



CONVICTIONS YÉLÉ

2025-2030

#2

CONVICTION #2 COMPLEXITÉ – NOUS COMPLEXIFIONS NOTRE MONDE. OR, POUR Y PRENDRE DES DÉCISIONS PERTINENTES, IL DEVIENT IMPÉRATIF D'ÉLARGIR NOS MODÈLES ÉCONOMIQUES POUR Y REFLÉTER CETTE COMPLEXITÉ.

Notre environnement, nos sociétés, nos économies et nos ressources s'imbriquent à tel point qu'ils forment un « système de systèmes ». Or, nos modèles de décision économique actuels représentent mal ces interactions, ce qui augmente le risque d'erreur stratégique. Il est donc **urgent** d'adopter des modèles décisionnels plus aptes à refléter la complexité de notre monde.

Edgar Morin disait : « *Quand je parle de complexité, je me réfère au sens latin élémentaire du mot « complexus », « ce qui est tissé ensemble ». Les constituants sont différents, mais il faut voir comme dans une tapisserie la figure d'ensemble. Le vrai problème [...] c'est que nous avons trop bien appris à séparer. Il vaut mieux apprendre à relier. [...] Le monde lui-même s'est autoproduit de façon très mystérieuse. La connaissance doit avoir aujourd'hui des instruments, des concepts fondamentaux qui permettront de relier.* »

La Science du Complexe s'attaque précisément à cette tâche.

Nos modèles (et théories) économiques vivent mal l'épreuve de la réalité...

Voyez-vous un rapport entre biologie et économie ? Ou, plus précisément, entre l'idée d'évolution des espèces émise par Charles Darwin dans ses éditions successives de L'Origine des Espèces entre 1859 et 1869 et le fonctionnement quotidien des marchés, par exemple, de l'énergie ?

Un premier indice : pour Darwin, toutes les nouvelles espèces vivantes trouvent leurs sources dans des espèces déjà existantes et toutes les espèces partagent un ancêtre commun. Par ailleurs, Darwin théorise que les organismes les mieux capables d'adaptation à l'évolution de leur environnement sont ceux qui survivent et se reproduisent le mieux à long terme.

Un autre (et dernier) indice : sur un marché où s'échange l'énergie – gaz, pétrole, ou électricité – une multitude d'acheteurs et de vendeurs élaborent et appliquent continuellement leurs propres stratégies d'achat et de vente. Même si ce marché ouvre et ferme chaque jour à heures régulières, chaque participant garde – par son bilan – une trace des décisions qu'il a prises dans le passé et des conséquences qu'elles ont eues sur sa position. Ainsi, ceux dont les stratégies s'avèrent le plus souvent appropriées à la situation du jour ressemblent à ces espèces darwiniennes qui ont le plus de chances de traverser les âges.

Cette analogie entre biologie et économie prend forme en 1982 avec l'essai Une Théorie Evolutionniste du Changement Economique, formulée par les économistes américains Richard Nelson et Sidney Winter. Inspirés par la percée des premiers modèles informatiques capables de fidèlement représenter l'évolution de vastes populations animales et dus au généticien britannique John Maynard Smith (années 1970-1980), **Nelson et Winter transposent cette approche de simulation à l'évolution des entreprises et de leurs marchés.** À leur tour, ils simulent de larges populations d'acteurs économiques avec leurs propres préférences, et leurs propres aptitudes à apprendre de leur expérience, pour mieux comprendre l'évolution des marchés.

Ainsi présentée, l'approche de Nelson et Winter peut vous sembler assez intuitive pour penser qu'elle ferait office de vérité générale chez les économistes, or la réalité est tout autre. Dans les années 1970-1980, leur approche évolutionniste de l'économie est une critique et, surtout, une nouvelle tentative de dépasser certaines limites de la pensée néoclassique prédominante depuis le 19ème siècle – et dont les travaux de Robert Solow ou Milton Friedman sont représentatifs.

Trop d'axiomes irréalistes : Nelson et Winter estiment que la théorie néoclassique représente mal la réalité des problèmes économiques, car elle se fonde sur des **axiomes – des principes théoriques non démontrés** – et cherche à calculer des optima ou « équilibres » de marché hypothétiques. Or, les premiers modèles de Nelson et Winter ont, eux, voulu aider à **mieux saisir les dynamiques décisionnelles qui rendent irréversible l'évolution d'une firme, en s'affranchissant d'axiomes**. Par exemple – et nous pourrions en citer d'autres, l'hypothèse selon laquelle toute firme cherche avant tout à maximiser son profit ou celle affirmant que tout acteur est purement rationnel sont emblématiques de la théorie néoclassique. Or, en pratique – et Winter le soutient, ces axiomes sont très réducteurs, car toute entreprise découvre dynamiquement son environnement, ses concurrents, et fait donc évoluer sa propre grappe d'objectifs et de contraintes continuellement. Cette première approche évolutionniste ne fonde cependant l'apprentissage des entreprises que sur les faits passés. Elle omet leur capacité à mobiliser d'autres connaissances – par exemple, celles d'autres acteurs.

Prédominants dans les modes de décision, mais aussi d'éducation et de recherche économiques et politiques, **les modèles néoclassiques dominent toujours, mais se heurtent à des échecs dont la taille croissante tend à les questionner plus ouvertement, notamment depuis les années 2000.**

Attardons-nous sur un seul exemple assez récent : l'éclatement de la bulle immobilière américaine – ou crise des *subprimes* – causa la « Grande Récession » de 2007-2009. Celle-ci eut un effet dévastateur sur l'économie mondiale. Des millions d'Américains perdirent leur logement, leur emploi et leur épargne, puis l'Europe de l'Ouest souffrit de longues années : effondrement du gouvernement et nationalisation des banques islandaises, chômage record, défaut de la dette publique et sévère austérité en Espagne, Grèce, Irlande, Italie, ou encore au Portugal. Les régulateurs financiers et banques centrales pâtirent des **lacunes majeures de leurs outils d'estimation des risques du système financier international, inaptes par leur nature à envisager des chocs majeurs et leur propagation.**

Ces outils comptent deux familles [16]. La première est « économétrique » et s'alimente de données historiques, s'interdisant ainsi d'envisager des surprises futures. L'autre est celle des modèles macroéconomiques dits « d'équilibre général dynamique et aléatoire ». Ceux-ci impliquent un monde où offre et demande sont faites pour s'équilibrer et où, à nouveau, il s'agit d'identifier les sentiers optimaux pour atteindre un objectif de politique économique donné, sans pour autant envisager des chocs qui compromettraient ce but. Avant 2007, les modèles des banques centrales ont échoué à cartographier la nature reliée des systèmes bancaires et des marchés financiers, sous-estimant le potentiel de propagation de défauts sur les dettes immobilières aux États-Unis en crise financière à l'échelle globale. **Ainsi, ces modèles ont sous-évalué le risque systémique.**

Ce risque émane du vocabulaire des régulateurs financiers, mais nous croyons que son principe est **tout aussi transposable** aux dégâts contagieux qu'encourt, par exemple, une chaîne logistique industrielle face à des chocs climatiques brutaux, ou encore au risque de panne étendue d'un système électrique régional ou continental si l'une de ses parties est touchée par une cyberattaque.

...or il est urgent d'étendre notre vision économique pour saisir la réalité d'un monde qui se complexifie à l'extrême, et la Science du Complexe peut nous y aider

Gardons à l'esprit qu'un « système », quel qu'il soit, est un ensemble d'éléments interconnectés – des personnes, des centrales électriques, des particules, des banques, etc. – mis en réseau, parfois aléatoirement, parfois par un mécanisme donné. **Plus ces éléments sont nombreux et plus ils sont interconnectés avec le temps, plus ce système devient complexe.**

Notre monde vit cette complexification de façon si continue qu'il n'est pas évident d'en dater un point de départ. Si nous pensons aux marchés de l'électricité européens, nous pourrions imaginer que le début des années 2000, avec les premières directives de libéralisation du secteur électrique, marque une réelle bifurcation vers nos systèmes énergétiques aujourd'hui si diversifiés, numérisés, et interreliés. Ces mêmes marchés se composent de différents systèmes : de nombreux réseaux d'infrastructures phy-

siques, des réseaux d'échange d'informations toujours plus nombreux, des places de marché aux mille et une ramifications. Cette liste vous semble-t-elle complète ?

Non, bien sûr : les ramifications de ces « sous-systèmes » ne cessent de se multiplier, avec des transformations telles que l'adoption croissante des énergies renouvelables décentralisées et de nouveaux usages énergétiques individuels. De plus, cette liste souligne seulement des composantes intrinsèques à ces marchés. Or, ceux-ci interagissent plus ou moins directement avec bien d'autres systèmes exogènes : par exemple, des réseaux de transport ou de télécommunications, les milieux urbains ou ruraux où les infrastructures sont implantées, ou encore – et surtout – **les systèmes naturels liés à l'environnement**. Les systèmes précités sont de plus en plus imbriqués par leurs interactions croissantes : ils finissent par former des « systèmes de systèmes », ce qui les rend **collectivement et dynamiquement plus complexes**.

Alors, finalement, avons-nous uniquement besoin d'un « autre modèle économique » ou d'abattre les barrières des modèles économiques pour qu'ils puissent intégrer les facettes des autres systèmes avec lesquelles ils évoluent ?

À cet égard, la Science du Complexe nous semble désormais incontournable. Ce champ scientifique interdisciplinaire cherche à comprendre les systèmes complexes dans toutes leurs dimensions : qu'elles soient économiques, biologiques, physiques, sociales, ou autres. C'est par son prisme que le courant dit d'« éconophysique » transpose des principes de physique mathématique à l'étude des phénomènes financiers et économiques, et tente aussi de les relier à des réalités essentielles comme le changement climatique. Le pari de cette approche est de s'affranchir au maximum d'axiomes et de s'employer à représenter nos réalités telles qu'elles sont. Le physicien contemporain français Jean-Philippe Bouchaud déclarait dans Nature [2], à ce titre, suite à la crise financière de 2008 : « **Economics needs a scientific revolution** ».

En l'occurrence, le climat et ses composantes forment – à eux seuls – un superbe archétype de système complexe. Et, même si nous rêvions de vous parler aussi des liens que l'économiste italienne Irene Monasterolo a modélisés entre économie et climat, **nous voudrions déjà ici illustrer la force de la Science du Complexe par sa capacité démontrée à décrire – et prédire – le fonctionnement des systèmes climatiques.**

Le Prix Nobel de physique 2021 fut conjointement décerné, pour une moitié au japonais Syukuro Manabe et à l'allemand Klaus Hasselmann et, pour l'autre moitié, à l'italien Giorgio Parisi. Leurs travaux fondés sur la complexité des systèmes climatiques ont directement permis d'accroître le réalisme des « *Earth System Models* » ou « *ESMs* ». Les *ESMs* sont des simulations sophistiquées qui forment notre point de référence mondial, universel, des relations entre nos mécanismes naturels physiques pour décrire – et prédire [20] – les phénomènes de court terme (quelques jours) comme la météo, et de moyen terme (quelques mois) comme le changement climatique.

Ces grands mécanismes naturels incluent l'atmosphère (l'enveloppe gazeuse de la Terre), la cryosphère (l'eau sous forme de glace), l'hydrosphère (l'eau sous forme liquide), et la lithosphère (le « matériau » terre), mais **une multitude de processus biologiques, et chimiques** régissent les interactions entre ces systèmes sur différentes échelles de temps et géospatiales. Les séries de travaux de Manabe, Hasselmann, et Parisi ont permis de **les comprendre avec une fidélité, une précision et une répliquabilité inédites**.

Manabe et Hasselmann ont permis, dès lors, de comprendre et prédire très finement la variabilité des phénomènes climatiques. **Aujourd'hui, le projet de jumeau numérique "Destination Earth" de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) s'appuie sur le modèle de prédiction de Manabe et Hasselmann pour fournir d'ici à 2030 une « réplique digitale intégrale de la Terre ».** Son objectif principal sera d'aider l'Union européenne à suivre, prédire, voire parer à de futurs chocs climatiques extrêmes.

Parisi et ses collaborateurs ont, eux, enrichi les outils de la Science du Complexe en parvenant à modéliser fidèlement ce qu'on appelle des « *tipping points* » ou « points de bascule » climatiques, et leurs dynamiques. Pour s'adapter au changement climatique, il est crucial de comprendre et anticiper ces moments de bascule, car ils traduisent **le passage, abrupt et irréversible, d'un état climatique à un autre. Le phénomène de retrait des banquises arctique et antarctique est un exemple de *tipping point*.** Les contributions de Parisi trouvent une résonance bien au-delà de la science du climat, dans les mathématiques, les neurosciences, le *machine learning* [20].

...notamment grâce à ses quelques principes premiers, la Science du Complexe vise effectivement à représenter les phénomènes les plus difficiles à expliquer « tels qu'ils sont »

Les travaux menés par Hasselmann, Manabe et Parisi ont pour même colonne vertébrale plusieurs principes que la Science du Complexe observe pour décrire les caractéristiques des systèmes climatiques. Inspirés par les cadres plus formels des physiciens Pier Luigi Gentili [18] (Université de Pérouse) et Henrik Jeldtoft Jensen [27] (Imperial College London), nous dressons ici un bref portrait-robot des attributs types d'un système complexe :

- **L'interaction** : le système climatique compte un très grand nombre de sous-systèmes et d'éléments individuels hétérogènes qui **interagissent en réseau et avec leur environnement**.
- **L'émergence** : les boucles de rétroaction entre éléments du système climatique **font émerger des phénomènes collectifs qui sont perceptibles à l'échelle du système**. Or ceux-ci représentent un « tout » différent de la somme des microphénomènes liés aux processus biologiques individuels.
- **La dynamique hors équilibre** : la plupart des systèmes naturels sont dits "hors équilibre" au sens thermodynamique, c'est-à-dire qu'ils sont **tôt ou tard voués à évoluer de manière irréversible**. Les éléments du système climatique sont ouverts à leur milieu et échangent donc des flux de matière et d'énergie avec d'autres systèmes et font l'objet de réactions chimiques.
- **L'irréductibilité mathématique** : les propriétés précédemment énoncées rendent **impossible de réduire ou résumer le système climatique par une expression mathématique ou des lois**. Comme pour la plupart des systèmes complexes, c'est la **simulation algorithmique** qui permet le mieux de représenter les dynamiques climatiques.
- **La difficulté à prédire** : selon Gentili [18], le comportement futur du système climatique est d'autant plus difficile à prédire que sa dimension mathématique le rend insoluble par des calculs et que ses composantes manifestent des formes très différentes de variabilités (ou « stochasticités », dans le vocabulaire mathématique).
- **L'incertitude radicale** : les systèmes complexes, et le climat en particulier, sont sujets à des surprises de grande ampleur. Prédire des événements climatiques majeurs est difficile parce que les systèmes naturels ont des dynamiques « chaotiques ». Cela couvre deux aspects. D'abord, les chocs naturels sont « apériodiques » : ils ne se produisent pas à intervalles réguliers donc il est impossible d'en évaluer la probabilité. Ensuite, ces événements dépendent fortement de l'état de départ unique, à un moment donné, du système qui génère ce choc. Or il est rarement possible de mesurer cet état en pratique.
- **La non-linéarité** : enfin, la magnitude des troubles climatiques est aussi dure à estimer parce que les mécanismes naturels ont parfois une extrême sensibilité à de petites variations dans leur milieu. Par exemple, l'assèchement d'une source aquifère peut causer l'effondrement en chaîne des espèces vivantes dans un écosystème. Ou encore, le caractère chaotique des précipitations peut perturber les « patterns hydrologiques » et avoir un impact plus que proportionnel sur les productions des barrages hydroélectriques, ce qui peut alimenter la volatilité des prix de l'électricité dans une région où ce type de production prédomine.

Les propriétés que nous venons de décrire ci-dessus incarnent le point de vue de la Science du Complexe : si nous voulons agir sur un système complexe, alors nous devons le représenter, ainsi que ses caractéristiques, aussi fidèlement que possible. Dans notre monde en complexification, **la clé de notre compréhension réside donc dans le réalisme de nos modélisations**.

À titre d'exemple actuel et de conclusion, retenons le recours accru à la modélisation basée sur les agents – « *agent-based modelling* » ou « ABM » dans le domaine des marchés de l'électricité européens depuis les années 2017-2018. L'intégration des marchés de l'énergie européens s'accompagne d'une forte granularisa-

tion des échanges physiques et financiers d'électricité, par exemple.

En l'occurrence, le nombre d'acteurs électriques de toutes tailles mis en interaction en Europe, leurs rôles – de production, consommation, stockage, et services de flexibilité – et leur capacité croissante à interagir en quasi-temps réel au sein d'un même continuum de marchés rend les prévisions d'offre, de demande, et de prix beaucoup plus complexes à mener. Ainsi, l'Université de Freiburg [22] formule-t-elle en 2023 un modèle « ABM » du marché de gros d'électricité où les acteurs affinent leurs stratégies de trading grâce à une approche de *deep learning* qui permet d'intégrer une bien plus large gamme de variables prédictives que les modèles prévisionnels classiques.

Nous croyons que la Science du Complexe s'apprête à jouer un rôle crucial pour éclairer la politique publique – tant nationale que supranationale, mais également les choix stratégiques de grands acteurs tels que les opérateurs énergétiques et les participants aux marchés des énergies.

Guiv Roger MORIN
Manager chez Yélé Consulting



Innovons pour une performance durable !

YÉLÉ CONSULTING
+33 (0)1 89 40 25 50
5 esplanade Charles de Gaulle
92000 NANTERRE

contact@yele.fr

WWW.YELE.FR



Références

- [1] Arthur, W. B. (2021). Foundations of complexity economics. *Nature Reviews Physics*, 3(2), 136-145.
- [2] Axtell, R. L., & Farmer, J. D. (2022). Agent-based modeling in economics and finance: Past, present, and future. *Journal of Economic Literature*.
- [3] Bale, C. S., Varga, L., & Foxon, T. J. (2015). Energy and complexity: New ways forward. *Applied Energy*, 138, 150-159.
- [4] Balint, T., Lamperti, F., Mandel, A., Napoletano, M., Roventini, A., & Sapio, A. (2017). Complexity and the economics of climate change: a survey and a look forward. *Ecological Economics*, 138, 252-265.
- [5] BCBS. (2021). Climate-related financial risks—Measurement methodologies.
- [6] Bompard, E., Connors, S., Fulli, G., Han, B., Maserà, M., Mengolini, A., & Nuttall, W. J. (2012). Smart energy grids and complexity science. JRC Scientific and Policy Reports.
- [7] Bouchaud, J. P. (2008). Economics needs a scientific revolution. *Nature*, 455(7217), 1181-1181.
- [8] Brelford, C., Clewlow, R., Geddes, J., la Cerva, G., Nguyen, H., Wolf, A. (2015). Opportunities for Complexity Theory to Advance Climate Change Research. Santa Fe Institute.
- [9] Carlin, D., Stopp, A. (2022). The Climate Risk Tool Landscape 2022 Supplement.
- [10] Carney, M. (2015). Breaking the tragedy of the horizon—climate change and financial stability. Speech given at Lloyd's of London, 29, 220-230.
- [11] Chenet, H., Ryan-Collins, J., & Van Lerven, F. (2021). Finance, climate-change and radical uncertainty: Towards a precautionary approach to financial policy. *Ecological Economics*, 183, 106957.
- [12] ENTSOE (2020). Vision on Market Design and System Operation towards 2030.
- [13] European Central Bank. (2021). The state of climate and environmental risk management in the banking sector.
- [14] EUROSIF. (2023). Eurosif Report on Climate-related Data.
- [15] Fan, J., Meng, J., Ludescher, J., Chen, X., Ashkenazy, Y., Kurths, J., ... & Schellnhuber, H. J. (2021). Statistical physics approaches to the complex Earth system. *Physics reports*, 896, 1-84.
- [16] Farmer, J. D., & Foley, D. (2009). The economy needs agent-based modelling. *Nature*, 460(7256), 685-686.
- [17] Financial Stability Board (FSB). (2022). FSB-Supervisory and Regulatory Approaches to Climate-related Risks.
- [18] Gentili, P. L. (2021). Why is Complexity Science valuable for reaching the goals of the UN 2030 Agenda?. *Rendiconti Lincei. Scienze fisiche e naturali*, 32(1), 117-134.
- [19] Gourdel, R., Monasterolo, I., Dunz, N., Mazzocchetti, A., & Parisi, L. (2022). The double materiality of climate physical and transition risks in the euro area.
- [20] Gupta, S., Mastrantonas, N., Masoller, C., & Kurths, J. (2022). Perspectives on the importance of complex systems in understanding our climate and climate change—The Nobel Prize in Physics 2021. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 32(5).
- [21] Hafner, S., Anger-Kraavi, A., Monasterolo, I., & Jones, A. (2020). Emergence of new economics energy transition models: a review. *Ecological Economics*, 177, 106779.
- [22] Harder, N., Qussous, R., & Weidlich, A. (2023). Fit for purpose: Modeling wholesale electricity markets realistically with multi-agent deep reinforcement learning. *Energy and AI*, 14, 100295.
- [23] Herrmann, J., & Savin, I. (2016). Optimal Policy Identification: Insights from the German Electricity Market—Working paper no. 2016-16.
- [24] Hoekstra, A., Steinbuch, M., & Verbong, G. (2017). Creating agent-based energy transition management models that can uncover profitable pathways to climate change mitigation. *Complexity*, 2017, 1-23.
- [25] Hubert, R., Marginean, I., Cardona, M., Clapp, C., & Sillmann, J. (2021). Addressing challenges of physical climate risk analysis in financial institutions. institutions.
- [26] Jensen, H. (2022). *Complexity Science: The Study of Emergence*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781108873710
- [27] Kell, A. J., McGough, S., & Forshaw, M. (2022). Machine learning applications for electricity market agent-based models: A systematic literature review. arXiv preprint arXiv:2206.02196.
- [28] Mounfield, C. C. (2021). *The Handbook of Agent Based Modelling*. Independently published (7 Dec. 2020).
- [29] Network for Greening the Financial System (NGFS). (2022). Final report on bridging data gaps.
- [30] Nitsch, F., & El Ghazi, A. A. (2021). Day-ahead market coupling in an agent-based electricity market model.
- [31] Ridha, E., Nolting, L., & Praktijnjo, A. (2020). Complexity profiles: A large-scale review of energy system models in terms of complexity. *Energy Strategy Reviews*, 30, 100515.
- [32] Sciuillo, A., Vallino, E., Iori, M., & Fontana, M. (2019). Paths and processes in complex electricity markets: The agent-based perspective. In *Routledge Handbook of Energy Economics* (pp. 522-533). Routledge.
- [33] Shinde, P., Gamberi, G., & Amelin, M. (2023). A multi-agent model for cross-border trading in the continuous intraday electricity market. *Energy Reports*, 9, 6227-6240.
- [34] UNPRI. (2023). Climate data and net zero closing the gap on investors' data needs.
- [35] Weiskopf, T., Zimmermann, F., & Kraft, E. (2023). The long-term impact of increased fossil fuel prices and market design on the market values of renewable generation. In 18th IAEE European Conference "The Global Energy Transition Toward Decarbonization" (2023), Mailand, Italien, 24.07. 2023–27.07. 2023.
- [36] Zimmermann, F., & Keles, D. (2023). State or market: Investments in new nuclear power plants in France and their domestic and cross-border effects. *Energy Policy*, 173, 113403.