



LA COMPLEXITÉ EXPLIQUÉE

#ComplexityExplained

TABLE DES MATIÈRES

1	Interactions	4
2	Emergence	6
3	Dynamique	8
4	Auto-organisation	10
5	Adaptation	12
6	Interdisciplinarité	14
7	Méthodes	16



LA COMPLEXITÉ EXPLIQUÉE



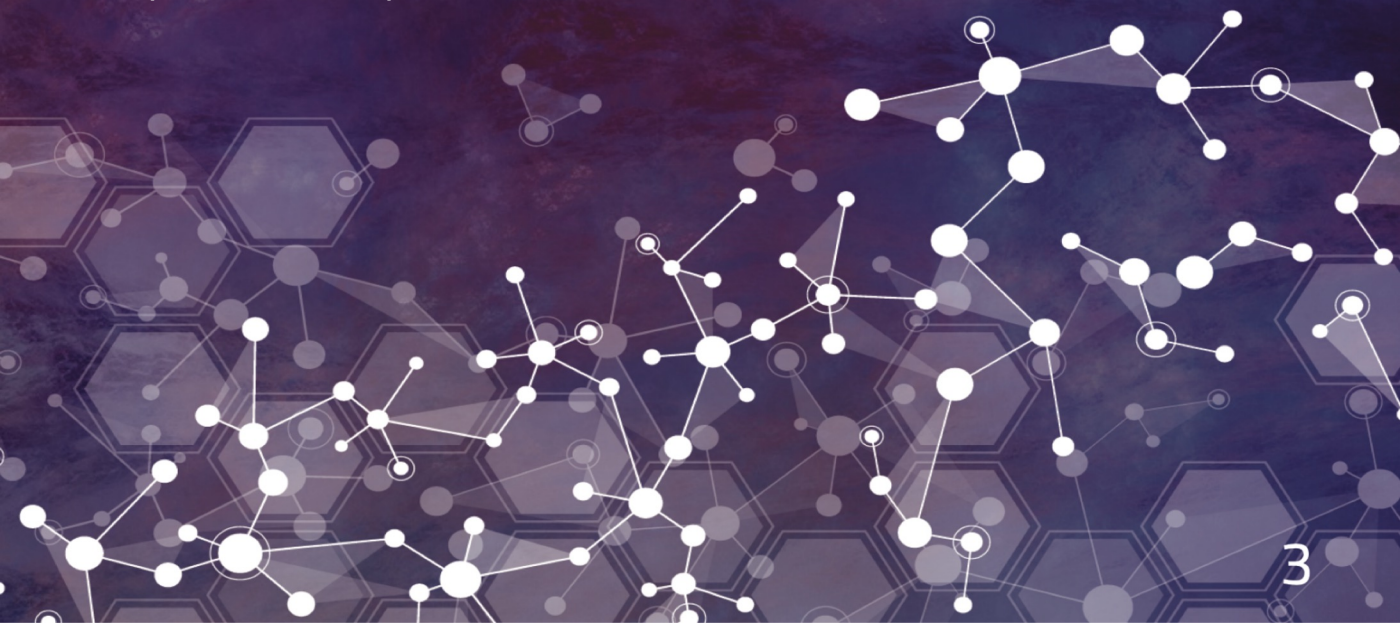
« Il n'y a pas d'amour dans un atome de carbone, pas d'ouragan dans une molécule d'eau, pas d'effondrement financier dans un dollar »

(Peter Dodds)

La science de la complexité, également appelée science des systèmes complexes, étudie comment une vaste collection de composants — interagissant localement entre eux à petite échelle — peut spontanément s'auto-organiser pour présenter des structures et des comportements globaux non triviaux à des échelles plus larges, souvent sans intervention externe, autorités centrales ou leaders.

Les propriétés de l'ensemble ne peuvent pas être comprises ou prédites par la seule connaissance complète de ses constituants. Un tel ensemble est appelé système complexe et nécessite de nouveaux cadres mathématiques et méthodologies scientifiques pour son investigation.

Voici quelques éléments que vous devriez connaître sur les systèmes complexes.





INTERACTIONS

LES SYSTÈMES COMPLEXES SONT CONSTITUÉS DE NOMBREUX COMPOSANTS INTERAGISSANT ENTRE EUX ET AVEC LEUR ENVIRONNEMENT DE MULTIPLES FAÇONS.

« *Chaque entité étudiée en biologie est un système de systèmes.* »

(François Jacob)

Les systèmes complexes se caractérisent souvent par de nombreux composants qui interagissent de multiples façons entre eux et potentiellement avec leur environnement. Ces composants forment des réseaux d'interactions, parfois avec seulement quelques composants impliqués dans de nombreuses interactions. Ces interactions peuvent générer de nouvelles informations, rendant difficile l'étude des composants isolément ou la prédiction complète de leur évolution future. De plus, les composants d'un système peuvent également être de nouveaux systèmes à part entière, menant à des systèmes de systèmes interdépendants les uns des autres.

Le principal défi de la science de la complexité est non seulement de voir les parties et leurs connexions, mais aussi de comprendre comment ces connexions donnent naissance à l'ensemble.

EXEMPLES:

- Les milliards de neurones interconnectés dans le cerveau humain.
- Les ordinateurs qui communiquent sur internet.
- Les relations humaines.

CONCEPTS ASSOCIÉS:

Système, composant, interactions, réseau, structure, hétérogénéité, interrelation, interconnexion, interdépendance, sous-systèmes, frontières, environnement, systèmes ouverts/fermés, systèmes de systèmes.

RÉFÉRENCES:

Mitchell, Melanie.
Complexity: A Guided Tour .
Oxford University Press, 2009.

Capra, Fritjof and Luisi, Pier Luigi.
The Systems View of Life: A Unifying Vision.
Cambridge University Press, 2016.





ÉMERGENCE

LES PROPRIÉTÉS D'UN SYSTÈME COMPLEXE DANS SON ENSEMBLE SONT TRÈS DIFFÉRENTES, ET SOUVENT INATTENDUES, DES PROPRIÉTÉS DE SES COMPOSANTS INDIVIDUELS.

« Vous n'avez pas besoin de plus pour obtenir plus. C'est ce que signifie l'émergence. »

(Murray Gell-Mann)

Dans les systèmes simples, les propriétés de l'ensemble peuvent être comprises ou prédites à partir de l'addition ou de l'agrégation de ses composants. En d'autres termes, les propriétés macroscopiques d'un système simple peuvent être déduites des propriétés microscopiques de ses parties. Cependant, dans les systèmes complexes, les propriétés de l'ensemble ne peuvent souvent pas être comprises ou prédites à partir de la connaissance de ses composants en raison d'un phénomène connu sous le nom d'« émergence ». Ce phénomène implique divers mécanismes où les interactions entre les composants d'un système génèrent de nouvelles informations et présentent des structures et des comportements collectifs non triviaux à des échelles plus larges. Ce fait est généralement résumé par la phrase populaire : « Le tout est plus que la somme de ses parties. »

EXEMPLES:

- Une grande quantité de molécules d'eau et d'air formant une tornade.
- De multiples cellules formant un organisme vivant.
- Des milliards de neurones qui forment un cerveau capable de conscience et d'intelligence.

CONCEPTS ASSOCIÉS:

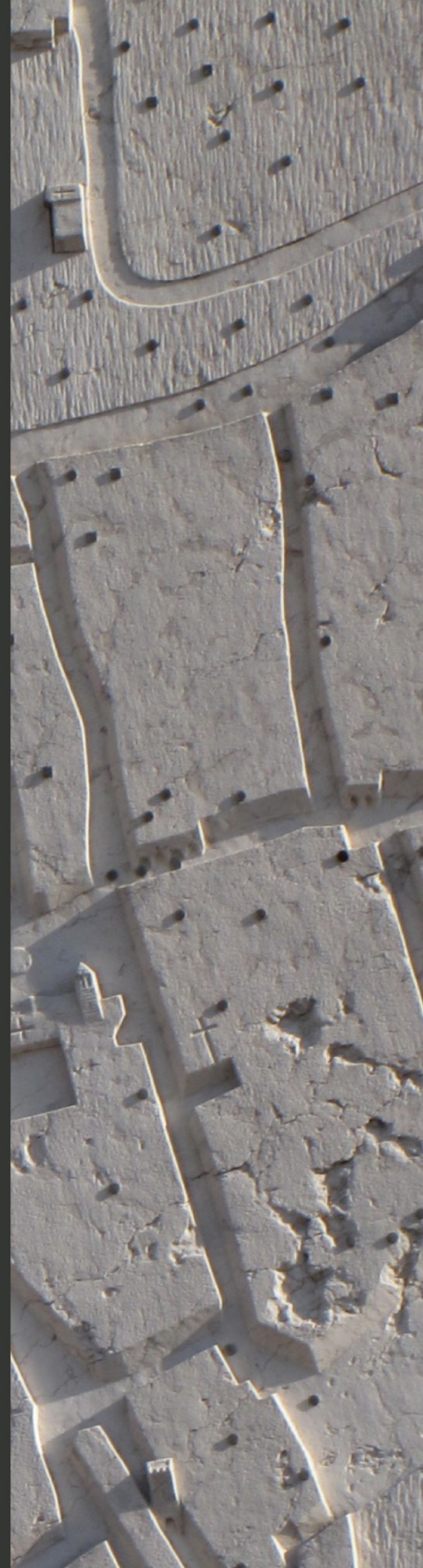
Émergence, échelles, non-linéarité, du bas vers le haut, description, surprise, effets indirects, non intuitif, transition de phase, irréductibilité, rupture avec la pensée traditionnelle linéaire/statistique, 'le tout est plus que la somme des parties'.

RÉFÉRENCES:

Bar-Yam, Yaner.
Dynamics of Complex Systems.
Addison-Wesley, 1997.

Ball, Philip.
Critical Mass: How One Thing Leads to Another.
Macmillan, 2004.

ÉMERGENCE 2



DYNAMIQUE

LES SYSTÈMES COMPLEXES ONT TENDANCE À CHANGER D'ÉTAT DE MANIÈRE DYNAMIQUE, MONTRANT SOUVENT UN COMPORTEMENT À LONG TERME IMPRÉVISIBLE.

« Chaos : lorsque le présent détermine l'avenir, mais que le présent approximatif ne détermine pas approximativement l'avenir. »

(Edward Lorenz)

Les systèmes peuvent être analysés en termes de changements d'état au fil du temps. Un état est décrit par un ensemble de variables qui caractérisent le mieux le système.

Lorsque le système change d'un état à un autre, ses variables évoluent également, souvent en réponse à son environnement.

Ce changement est qualifié de linéaire s'il est directement proportionnel au temps, à l'état actuel du système ou aux modifications de l'environnement, et de non-linéaire s'il ne leur est pas proportionnel.

Les systèmes complexes sont généralement non linéaires, changeant à des rythmes différents en fonction de leur état et de leur environnement.

Ils peuvent également présenter des états stables, dans lesquels ils restent inchangés même en cas de perturbation, ou des états instables, dans lesquels une petite perturbation peut les déstabiliser.

Dans certains cas, de petits changements environnementaux peuvent complètement modifier le comportement du système, un phénomène connu sous le nom de bifurcations, transitions de phase ou « points de bascule ».

Certains systèmes sont « chaotiques » - extrêmement sensibles aux petites perturbations et imprévisibles sur le long terme, illustrant le célèbre « effet papillon ». Un système complexe peut également être dépendant du chemin, c'est-à-dire que son état futur dépend non seulement de son état présent, mais aussi de son histoire passée.

EXEMPLES:

- La météo change constamment de manière imprévisible.
- La volatilité des marchés financiers.

CONCEPTS ASSOCIÉS:

Dynamique, comportement, non-linéarité, chaos, non-équilibre, sensibilité, effet papillon, imprédictibilité, incertitude, dépendance au chemin/contexte, non-ergodicité.

RÉFÉRENCES:

Strogatz, Steven H.
Nonlinear Dynamics and Chaos.
CRC Press, 1994.

Gleick, James.
Chaos: Making a New Science.
Open Road Media, 2011.



AUTO-ORGANISATION

LES SYSTÈMES COMPLEXES PEUVENT S'AUTO-ORGANISER POUR PRODUIRE SPONTANÉMENT DES MOTIFS NON TRIVIAUX, SANS PLAN PRÉÉTABLI.

« On suggère qu'un système de substances chimiques, appelées morphogènes, réagissant ensemble et diffusant à travers un tissu, est suffisant pour expliquer les principaux phénomènes de la morphogenèse. »

(Alan Turing)

Les interactions entre les composants d'un système complexe peuvent engendrer un motif ou un comportement global. Cela est souvent décrit comme une auto-organisation, car il n'y a ni contrôle central ni intervention externe.

Au contraire, le « contrôle » d'un système auto-organisé est réparti entre ses composants et intégré par leurs interactions. L'auto-organisation peut générer des structures physiques/fonctionnelles, comme les motifs cristallins des matériaux ou les morphologies des organismes vivants, ou des comportements dynamiques/informationnels, tels que les regroupements de poissons en bancs et les impulsions électriques se propageant dans les muscles des animaux.

À mesure que le système devient plus organisé par ce processus, de nouveaux motifs d'interaction peuvent émerger au fil du temps, conduisant potentiellement à une complexité accrue. Dans certains cas, les systèmes complexes peuvent s'auto-organiser dans un état « critique » qui ne peut exister que dans un équilibre subtil entre hasard et régularité.

Les motifs qui émergent dans de tels états critiques auto-organisés présentent souvent diverses propriétés particulières, telles que l'auto-similarité et des distributions en loi de puissance des propriétés des motifs.

EXEMPLES:

- Une seule cellule-œuf se divisant et s'auto-organisant progressivement pour former la structure complexe d'un organisme.
- Les villes se développant à mesure qu'elles attirent davantage de personnes et de capitaux.
- Une grande population d'étourneaux montrant des motifs complexes de vol en groupe.

CONCEPTS ASSOCIÉS:

Auto-organisation, comportement collectif, motifs d'essaimage, espace et temps, ordre issu du désordre, criticalité, auto-similarité, changements abrupts, criticalité auto-organisée, lois de puissance, distributions à longues queues, morphogenèse, contrôle décentralisé/distribué, auto-organisation guidée.

RÉFÉRENCES:

Ball, Philip.
The Self-Made Tapestry: Pattern Formation in Nature.
Oxford University Press, 1999.

Camazine, Scott, i altres. Self-Organization in Biological Systems
Princeton University Press, 2003.



AUTO-ORGANISATION 4



ADAPTATION

LES SYSTÈMES COMPLEXES PEUVENT S'ADAPTER ET ÉVOLUER.

« Rien en biologie n'a de sens si ce n'est à la lumière de l'évolution. »

(Theodosius Dobzhansky)

Plutôt que de simplement évoluer vers un état stable, les systèmes complexes sont souvent actifs et réactifs à leur environnement – à la différence d'une balle qui roule jusqu'au bas d'une colline et s'arrête, ou d'un oiseau qui s'adapte aux courants de vent en volant. Cette adaptation peut se produire à plusieurs échelles : cognitive, par l'apprentissage et le développement psychologique; sociale, grâce au partage d'informations via les liens sociaux; évolutive, par la variation génétique et la sélection naturelle.

Lorsque des composants sont endommagés ou retirés, ces systèmes sont souvent capables de s'adapter et de retrouver leur fonctionnalité précédente, voire parfois de devenir meilleurs qu'auparavant. Cela peut être rendu possible par : la robustesse, la capacité à résister aux perturbations; la résilience, la capacité à revenir à l'état initial après une perturbation majeure; l'adaptation, la capacité à modifier le système lui-même pour rester fonctionnel et survivre. Les systèmes complexes dotés de ces propriétés sont appelés systèmes complexes adaptatifs.

EXEMPLES:

- Un système immunitaire qui apprend continuellement à reconnaître les agents pathogènes.
- Une colonie de termites qui répare les dommages causés à son monticule.
- La vie terrestre qui a survécu à de nombreuses crises au cours de milliards d'années de son histoire.

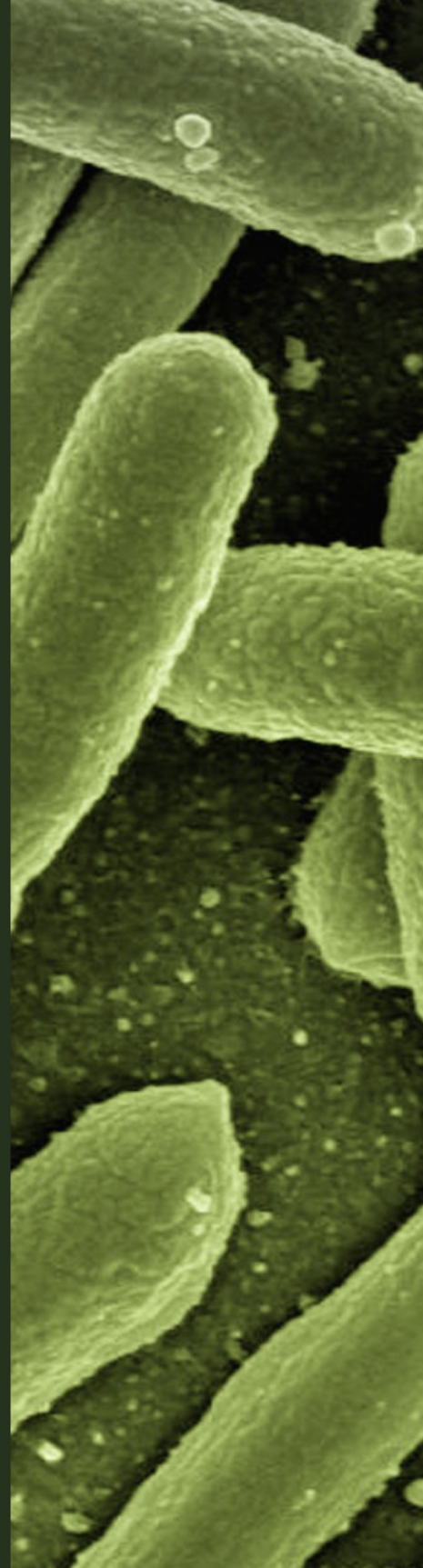
CONCEPTS ASSOCIÉS:

Apprentissage, adaptation, évolution, scénarios adaptatifs, robustesse, résilience, diversité, systèmes complexes adaptatifs, algorithmes génétiques, vie artificielle, intelligence artificielle, intelligence collective, créativité, processus sans fin.

RÉFÉRENCES:

Holland, John Henry.
Adaptation in Natural and Artificial Systems. MIT press, 1992.

Solé, Ricard i Elena, Santiago F.
Viruses as Complex Adaptive Systems. Princeton University Press, 2018.





INTERDISCIPLINARITÉ

LA SCIENCE DE LA COMPLEXITÉ PEUT ÊTRE UTILISÉE POUR COMPRENDRE ET GÉRER UNE GRANDE VARIÉTÉ DE SYSTÈMES DANS DE NOMBREUX DOMAINES.

« *Il n'est peut-être pas entièrement vain, cependant, de rechercher des propriétés communes parmi les différents types de systèmes complexes... Les notions de rétroaction et d'information offrent un cadre de référence pour examiner une large gamme de situations.* »

(Herbert Simon)

Les systèmes complexes apparaissent dans tous les domaines scientifiques et professionnels, notamment la physique, la biologie, l'écologie, les sciences sociales, la finance, les affaires, la gestion, la politique, la psychologie, l'anthropologie, la médecine, l'ingénierie, les technologies de l'information, et bien d'autres. De nombreuses technologies récentes, des réseaux sociaux et technologies mobiles aux véhicules autonomes et à la blockchain, produisent des systèmes complexes avec des propriétés émergentes qu'il est crucial de comprendre et de prédire pour le bien-être de la société.

Un concept clé de la science de la complexité est l'universalité, qui désigne l'idée selon laquelle de nombreux systèmes dans différents domaines présentent des phénomènes avec des caractéristiques sous-jacentes communes pouvant être décrites à l'aide des mêmes modèles scientifiques. Ces concepts nécessitent un nouveau cadre multidisciplinaire combinant mathématiques et informatique.

La science de la complexité peut offrir une approche analytique globale et interdisciplinaire qui complète les approches scientifiques traditionnelles, lesquelles se concentrent sur des sujets spécifiques propres à chaque domaine.

EXEMPLES:

- Propriétés communes des divers systèmes de traitement de l'information (systèmes nerveux, Internet, infrastructures de communication).
- Motifs universels observés dans divers processus de propagation (épidémies, modes, feux de forêt).

CONCEPTS ASSOCIÉS:

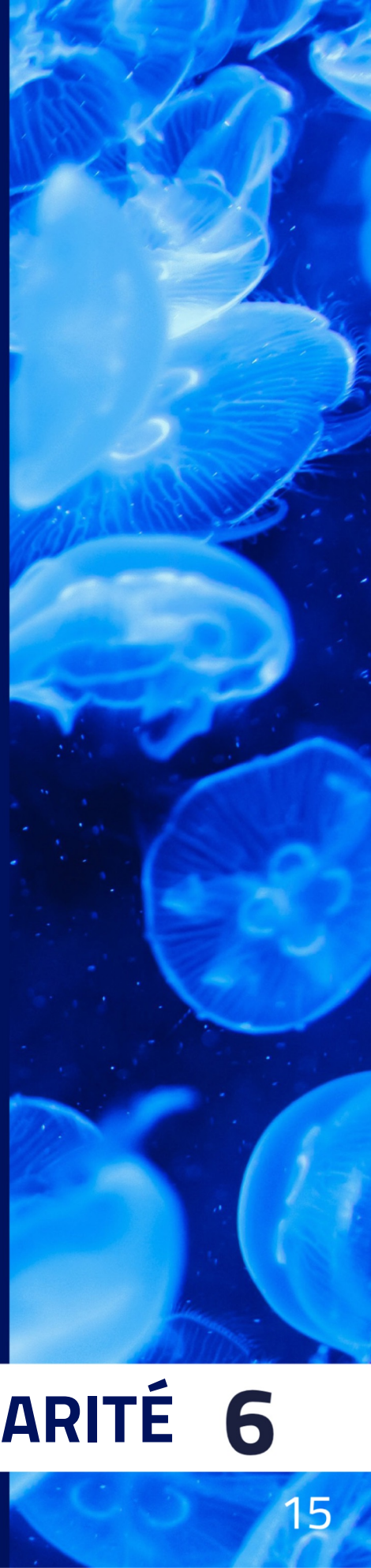
Universalité, applications diverses, multi/inter-/cross-/transdisciplinarité, économie, systèmes sociaux, écosystèmes, durabilité, résolution de problèmes concrets, systèmes culturels, pertinence pour la prise de décision dans la vie quotidienne

RÉFÉRENCES:

Turner, Stefan, Hanel, Rudolf i Klimek, Peter. Introduction to the Theory of Complex Systems. Oxford University Press, 2018.

Page, Scott E.
The Model Thinker .
Hachette UK, 2018.

INTERDISCIPLINARITÉ 6



MÉTHODES

LES MÉTHODES MATHÉMATIQUES ET INFORMATIQUES SONT DES OUTILS PUISSANTS POUR ÉTUDIER LES SYSTÈMES COMPLEXES.



« *Tous les modèles sont faux, mais certains sont utiles.* »

(George Box)

Les systèmes complexes impliquent de nombreuses variables et configurations qui ne peuvent pas être explorées simplement par l'intuition ou par des calculs sur papier. À la place, des modèles mathématiques et informatiques avancés, ainsi que des analyses et des simulations, sont presque toujours nécessaires pour comprendre comment ces systèmes sont structurés et comment ils évoluent au fil du temps.

Avec l'aide des ordinateurs, il est possible de vérifier si un ensemble de règles hypothétiques peut conduire à un comportement observé dans la nature, puis d'utiliser cette connaissance des règles pour générer des prédictions dans différents scénarios de type « et si ».

Les ordinateurs sont également utilisés pour analyser d'énormes quantités de données provenant de systèmes complexes afin de révéler et de visualiser des motifs cachés, invisibles à l'œil humain.

Ces méthodes informatiques peuvent conduire à des découvertes qui approfondissent notre compréhension et notre appréciation de la nature.

EXEMPLES:

- Modélisation basée sur les agents pour les regroupements d'oiseaux.
- Modèles mathématiques et informatiques du cerveau.
- Modèles informatiques de prévision climatique.
- Modèles informatiques des dynamiques des piétons.

CONCEPTS ASSOCIÉS:

Modelització, simulació, anàlisi de dades, metodologia, modelització basada en agents, anàlisi de xarxes, teoria de jocs, visualització, regles, comprensió.

RÉFÉRENCES:

Pagels, Heinz R.

The Dreams of Reason: The Computer and the Rise of the Sciences of Complexity.
Bantam Books, 1989.

Sayama, Hiroki.

Introduction to the Modeling and Analysis of Complex.
Open SUNY Textbooks, 2015.



« Je pense que le prochain [21e] siècle sera le siècle de la complexité »

(Stephen Hawking)

CONTRIBUTEURS

Manlio De Domenico*, Dirk Brockmann, Chico Camargo, Carlos Gershenson, Daniel Goldsmith, Sabine Jeschonnek, Lorren Kay, Stefano Nichele, José R. Nicolás, Thomas Schmickl, Massimo Stella, Josh Brandoff, Ángel José Martínez Salinas, Hiroki Sayama*

(* adresses des auteurs)

`mddomenico[at]fbk.eu`

`sayama[at]binghamton.edu`

CRÉDITS

Concu et édité par: *Serafina Agnello*

✉ `serafina.agnello[at]gmail.com`

in [Serafina Agnello](#)

<https://complexityexplained.github.io/>

Remerciements particuliers aux personnes suivantes qui ont apporté leurs contributions et leurs retours :

Hayford Adjavor, Alex Arenas, Yaneer Bar-Yam, Rogelio Basurto Flores, Michele Battle-Fisher, Anton Bernatskiy, Jacob D. Biamonte, Victor Bonilla, Dirk Brockmann, Victor Buendia, Seth Bullock, Simon Carrignon, Xubin Chai, Jon Darkow, Luca Dellanna, David Rushing Dewhurst, Peter Dodds, Alan Dorin, Peter Eerens, Christos Ellinad, Diego Espinosa, Ernesto Estrada, Nelson Fernández, Len Fisher, Erin Gallagher, Riccardo Gallotti, Pier Luigi Gentilli, Lasse Gerrits, Nigel Goldenfeld, Sergio Gómez, Héctor Gómez-Escobar, Alfredo González-Espinoza, Marcus Guest, J. W. Helkenberg, Stephan Herminghaus, Enrique Hernández-Zavaleta, Marco A. Javarone, Hang-Hyun Jo, Pedro Jordano, Abbas Karimi, J. Kasmire, Erin Kenzie, Tamer Khraisha, Heetae Kim, Bob Klapetzky, Brennan Klein, Karen Kommerce, Roman Koziol, Roland Kupers, Erika Legara, Carl Lipo, Oliver Lopez-Corona, Yeu Wen Mak, Vivien Marmelat, Steve McCormack, Dan Mønster, Alfredo Morales, Yamir Moreno, Ronald Nicholson, Enzo Nicosia, Sibout Nooteboom, Dragan Okanovic, Charles R Paez, Julia Poncela C., Francisco Rodrigues, Jorge P. Rodríguez, Iza Romanowska, Pier Luigi Sacco, Joaquín Sanz, Samuel Scarpino, Alice Schwarze, Nasser Sharareh, Keith Malcolm Smith, Ricard Sole, Keith Sonnenburg, Cédric Sueur, Ali Sumner, Michael Szell, Ali Tareq, Adam Timlett, Ignacio Toledo, Leo Torres, Paul van der Cingel, Ben van Lier, Jeffrey Ventrella, Alessandro Vespignani, Joe Wasserman, Kristen Weiss, Daehan Won, Phil Wood, Nicky Zachariou, Mengsen Zhang, Arshi, Brewingsense, Complexity Space Consulting, Raoul, Systems Innovation, The NoDE Lab.

Traducteur de la version Française:

Sébastien Morele



Serafina Agnello

Version 1.0 (13 Mai 2019)

Traduction française du : 8 Décembre 2024.