



HAL
open science

Le projet épistémique des sciences des systèmes complexes

Fabrizio Li Vigni

► **To cite this version:**

Fabrizio Li Vigni. Le projet épistémique des sciences des systèmes complexes. *Philosophia Scientiae*, 2020, 24 (1), pp.181-200. 10.4000/philosophiascientiae.2201 . halshs-03648761

HAL Id: halshs-03648761

<https://shs.hal.science/halshs-03648761v1>

Submitted on 21 Apr 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le projet épistémique des sciences des systèmes complexes

The epistemic project of complex systems sciences

LI VIGNI Fabrizio

Laboratoire Interdisciplinaire Sciences Innovations Sociétés

Université Paris-Est Marne-la-Vallée

Cité Descartes

5, boulevard Descartes

Champs-sur-Marne

77454 MARNE-LA-VALLÉE Cedex 02

Résumé en français

Cet article se propose de décrire le projet épistémique des sciences des systèmes complexes. Domaine interdisciplinaire fondé par le Santa Fe Institute en 1984 aux États-Unis, il a été décrit par ses représentants comme un champ d'étude interdisciplinaire, post-laplacien, holiste et antiréductionniste. Des journalistes à succès et des sociologues sympathisants de ce domaine en ont repris les discours, en annonçant l'avènement d'un nouveau paradigme révolutionnaire pour tous les savoirs. Dans ce texte, on montrera que le projet épistémique des sciences de la complexité est moins pluraliste, antipositiviste et antiréductionniste que ce que l'on en dit. Je tâcherai de montrer en quoi le cadre épistémologique et ontologique de ce champ d'études reste analytique et réductionniste dans un sens physicaliste, computationnaliste, mathématique et biologisant.

Abstract in English

The present article aims at describing the epistemic project of complex systems sciences. The latter is an interdisciplinary domain that was founded by the Santa Fe Institute in 1984 in the United States. It has been depicted by its representatives as an interdisciplinary, post-Laplacian, holist and antireductionist field. Some successful journalists and some sociologists sympathetic with this domain have promoted its discourses and have announced the advent of a new revolutionary paradigm for all fields of knowledge. In this text, I will show that the epistemic project of complexity science is less pluralist, anti-positivist and antireductionist than what is usually said. I will try to show why the epistemological and ontological framework of these sciences stays analytic and reductionist, in a physicalist, computational, mathematical and biological manner.

1. Introduction

Les sciences des systèmes complexes (SSC) sont un domaine fondé aux États-Unis par le Santa Fe Institute (SFI) dans les années 1980. Il s'est ensuite structuré dans plusieurs pays à travers la fondation d'une soixantaine d'instituts à l'image de l'ancêtre américain [Wolfram 2012]. Cet article a pour objectif d'en décrire le projet épistémique, ainsi que de déconstruire les discours *prometteurs* sur les SSC qui ont été mis en circulation par les fondateurs du domaine et par des observateurs sympathisants de celui-ci. Dans ce but, je mettrai en lumière quatre discours *programmatisques* et *opérationnels* tels qu'ils peuvent être dégagés à partir des archives du SFI. Les discours prometteurs décrivent ce domaine comme étant intrinsèquement interdisciplinaire, pluraliste et inclusif, holiste et antiréductionniste. Pourtant, les discours programmatiques montrent la prééminence de certaines disciplines et approches sur les autres. On observe notamment une domination socio-épistémique des sciences formelles sur les sciences de la vie et les sciences sociales. Ces derniers champs du savoir peuvent faire partie des instituts de la complexité, mais à condition de se soumettre à un certain cadre épistémique et ontologique déterminé avant tout par la physique et l'informatique. Je tâcherai de montrer en quoi un tel cadre reste, par conséquent, analytique et réductionniste, en illustrant en particulier quatre discours qui dominent dans les documents institutionnels produits par les spécialistes des systèmes complexes. On se focalisera uniquement sur le SFI et sur les bulletins qu'il a publié de 1986 à 2014¹, d'une part pour des raisons d'espace et d'autre part parce qu'il s'agit du centre qui a donné une identité et une direction à ce champ d'études. Les autres groupes dans le monde s'inscrivant dans les SSC reprennent, comme le Réseau National des Systèmes Complexes français [Bourgine, Chavalarias & Perrier 2009], tout ou partie de ces discours programmatiques, bien qu'avec des accents différents selon les contextes disciplinaires, culturels et institutionnels. Plus important encore, ces discours opérationnels se retrouvent à l'œuvre dans les publications scientifiques, dans les pratiques de recherche et dans l'organisation des instituts de la complexité². Les quatre axes dégagés ici ne sont pas les seuls

¹ Le SFI a publié 40 numéros de son Bulletin entre 1986 et 2014. Adressé aux membres du conseil d'administration, aux agents de recherche, aux conseillers, aux chercheurs et chercheuses, aux donateurs passés et potentiels, ainsi qu'aux dirigeants universitaires, industriels et gouvernementaux, son rôle était d'informer ce public à propos des programmes scientifiques et administratifs de l'institut. Publié une à deux fois par an, il était disponible gratuitement sur requête et imprimé à hauteur de cinq milles exemplaires. Plus tard la publication est devenue électronique et tous les bulletins ont été numérisés.

² Je renvoie à ma thèse pour une analyse approfondie de ces plusieurs aspects [Li Vigni 2018a].

repérables dans le domaine, mais ils paraissent les plus récurrents et structurants. Ils prônent notamment :

1. une vision computationnelle de la nature et de la société, issue de l'informatique et des sciences cognitives ;
2. une unification des théories des systèmes complexes, en suivant la tendance de la physique à chercher des intégrations théoriques générales ou locales ;
3. une formalisation des sciences de la vie et des sciences sociales par le biais du langage mathématique et algorithmique ;
4. une généralisation de la théorie darwinienne de l'évolution (concurrence, adaptation, apprentissage) à tout système naturel et humain.

Dans un premier temps, je rappellerai le fait que le poncif de la complexité semble aujourd'hui ubiquitaire et présenterai brièvement les SSC. La deuxième section décrira le contenu du discours hégémonique à propos des SSC, tel qu'il a été produit et diffusé par des spécialistes du domaine et par des observateurs tels que des journalistes à succès ou des chercheurs en sciences sociales. Dans un troisième temps, on illustrera le projet épistémique des SSC condensé dans les quatre discours que l'on vient d'énoncer, en faisant mention des rares tensions et résistances qui ont eu lieu à l'intérieur de ce domaine contre tel ou tel élément discursif. La conclusion résumera les points saillants de l'article.

2. L'omniprésence du poncif de la complexité

En jetant un regard à la culture scientifique, médiatique, artistique, économique et politique d'aujourd'hui, on constate l'ubiquité du *poncif de la complexité*. Nul ne peut nier l'extrême fréquence avec laquelle, dans n'importe lequel de ces domaines de la société, il est facile de tomber sur des termes tels que « réseau », « complexité », « système complexe », « émergence », « auto-organisation », « transition de phase », « *tipping points* », « résilience », etc. Même si les théories de la complexité sont diverses et variées, et même si certaines d'entre elles ont émergé bien avant les années 1980 [Li Vigni 2018b], c'est à partir des années 1990, lorsque le SFI devient célèbre dans le monde entier, que le répertoire lexical de la complexité se retrouve :

- dans plusieurs domaines scientifiques (physiques [Pietronero 2008], chimie [Lehn 2002], sciences cognitives [Jordan, Srinivasan & van Leeuwen 2015], sciences de la vie [Kitano 2001], sciences du climat et du système Terre [Schellnhuber 1999], sciences sociales [Law & Mo 2002], etc.) ;
- dans le domaine politique (RAND Corporation [Alberts & Czerwinski 1997], Maison Blanche [PCAST 2016], textes de politologie [Cairney 2012], stratégie nationale de la recherche [MESR 2013], etc.) ;

- dans les discours des mouvements sociaux, surtout dans ceux à visée écologiste (voir par exemple le mouvement des « villes en transition » [Brunetta & Baglione 2013]) ;
- dans le secteur économique (théoriciens et praticiens du néolibéralisme [OECD 2017]), dans les manuels de management [Boltanski & Chiapello 1999] et dans celui du développement urbain (théoriciens et praticiens des « villes intelligentes » [Batty et al. 2012]) ;
- dans l'art³ et dans la culture populaire (fractales, publicité, romans, films⁴) ;
- et surtout dans la vulgarisation scientifique (Hawking⁵, Gleick [Gleick 1988], Waldrop [Waldrop 1992]).

Face à ce constat, on pourrait avoir l'impression d'assister à un changement de paradigme tel que celui opéré par les découvertes de Newton, d'Einstein ou de Heisenberg. Comme le lecteur le sait, à chaque fois qu'une nouvelle théorie de cette envergure a été produite et est devenue consensuelle dans les milieux savants, la manière de voir le monde et de le traiter a changé non seulement dans le domaine de la physique, mais aussi dans d'autres secteurs de la société. Ainsi, l'omniprésence du langage de la complexité pourrait faire penser à l'essor, aujourd'hui, d'une nouvelle révolution paradigmatique, engendrée encore une fois dans les sciences naturelles et maintenant étendue à tous les pans de la société et de la culture.

À la suite d'un travail de recherche doctoral en histoire, sociologie et philosophie sur les SSC, je garde une certaine prudence quant à ce type d'interprétation globale. Les sciences de la complexité apparaissent comme une coalition de sous-disciplines afférentes à plusieurs domaines des savoirs, qui trouvent les raisons de leur alliance dans au moins trois éléments : une vision commune des sciences, des institutions scientifiques, de la nature et de la société, inspirée des réseaux computationnels ; un intérêt partagé pour des techniques numériques, jugées hautement performantes et particulièrement pertinentes pour le type de systèmes étudiés (multi-échelles, hétérogènes, évolutifs, etc.) ; et le fait d'occuper, chacune à sa manière, une place relativement marginale dans le plus vaste champ disciplinaire qui leur est propre⁶. Les représentants de ce domaine trouvent leur langage commun en s'inspirant principalement des théories mathématiques des systèmes dynamiques, qui vont de Poincaré à la « théorie du chaos » [Aubin & Dahan 2002]. Ils s'accordent autour d'une

³ Le Santa Fe Institute et l'Institut des Systèmes Complexes – Paris Île de France ont par exemple co-organisé à plusieurs reprises des expositions avec des artistes dans des musées américains et français.

⁴ Le film d'animation Disney *Les nouveaux héros* sorti en 2014 met en scène un exemple d'intelligence d'essaim (ou *swarm intelligence*), un concept issu de la vie artificielle et des SSC [Bonabeau, Dorigo, & Théraulaz 1999].

⁵ Le cosmologue Stephen Hawking a affirmé que le XXI^{ème} siècle sera le siècle de la complexité : <http://www.complexsys.org/downloads/whatiscomplexity.pdf>.

⁶ Restant en général bien ancrés dans leur discipline de départ, les spécialistes des systèmes complexes sont souvent associés à des instituts de la complexité. Les revues du secteur sont rares et peu prisées par les représentants des SSC eux-mêmes. L'étiquette de « scientifique de la complexité » n'est presque jamais la seule ni la première à être mise en avant dans les CV, les interviews, les publications ou les entretiens d'embauche.

définition de « systèmes complexes » qui, en général, les décrit comme étant des ensembles intégrés de nombreux éléments en interaction réciproque, pouvant amener à des phénomènes macroscopiques dits émergents [Mitchell 2009].

Cette coalition lâche de savoirs ne porte pas *une* théorie générale de la complexité comme il existe une théorie de la relativité. Ce qui a traversé les enceintes des laboratoires et des agences (inter)nationales de recherche, les conférences et les revues scientifiques dédiées à l'étude des systèmes complexes, et qui a colonisé d'autres espaces sociaux, c'est plutôt un *idiome* de la complexité composé de quelques mots clés. Un tel constat ne vise pas à minorer la portée de ce domaine dans les sciences et au-delà, car ce langage n'est pas moins porteur et performateur d'une vision particulière du monde et des savoirs. Mon constat vise plutôt à mieux cerner la spécificité de cet objet nommé « complexité » et à montrer notamment l'importance de la vulgarisation dans le succès de cette notion. Malgré la renommée des SSC, il n'existe pas beaucoup de travaux rigoureux de sciences sociales à leur égard, notamment historiques et sociologiques⁷. Le seul travail historique qui, à ma connaissance, retrace l'histoire du SFI est celui de l'historien des sciences américain Lambert Williams [Williams 2012]. Les autres textes à propos de cet institut et du champ qu'il a lancé sont des livres de vulgarisation. Williams avance une thèse que je défends également : ce qui a répandu l'idiome de la complexité au-delà des frontières des instituts de recherche ce sont les efforts sur le plan médiatique exercés par certains représentants des SSC, ainsi que par une poignée de journalistes scientifiques à succès⁸. Ces nombreux textes grand-public ont façonné et diffusé au niveau international une mythologie particulière du SFI, décrit comme un lieu d'électrons libres innovants, ouverts d'esprit et dynamiques, et ont permis au discours de la complexité de circuler bien au-delà des enceintes académiques.

3. Les discours prometteurs du SFI

À cette réalité scientifique assez cloisonnée et modeste – le SFI n'a jamais dépassé la vingtaine de résidents et la centaine d'associés – correspond toutefois un succès culturel remarquable. Le domaine des SSC se veut presque omni-disciplinaire, dans une optique de dialogue ouvert et antiréductionniste : ses militants soulignent souvent que la science newtonienne, galiléenne et laplacienne représente le vieux paradigme à dépasser. Selon leur discours, il n'y a pas de causalités simples dans la nature : les feedbacks positifs et négatifs sont partout, les effets de seuil et les transitions de phase le sont également, les interactions microscopiques produisant un ordre macroscopique sont insaisissables. L'interdépendance et l'irréductibilité intrinsèque des systèmes complexes appelleraient

⁷ On peut citer le livre de l'anthropologue Stefan Helmreich sur le courant de la vie artificielle [Helmreich 1998]. On peut citer quelques articles historiques, dont aucun n'offre une histoire du SFI ou d'autres instituts de la complexité dans le monde [Schweber & Wächter 2000], [Fox-Keller 2009], [Varenne 2009]. On peut également citer un travail scientométrique [Grauwin et al. 2012]. Mais la plupart des travaux sur les SSC sont philosophiques et normatifs [Wimsatt 1994], [Hooker 2011], [Fraisopi 2012], [Deffuant et al. 2015], [Zuchowski 2018].

⁸ Pour une bibliographie non-exhaustive de ces livres de vulgarisation, voir [Williams 2012], [Li Vigni 2018].

ainsi à une science plus holiste qu'analytique. Par exemple, les physiciens Murray Gell-Mann et Philip Anderson – parmi les fondateurs du SFI – décrivent les SSC comme des savoirs antiréductionnistes et invoquent la nécessité d'étudier chaque niveau du réel avec la pertinence que son échelle demande [Anderson 1972], [Gell-Mann 1994]. Le biologiste Harold Morowitz, très actif dans la première décennie de vie du SFI, appelait à rompre avec la science galiléenne-newtonienne pour enfin aborder des questions ne rentrant pas dans son « moule néo-platonicien » [SFI 1992b, 7]. Un tel projet ne peut pas se passer d'une intense collaboration entre différentes disciplines, comme l'affirme la mathématicienne du SFI Erica Jen, qui n'hésite pas à tisser l'éloge de l'approche interdisciplinaire en vigueur à l'institut en termes d'enrichissements intellectuels réciproques pour ses membres :

« The best part of collaborating in a truly interdisciplinary fashion, when it works, is that it places a stress on researchers and how they think. By working together with researchers from different disciplines, you are literally forced, in the most constructive of ways, to think about different problems, to use tools and methods from other disciplines with which you are not familiar » [SFI, 1996-1997, 7].

Si maintenant l'on prend en compte les discours produits par des acteurs extérieurs au domaine en question, l'on y retrouve la même rhétorique positive, voire enthousiaste, à propos de la nouveauté épistémologique représentée par le SFI. Le journaliste scientifique américain James Gleick, auteur du livre à succès *Chaos*, n'a pas hésité à affirmer que la théorie du chaos et la naissante théorie de la complexité représentaient des nouveaux paradigmes scientifiques aussi révolutionnaires que la théorie de la relativité et la mécanique quantique. Le journaliste Mitchell Waldrop, qui a dédié le livre *Complexity* aux premières années du SFI, rejoint son collègue dans l'annonce paradigmatique. Le physicien Heinz Pagels, mentor et ami de quelques-uns des membres du SFI, a même soutenu, dans un autre livre grand-public, que « les nations et les peuples qui maîtriseront les nouvelles sciences de la complexité deviendront les superpuissances économiques, culturelles et politiques du siècle prochain » [Pagels 1989, 15].

Quittons la vulgarisation pour nous diriger vers les SHS. Le philosophe Mark Taylor, dans son livre intitulé *The Moment of Complexity*, met en exergue la « culture du réseau » qui caractérise le *Zeitgeist* du monde post-guerre froide, sous l'influence des théories du chaos et de la complexité [Taylor 2003]. Le sociologue anglais John Urry a dirigé en 2006 un numéro spécial de la revue *Theory, Culture & Society* pour aborder la science de la complexité et ses implications potentielles pour les sciences sociales [Urry 2006]. Il y a soutenu que ce domaine peut permettre le dépassement des frontières entre nature et culture, ainsi qu'entre sciences naturelles et sciences humaines. De son côté, le sociologue de la médecine Brian Castellani a prolongé le raisonnement contenu dans

un autre texte de John Urry [Urry 2005] en affirmant que le tournant de la complexité a en effet révolutionné les SHS d'un point de vue méthodologique grâce à ses modélisations numériques et quantitatives [Castellani 2014].

Ces quelques exemples sont représentatifs d'un discours ayant une portée beaucoup plus vaste : pour de nombreux sociologues, philosophes et historiens, l'aspect transdisciplinaire, antiréductionniste et révolutionnaire des SSC est une évidence. Ces discours prometteurs du SFI, trop souvent relayés de manière acritique, s'accompagnent de discours programmatiques bien plus conservateurs et en accord avec l'ainsi dite « science classique », pourtant officiellement rejetée.

4. Le projet épistémique des SSC

À partir d'une lecture superficielle de la composition socio-épistémique des membres de plusieurs instituts de la complexité dans le monde, on serait tenté de penser à des collectifs dans lesquels, de manière égalitaire, des scientifiques différents dialoguent, en gardant leurs cultures et leurs questionnements propres tout en s'enrichissant mutuellement. On peut y retrouver des physiciens, des informaticiens, des biologistes, des économistes, des géographes, des écologues, des archéologues, des immunologistes, et bien d'autres spécialistes. En outre, l'une des activités principales du SFI, dès sa fondation, a consisté dans l'organisation d'un dispositif appelé « atelier intégratif ». À mi-chemin entre la conférence et l'école d'été, ce dispositif dure souvent une semaine, voire deux, et il réunit deux ou trois dizaines de scientifiques appartenant à plusieurs disciplines afin de discuter de manière transversale un concept (e.g. : complexité, résilience, robustesse, contagion, etc.). Chaque participant intervient en informant les autres de la manière dont on traite le concept en question dans son propre champ. Après une phase de *brainstorming*, suivent des tentatives de synthèse [SFI 1992b].

Si l'on en restait là, on pourrait croire à un échange *symétrique* entre savants de différents horizons. Cependant, à y regarder de plus près, on découvre une situation inégalitaire à plusieurs égards : certains savoirs y sont dévalués, tandis que quelques-uns imposent leurs cadres épistémologiques et ontologiques aux autres ; les outils d'enquête sont monocolores, s'agissant surtout d'ordinateurs et d'équations ; et la perspective axiologique est également touchée, puisque dans l'optique du SFI les systèmes complexes adaptatifs suivent le paradigme hayékien de la platitude individualiste auto-organisée et concurrentielle [Li Vigni à paraître].

La prosopographie des membres du SFI confirme la dominante physico-computationnelle, mathématique et biologique de la population des SSC. Les fondateurs de l'institut étatsunien sont tous des physiciens ou des chimistes [SFI 1994]. Les premiers membres actifs étaient des biologistes, des économistes et des informaticiens. Des prises d'information à des moments différents de l'histoire du centre confirment la tendance. En 1992, par exemple, la liste des nouveaux membres du conseil scientifique inclura un économiste, un informaticien, un anthropologue, un biologiste moléculaire,

un bio-informaticien, deux mathématiciens et cinq physiciens [SFI 1992a]. En 2001, la plupart des étudiants de premier cycle, ainsi que la majorité des chercheurs et chercheuses temporaires et permanents, sont issus de la physique (11), de l'informatique et/ou des mathématiques (8), des sciences de la vie (4), de l'économie (2) et de la socio-informatique (1) [SFI 2001, 22-24]. Quels que soient l'époque et l'institut de la complexité pris en compte, cette sociologie est systématiquement confirmée.

Un deuxième élément empirique contredit la prétendue inclusivité des SSC. En analysant les archives, les livres, les pages Internet des instituts, les dépliants des écoles d'été, aussi bien que les intitulés des présentations des conférences dédiées aux SSC – que cela soit aux États-Unis ou en Europe, il y a trente ans ou bien aujourd'hui –, on peut dégager une douzaine de modèles d'enquête. La liste n'est pas exhaustive et certains de ces éléments étaient plus en vogue au début de l'histoire des SSC qu'aujourd'hui, mais elle montre sans équivoque que les disciplines mobilisées (mises entre parenthèses) sont toutes afférentes à la sphère des sciences dites exactes :

1. Systèmes dynamiques, fractales et chaos (physique) ;
2. Automates cellulaires (informatique) ;
3. Physique statistique (physique) ;
4. Verres de spin (physique) ;
5. Réseaux de neurones (sciences cognitives computationnelles) ;
6. Réseaux génétiques (bio-informatique) ;
7. Théorie des réseaux (physique, mathématiques et informatique) ;
8. Modèles à base d'agent (informatique) ;
9. Criticalité autoorganisée (physique) ;
10. Algorithmes génétiques (informatique) ;
11. Théorie des jeux (économie) ;
12. Apprentissage machine (informatique) ;
13. Traitement des grandes masses de données (statistiques).

Prenons maintenant l'exemple d'un échange archétypique du SFI entre un biochimiste, Walter Fontana, et un politiste, John Padgett. Le premier est un spécialiste des réactions chimiques autocatalytiques, le second de la période d'or de la Florence de la Renaissance. Dans leur collaboration scientifique, Fontana donne une lecture physico-chimique de la société florentine étudiée par Padgett :

« Through reading a paper Padgett wrote on the flowering of Florentine society, Fontana saw connections with abrupt physical transitions of many chemical reactions. 'There was a natural resonance in Padgett's analysis of Florentine society leading up to the Renaissance with the emergence of the first self-maintaining, self-reproducing cell, or how a new paradigm of organization comes into existence', says Fontana » [SFI 2004b, 20-21].

Même si dans la suite de cet extrait le bulletin affirme que les deux chercheurs « ont été tous les deux capables de voir leurs propres domaines à travers des lunettes différentes », c'est Padgett qui s'inspire des recherches de Fontana pour mener les siennes. Il n'y a donc en réalité qu'une lunette ayant été transférée d'un domaine vers un autre :

« Says John Padgett, [...] 'Walter is interested in the folding in of chemical networks to get a self-sustaining system called a metabolism. If you look at my networks on marriage and economics in medieval Florence, pictorially there's a great similarity between his pictures and mine, though his are chemical and mine social. Mine fold in to produce political parties' [...] So, because I'm looking for self-sustaining mechanisms, I've taken his models and used them for medieval Florence » [SFI 1999a, 6-7].

Force est de constater que le changement de perspective n'est pas biunivoque ou symétrique : il est unidirectionnel, des sciences naturelles vers les sciences sociales – ce phénomène est systématique dans les SSC et résonne avec des cas concernant les SHS qui sont au contact avec les sciences de la vie, les sciences cognitives et les humanités numériques [Callard & Fitzgerald 2015], [Lemerle & Reynaud-Paligot 2017], [Larregue 2018], [Broca 2016]. Dans tous ces cas, le dialogue entre deux cultures épistémiques est bel et bien présent, mais l'une des deux vient recadrer l'autre en lui faisant adopter ses présupposés. Le pluralisme est admis nommément, mais pratiquement on s'aperçoit qu'il y a bien des disciplines maîtresses et que les savoirs convoqués ne sont pas mis sur le même plan⁹.

Illustrons maintenant les quatre discours composant le projet épistémique des SSC.

4.1. L'informatique et sa vision computationnelle de la nature

Le fait que le SFI se base avant tout sur des méthodes computationnelles est énoncé clairement dans tous ses documents publics, tels que les bulletins, les publications scientifiques et de vulgarisation, ou les dépliants des écoles d'été. La centralité de l'ordinateur et la croissante puissance de calcul constituent, selon les représentants des SSC, la cause même de l'essor du domaine : « La nouvelle approche, affirme Harold Morowitz du SFI, est rendue possible, en fait elle est commanditée par les ordinateurs » [SFI 1992b, 24]. En citant le livre célèbre de Charles Snow sur les deux cultures (humaniste et scientifique), George Cowan – chimiste de Los Alamos et premier président du SFI – écrit dans ses mémoires que son souhait consistait à combler le décalage entre la culture naturaliste et la culture humaniste à l'aide de l'ordinateur [Cowan 2010, 131].

⁹ Il serait erroné de penser qu'il n'y eut pas d'oppositions. Par exemple, l'archéologue George Gumerman, expert du Sud-Ouest américain et de l'Océanie, s'adressa une fois à Murray Gell-Mann dans une lettre publiée dans le bulletin de l'automne 1993, dans lequel l'opération de conquête et d'appropriation de la part des physiciens envers les autres disciplines fut mise en cause. Mais ce genre de protestations reste plus unique que rare.

Cependant, la vision computationnelle des SSC ne se limite pas à l'aspect instrumental et méthodologique. Il s'agit d'une véritable ontologie ou vision de la nature, dans laquelle tous les systèmes complexes physiques, vivants et humains sont décrits et abordés comme des processus traitant de l'information. L'informaticienne du SFI Melanie Mitchell relate que ses professeurs universitaires lui ont appris l'idée selon laquelle l'étude de la computation s'étend, au-delà de l'informatique, à tous les domaines du savoir et de la nature [SFI 1992b, 26]. C'est dans la science des réseaux que cette conviction d'une nature ontologiquement informationnelle est la plus visible. L'un des présupposés métaphysiques qui permet aux spécialistes des réseaux d'employer leurs outils à tous les domaines du savoir repose sur l'homologie qu'ils présument être sous-jacente aux différents systèmes qu'ils analysent. Quelle que soit la sphère matérielle spécifique aux différents objets d'étude, à partir du moment où ils peuvent être pensés comme des réseaux, ils *sont* des réseaux. Populations de gènes, fourmilières, écosystèmes, villes, marchés financiers, épidémies : tout peut être modélisé dans un graphe composé de nœuds et d'arêtes. L'informaticien belge Hugues Bersini, ayant jonglé dans sa carrière entre plusieurs instituts de la complexité, dont le SFI, est explicite à cet égard :

« Lorsqu'on ramène [l]es réseaux à leur description minimale, délestés ainsi de toute terminologie propre à chaque discipline, sous la forme d'un ensemble de variables évoluant dans le temps en fonction des interactions avec les autres variables auxquelles elles se trouvent connectées, ce que l'on découvre des réseaux biologiques doit pouvoir s'appliquer, en partie, à la sociologie ou à l'informatique » [Bersini 2005, XVIII-XIX].

Certains spécialistes des systèmes complexes, à vrai dire minoritaires, se font même porteurs d'une vision de l'univers qui assimile ce dernier à un grand ordinateur. C'est le cas du physicien, informaticien et entrepreneur britannique Stephen Wolfram. Selon lui, l'univers est un processus computationnel. Si dans les SSC, la métaphore informationnelle devient une ontologie du cosmos, Wolfram arrive à inscrire cette métaphysique dans une vision cosmologique, voire cosmogonique : « Il se peut même, se demande-t-il rhétoriquement, que, de manière sous-jacente à tous les phénomènes complexes que l'on observe en physique, il existe un programme simple lequel, si exécuté suffisamment de temps, pourrait reproduire l'univers dans chaque détail ? » [Wolfram 2002, 465].

4.2. *La physique et sa tendance unificatrice*

Le premier ressort de l'influence de la physique sur les autres cultures épistémiques inscrites dans le domaine des SSC est la conviction selon laquelle la complexité des phénomènes supérieurs découle de la simplicité des phénomènes inférieurs. Une phrase

de Gell-Mann, contenue dans les actes d'un des colloques fondateurs du SFI, a constitué à la fois la synthèse de cette philosophie et le cap à tenir pour les associés du centre de recherche : « La complexité de surface émerge d'une simplicité profonde » [Pines 1988, 3]. Cette formule deviendra un des leitmotifs du SFI, et en particulier de la vie artificielle fondée par Christopher Langton [SFI 1988, 15], mais aussi de nombreux spécialistes des automates cellulaires comme Stephen Wolfram et de plusieurs physiciens des réseaux comme Albert-László Barabási [Barabási 2003].

Le deuxième motif issu de la physique, qui découle du premier, concerne ce que j'appelle la *tendance unificatrice*. En effet, de la même façon que dans plusieurs champs de recherche de la physique théorique on rêve d'une théorie unifiée, dans les premières années de l'histoire du SFI on visait à parvenir à une théorie générale des systèmes complexes. Plusieurs ateliers intégratifs furent organisés pour parvenir à une telle unification [Cowan 1994]. Ensuite, à partir de la deuxième moitié des années 1990, le projet fut abandonné, notamment suite à un article critique paru dans *Science* qui taxait les recherches menées au SFI de « peu solides » [Horgan 1995]. Dans ce texte, le journaliste scientifique John Horgan critiquait l'excès de *hype* des discours prometteurs de l'institut, l'attitude évangélique de certains de ses membres et le surcroît de crédit que l'on y donnait aux simulations numériques. Depuis ce texte, le public scientifique se divisa entre les admirateurs et les détracteurs plus ou moins déclarés du SFI – et ironiquement ce clivage est, encore aujourd'hui, opérant y compris à l'intérieur des SSC. Cependant, la tendance unificatrice est restée présente dans les esprits des membres du SFI tout au long de sa vie institutionnelle. Elle s'est réinvestie dans la recherche de théories générales locales. Par exemple, le travail des écologues Jim Brown et Brian Enquist et du physicien Geoffrey West sur la loi de puissance dans les êtres vivants va précisément dans ce sens : en raison de la structure fractale des corps des animaux, les ratios métaboliques de la souris ou de l'éléphant seraient proportionnellement semblables [SFI 1997, 7]. Leur travail, critiqué depuis, était salué par le SFI pour le fait d'avoir peut-être détecté le phénomène biologique le plus universel.

4.3. *Les mathématiques et la formalisation des autres savoirs*

Le troisième axe du projet épistémique des SSC exprime la volonté de rendre plus scientifiques les savoirs peu formalisés numériquement. Dans le bulletin du SFI de 1994, le propos est posé sans ambiguïté en citant les intentions du premier président de l'institut : « Essentiellement, la vision de [George] Cowan a été d'appliquer les outils quantitatifs des sciences physiques, comme les mathématiques, aux sciences sociales » [SFI 1994, 3]. La motivation d'une telle mission de naturalisation des SHS repose sur une conviction positiviste : « L'un de mes amis, témoigne Cowan, dit qu'il juge les articles scientifiques par le quotient entre narration et équations. S'il ne trouve pas d'équations, il ne lit pas l'article » [SFI 2000, 3]. En rapportant cette anecdote, le premier président du SFI exprime sa propre hiérarchie des savoirs. Ce qui ne va pas sans

rappeler la fameuse phrase d'Ernst Rutherford sur l'importance de la physique, que Cowan mentionne également : « En science, il n'y a que deux choses, la physique ou la collection de timbres » [Birks 1963]. De manière conséquente, le SFI déclare s'intéresser aux phénomènes dynamiques mesurables [SFI 2000, 3]. Cowan dirigera, au début des années 2000, un projet de formalisation des études cognitives [SFI 2002, 8]. Et Gell-Mann, à la même période, s'associera au linguiste russe Sergei Starostin et au linguiste américain Merritt Ruhlen, afin d'étudier l'arbre généalogique des langues de manière quantitative [SFI 2004a, 11]. Voici leur argumentaire : la linguistique diachronique classique avait jusque-là catégorisé les 6000 langues existantes en plusieurs familles selon leur ancêtre individuel, et cela à travers une méthodologie basée sur l'identification d'un ensemble de similarités phonétiques [SFI 2004, 11] ; ces efforts étant qualifiés de « préscientifiques » par le collectif basé au SFI, il fallait dorénavant se préoccuper de faire de la « vraie science », en appliquant les mathématiques à l'étude de la phylogénèse des langues. Selon Gell-Mann et ses collègues humanistes, le but de la « glottochronologie » devait être de découvrir la langue-mère commune à toutes les langues humaines par le biais de la langue mère de la nature, les mathématiques [SFI 2004, 12]. Plus qu'à une science post-galiléenne, celle menée au SFI ressemble donc à la quête d'une nouvelle *mathesis universalis*. Ici aussi les implications sont d'ordre ontologique tout autant qu'épistémologique et méthodologique. Le groupe de recherche en question traite les langues comme des objets physiques et biologiques auxquels on peut appliquer des régularités formelles [SFI 2004a, 14], alors que d'autres les qualifieraient de réservoirs de sens, de métaphysique, d'histoire, de contingence, de libre arbitre, d'imaginaire...

La formalisation numérique des SSC s'invite aussi dans les territoires des sciences de la vie. À la fin des années 1980, l'idée du SFI pour mettre en place l'interdisciplinarité consiste dans la mise en collaboration entre « généralistes » et « spécialistes », entre « théoriciens » et « expérimentalistes » [SFI 1989, 14]. Selon un bulletin de l'institut de 2001, un atelier fut organisé pour encourager le rapprochement des physiciens et mathématiciens avec les biologistes. Mais, encore une fois, l'échange ne fut pas conçu et effectué de manière égalitaire. Bien que les mathématiciens et les autres théoriciens apprennent des éléments de biologie, c'était aux biologistes de changer leurs méthodes d'enquête en apprenant les outils de modélisation des premiers [SFI 2001, 27]. Bref, au sein des SSC, les sciences tendanciellement moins mathématisées sont vues comme des sciences « brouillonnes », qu'il faut unifier sous le langage commun des mathématiques et de la computation¹⁰. Ce geste intellectuel relève d'une forme bien particulière de réductionnisme. Il ne s'agit pas de réduire tout au physique, pas plus qu'il ne s'agit non plus de nier la spécificité de chaque niveau de la nature et de la société. Il s'agit plutôt

¹⁰ « Self-organization would be the lens through which all of life could be seen, quantified, and well, organized – putting the messy sciences that are biology, sociology, and economics (as well as some of the most complicated physical phenomena) into a universal framework where mathematics and computation would guide research and discovery » : [SFI 2004b, 4].

de voir chaque niveau ontologique de la même manière que l'on voit et que l'on étudie le niveau physique – c'est-à-dire à travers le calcul [SFI 2004a]. Le mathématique, pendant fondamental des deux premiers axes du projet épistémique des SSC, est ce qui permet de tenir ensemble et de rendre compte de la « complexité » du réel : le holisme devient ainsi une autre forme de réductionnisme, alors qu'une position antiréductionniste et pluraliste favoriserait des échanges bidirectionnels et des complémentarités à la fois méthodologiques, métaphysiques et axiologiques entre les sciences en présence.

Cela ne va pas sans opposition à l'intérieur même des instituts de la complexité, où certains physiciens intéressés par les sciences sociales ont adopté le discours inverse, à savoir que la société ne saurait être mise en équation [Jensen 2018]. Il s'agit toutefois de cas isolés.

4.4. *Darwin et la vision concurrentielle et évolutive des systèmes complexes*

Le quatrième discours que nous allons examiner est inscrit dans la notion de « complex adaptive systems » (CAS) développée au SFI. Même si la définition canonique de ce concept n'est pas toujours partagée dans sa totalité ou de la même manière par tous les représentants de ce domaine dans le monde, elle condense les quatre discours que l'on vient d'illustrer :

« un [système complexe adaptatif est un] système dans lequel des grands réseaux de composants sans contrôle central et avec des règles simples d'opération donnent lieu à des comportements collectifs complexes, à un traitement sophistiqué de l'information et à l'adaptation via l'apprentissage ou l'évolution » [Mitchell 2009, 13].

L'attention pour l'évolution de la part des SSC se fonde sur une certaine lecture de Charles Darwin, parfois présenté comme un précurseur des SSC [SFI 1992a, 16]. Comme il est notoire, ni Darwin ni les biologistes en général n'ont ignoré le rôle des différentes formes de coopération observables dans la nature [Servigne & Chapelle 2017]. Certains affiliés du SFI ont même fait de la coopération un principe structurant des sociétés humaines [Axelrod 1997] et des celles des insectes sociaux dont s'inspirent des versions robotiques d'« essaims intelligents » [Bonabeau, Dorigo, & Théraulaz 1999]. Mais ce n'est pas la coopération qui est prédominante dans le discours biologisant du SFI, ni même une complémentarité entre celle-ci et la concurrence. C'est bien la compétition, à des fins d'adaptation, d'évolution et d'apprentissage, qui peuple les explications et les modèles produits par les fondateurs et premiers membres de l'institut américain. Par exemple, les algorithmes génétiques, les réseaux booléens et les réseaux de neurones sont des techniques informatiques où une série d'agents se retrouvent à innover de manière aléatoire en étant soumis au principe de la sélection naturelle.

L'intérêt du SFI pour l'évolution est, par ailleurs, illustré par l'organisation de plusieurs projets de recherche sur cette thématique [SFI 1999a, B]. Par ailleurs, Darwin est souvent explicitement associé à Adam Smith et à Friedrich von Hayek. Deux visions épistémiques se font, ainsi, d'emblée politiques : ce qui les lie est une même ontologie de l'humain, individualiste et concurrentielle.

Des voix discordantes existent tout de même. L'informaticien Cristopher Moore, membre du SFI depuis 2007, tient par exemple à prendre ses distances avec l'exportation des métaphores biologiques en économie, car elles naturalisent selon lui les marchés plus qu'elles ne le doivent : « 'L'économie n'est pas une jungle', dit Moore. Les systèmes économiques sont régis par des gouvernements, qui ne sont pas présents dans une forêt tropicale » [SFI 1999b, 29].

5. Conclusion

Les discours prometteurs à propos des SSC les décrivent comme des savoirs post-galiléens, post-newtoniens, post-laplaciens, antiréductionnistes et interdisciplinaires. J'ai tâché de montrer que le projet épistémique de ce domaine apparaît moins pluraliste, révolutionnaire et antiréductionniste que ce que l'on en dit. J'ai également apporté des éléments empiriques au soutien de cette thèse, en me concentrant surtout sur quatre discours programmatiques qui sont détectables dans les archives du SFI.

La thèse de cet article est qu'un rapport de domination ou d'invisibilisation marginalise, au sein des SSC, certaines visions du monde au profit d'une ou de quelques-unes d'entre elles. L'interdisciplinarité présuppose une multiplicité de voix et une collaboration entre elles. Mais les instituts de la complexité, depuis le SFI jusqu'à ses homologues éparpillés dans le monde, ne possèdent pas de laboratoires de sciences naturelles ou humaines. Les ordinateurs et les grilles de calcul sont les seuls outils de travail que l'on trouve dans ces centres de recherche. Les logiciels et les équations sont les principaux outils d'enquête des scientifiques. Ontologiquement, de la physique à la société, en passant par les écosystèmes, selon les SSC tout fonctionne comme un réseau informatique régi par les formes de la sélection naturelle.

Cela dit, on constate que l'emprise des savoirs numériques sur les autres se fait rarement sur fond de tension et de résistance. Les non-informaticiens recherchent l'expertise des informaticiens, pour s'y « soumettre » de manière spontanée, assumée et raisonnée, ou alors ils se mettent à apprendre le langage informatique de manière autonome. Lorsque des paléontologues ou des archéologues sollicitent des radiologues pour la datation par carbone 14, les visions épistémologiques et ontologiques des premiers restent sous leur propre contrôle. Au sein des SSC en revanche, les sciences de la vie et les sciences sociales semblent, pour le moment, abdiquer devant l'onto-épistémologie physico-computationnelle.

Remerciements

L'auteur tient à remercier Sébastien Lemerle, Julien Larregue et deux relecteurs anonymes pour leurs conseils.

Bibliographie

Alberts, David S. & Czerwinski, Thomas J. [1997], *Complexity, global politics, and national security*, Washington : National Defense University : http://www.dodccrp.org/files/Alberts_Complexity_Global.pdf.

Anderson, Philip [1972], More Is Different, *Science*, New Series, 177, 4047, 393-396.

Aubin, David & Dahan, Amy [2002], Writing the History of Dynamical Systems and Chaos : *Longue Durée* and Revolution, Disciplines and Cultures, *Historia Mathematica*, 29, 273-339.

Axelrod, Robert [1997] *The Complexity of Cooperation. Agent-Based Models of Competition and Collaboration*, Princeton : Princeton University Press.

Barabási, Albert-László [2003], *Linked. How Everything Is Connected to Everything Else and What It Means for Business, Science, and Everyday Life*, Londres : Plume.

Batty, Michael, Axhausen, Kay W., Giannotti, Fosca, Pozdnoukhov, Alexey, Bazzani, Armando, Wachowicz, Monica, Ouzounis, Georgios & Portugali, Yuval [2012], Smart cities of the future, *The European Physical Journal Special Topics*, 214, 481-518.

Bersini, Hugues [2005], *Des réseaux et des sciences. Biologie, informatique, sociologie : l'omniprésence des réseaux*, Paris : Vuibert.

Birks, J.B. (éd.) [1963], *Rutherford at Manchester*, New York : Benjamin.

Boltanski, Luc & Chiapello, Ève [1999], *Le nouvel esprit du capitalisme*, Paris : Gallimard.

Bonabeau, Éric, Dorigo, Marco & Théraulaz, Guy [1999], *Swarm Intelligence. From Natural to Artificial Systems*, New York : Oxford University Press.

Bourgine, Paul, Chavalarias, David & Perrier, Edith [2009], *French Roadmap for Complex Systems. 2008-2009 Edition*, Paris : ISC-PIF, RNSC & IXXI : <http://www.iscpif.fr/tiki-index.php?page=Roadmap-fr>.

Broca, Sébastien [2016], Épistémologie du code et imaginaire des 'SHS 2.0', *Variations*, 19, 2 : <https://journals.openedition.org/variations/701>.

Brunetta, Grazia & Baglione, Valeria [2013], Resilience in the Transition Towns movement. Towards a new urban governance, *TeMA. Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 6, 2, 251-264.

Cairney, Paul [2012], Complexity Theory in Political Science and Public Policy, *Political Studies Review*, 10, 3, 346-358.

Callard, Felicity & Fitzgerald, Des [2015], *Rethinking interdisciplinarity across the social sciences and neurosciences*, Houndmills & New York : Palgrave Macmillan.

Castellani, Brian [2014], Brian Castellani on the Complexity Science, *Theory Culture & Society blog* : <https://www.theoryculturesociety.org/brian-castellani-on-the-complexity-sciences/>.

- Cowan, George (éd.) [1994], *Complexity. Metaphors, Models, And Reality*, Boston : Addison Wesley.
- Cowan, George [2010], *Manhattan Project to the Santa Fe Institute. The Memoirs of George A. Cowan*, Albuquerque : University of New Mexico Press.
- Deffuant, Guillaume, Banos, Arnaud, Chavalarias, David, Bertelle, Cyril, Brodu, Nicolas, Jensen, Pablo, Lesne, Annick, Müller, Jean-Pierre, Perrier, Edith & Varenne, Franck [2015], Visions de la complexité. Le démon de Laplace dans tous ses états, *Natures Sciences Sociétés*, 23, 42-53.
- Fox–Keller, Evelyn [2009], Organisms, Machines, and Thunderstorms : A History of Self-Organization, Part Two. Complexity, Emergence, and Stable Attractors, *Historical Studies in the Natural Sciences*, 39, 1, 1-31.
- Fraisopi, Fausto [2012], *La complexité et les phénomènes. Nouvelles ouvertures entre science et philosophie*, Paris : Hermann.
- Gell-Mann, Murray [1994], *The Quark and the Jaguar. Adventures in the Simple and the Complex*, Londres : Abacus.
- Gleick, James [1988], *Chaos. Making a new science*, Londres : Sphere Books.
- Grauwin, Sébastien, Beslon, Guillaume, Fleury, Eric, Franceschelli, Sara, Robardet, Céline, Rouquier, Jean-Baptiste & Jensen, Pablo [2012], Complex Systems Science : Dreams of Universality, Reality of Interdisciplinarity, *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 63, 7, 1327–1338.
- Helmreich, Stefan [1998], *Silicon Second Nature. Constructing Artificial Life in a Digital World*, Berkeley & Los Angeles : University of California Press.
- Hooker, Cliff A. (éd.) [2011], *Philosophy of Complex Systems*, volume 10, Amsterdam : Elsevier / North Holland, 2011.
- Horgan, John [1995], From complexity to perplexity, *Scientific American*, 272, 6, 74-79.
- Jensen, Pablo [2018], *Pourquoi la société ne se laisse pas mettre en équations*, Paris : Seuil.
- Jordan, J. Scott, Srinivasan, Narayanan & van Leeuwen, Cees [2015] The role of complex systems theory in cognitive science, *Cognitive Processing*, 16, 4, 315-317.
- Kitano, Hiroaki (éd.) [2001], *Foundations of Systems Biology*, Cambridge: MIT Press.
- Larregue, Julien [2018], ‘C’est génétique’ : ce que les *twin studies* font dire aux sciences sociales, *Sociologie*, 9, 3, 285-304.
- Law, John & Mol, Annemarie (éds.) [2002], *Complexities. Social studies of knowledge practices*, Durham & London : Duke University Press.
- Lehn, Jean-Marie [2002], Toward Self-Organization and Complex Matter, *Science*, 295, 5564, 2400-2403.
- Lemerle, Sébastien & Reynaud-Paligot, Carole (éds.) [2017], *Biologisation du social. Discours et pratiques*, Nanterre : Presses universitaires de Paris Nanterre.

- Li Vigni, Fabrizio [2018a], *Les systèmes complexes et la digitalisation des sciences. Histoire et sociologie des instituts de la complexité aux États-Unis et en France*, Paris : École des Hautes Études en Sciences Sociales.
- Li Vigni, Fabrizio [2018b], La place du désordre dans les différentes traditions des théories de la complexité, dans *L'avenir de la complexité et du désordre*, édité par Jean-Claude Lévy, Paris : Éditions Matériologiques, 99-110.
- Li Vigni, F. [à paraître], Normativité et régimes du futur. Trois communautés d'anticipation dans les sciences de la complexité, *Revue d'anthropologie des connaissances*.
- Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche [2013], *Stratégie Nationale de Recherche*, Paris : MESR.
- Mitchell, Melanie [2009], *Complexity. A Guided Tour*, Oxford & New York : Oxford University Press.
- OECD [2017], *Debate the Issues : Complexity and policy making*, Paris : OECD Publishing : <http://dx.doi.org/10.1787/9789264271531-en>.
- Pagels, Hans R. [1989], *The Dreams of Reason. The Computer and the Rise of the Sciences of Complexity*, New York : Bantam Books.
- Pietronero, Luciano [2008], Complexity ideas from condensed matter and statistical physics, *Europhysics News*, 39, 26-29.
- Pines, David (éd.) [1988], *Emerging Syntheses in Science. Proceedings of the Founding Workshops of the Santa Fe Institute, Santa Fe, New Mexico. Volume I*, New York : Perseus Books.
- President's Council of Advisors on Science and Technology [2016], *Report to the President on the Technology and the Future of Cities* : <https://www.whitehouse.gov/sites/whitehouse.gov/files/images/Blog/PCAST%20Cities%20Report%20%20FINAL.pdf>.
- Schellnhuber, Hans Joachim [1999], Earth system analysis and the second Copernican revolution, *Nature*, 402, C19-C23.
- Schweber, Sam & Wächter, Matthias [2000], Complex Systems, Modelling and Simulation, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 31, 4, 583-609.
- Servigne, Pablo & Chapelle, Gauthier [2017] *L'entraide. L'autre loi de la jungle*, Paris : Les Liens qui Libèrent.
- SFI [1988], *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 3, 1.
- SFI [1989], *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 4, 2.
- SFI [1992a], *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 7, 1.
- SFI [1992b], *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 7, 2.
- SFI [1994], *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 9, 2.
- SFI [1996-1997], *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 12, 1.
- SFI [1997], *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 12, 2.
- SFI [1999a], *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 14, 1.

- SFI [1999b], *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 14, 2.
- SFI [2000], *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 15, 2.
- SFI [2001], *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 16, 1.
- SFI [2002], *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 17, 1.
- SFI [2004a], *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 19, 1.
- SFI [2004b], *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 19, 2.
- Taylor, Mark C. [2003], *The Moment of Complexity. Emerging Network Culture*, Chicago : University of Chicago Press.
- Urry, John [2005], The Complexity Turn, *Theory, Culture & Society*, 22, 5, 1-14.
- Urry, John [2006], Complexity, *Theory, Culture & Society*, 23, 2-3, 111-117.
- Varenne, Franck [2009], Models and Simulations in the Historical Emergence of the Science of Complexity, dans *From System Complexity to Emergent Properties. Understanding Complex Systems*, édité par M.A. Aziz-Alaoui & C. Bertelle, Berlin & Heidelberg : Springer.
- Waldrop, Mitchell M. [1992], *Complexity. The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*, New York : Simon & Schuster Paperbacks.
- Williams, Lambert [2012], *Modeling, Building, Writing : A History of Nonlinear Dynamics and Complex Systems*, Cambridge : Harvard University.
- Wimsatt, William C. [1994], The ontology of complex systems : levels of organization, perspectives, and causal thicket, *Canadian Journal of Philosophy*, 24, 1, 207-274.
- Wolfram, Stephen [2002], *A New Kind of Science*, Champaign : Wolfram Media.
- Wolfram, Stephen [2012], It's Been 10 Years: What's Happened with *A New Kind of Science*?, *Stephen Wolfram blog* : <http://blog.stephenwolfram.com/2012/05/its-been-10-years-whats-happened-with-a-new-kind-of-science/>.
- Zuchowski, Lena [2018], Complexity as a contrast between dynamics and phenomenology, *Studies In History and Philosophy of Science Part B : Studies In History and Philosophy of Modern Physics*, 63, 86-99.