées, des organes.

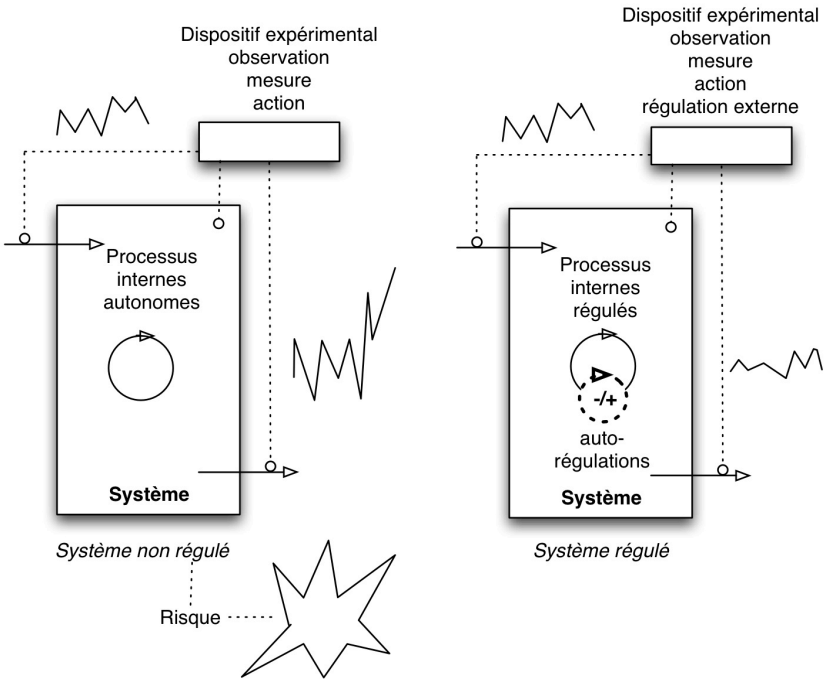


Figure 1. Un système non contrôlé et sans rétroaction, non linéaire, peut exhiber des comportements erratiques qui peuvent l'amener dans des zones de fonctionnement susceptibles de mettre son existence en danger (figure de gauche). Pour éviter ces excursions dans des zones à risque, des contrôles externes ou des rétroactions internes sont nécessaires. Des capteurs et des indicateurs permettent de détecter les trop grands écarts par rapport à un fonctionnement nominal. Pour les êtres vivants, les boucles de rétroactions se sont mises en place progressivement : les organismes n'en possédant pas ou peu disparaissant rapidement. Dans les systèmes technologiques, ces rétroactions et ces contrôles sont installés *a priori* ou suite à l'observation de dysfonctionnements. Dans les systèmes socio-économiques, certains émergent spontanément (sans doute dans les relations sociales « quotidiennes »), mais ils sont le plus souvent conçus volontairement pour améliorer la vie en société. Pour les systèmes économiques, il est urgent de mettre en place de la régulation au risque d'une dérive, voir d'une explosion, de ces systèmes avec toutes les conséquences sociales qu'on peut imaginer. Cela étant, il ne faut pas non plus geler le système, mais bien laisser s'exprimer un certain désordre pour maintenir de la souplesse.

Au total, on se représente notre monde, celui qui nous est naturellement perceptible, comme un emboîtement d'objets en interactions plus ou moins fortes, le tout changeant de façon plus ou moins aléatoire. Nous sommes loin d'un ordre rigide et éternel, d'un cosmos intangible, et c'est pour cette raison que l'ensemble est pérenne et peut faire face à des imprévus. Il nous revient de préserver ces propriétés pour assurer la durabilité de ce monde. Le débat n'est pas nouveau et date d'Héraclite et de Parménide et (VIième – Vième AJC: d'un côté un monde désordonné, chaotique, indéterminé (Héraclite), réel en quelque sorte[8], même s'il est une déclinaison du mythe de Dyonisos, mettant en tension les contraires, et de l'autre un cosmos bien ordonné et bien huilé associé où chaque élément est à sa place dans la mécanique de l'univers (Parménide), à mettre en relation avec le mythe d'Apollon. Cette dernière vision « systémique » est en fait une idéalisation de ce monde telle que nous, les scientifiques, tentons de le représenter pour mieux le

[8] « De choses répandues au hasard, le plus bel ordre, l'ordre du monde. » (Fragment 124, Héraclite)

comprendre, mais qui voit ses limites au filtre du hasard qu'il produit lui-même, de l'indétermination et de l'incertitude qui en résulte.

3.3. Comment faire ?

Une partie de la réponse est déjà donnée ici : il faut d'abord construire des schémas simplificateurs, rechercher des bases pour construire un discours compréhensible, construire des catégories (structurelles en systématique, par exemple les espèces, et fonctionnelles en écologie, comme les catégories prédateurs, proies, compétiteurs, symbiontes, autotrophes, hétérotrophes, etc.). Ensuite la démarche passe par l'élaboration de représentations et des modèles cohérents et pertinents mettant en relation ces catégories, tout en sachant que ceux-ci ont un domaine et une durée de validité limités. Ces modèles peuvent être mis en défaut par une réalité inattendue[9]. D'ailleurs, des connaissances réellement nouvelles ne sont obtenues que lorsque ces représentations et ces modèles sont réfutés, quasiment au sens de Popper, par une observation ou une expérience.

Vu son rôle important, il vaut aussi mieux qualifier et analyser ce hasard, en identifier la partie « utile » et limiter l'autre, qui peut se révéler dangereuse, grâce à des processus de régulation. Les ingénieurs l'ont bien compris, les économistes et les politiques, pas tous, loin de là, les biologistes et écologues ont noté la présence du hasard et son rôle dans les systèmes vivants, ainsi que de nombreuses régulations, mais ils n'en ont pas encore tiré toutes les conséquences. Résultant de l'évolution, les processus engendrant du hasard en sont aussi des moteurs grâce à la diversité qu'ils engendrent. En compléments, les régulations, apparues spontanément, ont été ajustées progressivement à travers le double mécanisme de diversification et de sélection pour en limiter ou au contraire en amplifier l'expression.

Par exemple, des mécanismes régulent l'expression du « hasard interne », ce hasard nécessaire, mais pas toujours. On en trouve une illustration dans l'expression ou la répression des gènes SOS (au sens usuel du terme) chez certaines bactéries (découverts par M. Radman en 1974, et bien présentés par M. Chicurel en 2001, dans *Science*) : dans des conditions non stressantes des enzymes assurent la réparation de parties endommagées de leur génome, dès que le milieu devient hostile, ces gènes sont réprimés ce qui a pour conséquence une forte mortalité, mais aussi une grande diversité génétique, une multitude de variants parmi lesquels il peut se trouver quelques individus résistants, voire adaptés à ce milieu. La population bactérienne peut alors se reconstituer à partir de ces variants. Très généralement, la capacité de populations microbiennes

[9] On pourrait prendre l'exemple très médiatiques des neutrinos supra luminiques, mais un autre exemple beaucoup plus modeste a été vécu par l'auteur dans les années 1980. Des collègues d'écologie microbienne cherchaient à comprendre les mécanismes limitant des populations microbiennes de *Rhizobium japonicum*, fixatrices d'azote, dans les sols pensaient à la compétition. Mais aucun modèle représentant ce type de mécanisme ne permettait de rendre compte des données expérimentales. En revanche, un modèle fondé sur un mécanisme prédateur - proie s'avérait mieux adapté. Sur l'instant, aucun prédateur n'avait été identifié, mais cette hypothèse introduite grâce au modèle a été vérifiée et le prédateur identifié, en l'occurrence une amibe (Steiberg et al., 1987).

à se diversifier et de pouvoir résister à des conditions de milieux hostiles pour elles leur sont bénéfiques, mais peuvent aussi être nuisibles quand il s'agit de pathogénes.

4. Conclusion

Depuis longtemps, on parle du hasard, mais sans réellement essayer de comprendre ce qui l'engendre, sa « nature intime ». On a aussi opposé déterminisme et stochastique. Or aujourd'hui grâce aux modèles mathématiques le lien peut se faire : les modèles déterministes sont bien adaptés pour représenter des mécanismes physiques, chimiques et biologiques, voire économiques, et certains d'entre eux peuvent engendrer des comportements erratiques, se rapprochant de ce qu'on imagine être le hasard dans sa nature intime, selon les définitions formelles proposées (Chaïtin, 1991) mais aussi de son observation dans les situations concrètes.

Nous proposons que le terme de *complexe* qualifie les systèmes susceptibles d'engendrer ce hasard. Il présente des facettes négatives (possibilité d'être néfaste au système qui l'engendre ou auquel il est soumis et aussi capacité de nuire à d'autres systèmes, comme dans le cas de microorganismes pathogènes) et positives (augmentation de la diversité, adaptabilité, capacités évolutives, en particulier). Nous avons vu que selon le système considéré les facettes positives ou négatives s'expriment plus ou moins et peuvent revêtir une importance pour la survie même du système (cas de la proie), ou seulement pour son maintien (cas des écosystèmes). Des processus de régulation limitent les expressions nuisibles et permettent de maintenir ou d'amplifier les aspects positifs.

Tout cela étant dit, rôle du hasard endogène, les processus qui l'engendrent, son contrôle par des processus de régulation, sont des champs de recherche encore en émergence dans les sciences de la vie et aussi dans d'autres disciplines. De fait, à part des précurseurs, comme Miroslav Radman, on ne commence à relever un nombre significatif de publications sur ce sujet, et majoritairement en biologie, qu'à partir du début des années 2000. Il n'est donc pas étonnant qu'ici nous n'ayons fait qu'effleurer la question.

L'une des origines de la production d'aléas nocifs est l'accélération du rythme empêchant les processus de régulation de réagir ou même tout simplement de se mettre en place. C'est sans doute l'une des causes majeures des dysfonctionnements de notre système économique. Aujourd'hui, notre système de recherche scientifique est pressé par un pouvoir politique navigant constamment dans l'urgence et la précipitation. Faisons que ce système puisse résister pour éviter la production d'aléas nocifs.

Références :

Abrahamson E., Freedman D.A. *Un peu de désordre = beaucoup de profit(s)*. Flammarion, 2008.

Arnoult P. Biodiversité : la confusion des chiffres et des territoires. *Ann. Géo.*, 651, 2006, 528-549.

Brooks M. What we'll never know. *Scientific American*, 210 : 2811, 2011, 34-39.

Chaitin G.J. Le hasard des nombres. *La Recherche*, 1991, 22, 232, 610-615.

Chicurel M. Can organisms speed their own evolution? *Science*, 2001, 292, 1824-1827.

Dorit R.L. The Humpty-Dumpty problem. *American Scientist*, 99:4, 2011, 293-295.

Doxiadis A., Papadimitriou C., Papadatos A., di Donna A. *Logicomix*. Vuibert, 2010.

Driver P. M., Humphries D.A. *Protean behavior: the biology of unpredictability*. Oxford University Press. 1988

Gleiser M. *L'univers imparfait. Aux origines du temps, de la matière et de la vie*. Flammarion, 2011.

Hofstadter D. *Gödel, Escher, Bach. Les brins d'une guirlande éternelle.* Inter Éditions, Paris,1985.

Hofstadter D. *Ma thémagie. Enquête de l'essence de l'esprit et du sens.* Inter Éditions, Paris, 1988.

Hubbell S.P. *The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography*. Princeton Univ. Press, 2001.

Humphries, D. A. and Driver, P. M. Erratic display as a defence against predators. *Science*, 1967, 156 : 1767-1768.

Kleene S.C. (1971) *Logique mathématique*. Armand Colin, Paris

Kupiec J.J. (2006). L'expression aléatoire des gènes. *Pour la Science*, 342, 78-83.

Laughlin R. *Un univers different. Nous vivons la fin du réductionnisme, la fausse idéologie qui promettait à l'humanité la maîtrise de toute chose.* Fayard , le temps des sciences, 2005.

Lecointre G. *Comprendre et enseigner la classification du vivant*. Belin, Paris, 2e édition, 2008

Lévêque C., Mounolou J.C., Pavé A., Schmidt-Lainé Claudine. À propos des introductions d'espèces. Écologie et idéologies. 2010. *Études rurales*, 185(1), 2010, 219-234.

May R. M. (1976). Simple mathematical model with very complicated dynamics. *Nature*, 261, 459-467.

Morel C. *Les décisions absurdes*. Gallimard, 2002.

Pavé A. Necessity of chance: biological roulettes and biodiversity. *C.R. Biologies* 330 : 3, 2007, 189-198.

Pavé A. *La nécessité du hasard – Vers une théorie générale de la biodiversité*. EDP-Sciences, Les Ulis, 2007, 192p.

Pavé A. *On the Origins and Dynamics of Biodiversity : the Role of Chance*. Spinger US, 2010, 178p.

Pavé A. *La course de la gazelle - Biologie et écologie à l'épreuve du hasard*. EDP Sciences, Les Ulis, 2011, 168p.

Picard Ph. *Hasard et probabilités. Histoire, théorie et application des probabilités*. Vuibert, Paris, 2007, 224p.

Shinbrot T., Grebogi C., Yorke J.A., Ott E. Using small perturbations to control chaos. *Nature*, 363, 1993, 411-417.

Steinberg C., Faurie G., Zegerman M., Pavé A. - Régulation par les Protozoaires d'une population bactérienne introduite dans le sol. Modélisation mathématique de la relation prédateur-proie. *Rev. Ecol. Biol. Sol,* 1987, 24 : 1, 49-62.

Strzałko J., Grabski J., Stefański A., Perlikowski P., Kapitaniak T. Dynamics of coin tossing is predictable. *Physics reports*, 2008, 469, 59-92.

Annexe : Qu'entend-on par « non linéaire » ?

Bien que ce terme soit souvent utilisé, il est utile de le définir. On peut d'abord l'opposer à la notion de linéarité : un phénomène est dit « *linéaire* » si un changement dans l'expression de ce phénomène est proportionnel à la cause qui produit ce changement. Par exemple, beaucoup de nos appareils sont conçus pour répondre linéairement à la commande qui nous est accessible, dans un domaine qualifié de « normal » de fonctionnement. C'est le cas, par exemple, pour les régulateurs de température des systèmes de chauffage. Plus subtile, la régulation des systèmes sonores nous donne une impression de linéarité alors que notre perception de l'est pas. Autre exemple, un cours d'eau régulier pour des débits faibles la vitesse d'un esquif flottant sur la surface sera proportionnel au débit.

En fait cette notion de linéarité vient des mathématiques et de la fonction linéaire, y->f(x) = ax (la valeur de y est proportionnelle à x).

Bien que cela puisse apparaître comme une lapalissade, on qualifie de « *non linéaire* » ce qui ne répond pas à ce critère de linéarité, là où l'effet n'est pas proportionnel à la cause qui l'engendre. La plupart des systèmes, naturels ou non, sont en fait non linéaires : les cours d'eau ne sont en général pas des « longs fleuves tranquilles », turbulences et contre-courants sont fréquents.

Comment faire ? On peut tenter les « linéariser » en se mettant dans des conditions de fonctionnement ou le comportement est linéaire ou presque. C'est le cas du cours d'eau mentionné ci-dessus si le débit peut être régulé, par exemple grâce à un barrage, et encore mieux s'il est canalisé. On peut aussi « gérer directement la non-linéarité » ; c'est ce que nous faisons souvent dans notre quotidien. Par exemple, lorsque venant d'un extérieur froid, l'hiver, nous entrons dans un local chauffé : un déplacement de quelques dizaines de centimètres, lorsque l'on franchit le seuil du local, correspond à un accroissement brutal de température (et inversement, si l'on sort, à une diminution tout aussi rapide). Nous y sommes accoutumés et ajustons notre comportement à cette situation, par exemple en enlevant ou mettant des vêtements. La régulation physiologique vient ensuite. Remarquons au passage que cet effet de seuil est l'exemple type d'une non-linéarité.

Les non-linéarités peuvent engendrer de l'incertitude, par exemple, sur la vitesse et la trajectoire de notre esquif, flottant sur un cours d'eau turbulent. La présence d'un seuil laisse incertaines les conditions au-delà du seuil. À l'extérieur du local on peut presque sûrement prévoir la température et ses variations sensibles lors de nos déplacements ; sans autre information ont peut espérer qu'il fera chaud dès que le seuil sera franchi, mais nous n'en sommes pas sûr : il peut y avoir une panne de chauffage ! Il est donc prudent de ne se dévêtir qu'une fois le seuil passé et l'assurance qu'il y a bien un « effet de seuil ».

Cela étant, la non-linéarité, si elle est nécessaire, n'est pas suffisante pour expliquer l'émergence de comportements aléatoires. Là encore, les modèles mathématiques sont utiles pour cerner la question, même s'ils ne permettent pas encore d'y répondre. En gros, il faut un nombre suffisant de variables (qui peuvent représenter des objets), que ces variables (ou objets) interagissent, avec au moins une interaction non linéaire, et que certaines dynamiques soient assez rapides par rapport aux autres.