GRÉTSÉ

Groupe de recherche et d'étude
sur les transformations sociales
et économiques

CAHIERS DU GRÉTSÉ N° 16

Transformations économiques et irréversibilités : Le chaos questionne l'économie

Ianik Marcil

Département des sciences éconoiques
Université du Québec à Montréal

GRETSÉ
Groupe de recherche et d'étude sur les transformations sociales et économiques

Juin 1994

L'ordre astral dans lequel nous vivons est une exception: cet ordre et la durée relative qu'il dermine ont derechef rendu possible l'exception des exceptions: la formation de l'organique. En revanche le caractère de l'ensemble du monde est de toute éternité celui du chaos, en raison non pas de l'absence de nécessité, mais de l'absence d'ordre, d'articulation, de forme, de beauté, de sagesse et quelles que soient nos humaines catégories esthétiques. [...] Gardons-nous de déclarer qu'il y a des lois dans la nature. Il n'y a que des nécessités: là nul ne commande, nul n'obéit, nul ne transgresse. Dès lors que vous savez qu'il n'y a point de but, vous savez aussi qu'il n'y a point de hasard. Car ce n'est qu'au regard d'un monde de buts que le mot hasard a un sens. [...] Quand donc en aurons-nous fini avec notre précaution et nos soins? Quand toutes ces ombres de Dieu cesseront-elles de nous obscurcir? Quand aurons-nous totalement dédivinisé la nature?

F. Nietzsche, *Le Gai savoir*, 1882, §109, p. 138.

1.

Depuis quelques années, la plupart des disciplines scientifiques, de la physique des systèmes dynamiques à l'économie, en passant par la météorologie et la biologie, sont touchées par de nouvelles méthodes: les théories du chaos. Ce texte se veut une introduction à ces questions et une amorce de réflexion sur les conséquences épistémologiques de leur application dans l'analyse économique. Nous examinerons leur impact sur les théories dynamiques, et en quoi elles exigent une plus grande attention aux transformations économiques. On trouve une littérature abondante produite sur le sujet en économie, mais un examen critique de la question doit encore être mené.

Deux étapes principales sont nécessaires à notre exposé: la mise en place d'un certain nombre de concepts et leur utilisation dans l'analyse. Nous commencerons par rappeler comment la pensée économique contemporaine analyse les situations dynamiques près de l'équilibre (§2), puis nous généraliserons cette approche pour un système économique en général (§3). Cette étude nous permettra de définir les propriétés des systèmes dynamiques dit chaotiques (§4), puis d'en montrer la profonde nouveauté (§5). À la section 6, nous définirons la causalité déterministe, outil nécessaire à l'analyse de l'irréversibilité. Finalement, nous verrons si les théories du chaos remettent en cause le déterminisme scientifique, comme on le croit souvent, et nous constaterons que non seulement cette remise en cause n'a pas lieu, mais qu'une conséquence beaucoup plus importante est l'affirmation du caractère irréversible des systèmes dynamiques déterministes (§7); et puisque le chaos semble la règle plutôt que l'exception, nous conclurons qu'une modification de l'approche épistémologique est inévitable en économie[1].

2.

La pensée économique classique, puis néoclassique[2], s'est articulée en partie autour d'un concept emprunté à la physique: l'équilibre. De l'élaboration des fondements de ce concept par Adam Smith à sa généralisation par Léon Walras, et jusqu'à nos jours[3], l'équilibre exprime l'idée de l'état stable d'un système dans le temps, résultat de forces opposées. Ainsi, Smith dans *La richesse des nations* définit le prix naturel comme un point vers lequel le système des prix converge, gravite, inéluctablement:

> Le prix naturel est conséquemment, pour ainsi dire, le prix central, vers lequel les prix de toutes les marchandises gravitent continuellement. Différents événements accidentels peuvent parfois les garder un certain temps élevées au-dessus, et parfois les forcer à descendre un peu au-dessous de ce prix. Mais, quels que soient les obstacles qui les empêchent de s'installer dans ce centre de repos et de permanence, ils tendent constamment vers lui. (Smith 1776a, 1: 75)[4]

Après la révolution marginaliste, les concepts d'offre à pente croissante et de demande à pente décroissante, illustrés dans le plan cartésien, deviendront l'outil premier de l'économiste. La conjonction de ces deux forces que sont l'offre et la demande dans un système détermine l'équilibre du système (fig. 1). Le point de jonction entre les courbes d'offre et de demande (P^*, Q^*) est donc ce qui est celui de l'équilibre au croisement des fonctions d'offre et de demande.

Figure 1 L'équilibre de l'offre et de la demande.

Puisque les systèmes économiques ne sont pas toujours stables, dans un état , mais évoluent souvent au-dessus ou au-dessous de cet état, il est donc nécessaire d'étudier le fonctionnement des fluctuations du système, leur dynamique. Tout en conservant le cadre de travail du principe d'équilibre, vu comme un centre d'attraction du système vers cet état, on peut élaborer une conception simple du comportement temporel de l'économie. Sur la figure 2, nous voyons comment le prix se dirige vers l'équilibre de l'offre et de la demande, selon le schéma classique en toile d'araignée, plus généralement nommé sous sa désignation anglophone du *cobweb*[5]. La courbe en spirale montre le tracé du prix de période en période. Considérons le point de départ *A*; le amène par la négociation le prix au point *B*, puis *C*, et ainsi de suite jusqu'à l'équilibre. Le graphe à la droite de la figure 2 montre l'évolution du système en fonction du temps. On voit que le prix oscille en convergeant vers le prix d'équilibre P^*.

Figure 2 Évolution temporelle vers l'équilibre dans le modèle du *cobweb*.

Ce qui intéresse la dynamique économique, c'est l'analyse de cette évolution temporelle, que ce soit celle de l'économie ou celle d'un de ses sous-systèmes (une industrie, par exemple). Pour illustrer cette évolution, nous pouvons observer une variable quelconque y_t qui représente l'état du système à la période t, ou, pour simplifier, la grandeur d'une variable économique durant cette période. Une des questions étudiées à l'aide de ce genre d'analyse en économie est la croissance, dont une des manifestations est l'augmentation dans le temps de la capacité de production. Le modèle de croissance habituel du vaste courant dominant en science économique dans les années 50 à 70, la synthèse néoclassique, a été proposé par Robert Solow en 1956, et fut par la suite la référence obligée des économistes pour modéliser la croissance économique[6]. Il posait les deux équations fondamentales suivantes (Solow 1956, 162-3), où Y est la production, K le stock de capital, L la quantité de travail et s le taux d'épargne (par période):

$$\begin{aligned} &\dot{K} = sY, \text{ où } \dot{K} = \frac{dK}{dt} \\ &Y = f(K,L) \end{aligned} \qquad \mathbf{1}$$

Ces équations signifient simplement la chose suivante: le taux d'augmentation du stock de capital $\dot{K}$ (la dérivée du stock K par rapport au temps t), est une proportion s (ici fixe dans le temps) de la production annuelle Y, laquelle est une fonction du stock de capital disponible à ce moment et de la quantité de travail dépensée durant la période. En combinant le système d'équations **1** en une seule équation, nous obtenons l'équation **2** qui explique l'évolution temporelle de l'accumulation du capital dans une économie:

$$\dot{K} = sf(K,L) \qquad \mathbf{2}$$

Ce que l'on doit souligner dans l'équation **2**, c'est que l'évolution de la grandeur étudiée, le stock de capital, est une fonction de son comportement à la période précédente. L'état du système de production à un moment donné est déterminé par son état à la période précédente. Toute théorie de la croissance économique, ou du comportement économique de n'importe quelle variable dans le temps, qui ne serait pas une transformation de type $y_t \rightarrow y_{t+1}$ serait absurde, car elle signifierait que l'état du système observé à un instant donné n'est pas explicable par celui qu'on observait juste l'instant passé.

3.

Pour donner une portée plus large à ce type de théorie, on doit généraliser l'analyse du comportement possible d'un système dynamique. La façon la plus simple de modéliser mathématiquement le comportement temporel d'un système est par une équation différentielle de premier ordre du type:

$$\dot{y} = f(y) \qquad \mathbf{3}$$

Dans la classe des équations de forme **3**, nous utiliserons la fonction dite logistique pour fins d'illustration, pour deux raisons: 1° parce que selon Goodwin (1990, 14), sur ses capacités à bien modéliser l'accumulation du capital en présence d'innovations, et 2° parce qu'elle a une importance historique dans le développement des théories du chaos. Soit y la variable décrivant l'état du système à chaque instant, et g son taux de variation dans le temps, l'équation logistique est:

$$\dot{y} = f(y) = gy(1-y),\ g > 0,\ 0 < y < 1 \qquad \mathbf{4}$$

Cette équation logistique est très importante. C'est une courbe de croissance utilisée pour expliquer le comportement de plusieurs systèmes dynamiques. Elle est utilisée en écologie pour modéliser l'évolution des populations isolées (de bactéries, d'organismes, d'écosystèmes) (*cf.* May 1976); de la même façon, elle peut être utilisée en démographie. Sa non-linéarité permet une grande souplesse dans la configuration du comportement temporel du système[7]. Gardons à l'esprit l'interprétation de Goodwin: l'équation **4** modélise l'accumulation du capital en présence d'innovation, et, à terme, la transformation qualitative du système productif.

En développant sous forme discrète l'équation **4** pour un délai d'une période, nous obtenons:

$$y_{t+1} = -gy_t^2 + gy_t \qquad \mathbf{5}$$

l'équation d'une parabole, que nous pouvons tracer dans un graphe appelé espace des phases (fig. 3). Cette figure illustre le cas pour cinq valeurs différentes du taux de croissance g. On remarque immédiatement par la forme de l'équation **4** que la fonction atteint un maximum en y_t=0.5 quelle que soit la valeur de g, et que la valeur de y_{t+1} à ce maximum sera de $g/4$.

Figure 3 Espace des phases de l'équation logistique **5** pour différentes valeurs de g.

L'espace des phases est un outil couramment utilisé en physique pour décrire l'état d'un système[8]. Examinons comment ce graphe nous permet de voir apparaître le chaos[9]. La droite diagonale à 45° qui coupe le graphique en deux représente le lieu géométrique où la valeur de la variable y au temps t+1 est égale à sa valeur au temps t. La valeur de l'intersection entre cette droite et la courbe des phases (l'équation **5**) est donc

$$y_{t+1} = y_t = y^* = 1 - \frac{1}{g} \qquad \mathbf{6}$$

Cette valeur de y est particulièrement intéressante si à partir d'une période donnée elle demeure la même (*i.e.* **6** valide pour tout $t>t^*$, t^* période où la stabilité est atteinte); cela signifierait que le système a atteint un équilibre en t^*. Notons cette valeur d'équilibre y^*, comme indiqué en **6**. Ces manipulations algébriques nous permettent d'obtenir quelques informations sur le processus de convergence vers l'équilibre du système. Conformément à la théorie des équations différentielles, l'évaluation de la pente de la courbe des phases à son intersection avec la droite à 45° indiquera le comportement du système. La pente est:

$$\left.\frac{df}{dy^*}\right|_{y^*} = g(1-2y^*) = 2-g \qquad \mathbf{7}$$

Pour $g<1$, la valeur du système tombe immédiatement à 0; ce n'est donc pas un cas très intéressant. Pour g compris entre 1 et 3 exclus, la pente sera plus grande que -1, et la théorie des équations différentielles nous dit que le système oscillera pendant un temps plus ou moins long (proportionnel à la valeur de g) pour atteindre son point d'équilibre. Pour $g=3$, la pente égale à -1, ce temps sera très long. Finalement pour $g>3$, avec une pente inférieure à -1, le système sera oscillatoire sans atteindre l'équilibre.

Examinons une illustration qualitative de modification de la structure du comportement causée par la variation dans le paramètre g. La figure 4 trace l'évolution temporelle de l'équation logistique pour g=2.9[10]. On remarque que le système se stabilise tranquillement vers son point d'équilibre. Le second graphe de la figure montre la même évolution, mais dans l'espace des phases. Le système oscille jusqu'à sa stabilisation au point de rencontre de la courbe des phases et de la droite à 45°, au point d'équilibre déjà mentionné y^*. La similitude avec le graphique en *cobweb* illustrant le chemin vers l'équilibre dans un système de prix est évidente, puisqu'il s'agit dans les deux cas d'une description de cheminement vers l'équilibre (on appelle aussi ce graphe dans l'espace des phases *cobweb*).

Figure 4 Évolution temporelle et espace des phases du système logistique, g=2.9

Si, maintenant, on ajuste le paramètre de croissance à 3.5, on observe (figure 5) un comportement substantiellement plus violent du système: il oscille sur un cycle de quatre périodes, avec des variations d'amplitude égale, mais sans jamais atteindre l'équilibre.

Figure 5 Évolution temporelle et espace des phases du système logistique, g=3.5

Dans un dernier cas de figure, si nous augmentons légèrement le paramètre g à 3.94, nous voyons apparaître... le chaos. La figure 6 montre le comportement de ce système sur 60 périodes comme dans les cas précédents, mais peu importe le nombre de périodes utilisé, aucun comportement régulier ne pourrait être observé. Ce système est chaotique parce qu'il est apériodique. Qualitativement, l'espace des phases est éloquent.

Figure 6 Évolution temporelle et espace des phases du système logistique, g=3.94

Il existe un outil pour étudier ce qui se passe lorsqu'on fait varier ainsi la valeur du paramètre g: le diagramme de bifurcation du système. Il présente dans un plan cartésien en ordonnée la valeur de la variable (ici y) lorsqu'elle atteint l'équilibre (c'est-à-dire lorsque le nombre d'itérations tend vers l'infini ($t \rightarrow \infty$); on dit de cet état d'équilibre qu'il est un attracteur), en fonction (sur l'abscisse) de la valeur du paramètre de croissance g (figure 7).

Figure 7 Diagramme de bifurcation schématisé

Nous remarquons sur ce diagramme que pour une valeur de $g<g_1$, la variable y atteint un équilibre stable: elle n'a qu'une valeur lorsque $t \to \infty$. Mais la valeur g_1 est critique, car on constate que pour $g>g_1$, il y a deux valeurs d'équilibre de y. À cette valeur critique, il y a bifurcation ou , *i.e.* le système atteint un attracteur cyclique de deux périodes. Pour $g>g_2$, le système passe à un cycle de quatre périodes, et ainsi de suite.

Le mathématicien Mitchell Feigenbaum a étudié ce comportement dans un article maintenant célèbre (1978). Il a découvert que le ratio de l'écart entre les valeurs de bifurcations consécutives était une constante, qu'on appelle maintenant constante de Feigenbaum (1978, 184-5):

$$\delta = \lim_{n \to \infty} \frac{g_n - g_{n-1}}{g_{n+1} - g_n} = 4.669201609103... \qquad \mathbf{8}$$

Cette constante est universelle en ce sens qu'elle est valide pour tout système ayant un maximum quadratique, comme l'équation logistique.

Le diagramme de bifurcation est à certains endroits hachuré. Pour ces valeurs de g, le système ne suit pas une trajectoire périodique, comme c'est le cas entre g_1 et g_2, par exemple. Ces plages hachurées représentent une zone comprise entre les limites des courbes indiquées (toujours comprises enre 0 et 1), qui sont remplies pour ainsi dire au hasard de différentes valeurs de y. L'attracteur du système ne représente donc pas pour ces valeurs de g un nombre restreint d'équilibres y^*, mais un ensemble, un attracteur apériodique. Suite à David Ruelle, la théorie du chaos appelle cet attracteur un . Ce qui rend la constante de Feigenbaum significative, c'est qu'elle , selon l'expression consacrée. Les zones chaotiques sont parfaitement délimitées, apparaissent selon un schéma ordonné (le nombre de doublement de périodes, réglé par la constante de Feigenbaum), mais pourtant, le comportement du système dans ces zones est parfaitement imprévisible. On en conclut donc qu'il y a une structure sous-jacente au désordre.

4.

Tout ceci est certes visuellement éloquent mais ne nous apprend rien de solide sur les caractéristiques d'un système chaotique. Nous allons maintenant définir, en trois points, les caractéristiques qui permettent d'affirmer qu'un système est chaotique, qu'il possède un attracteur étrange[11].

1° La géométrie fractale. Cela signifie que la représentation spatiale de ce système (dans un espace à trois dimensions) est un objet ayant une dimension fractionnaire comprise entre deux et trois. Cette notion a une importance fondamentale, car elle a permis en quelque sorte de représenter le chaos, et toute une nouvelle géométrie (à partir de laquelle on a construit plusieurs théories de la morphogénèse) a été élaborée par le mathématicien Benoît Mandelbrot sur ces fondements (Mandelbrot 1975). Nous n'étudierons pas en détail cette première caractéristique d'un attracteur étrange.

2° L'apériodicité. Pour les besoins de notre compréhension, le concept d'apériodicité nous permet de connaître le résultat le plus fondamental des théories du chaos. Formellement, l'apériodicité d'un système dynamique implique que ses courbes intégrales (c'est-à-dire les fonctions de comportement temporel de l'équation différentielle dans l'espace des phases) ne repassent jamais deux fois par le même état. Conséquemment, et c'est là l'intuition fondamentale, l'observation d'un système chaotique, même si sa durée est très grande, ne nous permettra jamais d'anticiper son comportement ultérieur. Ce système (Bergé *et al*., 1984, p. 125). Cette création d'information a une conséquence cruciale: la sensibilité aux conditions initiales.

3° La dépendance sensitive aux conditions initiales. On dira qu'un système dynamique dépend sensitivement de ses conditions initiales ou de sa trajectoire dans les situations où ses courbes intégrales très proches à l'origine pour des conditions initiales différentes divergeront les unes des autres exponentiellement dans le temps. La figure 8 schématise cette idée. Le même système part de deux situations initiales presque identiques, se dirigeant au début dans la même direction, mais divergeant qualitativement très rapidement par la suite.

Figure 8 Dépendance sensitive aux conditions initiales dans l'espace des phases

L'équation logistique **4** possède cette dépendance sensitive aux conditions initiales dans la zone chaotique: la figure 6 graphait le comportement temporel de ce système pour le paramètre *g*=3.94. La figure 9 trace la même chose, mais pour un paramètre quantitativement très peu différent (g=3.941, augmentation de 0.025%); pourtant, la différence qualitative entre les deux comportements est considérable. Une variation aussi minime dans le taux de croissance d'une population (dont le comportement est décrit adéquatement par cette équation) peut donc avoir des effets très divergents sur son évolution temporelle, après quelques périodes seulement[12].

Figure 9 Évolution temporelle du système logistique pour *g*=3.941

La dépendance aux conditions initiales n'a rien de nouveau, ce ne sont pas les théoriciens du chaos qui l'ont formulée pour la première fois, en ce que nous en ressentons ses effets quotidiennement. Qui ne s'est pas arrêté un jour, à réfléchir à la série de coïncidences qui ont mené à sa rencontre avec un être aimé? Pascal, dans une citation célèbre des *Pensées*, évoque cette idée (1670†, n° 413, 549):

> Qui voudra connaître à plein la vanité de l'homme n'a qu'à considérer les causes et les effets de l'amour. La cause en est un je ne sais quoi. Corenille. Et les effets en sont effroyables. Ce je ne sais quoi, si peu de chose qu'on ne peut le reconnaître, remue toute la terre, les princes, les armées, le monde entier.
>
> Le nez de Cléopâtre s'il eût été plus court toute la face de la terre aurait changé.

Ou encore cette comptine (citée par Gleick 1987, 41):

> Faute de clou, on perdit le fer;
> Faute de fer, on perdit le cheval;
> Faute de cheval, on perdit le cavalier;
> Faute de cavalier, on perdit la bataille;
> Faute de bataille, on perdit le royaume!

5.

Le sort d'une nation scellé par la perte du clou d'un fer à cheval! En dernière analyse, c'est cette idée, très simple lorsqu'ainsi exprimée, qu'on nous présente comme une révolution dans les sciences physiques. On est en droit de se demander pourquoi. Pourquoi cette chose simple n'a jamais sauté aux yeux des scientifiques, pourquoi a-t-on attendu le début des années soixante-dix pour s'y intéresser? Plusieurs pistes de réponses à cette question sont possibles.

Premièrement, cette situation s'explique par l'histoire même des outils scientifiques. Outils conceptuels, d'abord, la théorie des équations différentielles n'était pas assez développée au temps de Poincaré, par exemple, pour qu'il puisse exprimer mathématiquement le concept de dépendance sensitive qu'il connaissait pourtant. Ce n'est qu'après la deuxième guerre mondiale que la résolution d'équations différentielles non linéaires fut développée, maintenant en parallèle avec les théories du chaos. Outils informatiques, également. Une des études qui lança les recherches en théorie du chaos[13] fut l'œuvre d'un météorologue, Edward Lorenz (1963) qui, sur un ordinateur pour nous très primitif, simula en 1961 les mouvements atmosphériques avec un modèle simplificateur de trois équations différentielles à trois inconnues[14]. Comme son ordinateur était relativement lent, imprimant les résultats, itération après itération, et qu'il voulait connaître l'évolution d'un système sur de longues périodes, il recommença un jour l'exécution de son programme à partir de données prises au milieu du dernier listage. Il constata que les prévisions de ce second listage divergeaient rapidement de celles qui suivaient les mêmes valeurs des trois variables du premier. Il comprit que cela était causé par le fait que son ordinateur utilisait six décimales pour faire ses calculs, mais n'en imprimait que trois. Conséquemment, Lorenz avait tronqué des trois dernières décimales les conditions initiales de sa seconde simulation (Gleick 1987, 32-3)[15]. On ne peut avoir d'illustration plus claire de dépendance sensitive aux conditions initiales. Cette intuition, comme plusieurs autres résultats ultérieurs, a été rendue possible par la simulation numérique, ce qui est fondamentalement nouveau pour la science.

Mais, d'autre part, il est évidemment faux de prétendre que les scientifiques furent de tout temps aveugles à cette réalité. Le grand mathématicien Poincaré la soulignait dès le début du siècle (1908, 68-9):

> Une cause très petite, qui nous échappe, détermine un effet considérable que nous ne pouvons pas ne pas voir, et alors nous disons que cet effet est dû au hasard. Si nous connaissions exactement les lois de la nature et la situation de l'univers à l'instant initial, nous pourrions prédire exactement la situation de ce même univers à un instant ultérieur. Mais, lors même que les lois naturelles n'auraient plus de secret pour nous, nous ne pourrons connaître la situation initiale qu'*approximativement*. Si cela nous permet de prévoir la situation ultérieure *avec la même approximation*, c'est que tout ce qu'il nous faut, nous disons que le phénomène a été prévu, qu'il est régi par des lois; mais il n'en est pas toujours ainsi, il peut arriver que de petites différences dans les conditions initiales en engendrent de très grandes dans les phénomènes finaux; une petite erreur sur les premières produirait une erreur énorme sur les derniers. La prédiction devient impossible et nous avons le phénomène fortuit.

À une conception qui voudrait que le hasard ne soit que (*id.*, 65), Poincaré oppose un hasard qui est la mesure de notre incapacité pratique à observer avec exactitude les phénomènes. Dans les deux cas, le hasard n'est pas ontologique: il est épistémologique. La remarque de Poincaré ne remet pas en cause la nature déterministe du monde, mais affirme que le hasard n'est pas le fruit de notre ignorance des causes, mais de notre . Mais dans le cas chaotique, la que nous avons des conditions initiales est mathématiquement exacte. Dans la comparaison faite à la section 4 entre le comportement de l'équation logistique au paramètre de croissance 3.94 et 3.941, toutes les conditions du système ont une valeur finie connue initialement.

La sensibilité aux conditions initiales observée, l'éloignement exponentiel des trajectoires entre les deux cas, n'est donc pas le produit de notre incapacité à mesurer avec exactitude, , mais bien une caractéristique intrinsèque du système. Poincaré niait que le fut possible: le hasard ne pouvait émaner que de notre ignorance d'une cause perturbatrice, ou bien, c'est là son apport original, de notre incapacité à mesurer adéquatement[16]. Or, le systèmes chaotique que nous venons d'observer nie cette dualité: nos mesures sont parfaites, et le système est fermé (aucune autre cause ne peut venir le perturber). C'est pourquoi on est en droit de s'interroger sur la remise en cause du déterminisme par les théories du chaos, ou par leur affirmation d'un hasard essentiel.

6.

Avant d'en discuter, il est nécessaire de définir soigneusement ce concept que nous venons de présenter dans la citation de Poincaré et qui porte souvent à confusion: le déterminisme, ou la causalité[17]. La question de la causalité (et donc du déterminisme) remonte loin. Les quatre causes universelles d'Aristote sont bien connues. Mais dans le cadre de la science moderne, le concept de causalité prendra un sens déterministe tout particulier. Newton à la fin du 17e siècle fixait pour les trois siècles suivants la tâche de la science: découvrir les causes des phénomènes naturels (1687, 76). Quelques années plus tard, Leibniz (1714, § 7-8, 91-92) commit un qui aura une postérité prodigieuse:

> [...] rien ne se fait sans raison suffisante; c'est-à-dire que rien n'arrive sans qu'il soit possible à celui qui connaîtrait assez les choses de rendre une raison qui suffise pour déterminer pourquoi il en est ainsi, et non pas autrement. [...] Ainsi, il faut que la raison suffisante, qui n'ait plus besoin d'une autre raison, soit hors de cette suite des choses contingentes, et se trouve dans une substance qui en soit la cause, ou qui soit un être nécessaire, portant la raison de son existence avec soi; autrement on n'aurait pas encore une raison suffisante où l'on pût finir.

Ce stipule que pour chaque être, il y a une cause suffisante qui l'explique. Et ainsi de suite dans le cours du temps, tout phénomène, toute existence est déterminée par l'existence d'un phénomène, d'un être passé. (*id.*, §13, 94) Chaque moment présent contient son passé et son avenir: on peut faire l'économie de son histoire, elle est inutile.

Grossièrement, l'idée de déterminisme absolu est contenue dans ces mots. C'est parce qu'il implique une parfaite absence de liberté que le principe de raison suffisante et l'idée de déterminisme physique tel qu'exprimé par Leibniz, puis à la fin du 18è siècle par Laplace, suscitent tant de passions[18]. De plus, le concept même de déterminisme de Leibniz repose sur une causalité temporelle. Il y a cause d'être ou de phénomènes du présent vers le futur. Puisque nous voulons mesurer l'impact des théories du chaos sur la réversibilité des systèmes dynamiques en économie, il est important de voir si une telle causalité temporelle subsiste ou est altérée par le chaos.

Et c'est pour ces raisons qu'il est nécessaire de définir sans ambiguïté le concept de causalité déterministe scientifique, applicable à notre analyse. Premièrement, distinguons trois types de causalité: 1° la causalité éthique, 2° la causalité ontologique et 3° la causalité épistémologique.

La première est celle de la liberté morale. Si l'on accepte avec Kant que l'homme appartient à deux mondes, celui du ciel étoilé au-dessus de lui, et celui de la morale en lui, ce type de causalité ne nous intéresse pas ici. Avec Boutot (1991, 172), disons que vouloir lier cette causalité à la science, c'est mal poser la question. La seconde causalité, ontologique, voudrait que le principe de causalité (quel qu'il soit) s'applique au réel, aux choses, peu importe l'accès que l'esprit et la science peuvent y avoir. Par économie, écartons également cette causalité de la discussion. Toutefois cette mise à l'écart qui pourrait sembler hardie a une justification: de deux choses, l'une: (a) soit nous sommes réalistes, et admettons que notre connaissance tire sa source directement du réel, alors la causalité appréhendée par cette connaissance adhère parfaitement au réel, alors il suffit d'étudier la conception que nous avons de cette causalité (la causalité épistémologique); (b) soit nous sommes idéalistes, et croyons que nous n'avons pas accès directement au réel, auquel cas la causalité épistémologique est la seule sujette à examen, comme dans le cas précédent[19].

Reste donc la causalité déterministe épistémologique, c'est-à-dire celle des théories scientifiques. Il y a une grande variété de définitions possibles à la causalité. Pour les besoins de la cause, nous utiliserons celle proposée par Mario Bunge (1959, 48):

Définition CD *C* se produit (*happens*), alors (et alors seulement) *E* est toujours produit par lui[20].

Cette définition implique deux choses. 1° il y a connexion nécessaire entre l'effet *E* et la cause *C*. L'expression exclut la contingence et la probabilité du domaine de la causalité. 2° aucune référence n'est faite à la temporalité, à l'antériorité de la cause sur l'effet, par exemple. Cela permet d'éviter d'interpréter fallacieusement une succession temporelle de phénomènes comme un lien causal, car si deux phénomènes causalement liés se succèdent dans le temps, ce n'est pas nécessairement le premier qui est la cause du second. Ainsi, si nous admettons qu'il y a antériorité temporelle d'une hausse de la masse monétaire sur la hausse des prix, et qu'il y a un lien de causalité liant les deux grandeurs, on ne doit pas admettre *a priori* que cette antériorité désigne la cause[21].

7.

C'est à l'aide de cette définition de la causalité (du déterminisme) que nous allons analyser les concepts développés depuis le début du texte. Les équations de Solow **1** et **2** ont pour objectif l'explication des transformations de l'appareil de production dans le temps, bien qu'elles ne semblent refléter aucune modification qualitative. Ce modèle est du type $y_t \rightarrow y_{t+1}$, c'est-à-dire que le membre de droite de l'équation **2**, l'ensemble des variables explicatives, est la cause diachronique du membre de gauche, la variable expliquée, l'état de la variable en question étant expliqué par ses états passés. Selon la définition **CD**, pour toute variation de y_t dans l'équation **3**, alors et alors seulement une variation se produira dans y_{t+1}.

Une catégorie importante de cette classe d' aura dans certaines configurations un comportement chaotique, dont la caractéristique la plus importante est la dépendance sensitive aux conditions initiales. Interprétons le diagramme de bifurcation (figure 7) de la façon suivante: l'ordonnée représentant les solutions possibles de l'état du système, l'abscisse mesure l'écart à l'équilibre, ou le flux (croissant) de déséquilibre (Prigogine et Stengers 1988, 61). À chaque point de bifurcation, qu'on peut appeler (May 1976, 462), le système doit sa trajectoire; lorsqu'il y a doublement de période, le système peut suivre une trajectoire cyclique, mais il peut aussi pénétrer dans une zone chaotique. C'est pourquoi (Briggs et Peat 1989, 145):

> À chaque point de bifurcation du passé de notre système, un flux survient dans lequel de nombreux futurs existent. Par l'itération et l'amplification du système, un futur est choisi et les autres possibilités

> disparaissent à jamais. Ainsi, nos points de bifurcation constituent une carte de l'irréversibilité du temps.

En présence de chaos, à chaque fenêtre de bifurcation, le système fait face à un futur ouvert, à une infinité de possibles. Il est devant (Popper 1990). Mais malgré cela, le système demeure parfaitement déterministe, en ce qu'il continue à répondre de la définition **CD**. Conséquemment, la théorie du chaos conclut qu'un système déterministe non linéaire de la classe de l'équation **3** est imprédictible, mais demeure déterministe.

Ce déterminisme est supporté par l'irréversibilité, et vice-versa. L'irréversibilité émerge de la dépendance aux conditions initiales, comme dans l'histoire de Cléopâtre racontée par Pascal, ou la comptine du clou de fer à cheval. Le royaume de cette comptine est perdu parce que le fer d'un cheval a perdu son clou, et que s'en suit une série d'événements causalement reliés, parfaitement déterministes. Il y a émergence, création soudaine, à partir d'un événement insignifiant, d'une histoire entièrement nouvelle et inattendue[22]. La bifurcation du système vers le chaos empêche le retour vers le passé, affirme l'irréversibilité essentielle du système.

Un thème récurrent dans les disputes entre écoles dans la pensée économique depuis Keynes tourne autour de la question du temps. Joan Robinson répète à de nombreuses reprises que la supériorité du système keynésien sur les théories néoclassiques tient à sa prise en compte d'un temps historique (donc irréversible), par opposition au temps logique (réversible) de celles-ci[23]. Les théories du chaos montrent que ce qui caractérise l'essence du temps est son irréversibilité, même lorsque modélisé par des théories au comportement réversible, comme l'équation logistique.

On croit souvent *a priori* que les théories du chaos tuent le déterminisme. En fait, elles ne peuvent continuer de soutenir un principe de déterminisme qui voudrait qu'à chaque état présent du système il y ait un et un seul état subséquent. Une telle conception, celle de Laplace, restreint toute surprise, toute création, parce que l'état du système à l'instant 1 ne peut être autre que celui déterminé par l'instant 0 précédent[24]. Mais le déterminisme, le , c'est celui qui stipule que chaque état du système contient une partie de son passé, mais pas l'ensemble des possibles disponibles dans ses états passés, et que conséquemment son évolution est irréversible. En quelque sorte, le chaos s'appuie fermement sur le caractère déterministe de la science[25].

Nous appelons hasard les phénomènes qui ont un comportement totalement imprévisible. Et les systèmes dynamiques déterministes chaotiques sont totalement imprévisibles dans la zone du schéma de bifurcation. Ce sont des systèmes qui ont une structure parfaitement prévisible en droit (puisqu'ils participent d'un déterminisme absolu, comme l'équation logistique), mais en pratique, leur comportement semble véritablement stochastique. C'est ainsi que la Royal Society de Londres a défini le chaos lors d'une conférence sur le sujet en 1986: (Stewart 1989, 35)[26].

On penserait réfuter une classe de théories à laquelle appartiendrait le matérialisme historique de Marx et Engels par exemple. L'interprétation habituelle de la pensée de Marx, c'est de la voir comme une théorie déterministe de l'histoire. Selon le schéma traditionnel, les individus sont déterminés par leurs conditions socio-économiques[27]. Mais, comme l'explique Don Lavoie (1989), à la lumière des théories du chaos, cette détermination n'implique pas une négation de la possibilité de choix. Notre état présent est déterminé par notre histoire, mais pas par notre futur; celui-ci est fondamentalement ouvert sur un infini de possibles.

8.

Les transformations économiques doivent donc s'expliquer et se concevoir à l'intérieur de ce cadre théorique. En dynamique linéaire classique, l'état final du système est relativement indépendant de sa trajectoire, alors qu'en dynamique non linéaire chaotique, il y a dépendance à la trajectoire, et (Bergé *et al.* 1984, 109). C'est-à-dire qu'il est irréversible parce qu'il perd la mémoire de ses possibilités de choix passées (les fenêtres de bifurcation), cependant qu'il est fortement déterminé par son trajet de court-terme. C'est en ce sens qu'il y a enrichissement continuel et imprévisible d'information du système. Et c'est pourquoi le système économique fait toujours face à un ensemble de possibles. Il y a, à cet égard, un exemple fameux de Schumpeter (1935, 4): on aura beau ajouter un nombre infini de diligences au système des transports, on n'approchera jamais à la marge l'effet de l'implantation du train à l'intérieur du système[28]. La venue du chemin de fer est une bifurcation imprévisible qui ne peut être déduite linéairement de son état précédent, mais qui est pourtant déterminée par lui.

Pour Ilya Prigogine, chimiste et théoricien de la thermodynamique de non-équilibre (et qu'on met souvent, malgré la distance et les différends qui existe entre eux, sous le même chapeau que les inventeurs de la théorie du chaos, tel David Ruelle), les systèmes éloignés de l'équilibre, les systèmes chaotiques, sont la règle dans la nature et les systèmes près de l'équilibre, l'exception (Prigogine et Stengers 1979, *passim*). Les sciences n'avaient pas perçu cela, ou ne l'avaient pas intégré dans leurs analyses auparavant, parce que le chaos est le fait des systèmes non linéaires, complexes à étudier. La linéarisation simplifiait les choses, et a permis à une foule de disciplines de se développer; elles sont maintenant à un point de bifurcation vers une nouvelle conception[29]. De plus, les équations développées en théorie de la croissance sont généralement linéarisées, car, comme mentionné à la section 5, la résolution d'équations différentielles non linéaires pose des difficultés que les mathématiciens commencent seulement à résoudre. Et puisque cette vision plaide également contre la séparation des domaines scientifiques entre ceux de la nature et ceux du social[30], il est nécessaire à la lumière de cette nouvelle vision scientifique de modifier les conceptions épistémologiques en économie. En se penchant sur le devenir des systèmes, la pensée économique pourra tenir compte de la nature essentiellement historique (temporelle) et imprévisible de son objet.

Hicks (1976, 142) plaidait pour une théorie de la croissance loin de l'équilibre. À la lumière de la science non linéaire, du chaos, nous devons plaider pour une théorie de la croissance qui soit une théorie des transformations économiques. Keynes voulait révolutionner la pensée économique, en partie parce que celle-ci postulait l'économie en équilibre à long-terme, alors que Keynes la croyait généralement sous l'équilibre. Mais son système théorique demeurait lié à l'idée d'équilibre: s'il affirmait que l'économie est rarement à l'équilibre, il n'a pas moins affirmer qu'en situation de crise, elle demeurait dans un état sous l'équilibre, qu'il y a alors . C'est pourquoi Hicks a pu reprendre les idées maîtresses de Keynes en les intégrant dans un schéma d'équilibre. Le problème de Keynes, c'est peut-être de ne pas avoir cherché un concept qui rompe totalement avec la notion d'équilibre. Les théories du chaos offrent un tel outil[31].

Car raisonner en termes d'équilibre contraint à raisonner en termes réversibles. Le parcours de transition vers l'équilibre d'un système qui en est initialement éloigné n'est pas pertinent pour la compréhension du fonctionnement du comportement de ce système: les conditions initiales, donc l'histoire du système, n'ont aucune importance, car peu importent celles-là, celui-ci atteindra de toute manière l'équilibre. Alors que les théories du chaos apportent cette idée novatrice: l'histoire du système est une des composantes fondamentales de sa compréhension, même dans les cas de systèmes déterministes isolés, comme l'équation logisitique ou les équations de croissance de Solow. L'approche en termes d'équilibre implique la réversibilité du système, le déterminisme fermé, et donc l'absence d'histoire, tandis que l'approche par la sensibilité aux conditions initiales offre une description historique des processus, irréversibles, de systèmes toujours en devenir.

L'imprédictibilité des systèmes chaotiques, plutôt que sonner le glas de la connaissance rationnelle, annonce au contraire une multitude d'avenues nouvelles. La conclusion la plus fondamentale à laquelle nous conduisent les théories du chaos, l'irréversibilité, nous donne une image de la nature de l'homme et du monde économique profondément ancrée dans le devenir; le devenir est en quelque sorte la substance de l'homme et de la société, ainsi que l'écrivit le philosophe Vladimir Jankélévitch (1974, 7-8):

> L'irréversible n'est pas un caractère du temps parmi d'autres caractères, il est la temporalité même du temps; et le verbe est pris ici au sens et non pas au sens copulatif: c'est-à-dire que l'irréversible définit le tout et l'essence de la temporalité, et la temporalité seule; en d'autres termes il n'y a pas de temporalité qui ne soit irréversible, et pas d'irréversibilité pure qui ne soit temporelle. [...]
>
> Le temps est irréversible de la même manière que l'homme est libre: essentiellement et totalement. [...] Le devenir n'est pas sa manière d'être, il est son être lui-même; le temps n'est pas son mode d'existence, il est sa seule substantialité. En d'autres termes l'homme est toute temporalité, et ceci de la tête aux pieds, et de part en part, jusqu'au bout des ongles. [...] L'homme est un irréversible incarné: tout son consiste à devenir (c'est-à-dire à être en

> n'étant pas), et par surcroît il devient (advient, survient, quelquefois même se souvient), mais ne revient jamais [...].

Nietzsche cité en exergue à ce texte nous invitait à quitter nos représentations du monde gouvernées par l'idée d'ordre, cette , à réapproprier la nécessité, tout en assumant la constance du désordre. Ruelle, Prigogine et les autres théoriciens du chaos ont assurément débuté cette , sans, toutefois, en être toujours conscients.

Notes

Je remercie Claude Fortin pour la révision linguistique de ce texte, qui a d'abord été présenté à un séminaire au département des sciences économiques de l'Université du Québec à Montréal le 21 mars 1994. J'ai bénéficié des commentaires des participants à ce séminaire, et particulièrement de ceux de Gilles Dostaler et de Patrick Petit qui le commentaient. D'autre part, Yvon Gauthier (philosophie, Université de Montréal), Pierre Pelletier (génie civil, Université Laval) et Jean-Philippe Thérien (sciences politiques, Université de Montréal) m'ont apporté d'utiles remarques. Qu'ils en soient tous remerciés.

[1]**.** Nous n'interrogerons pas ici la légitimité de l'intégration des théories du chaos dans le corpus théorique néoclassique. Il s'agit certes d'une question fondamentale, et d'aucuns considèrent que ces théories ne peuvent s'appliquer à ce corpus, parce qu'elles sont destinées à l'analyse de systèmes dynamiques dissipatifs, qui n'ont pas leur équivalent dans l'économie néoclassique, ce qui expliquerait par ailleurs le peu de succès empirique rencontré dans ces études (Mirowski 1990, 302-3). Mais puisqu'un nombre grandissant d'économistes utilisent directement ces méthodes sans en interroger la légitimité, nous croyons fondé de présumer cette légitimité, et d'en tirer les conséquences. D'autre part, les conclusions de notre analyse sont en fait le cœur du texte, mais en occupent une partie très limitée (§7). C'est que pour y arriver, nous croyons nécessaire de présenter le plus rigoureusement possible les outils des théories du chaos. Une compréhension approximative de ceux-ci peut conduire à leur interprétation erronée (comme c'est souvent le cas, particulièrement lorsqu'on croit que les théorie du chaos tuent le déterminisme classique).

[2]**.** Nous englobons dans ces termes vagues la pensée économique depuis Adam Smith.

[3]**.** *Cf*. Mirowski (1989) et Ingrao et Israël (1991) sur l'histoire de la part d'analogie physique dans le concept d'équilibre économique.

[4]**.** «The natural price, therefore, is, as it were, the central price, to which the prices of all commodities are continually gravitating. Different accidents may sometimes keep them suspended a good deal above it, and sometimes force them down even somewhat below it. But whatever may be the obstacles which hinder them from settling in this center of repose and continuance, they are constantly tending towards it.» Nous avons fourni notre propre traduction, car celle G. Garnier (1881), republiée récemment (Smith 1776b), suit moins scrupuleusement la lettre du texte original, et traduit par (1: 128), par exemple.

[5]**.** L'illustration (classique) qui suit, ainsi que les figures, s'inspirent de Baumol (1951, 111-5).

[6]**.** Un manuel de macroéconomie récent (Mankiw 1992, 77-116) utilise encore le modèle de Solow comme première idéalisation dans l'étude de la croissance économique.

[7]**.** L'interprétation que l'on fait de cette équation dans l'étude des populations est généralement que la partie positive de l'équation (gy) est le nombre d'individus nouveaux-nés par période, alors que la partie négative ($-gy^2$) est le nombre d'individus morts dans la même période.

[8]**.** L'état d'un système en mécanique classique est représenté par deux éléments: sa vitesse (3 coordonnées cartésiennes) et sa position (3 coordonnées cartésiennes). L'espace des phases indique en ordonnée sa vitesse et en abscisse sa position. Conséquemment, pour un système qui n'a pas les trois coordonnées spatiales nécessaires à sa description, l'espace des phases se limite à joindre ses coordonnées retardées d'une période (ou plus).

[9]**.** Dans le foisonnant domaine des publications spécialisées et des ouvrages de vulgarisation sur les théories du chaos, le livre de Pierre Bergé, Yves Pomeau et Christian Vidal (1984) nous offre le meilleur des deux mondes. Il présente d'une part toutes les qualités de l'accessibilité: utilisation restreinte à l'essentiel des mathématiques, nombreux schémas et illustrations, explications claires des concepts d'hydrodynamique ou de thermodynamique. Mais, il ne sacrifie pas les explications sur l'autel de l'analogie boiteuse, comme le font trop souvent les ouvrages de vulgarisation, sacrifice qui mène généralement à une totale incompréhension de la matière parce qu'elle ne permet pas de penser la théorie dans son cadre-même. Bachelard met en garde contre l'utilisation de l'analogie: «Ces phénomènes, on les exprime: on croit donc les expliquer. On les reconnaît: on croit donc les connaître. [...] Le danger des métaphores immédiates pour la formation de l'esprit scientifique, c'est qu'elles ne sont pas toujours des images qui passent; elles poussent à une pensée autonome; elles tendent à se compléter, à s'achever dans le règne de l'image.» (1938, 73, 81). Pour ce qui est de

l'économie, les textes les plus accessibles et les plus complets sur lesquels nous nous sommes basés pour notre présentation sont Baumol et Benhabib (1989), Boldrin et Woodford (1990), Gabisch et Lorenz (1989, 174-201), Goodwin (1990), Kelsey (1990), Medio et Gallo (1992) et Scheinkman (1990).

[10]**.** Dans toutes nos simulations numériques de l'équation logistique nous avons choisi arbitrairement la valeur de départ (y_0) 0.99, la population étant à son maximum à la première période (1 étant exclu du domaine, nous faisons tendre cette valeur initiale vers 1).

[11]**.** L'origine de cette distinction tri-partite est Ruelle (1979, 131), qui est maintenant la définition canonique du chaos dans ce type de système. Dans ce cas le chaos est atteint par . On trouvera une présentation mathématique claire dans Coullet (1988) ou Eckmann et Ruelle (1985). Ce sont les mathématiciens Li et Yorke (1975) qui ont fourni ce concept (et qui ont par ailleurs utilisé pour la première fois le mot chaos dans cet article). Ils définissaient toutefois le chaos de façon légèrement plus limitative (on découvrit par la suite qu'il s'agissait d'un cas particulier d'un théorème connu, celui de Sarkovskii). Leur définition, qui demeure utile, est la suivante (théorème de Li-Yorke): Soit $f: I \mapsto I$ une transformation continue sur l'intevalle *I* (comme l'équation logistique **4**, *e.g.*), s'il y a un point y_t I tel que:

$$f^{(3)}(y_t) \leq y_t < f(y_t) < f^{(2)}(y_t)$$

tel que:

$$f^{(2)}(y_t) = f(f(y_t)) = f(y_{t+1}) = y_{t+2}$$

alors:

1° pour chaque *k* entier, il y a un point périodique dans *I* de période *k*;

2° il y a un ensemble non dénombrable S I de points initiaux apériodiques tel que:

- i. peu importe le rapprochement qu'il peut y avoir entre deux trajectoires apériodiques, elles se distancieront éventuellement l'une de l'autre;
- ii. toutes les trajectoires possibles se dirigent arbitrairement près l'une de l'autre;
- iii. aucune trajectoire apériodique convergera asymptotiquement vers une autre trajectoire;

3° tout système unidimensionnel ayant les propriétés 1° et 2° sera dit chaotique.

[12]**.** *Cf*. Smith (1990-91).

[13]**.** À retardement et rétrospectivement il est vrai, parce qu'elle fut publiée dans une revue à diffusion restreinte dans la communauté scientifique (elle n'était pas lue par les thermodynamiciens et hydrodynamiciens comme David Ruelle, par exemple, qui élaborèrent la théorie des attracteurs étranges indépendamment et redécouvrirent l'article plus tard).

[14]**.** Ces équations sont (Lorenz 1963, 135):

$$\dot{X} = -\sigma X + \sigma Y$$

$$\dot{Y} = -XZ + rX - Y$$

$$\dot{Z} = XY - bZ$$

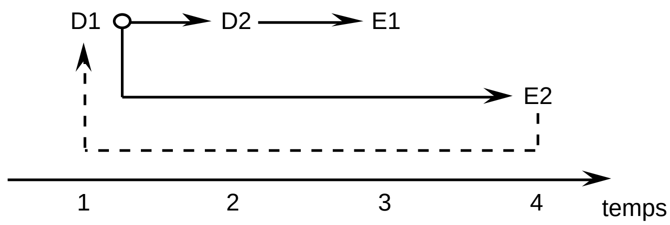
[15]**.** On appelle souvent la dépendance sensitive , suite à Lorenz semble-t-il, qui a intitulé une de ses communications en 1979 (Gleick, 1987, 401).

[16]**.** On doit noter que l'originalité de Poincaré tient au fait qu'il ne considère pas cette incapacité comme un problème pratique, mais théorique. En effet, les mesures finies seront toujours imparfaites, alors que le monde que nous observons nécessiterait des mesures infinies.

[17]**.** On peut généralement associer ces deux termes, bien que selon certains (Bunge 1959) l'ensemble soit inclus dans l'ensemble , mais ne l'épuise pas. Nous avons brossé un bref tableau des concepts de causalité dans la pensée économique contemporaine dans un précédent *Cahier* (Marcil 1993); *cf.* également Hoover (1990).

[18]**.** Il est nécessaire de souligner que Leibniz ne nie pas la liberté morale et humaine. En fait, contrairement à Spinoza, par exemple, il l'affirme beaucoup plus nettement. Mais faire l'histoire comparée des différentes conceptions du déterminisme en opposition à la liberté morale, au librearbitre, dépasse très largement le cadre de ce texte. Elle serait en fait toute l'histoire de l'éthique, de la philosophie.

[19]**.** Cette justification est bien évidemment en partie frauduleuse, car elle n'admet que deux types de catégories, et , qui ne reflètent pas l'ensemble des possibles en la matière. L'examen de la causalité ontologique à la lumière des théories du chaos est de première importance, et nécessite une étude approfondie, car malgré notre petit raisonnement, si la configuration du réel a une emprise sur notre façon de penser, par notre structure neuronale, par exemple, alors la manifestation de la causalité déterministe dans le réel a une répercussion sur notre conception cognitive de la causalité. Mais cette analyse demande plus d'espace.
[20]**.** C'est cette traduction hésitante que nous proposons à: (ital. dans le texte).
[21]**.** Voici un exemple concret. Soit le schéma suivant:



Supposons que les entrepreneurs au temps 1 anticipent (correctement) une hausse des prix, et prennent la décision *D1* de hausser leur production. Supposons encore que cette décision aura comme conséquence d'augmenter les prix. Mais avant d'avoir la possibilité de produire davantage, les entrepreneurs ont besoin de crédit: cette décision est prise au temps 2 (*D2*). Elle a comme effet d'augmenter la masse monétaire au temps 3 (*E3*). Pendant cette même période 3, les entrepreneurs auront augmenté leur capacité productive, et l'effet prévu sur les prix se produit au temps 4 (*E4*). Conséquemment, la hausse de la masse monétaire et l'inflation du niveau des prix se produisent consécutivement, mais selon cette explication, la seconde est la cause de la première. On aura reconnu une dispute monétariste/anti-monétariste; *cf.* Tobin (1970), Friedman (1970) et Hammond (1986).
[22]**.** *Cf*. Elskens et Prigogine (1986, 5759-60).
[23]**.** Voir l'opinion de Robinson résumée dans (1980), et Hicks (1976, 141) qui, quarante ans après la publication du célèbre article qui donnait naissance au modèle IS-LM, dont l'objectif était de concilier les approches keynésienne et classique, affirme à propos de son modèle
[24]**.** Il faut noter que nous escamotons dans cette analyse restreinte un problème fondamental du déterminisme scientifique: l'opposition global/local. Le déterminisme de Laplace, auquel se réfère Poincaré (1902, 161) pour affirmer qu'il ne tient plus à cause du second principe de la thermodynamique (*a fortiori* en présence de sensibilité aux conditions initiales), est un déterminisme global: l'état de l'univers (*i.e.* de tout ce qui existe) est déterminé par son état passé. Si cette question est philosophiquement importante, le problème scientifique est de nature locale, et la théorie du chaos s'applique à des situations locales, mais fermées (comme l'équation logistique); *cf.* Bachelard (1951, 212-3), Hunt (1987, 132), Israël (1992, 258) et Stone (1989).
[25]**.** Cf. Israël (1992) et Ruelle (1981),
[26]**.** Bergé *et al.* (1984, 109), affirment qu'«aucune définition scientifique précise du substantif et de l'adjectif n'existe vraiment, nous prendrons ces mots comme synonymes de certaines propriétés typiques. [...particulièrement:] la perte de mémoire du signal par rapport à lui-même. Par suite, la connaissance de l'état du système pendant un temps aussi long que l'on veut, ne permet pas, pour autant, de prévoir ce que sera son évolution ultérieure. Au fond, cela revient à faire de l'imprédictibilité l'aspect déterminant du chaos.»
[27]**.** (Marx 1859, 5)
[28]**.** «This historic and irreversible change in the way of doing things we call "innovations" and we define: innovations are changes in production functions which cannot be decomposed into infinitesimal steps. Add as many mail-coaches as you please, you will never get a railroad by so doing.»
[29]**.** Boutot (1986, 168) remarque avec grande justesse que la science non linéaire (c'est le nom, plus sobre, qui semble s'imposer pour) est une généralisation de la science linéaire, et non pas sa négation, au même titre que la géométrie non euclidienne inclut également la géométrie euclidienne, comme le montrait Bachelard dans *La philosophie du non*.
[30]**.** Ainsi selon Lavoie (1989, 619), les théories du chaos Voir également Testart (1991) qui développe cette thèse avec grande clarté, sans recourir directement aux théories du chaos, mais dont les arguments sont intégrables au système de Prigogine.

[31]. Un grand mathématicien Ivar Ekeland (1984) conclut quant à lui que les théories du chaos, et la théorie des catastrophes de René Thom conduisent à l'abandon du calcul, des mathématiques quantitatives, et à la renaissance des mathématiques qualitatives. On renonce ainsi aux prédictions chiffrées, inutiles à long-terme, mais il est maintenant permis de mieux (Ekeland 1984, 93). Ce délaissement du calcul conduit en économie, selon Goodwin (1990, vi) à l'abandon du postulat de rationalité: .

Bibliographie

Bachelard, Gaston 1938. *La formation de l'esprit scientifique: contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*. Paris: J. Vrin, 1989.

Bachelard, Gaston 1951. *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*. Paris: Presses universitaires de France.

Batterman, Robert W. 1991. *Synthese*, 89: 189-227.

Baumol, William J. 1951. *Economic dynamics: an introduction*. London: Macmillan, 4è éd., 1970.

Baumol, William J. et Jess Benhabib 1989. *Journal of economic perspectives*, 3(1): 77-105.

Bergé, Pierre, Yves Pomeau et Christian Vidal 1984. *L'ordre dans le chaos: vers une approche déterministe de la turbulence*. Paris: Hermann, 2è éd., 1988.

Boldrin, Michele et Michael Woodford 1990. Jess Benhabib, éd. *Cycles and chaos in economic equilibrium*. Princeton: Princeton University Press, 1992, 8-43.

Boutot, Alain 1991. *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, 181: 145-78.

Briggs, John et F. David Peat 1989. *Un miroir turbulent: guide illustré de la théorie du chaos*. Paris: InterÉditions, 1991.

Bunge, Mario 1959. *Causality and modern science*. New York: Dover, 1979.

Coullet, Pierre 1988. Pierre Bergé, éd. *Le chaos: théories et expériences*. Paris: Eyrolles, 83-116.

Eckmann, Jean-Paul et David Ruelle 1985. *Reviews of modern physics*, 57: 617-56.

Ekeland, Ivar 1984. *Le calcul, l'imprévu: les figures du temps de Kepler à Thom*. Paris: Seuil.

Elskens, Y. et Ilya Prigogine 1986. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 83: 5756-60.

Feigenbaum, Mitchell J. 1978. *Journal of statistical physics*, 19: 25-52.

Friedman, Milton 1970. *Quarterly journal of economics*, 84: 318-27.

Gabisch, Günter et Hans-Walter Lorenz 1987. *Business cycle theory: a survey of methods and concepts*. Berlin: Springer, 2è éd., 1989.

Gleick, James 1987. *La théorie du chaos: vers une nouvelle science*. Paris: Albin Michel, 1989.

Goodwin, Richard M. 1990. *Chaotic economic dynamics*. Oxford: Clarendon Press.

Hammond, J. Daniel 1986. Warren J. Samuels, éd. *Research in the history of economic thought and methodology*. Greenwich, CT: Jai Press, vol. 4, 109-26.

Hicks, John R. 1976. Anthony M. Tang, Fred M. Westfield et James S. Worley, éd. *Evolution, welfare, and time in economics: essays in honor of Nicholas Georgescu-Roegen*. Lexington, MA: Lexington Books, 135-51.

Hobbs, Jesse 1991. *Canadian journal of philosophy*, 21: 141-64.

Hoover, Kevin D. 1990. *Economics and philosophy*, 6: 207-34.

Hunt, G. M. K. 1987. *Analysis*, 47: 129-33.

Ingrao, Bruna et Giorgio Israël 1991. *The invisible hand: economic equilibrium in the history of science*. Cambridge: MIT Press.

Israël, Giorgio 1992. Amy Dahan Dalmedico, Jean-Luc Chabert et Karine Chemla, éd. *Chaos et déterminisme*. Paris: Seuil, 249-73.

Jankélévitch, Vladimir 1974. *L'irréversible et la nostalgie*. Paris: Flammarion.

Kelsey, David 1988. *Oxford economic papers*, 40: 1-31.

Lavoie, Don 1989. *Cato journal*, 8: 613-35.

Leibniz, Gottfried W. 1714. André Cresson, éd. *Leibniz: sa vie, son œuvre, avec un exposé de sa philosophie*. Paris: Presses universitaires de France, 1958, 85-98.

Li, T. Y. et J. A. Yorke 1975. *American mathematical monthly*, 82: 985-92.

Lorenz, Edward N. 1963. *Journal of the atmospheric sciences*, 20: 130-41.

Mandelbrot, Benoît 1975. *Les objets fractals: forme, hasard et dimension*. Paris: Flammarion, 3è éd., 1989.

Mankiw, N. Gregory 1992. *Macroeconomics*. New York: Worth Publishers.

Marcil, Ianik 1993. Montréal: Université de Montréal — Université du Québec à Montréal, Groupe de recherche et d'étude sur les transformations sociales et économiques, Cahiers du GRÉTSÉ, n° 14.

Marx, Karl 1859. *Contribution à la critique de l'économie politique (Gründrisse)*. Moscou: Éd. du Progrès, 1974.

May, Robert M. 1976. *Nature*, 261: 459-67.

McCloskey, Donald N. 1991. *History and theory*, 30: 21-36.

Medio, Alfredo et Giampaolo Gallo 1992. *Chaotic dynamics: theory and applications to economics*. Cambridge: Cambridge University Press.

Mirowski, Philip 1989. *More heat than light: economics as social physics, physics as nature's economics.* Cambridge: Cambridge University Press.

Mirowski, Philip 1990. *Southern economic journal*, 57: 289-307.

Morin, Edgar 1980. Krzysztof Pomian, éd. *La querelle du déterminisme: philosophie de la science aujourd'hui*. Paris: Gallimard, 1990, 79-101.

Nietzsche, Friedrich W. 1882. *Le gai savoir: la gaya scienza; fragments posthumes été 1881-été 1882*. *Œuvres philosophiques complètes*. Giorgio Colli, Mazzino Montinari et Marc B. de Launay, éd. Paris: Gallimard, 1982, vol. 5.

Newton, Isaac 1687. *De philosophiæ naturalis principia mathematica: les principes mathématiques de la philosophie naturelle.* Paris: Christian Bourgois, 1985.

Pascal, Blaise 1670†. *Pensées*. *Œuvres complètes*. Louis Lafuma, éd. Paris: Seuil, 1963, 493-641.

Poincaré, Henri 1902. *La science et l'hypothèse*. Paris: Ernest Flammarion, 1920.

Poincaré, Henri 1908. *Science et méthode*. Paris: Ernest Flammarion, 1922.

Pomian, Krzysztof 1990. Krzysztof Pomian, éd. *La querelle du déterminisme: philosophie de la science aujourd'hui.* Paris: Gallimard, 11-58.

Popper, Karl 1990. *Un univers de propensions: deux études sur la causalité et l'évolution*. Combas: Éd. de l'Éclat, 1992.

Prigogine, Ilya et Isabelle Stengers 1979. *La nouvelle alliance: métamorphose de la science*. Paris: Gallimard, 2è éd., 1986.

Prigogine, Ilya et Isabelle Stengers 1988. *Entre le temps et l'éternité*. Paris: Fayard.

Reisch, George A. 1991. *History and theory*, 30: 1-20.

Robinson, Joan 1980. *Kyklos*, 33: 219-29.

Ruelle, David 1979. *Mathematical intelligencer*, 2: 126-37.

Ruelle, David 1981. Krzysztof Pomian, éd. *La querelle du déterminisme: philosophie de la science aujourd'hui*. Paris: Gallimard, 1990, 153-62.

Scheinkman, José A. 1990. *Economic journal*, 100(Supplement): 33-48.

Schumpeter, Joseph A. 1935. *Review of economic statistics*, 17(4): 2-10.

Smith, Adam 1776a. *An inquiry into the nature and causes of the wealth of nations*. Oxford: Clarendon Press (Glasgow Edition), 1976.

Smith, Adam 1776b. *La richesse des nations*. Paris: Garnier-Flammarion, 2 vol., 1991.

Smith, Peter 1990-91. *Proceedings of the Aristotelian society*, 91: 247-67.

Solow, Robert M. 1956. Amartya K. Sen, éd. *Growth economics*. Harmondsworth: Penguin, 1970, 161-92.

Stewart, Ian 1989. *Dieu joue-t-il aux dés? Les mathématiques du chaos*. Paris: Flammarion, 1992.

Stone, Mark A. 1989. *American philosophical quarterly*, 26: 123-31.

Testart, Alain 1991. *Pour les sciences sociales: essai d'épistémologie*. Paris: Christian Bourgois.

Tobin, James 1970. *Quarterly journal of economics*, 84: 301-17.