

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

**Association Française de Science des Systèmes
(AFSCET)**

**SYSTÈMES COMPLEXES
THÉORIE & PRATIQUES**

**30 ème édition des JSR
Journées Scientifiques de Rochebrune**

Rochebrune : 3–9 avril 2022

par

Danièle Bourcier

Paul Bourguine

Salma Mesmoudi

édition de 2023

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

Ce livre a été publié avec www.bookelis.com

ISBN : 979-10-359-9815-8

Edité par AFSCET, 2023

AFSCET (Association Française de Science des Systèmes), ENSAM,
151 Boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, afscet.fr

Tous droits de reproduction, d'adaptation et de traduction, intégrale ou partielle réservés pour tous pays.

Table des matières

Préface de l'édition 2022.....	7
Introduction.....	9
De la Complexité à la Simplexité : théorie, métrique et applications aux technologies cognitives (C. Tijus & F. Jouen)	13
Introduction : de la complexité novice à la simplexité experte des choses.....	16
De la complexité organisée des choses à celle des systèmes autonomes.....	18
La complexité-simplexité organisée des objets smart	28
Discussion et conclusion : les technologies cognitives dédiées aux systèmes autonomes.....	31
Bibliographie.....	33
Traiter le flou et la complexité du droit (D. Bourcier).....	41
Présentation.....	42
1- Logiques traditionnelles et concept de flou.....	47
II- De modèles plus souples pour traiter la complexité du droit : les apports de l'Intelligence Artificielle.....	56
La fonction ou le passage du discret au continu (P. Riot).....	67
De la contrainte à l'émergence comprendre la morphogenèse par la matrice extracellulaire (A. Fronville & F. Mercier).....	108
Introduction.....	108
1. Analyse mutationnelle et morphologique.....	109
2. Algorithme discret pour la morphogenèse.....	110
3. Structures biologiques contrôlant la morphogenèse.....	113
4. Stabilisation des formes biologique.....	114
Conclusion.....	115

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

Bibliographie.....	116
Cartographier le paysage sémantique de la science des systèmes complexes (Q. Lobbé & A Delonoë).....	120
<i>Compte rendu d'atelier cartographique.....</i>	120
1) Carte sémantique.....	122
2) Phylomémié.....	127
Références.....	129
Pour une approche systémique des groupes sociaux (R. Padiou) 130	
Acte I.....	131
Scène 1.....	132
Scène 2.....	134
Acte II, Scène 1.....	137
Acte III, Scène 1.....	140
Vers une perception de l'identité numérique comme système complexe (B. Merhi).....	145
Introduction.....	147
I. L'identité humaine, caractéristique du soi « irréductible ».....	149
II. La confusion d'espaces, corollaire de l'émergence de l'identité numérique.....	164
III. L'identité numérique émergente, caractéristique du « soi connecté ».....	170
Conclusion.....	179
Références.....	181
Complex systems science and urban science: towards applications to sustainability trade-offs in territorial systems (J. Raimbault & D. Pumain)	187
1 - Introduction.....	188
2 - Complexity and urban science.....	190
3 - Perspectives towards sustainable planning.....	193
4 - Trade-offs between SDGs in systems of cities.....	195
Conclusion.....	199
References.....	199
Le cerveau, un système complexe (S. Mesmoudi).....	205
I. Introduction.....	206

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

II. Intégration en temps réel dans l'anneau VSA et intégration multi-temporelles dans l'anneau PTF.....	209
III Avantages topologiques de l'entrelacement.....	213
IV L'architecture en double anneau et la plasticité du cerveau.....	215
VI Émergence : fonctionnement à deux échelles temporelle.....	216
Références.....	218

Les grands projets infrastructurels – questions sur la relation aux espaces de déplacement (A. Cicchi & L. Bertand).....

La relation à l'espace dans les trajets urbains.....	223
Les disjointures ferroviaires, grandes gares parisiennes, petite ceinture et métropolitain.....	225
Le passage du crédo ferroviaire au crédo routier, un choix décisif..	226
Les projets urbains sur la zone non aedificandi.....	228
Le nouveau quadrillage - l'être humain/usager, acteur du dispositif fonctionnel.....	230
Le crédo de l'enfouissement infrastructurel - Le boulevard périphérique et le RER.....	234
Le déplacement, une fenêtre ouverte sur l'espace intérieur et sur le roman urbain.....	236
Conclusion.....	237

Une modélisation catégorielle du débat numérique ((J. Sallantin et al.,)

Introduction.....	243
Modéliser avec des catégories.....	249
La modélisation catégorielle du débat.....	251
Conclusion.....	258
Références.....	259

Vers une théorie supersymétrique des dynamiques complexes (P. Bourgine).....

Introduction	263
1. La théorie supersymétrique des systèmes dynamiques.....	264
2. Vers une théorie supersymétrique des dynamiques complexes..	270
3. Conclusion : définition d'une « dynamique stochastique complexe ».....	281

PRÉFACE DE L'ÉDITION 2022

La phénoménologie d'un système complexe est celle de *l'émergence d'un réseau créant de nouveaux nœuds et de nouveaux liens dans son cycle naissance/vie/disparition au sein de son environnement*. Son environnement ainsi que chacun de ses nœuds sont *récurivement* des systèmes complexes.

Il y a deux grandes manières d'étudier les systèmes complexes. Soit on part des grandes questions théoriques et on regarde comment elles traversent les grands domaines expérimentaux : l'on construit alors la « science des systèmes complexes ». Soit on part d'un grand objet d'étude et on regarde quelles sont les questions théoriques qui le traversent : on trace alors la voie à un approfondissement de chaque discipline expérimentale comme « science intégrative et prédictive ». Toutes les feuilles de route vers une science des systèmes complexes sont écrites de cette façon**.

L'étude *in vivo* des systèmes complexes soulève de grandes difficultés en raison de leur définition récursive : si l'observation *in vivo* concomitante d'un système complexe et de son environnement n'est pas trop problématique, l'observation de chacun de ses nœuds n'est pas toujours possible et, a fortiori, les nœuds de ses nœuds. Cette difficulté est la question fondamentale de la 'mécanique statistique'.

La série des Journées de Rochebrune est consacrée à ces deux grandes manières d'étudier les systèmes complexes.

Paul Bourguine

Paris, Le 10 février 2023

INTRODUCTION

Les journées scientifiques de Rochebrune ont été créées par Paul Bourguine, Thierry Fuhs, et Évelyne Andreewsky (ECAL) en 1992. Pour leur trentième anniversaire, nous avons repris l'esprit et la finalité qui ont présidé au lancement de ces Rencontres à savoir la dimension scientifique et épistémologique de la science des systèmes complexes dans leur dimension théorique et expérimentale. Ces rencontres se sont caractérisées par : l'existence d'un comité scientifique, la perspective d'une publication, le financement des missions ou des subventions par des institutions scientifiques, la révision des contributions par les pairs.

Ces rencontres ont eu lieu du dimanche 3 au 9 avril 2022 à Rochebrune (Haute-Savoie).

La science des systèmes complexes s'est considérablement organisée depuis la création de Rochebrune, essentiellement sous l'impulsion de ses fondateurs. Ces journées s'inscrivent dans la perspective de la feuille de route de Cargèse (2006-2008-2010) (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00392486/document>), de la création de la Complex System Society en 2005

(<https://cssociety.org>) et du Complex System Digital Campus (CSDC <https://csdc.org>) (un UniTwin UNESCO de 149 universités depuis 2014).

Ces Journées ont été l'occasion d'analyser cette évolution dans le monde scientifique. Compte tenu de cet anniversaire, nous avons proposé aux auteurs d'inscrire leur intervention sous les deux thèmes suivants :

1. Bilan de la science des systèmes complexes : quels résultats, quelles méthodes et quels problèmes critiques ces rencontres vous ont aidé à redéfinir dans vos disciplines ou vos champs d'intervention en termes de systèmes complexes ?

2. Perspectives pour la science des systèmes complexes : depuis 30 ans se sont développés des outils de modélisation, de simulation ou d'Intelligence artificielle des systèmes complexes dans un contexte de massification des données complètement nouveau et de prise en compte des besoins de modèles tenant compte du développement durable et de ses enjeux. Les sciences humaines et les sciences formelles ont développé de nouveaux concepts pour analyser ces résultats. Dans ce contexte, quelles nouvelles formes de transdisciplinarité peuvent être mises en place aujourd'hui pour enrichir la science des systèmes complexes ? Quels nouveaux modèles, et nouveaux usages de la science des systèmes complexes peut-on inventer ? quelles formations, quelles innovations, quelles précautions, quelles

applications à prévoir, à développer aussi bien au plan théorique qu'expérimental.

Comme par le passé, ces rencontres sont très fortement interdisciplinaires. Ont été présentées des recherches articulant biologie/santé ; cognition ; IA et systèmes complexes ; droit et IA ; sociologie ; environnement et exploitation des données ; organisation des territoires et urbanisme ; conception et usages des plateformes ; création, gestion et diffusion de Communs naturels, artificiels ou numériques.

Comité scientifique : Paul Bourgine (UniTwin Unesco CSDC), Danièle Bourcier (CNRS-CERSA), Pierre Collet (univ. de Strasbourg), Niels Ferrand (INRAE), Anne Jeannin-Girardon (univ. de Strasbourg), Pierre Livet (Iméra - IEA d'Aix-Marseille), Salma Mesmoudi (Univ. Paris1), Luiz Carlos Pereira (Fondation Getulio Vargas Brésil), Nadine Peyrieras (CNRS), Denis Phan (CNRS), Denise Pumain (Univ. Paris1), Céline Rozenblat (Univ. Lausanne), Pierre Saurel (Sorbonne Université), Véronique Thomas-Vaslin (CNRS), Charles Tijus (Univ. Paris 8), Gerard Weisbuch (ENS).

Comité d'organisation : Yann Girard, Betty Merhi, Jennifer Verney

LA GOUVERNANCE DANS LES SYSTÈMES

DE LA COMPLEXITÉ À LA SIMPLEXITÉ :

THÉORIE, MÉTRIQUE ET APPLICATIONS AUX

TECHNOLOGIES COGNITIVES

Charles Tijus & François Jouen

EA 4004 – Cognitions Humaine et Artificielle

Résumé

Cet article qui vise à faire le point sur le thème de la complexité de l'information telle qu'elle se retrouve en Science Cognitive chez Herbert Simon avec la notion de complexité organisée, entre autres hiérarchiquement, dans le cadre de systèmes autonomes tels que définis par Bourgine et Varela, visant selon Berthoz et Petit la simplicité cognitive. Cette réduction de la complexité du traitement de l'information a été étudiée dans notre laboratoire lors de l'évaluation sensorielle, de l'interprétation de l'action perçue, du contrôle aérien, ... et dans le cadre de systèmes multi-agents ; ceci dans la lignée des travaux menés, d'une part, sur catégorisation et résolution de problème par Jean-François Richard, Anh Nguyen-Xuan et Sébastien Poitrenaud et, d'autre part, sur redondance et diversité par Michelle Molina et François Jouen; ceci jusqu'aux travaux récents sur les jumeaux numériques de complexité-simplicité équivalente et les perspectives d'utilisation par la modélisation-simulation de l'interaction Humain-Machine à des fins de simplification.

S'agissant de la simplexification de l'interaction entre systèmes autonomes (*humain-humain, artificiel-artificiel, artificiel-humain*), celle-ci nécessite un modèle interne métacognitif de l'un et de l'autre, intégrant la redondance et diversité des perceptions et traitements cognitifs à des fins de catégorisation (reconnaître) et de résolution de problème (agir) et permettant d'anticiper les prises de décision pour interagir efficacement et de manière empathique. Ainsi, pour une interaction efficace avec un système autonome, un assistant numérique doit le simplexifier pour en avoir une modélisation-simulation qui permette d'interpréter, de comprendre, d'anticiper les jugements et raisonnements de l'autre et, pour cela, disposer de son « jumeau numérique » ; ceci cadré par la tâche en cours.

Mots clés : *complexité, simplicité, graphe de connaissances, système autonome, Interaction Humain Machine, Jumeau numérique*

Abstract

This article is about information complexity as found in Cognitive Science with the work of Herbert Simon on the notion of organized complexity, among others hierarchically, as found within the framework of autonomous systems as defined by Bourgin and Varela, and aiming at cognitive simplicity, according to Berthoz and Petit. This reduction in the complexity of information processing has been studied in our laboratory in cases of sensory evaluation, interpretation of perceived action, air traffic control, etc. and in the context of multi-agent systems. This has been done in line with the work carried out, on the one hand, on categorization and problem solving by Jean-François Richard, Anh Nguyen-Xuan and Sébastien Poitrenaud and, on the other

COMPLEXITÉ ET TRANSDISCIPLINARITÉ : NOUVELLES MÉTHODES, NOUVEL OUTIL

hand, on redundancy and diversity by Michelle Molina and François Jouen. This has been done up to recent work on digital twins of equivalent complexity-simplicity allowing to consider the prospects for using modeling-simulation of Human-Machine interaction for simplexification purposes.

Regarding simplexification of the interaction between autonomous systems (human-human, artificial-artificial, artificial-human), this requires an internal metacognitive model of each other, integrating the redundancy and diversity of perceptions and cognitive processing for purposes of categorization (recognition) and problem solving (action) and allowing to anticipate decision-making to interact effectively and empathically. Thus, for effective interaction with an autonomous system, a digital assistant must simplexify it in order to have a modeling-simulation of it which makes it possible to interpret, to understand, to anticipate the judgments and reasonings of the other and, for this, to have its “digital twin” being framed by the current task.

Keywords: *complexity, simplicity, knowledge graph, autonomous system, Human-Machine Interaction, Digital Twin.*

Introduction : de la complexité novice à la simplicité experte des choses

Dans le cadre des Journées de Rochebrune (*Hervé & Rivière, 2015*) portant ici sur « *Systèmes complexes et interdisciplinarité : bilan & perspectives* », notre propos vise à faire le point sur la complexité-simplicité perçue d'une chose (ou d'une entité). Ce thème est celui de nos travaux sur la réduction de la complexité lors du contrôle aérien (*Tijus et al. 2007*), l'évaluation sensorielle (*Urdapilleta et al. , 1999*), l'interprétation de l'action (*Zibetti et al., 2001*), entre autres pour des systèmes multi-agents (*Beltran et al., 2009*). Ces travaux sont dans la lignée de ceux de Richard et Poitrenaud sur catégorisation et résolution de problème (*Richard et al., 1993 ; Poitrenaud et al., 2005*) et de ceux de Molina et Jouen sur redondance et diversité (*Jouen et Molina, 2007*). Les plus récents portent sur les jumeaux numériques (*Tijus et al, 2022*) pour en envisager les perspectives.

Pour cela, nous discutons la notion de complexité organisée, - entre autres hiérarchiquement -, de systèmes techniques et de leurs corrélats symboliques, « *made up of a large number of parts that have many interactions* » (*Simon, 1996*), dans le cadre de systèmes autonomes (*Bourgine & Varela, 1992*), et celle de simplicité cognitive se référant à « *l'ensemble des solutions trouvées par les organismes vivants pour que, malgré la complexité des processus naturels, le cerveau puisse préparer*

COMPLEXITÉ ET TRANSDISCIPLINARITÉ : NOUVELLES MÉTHODES, NOUVEL OUTIL

l'acte et en projeter les conséquences » de Berthoz & Petit (2014) pour lesquels « *simple ou complexe ne ressemblent pas à des qualités objectives qui puissent revenir à un réel indépendamment de celui qui en juge* ».

Concernant la complexité, nos aspects théoriques, expérimentaux et de modélisation-simulation différencient les propriétés de surface, - éventuellement abordables-, structurales, fonctionnelles et procédurales qui permettent d'envisager un ensemble de solutions, associant « *entrées et sorties* », générant *prototypes* et *stéréotypes* de manière prédictive et abductive, pour différencier entre les possibles qui sont « *à – venir* » (Bourgine & Varela, 1992); générant de la cognition à partir de la perception, du savoir-faire et du comportement.

L'interaction entre systèmes autonomes (*humain-humain, artificiel-artificiel, artificiel-humain*) nécessite alors un modèle interne métacognitif de l'autre intégrant ses perceptions et traitements cognitifs, et permettant d'anticiper ses prises de décision pour interagir de manière efficace et empathique. Ainsi, pour une interaction efficace, un assistant numérique peut en avoir une modélisation-simulation pour comprendre, anticiper les jugements et raisonnements de cette personne et, pour cela, disposer de son « *jumeau numérique* » ; ceci limité à la tâche en cours.

De la complexité organisée des choses à celle des systèmes autonomes

Il n'est pas aisé de trouver une définition de ce qu'est la *complexité*. Lorsqu'elle est utilisée, son acception n'est généralement pas donnée. De manière définitoire, dans les dictionnaires, on trouve des tautologies : la complexité est ce qui est complexe. Pour Wordnet, il s'agit de « *la qualité d'être complexe et composé* ». Pour Le Robert, il s'agit de « *l'État, caractère de ce qui est complexe* »; l'entrée « *complexe* » renvoyant elle-même, soit à deux substantifs qui relèvent pour l'un de la psychologie (*complexe d'Œdipe*) et l'autre de la chimie (*quand sont réunis plusieurs éléments différents en un édifice chimique*), soit comme adjectif à ce qui qualifie un *Qui*. Mais ici encore de manière tautologique (*complexe : Qui est difficile, à cause de sa complexité*) ou antilogique en faisant appel à l'antonyme (*pour le CNRTL, complexe : Qui n'est pas simple*). L'autre versant du qualificatif concerne sa représentation mathématique comme ensemble dans le monde sensible (*Qui contient, qui réunit plusieurs éléments différents*) ; ou en dehors du monde sensible (*Qui est sans représentation dans le monde sensible, ayant une partie imaginaire par exemple*).

Comme de raison, il y a des définitions opérationnelles, mais qui se révèlent tout autant tautologiques : "*le degré de complication d'un système ou d'un composant de système, déterminé par des facteurs tels que le nombre et la complexité*

COMPLEXITÉ ET TRANSDISCIPLINARITÉ : NOUVELLES MÉTHODES, NOUVEL OUTIL

des interfaces, le nombre et la complexité des branches conditionnelles, le degré d'imbrication et les types de structure de données ".

En revanche, un éclairage sur ce qu'est *la complexité d'une chose* est donné par l'expertise et la compréhension de cette chose puisque sa complexité est une propriété qualificative recherchée par l'expert, aussi bien lorsqu'il s'agit de systèmes (*aimer la complexité des ordinateurs modernes*), voire de mets (*acidité, corps, terreux, sucrosité, etc., se combinent pour faire un café complexe ; un Château Latour d'Yquem est un vin complexe*). Toutefois, cette complexité est à éviter quand le niveau de compréhension de l'expert est excédé : pour le comité de l'IEEE Computer Society, « *la complexité est celle d'un système ou un composant qui résulte d'une implémentation de concepteur difficile à comprendre et à vérifier* ». C'est l'objet de la définition du Mountain Quest Institute pour lequel la complexité correspond au "*nombre d'états possibles qu'un système une situation ou une organisation peut prendre, mais qui a trop d'éléments et de relations pour être compris de manière analytique ou logique simple*".

Profitant de cet éclairage, notre proposition est que la complexité d'une chose est liée à l'acquisition de l'expertise à son endroit : aux savoirs et savoir-faire concernant cette chose. Est complexe, ce qui ne peut s'appréhender et se comprendre (*au*

LA GOUVERNANCE DANS LES SYSTÈMES

sens propre et au sens figuré). Devient simplexe, la chose qui peut par découverte, apprentissage et acquisition d'expertise, s'appréhender et se comprendre de la part de celui qui en traite l'information.

Par exemple, considérons l'apprentissage selon Rumelhart et Norman (1976) comme une capacité cognitive se faisant à partir d'un traitement cognitif de découpage et de catégorisation de ce qu'on perçoit, par accréation (*attribuer cette chose à une catégorie existante*), tuning (*adapter les catégories existantes à cette chose*) ou par restructuration (*créer de nouvelles catégories*). Un tel apprentissage permet alors d'appréhender ce qui auparavant relevait du complexe et de le simplifier. Cette proposition rejoint l'approche algorithmique de la mesure de la complexité qui est basée sur la capacité du modèle à traiter l'information concernant la chose: "*la mesure de la complexité de l'objet est la longueur (en bits) de l'algorithme le plus court qui décrit complètement l'objet*". Ainsi, "*la complexité d'un nombre est la longueur (en bits) de l'algorithme le plus court qui permet d'imprimer ce nombre*" (Chaitin, 1970; Li & Vitanyi, 1997).

La complexité est alors une propriété composite attribuée par un système cognitif, naturel ou artificiel, à une chose externe (*un objet, un système, une situation, une organisation, ...*), qui rend compte de l'appréhension de cette chose par ce système cognitif, et le degré de complexité-simplicité une propriété du système

COMPLEXITÉ ET TRANSDISCIPLINARITÉ : NOUVELLES MÉTHODES, NOUVEL OUTIL

cognitif révélant sa capacité à analyser, caractériser et catégoriser l'entité extérieure (*objet, système, situation ou organisation*) à des fins d'apprentissage pour le comprendre et en être expert.

A cet égard, la simplification rend compte de la situation d'apprentissage par connaissance, par découverte en expérimentant, par sérendipité, mais aussi par la gestion de l'interaction avec la chose, qui peut relever d'une Interaction Humain Machine, avec une interface plus ou moins transparente, plus ou moins aidante, ou médiée par un tuteur (*un pair, un compère, un tuteur, un enseignant, voire un assistant humain ou virtuel à l'apprentissage simplifiant*).

A un moment donné, la complexité d'une chose pour un système cognitif, qui vise la connaissance de cette chose correspond à la complexité du modèle interne que le système cognitif a de cette chose. Comme les choses ne sont, dans un modèle, rien de plus que des propriétés, la complexité peut être calculée comme la structure des propriétés utilisées par le système cognitif pour modéliser l'entité,

Ensuite, la simplicité de la chose repose sur la tâche du système cognitif qui a comme but d'en avoir un modèle et pour cela sur sa description en termes de propriétés (*type de propriété et précision*) issues à la fois de la perception et de la connaissance. A cet égard, dans la lignée de Berlyne (1958), Mesmoudi, Hommet et Peschanski (2020) trouvent que la durée

LA GOUVERNANCE DANS LES SYSTÈMES

passée à regarder une œuvre dépend de sa complexité ; une durée durant laquelle catégorisation et résolution sont à l'œuvre : comparant les parcours oculaires et verbatim avant et après la visite du Musée-mémorial de Caen les auteurs rapportent que les participants étaient plus éloquents après la visite, qu'ils utilisaient de nouveaux mots, que leurs connaissances s'enrichissaient (*assimilation*) et que certains de leurs schémas étaient modifiés pour accepter de nouvelles connaissances (*accommodation*).

Les textes de lois sont connus pour leur complexité et la mesure de cette complexité est déterminante pour leur appréhension numérique pour leur interprétation et leur application. Bourcier et Mazzega (2007) dénotent deux mesures de la complexité des textes légaux. La première mesure « *structurante* » concerne l'analyse en réseau de l'organisation des textes juridiques et des citations dans un corpus donné. La seconde mesure "*basée sur le contenu*" repose sur la diversité des "*produits juridiques*" générés par tout système juridique. Celle-la reflète selon nous l'aspect redondance et celle-ci l'aspect diversité qui conjointement détermine la complexité-simplicité de cette chose légale. C'est cette dualité, très bien analysée par Saurel (2014), qui est source de complexité-simplicité: la tragédie des trois C, à savoir que dans un système de normes suffisamment complexe, on doit renoncer soit à la complétude (*diversité*) soit à la cohérence (*redondance*). Un dilemme que la simplification est condamnée à résoudre.

Les sources pour la simplicité

Dans les dimensions spatiale et temporelle du monde sensible, il y a des sources externes de simplicité. Parmi celles-ci, il y a la logique physique : les choses ont une place comme propriété ontologiquement fondamentale puisque deux objets ne peuvent occuper la même place et qu'un objet ne peut être à deux places différentes. Il y a aussi des sources internes. S'agissant de l'espace, bien que la diversité spatiale des choses physiques soit grande, en couleur et en forme, - celle-ci permettant de différencier visuellement celle-là du fond -, nous avons à notre disposition un nombre restreint de figures géométriques (cercle, triangle, rectangle, ...) qui, comme connaissances, nous permettent la simplicité relative à l'espace.

S'agissant du temps qui ne peut s'appréhender que dans l'immédiat, puisque le passé et le futur sont hors du sensible, il y a aussi des sources pour sa simplicité. Nous avons par exemple la spatialisation du temps qui permet de visualiser en un coup d'oeil tous les jours d'une année, spatialement ordonnés, distribués sur un calendrier.

S'agissant du développement temporel du son, - musical par exemple-, nous avons aussi, comme pour l'espace, un petit nombre de figures sonométriques qui agissent comme

connaissance (Tijus et al., 2004 ; Frey et al., 2009); le laboratoire Musique et Informatique de Marseille ayant répertorié les dix-neuf Unités Sémiotiques Temporelles (UST) **[note 1]** qui sont des figures sonométriques. Timsit-Berthier (2007) relie leur appréhension cognitive au traitement psychophysiologique de la spatio-temporalité du mouvement.

Ces figures géométriques et sonométriques permettent selon nous (i) le codage-découpage de la chose, (ii) la catégorisation, soit attributive, soit constitutive, (ii) la compréhension progressive ou subite (eurêka), l'apprentissage et l'acquisition de l'expertise, et finalement la simplicité.

Ainsi, la complexité d'une chose ne relève pas de la chose elle-même mais du modèle dont le système cognitif dispose pour l'appréhender ; lui permettant la compréhension, l'apprentissage et l'expertise à son endroit. Notre proposition est que ce modèle est un graphe de connaissances, type treillis de Galois (Barbut & Monjardet, 1970). Ce modèle permet alors :

- soit la catégorisation attributive de tout ou partie de la chose, considérant les propriétés perçues de la chose compatibles avec les connaissances catégorielles et permettant d'en hériter celles qui n'ont pas été perçues (tuning),
- soit la catégorisation constitutive due à la nécessité de créer de nouvelles catégories à partir des propriétés perçues incompatibles aux catégories existantes, forçant

COMPLEXITÉ ET TRANSDISCIPLINARITÉ : NOUVELLES MÉTHODES, NOUVEL OUTIL

alors la compréhension du complexe et sa simplification (reconceptualisation).

La simplification a aussi des sources à la fois externes et internes. C'est le cas lorsque l'apprenant est assisté dans son appréhension et sa compréhension de la chose, comme vu ci-dessus par un tuteur (*un pair, un compère, un tuteur, un enseignant, voire un assistant humain ou virtuel*) qui peut expliquer et enseigner. Santolini et al (1996) qui ont recueilli et analysé un corpus de quelques 800 interactions entre enfants en crèche ont pu montrer cette aide entre pairs pour appréhender les choses complexes, distinguant une quinzaine de niveaux d'interactions indépendamment du contenu de l'échange. Les degrés les plus élevés impliquent des niveaux élevés d'engagement à l'interaction (*participation active, réciproque*) et d'ajustement (*prise en compte des capacités de l'autre, de l'apprenant, pour adapter son aide, pour la rendre plus efficace*). La liste ordonnée des niveaux d'élaboration de l'assistance à la découverte et à l'apprentissage va jusqu'à l'aide métapédagogique où l'enfant qui en aide un autre change sa manière d'assister pour assurer l'apprentissage, surtout du savoir-faire **[note 2]**.

La complexité organisée des systèmes autonomes

LA GOUVERNANCE DANS LES SYSTÈMES

Dans son ouvrage « *The Architecture of Complexity in the Sciences of the Artificial* », Herbert Simon (1996) discute la notion de complexité organisée, entre autres hiérarchiquement, de systèmes techniques (*Machine*) et de leurs corrélats symboliques (*Humain*), « *made up of a large number of parts that have many interactions* ». Cette notion de complexité organisée a été présentée auparavant dans le cadre de systèmes autonomes (Bourgine & Varela, 1992). Notre proposition est que cette fonction des systèmes autonomes à organiser la complexité est celle qui fournit la simplicité cognitive ; celle-ci se référant à « *l'ensemble des solutions trouvées par les organismes vivants pour que, malgré la complexité des processus naturels, le cerveau puisse préparer l'acte et en projeter les conséquences* » (Berthoz & Petit, 2014).

Nous pouvons déjà noter que nous avons un monde peuplé d'objets fabriqués et qui est d'une complexité bien organisée : un monde smart ; à savoir clairement structuré et d'une description claire, simple à comprendre, et pour lesquels le savoir-faire est ajusté à nos possibilités d'action. Ainsi, à la différence du vivant qui tombe malade et meurt, le fabriqué par l'homme peut être d'un seul tenant (e.g., un pavé taillé) et représenter symboliquement autre chose que lui-même (e.g., une sculpture). Sans perdre ces dites qualités, il peut être composé de diverses parties, agencées les unes aux autres en une composition qui lui confère une structure à laquelle correspond une utilité et un

COMPLEXITÉ ET TRANSDISCIPLINARITÉ : NOUVELLES MÉTHODES, NOUVEL OUTIL

usage et ainsi une signification (e.g., une chaise). La structure est ainsi un simplexifiant, indépendant des parties. Si cette chose nous sert d'instrument (e.g., un couteau), nous permettant d'agir sur lui via ses propriétés patientes (e.g., le manche du couteau) pour mettre en œuvre sa fonction (*couper une autre chose coupable : du pain*), via ses propriétés fonctionnelles (*la lame du couteau*), alors outre la structure, nous avons une procédure et des actions signifiantes et simplexifiantes, liées ici aux actions de la main. Si les parties, diversement structurées, agissent les unes sur les autres suite à l'action humaine, on a alors un système technique non autonome : un automate (e.g., une machine à calculer). Et si cet automate est capable de s'autonomiser (*indépendant de l'humain*) et peut-être de s'auto-déterminer (*imiter l'humain*), nous avons alors les systèmes autonomes et peut-être un jour décisionnels.

Notons que cette complexité bien organisée correspond à la notion d'énaction qui « *met l'accent sur la manière dont les organismes et esprits humains s'organisent eux-mêmes en interaction avec l'environnement* ». A cet égard, Bourguine et Varela (1992) définissent le système autonome comme opérationnellement fermé, constitué de sous-réseaux modulaires mutuellement liés donnant lieu à des ensembles d'activité cohérente de mobilité (*une unité mobile dans l'espace*) et de sensations (*à partir de modèles stables établissant une correspondance entre soi et le monde ; entre sensorimotricité et*

surfaces sensorielles et effectrices). Et dans ce contexte, la notion de connaissance qui simplexifie correspond à une forme de résolution de problèmes déjà résolus. Les connaissances pertinentes émergent alors à partir de la capacité à se poser les problèmes pertinents qui ont déjà été résolus et relèvent plus du savoir-faire que du savoir. Ce fonctionnement énaactif étant la condition du fonctionnement des systèmes autonomes.

Un système autonome pouvant se concevoir comme un système cognitif de transformation d'états discrétisés, peut alors s'envisager un ensemble of solutions possibles, associant par simplicité « *entrées et sorties* »; générant prototypes et stéréotypes; de manière hypothétiquement prédictive, abductive, pour différencier entre les possibles qui sont « à – venir » (*Bourgine & Varela, 1992*); générant selon nous de la cognition (*thinking and reasoning*) à partir de la perception, mais aussi à partir de l'expérience accumulée en savoir-faire expert, et finalement en comportement.

La complexité-simplicité organisée des objets smart

Les systèmes autonomes fabriqués (*Bourgine & Varela, 1992*) devraient fournir de la simplicité à l'Interaction Humain-Machine; à savoir une réduction significative de toute complexité préconstituée pour aboutir à une « *complexité réduite, ressaisie et transposée par l'acte d'un vivant sous une forme compatible avec ses exigences propres* » (*Berthoz & Petit, 2014*). Cette

COMPLEXITÉ ET TRANSDISCIPLINARITÉ : NOUVELLES MÉTHODES, NOUVEL OUTIL

simplicité pourrait être acquise sur la manière d'interagir de la machine, mais aussi sur l'assistance qui pourrait être apportée, veillant à ne pas transférer à la machine nos fonctions cognitives de compréhension et d'apprentissage (Chang et al., 2015).

Pour cela, nous proposons un modèle de segmentation hiérarchique (HSM) basé sur les treillis de Galois (Poitrenaud, 2005) et sur la catégorisation contextuelle (Tijus et al., 2007) en considérant que la mesure de la complexité n'est ni le nombre d'éléments, ni le nombre de propriétés par chose, mais le nombre de relations entre éléments à travers leurs propriétés avec la constitution de catégories contextuelles. Pour ce traitement cognitif de catégorisation ici et maintenant, les choses sont catégorisées, c'est-à-dire groupées et différenciées des autres, selon le savoir-faire de codage des descripteurs et des connaissances, principalement selon les autres choses qui en forment le contexte. Quatre types d'opérateurs sont considérés : l'indépendance (*la présence d'un descripteur ne permet pas de déduire la présence de l'autre*), l'équivalence (*la présence de l'un entraîne la présence de l'autre et vice-versa*), l'exclusion (*la présence de l'un exclut la présence de l'autre*) et l'implication (*la présence de l'un entraîne la présence de l'autre, l'inverse n'étant pas nécessairement vrai*).

La matrice booléenne $\text{Objet}_n \times \text{Descripteur}_m$ qui indique si chacun des n objets possède ou non chacun des m descripteurs,

LA GOUVERNANCE DANS LES SYSTÈMES

permet de créer une hiérarchie de catégories avec transitivité, asymétrie et réflexivité avec un nombre maximal de catégories qui est soit 2^{n-1} , soit le nombre m de descripteur si $m < 2^{n-1}$, sachant que chaque catégorie doit avoir au moins un descripteur, ce qui rend l'explosion combinatoire maîtrisable parce que relative au nombre de descripteurs.

La métrique que nous utilisons est dérivée de ce modèle de segmentation hiérarchique. La complexité s'y trouve définie par le produit du nombre de catégories par le nombre de descripteurs ($COMP.obj = Nc \times Nd$). L'applicabilité d'un descripteur aux catégories est définie par sa portée ou son extension, c'est-à-dire par le nombre de catégories auxquelles il s'applique ($EXT.description = Nc.description$). La puissance d'un descripteur reflète la relation entre son extension et le nombre total de catégories ($POW.description = EXT.description / Nc$). La puissance d'une description correspond à la somme de chaque puissance de description particulière ($POW.obj = \sum POW.description$) et l'efficacité simplexifiante d'une assistance par une IHM est alors mesurable ($EFF.obj = POW.obj / COMP.obj$). Notons que la quantité d'information se mesure alors à partir du Treillis de catégories, selon le nombre de questions à poser pour déterminer la catégorie d'appartenance [Note 3].

S'agissant d'un treillis hiérarchique d'héritage de propriétés (des catégories superordonnées vers les catégories

COMPLEXITÉ ET TRANSDISCIPLINARITÉ : NOUVELLES MÉTHODES, NOUVEL OUTIL

subordonnées), il en découle des règles pour la simplification : « *en cas d'héritages multiples, augmenter la valeur des liens vers les classes supérieures qui transmettent le plus de propriétés à leur descendance* ». Une telle opération permet de différencier les catégories structurantes (*redondance et diversité organisées*) de celles qui sont responsables de la complexité (*peu de propriétés transmises hors d'une structure arborescente*). Comme les opérations sur les éléments modifient principalement les propriétés exceptionnelles, la méthode fournit la simplification de l'entité catégorisée, tout en conservant l'ensemble de la structure. Par exemple, si un opérateur doit agir sur des composants d'un système technique, agir sur le cas le plus problématique simplifie le reste de la tâche à accomplir. Cette planification du cognitive computing, basée sur la "*simplification*", est une stratégie humaine qui pourrait aider les systèmes autonomes à résoudre en autonomie les problèmes complexes.

Discussion et conclusion : les technologies cognitives dédiées aux systèmes autonomes

Les technologies cognitives sont des technologies qui intègrent les connaissances de la cognition humaine (*comment les humains raisonnent, prennent des décisions et agissent en fonction de ce qu'ils perçoivent et pensent*) et qui s'insèrent dans les systèmes autonomes que sont les objets Smart. Il s'agit des robots

LA GOUVERNANCE DANS LES SYSTÈMES

physiques ou virtuels et des Smart-Things que sont les divers objets robotiques de la vie quotidienne qui nous sont extérieurs, mais aussi de nos habitats, habitacles et habits que nous occupons de l'intérieur : smart city (*ville intelligente*), smart home (*maison stimulante et sécurisante*), smart car (*voiture autonome*), smart clothes (*vêtements qui changent de forme et de couleur*).

Un jumeau numérique étant « *une description informatique d'une chose physique (objet, système, êtres vivants...) mise en œuvre avec un appareil spécifique et une base de données d'utilisateurs mise à jour en temps réel qui peut être utilisée pour simuler l'interaction homme-machine (IHM) dédiée à l'aide et à la décision* » nous proposons le jumelage numérique entre Systèmes autonomes Humain et Machine pour permettre aux tâches d'interaction d'être planifiées, coordonnées et évaluées. La simulation fondée sur le jumelage numérique Humain-Machine peut ainsi fournir une expérience de réalité étendue favorisant l'aide à la catégorisation, compréhension et à l'acquisition de l'expertise à travers des dialogues efficaces. Nos recherches actuelles portent ainsi sur l'interaction avec un appareil fournissant des textes faciles à lire et à comprendre, un appareil fournissant des sous-titres et des langues des signes pour la compréhension des contenus télévisuels ; ou encore un dispositif d'assistance à l'intérieur des voitures autonomes.

COMPLEXITÉ ET TRANSDISCIPLINARITÉ : NOUVELLES MÉTHODES, NOUVEL OUTIL

Bibliographie

- Barbut, M., & Monjardet, B. (1970). *Ordre et classification: algèbre et combinatoire*. Paris: Hachette.
- Beltran, F. S., Quera, V., Zibetti, E., Tijus, C., & Minano, M. (2009). ACACIA: an agent-based program for simulating behavior to reach long-term goals. *Cognitive processing*, 10(2), 95-99.
- Berlyne, D. E. (1958). The influence of complexity and novelty in visual figures on orienting responses. *Journal of Experimental Psychology*, 55, 289–296.
- Berthoz, A., & Petit, J. L. (2014). *Complexité-simplicité*. Paris: Collège de France.
- Bourcier, D., & Mazzega, P. (2007). Toward measures of complexity in legal systems. In *Proceedings of the 11th international conference on Artificial intelligence and law* (pp. 211-215).
- Bourgine, P., & Varela, F. J. (1992). Towards a practice of autonomous systems. In *Toward a practice of autonomous systems. Proceedings of the first European conference on artificial life (Vol. 1)*. xi±xvii. Cambridge, MA: MIT Press.
- Chaitin, G. (1970). On the difficulty of computations. *IEEE Transactions on Information Theory*, 16(1), 5-9.

LA GOUVERNANCE DANS LES SYSTÈMES

- Chang, C. Y., Tijus, C., & Zibetti, E. (2015). Les apprentissages à l'heure des technologies cognitives numériques. *Administration Education*, (2), 91-98.
- Frey, A., Daquet, A., Poitrenaud, S., Tijus, C., Fremiot, M., Formosa, Prod'homme, L., Mandelbrojt, J., Timsit-Berthier, M., Bootz, Ph., Hautbois, X. & Besson, M. (2009). Pertinence cognitive des unités sémiotiques temporelles. *Musicae Scientiae*, 13(2), 415-440.
- Hervé, D., & Rivière, M. (2015). L'interdisciplinarité s'invite dans les systèmes complexes: les journées de Rochebrune. *Natures Sciences Sociétés*, 23(1), 54-60.
- Jouen, F., & Molina, M. (2007). La multimodalité et la redondance. *Chapitre 8. PSY-Theories, débats, synthèses*, 113-122.
- Li, M., & Vitányi, P. (2008). *An introduction to Kolmogorov complexity and its applications* (Vol. 3, p. 11). New York: Springer.
- Mesmoudi, S., Hommet, S., & Peschanski, D. (2020). Eye-tracking and learning experience: gaze trajectories to better understand the behavior of memorial visitors. *Journal of Eye Movement Research*, 13(2):3, 1-15.
- Poitrenaud, S., Richard, J. F., & Tijus, C. (2005). Properties, categories, and categorisation. *Thinking & reasoning*, 11(2), 151-208.

COMPLEXITÉ ET TRANSDISCIPLINARITÉ : NOUVELLES MÉTHODES, NOUVEL OUTIL

- Richard, J. F., Poitrenaud, S., & Tijus, C. (1993). Problem-solving restructuration: Elimination of implicit constraints. *Cognitive Science*, 17(4), 497-529.
- Rumelhart, D. E., & Norman, D. A. (1976). *Accretion, tuning and restructuring: Three modes of learning*. California University, San Diego, La Jolla Center for human information processing.
- Santolini, A., Danis, A., & Tijus, C. A. (1996). Une méthode d'analyse des interactions cognitives dans l'environnement proximal du jeune enfant. *Enfance*, 49(3), 331-360.
- Saurel, P. (2014). *Ingénierie des connaissances pour traiter de l'hétérogénéité des données issues de systèmes sociaux-IA et Altérité radicale* (HDR, Université Reims Champagne Ardenne).
- Simon, H.A. (1996). *The Architecture of Complexity in the Sciences of the Artificial*. MIT Press, Cambridge, Mass.
- Tijus, C., Chen, C. L. D., & Chang, C. Y. (2022). Franco-Taiwanese Research on Extended Reality Experience. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 18(2), em2075.
- Tijus, C., Poitrenaud, S., Bellissens, C., Heni, J. & Frémiot, M. (2004). La spatialisation du temps musical : les Unités Sémiotiques Temporelles. *Actes des 11e Journées CNRS de Rochebrune:Rencontres Interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels*, « Le temps dans les systèmes complexes», Paris : ENST.

LA GOUVERNANCE DANS LES SYSTÈMES

- Tijus, C., Poitrenaud, S., Zibetti, E., Jouen, F., Bui, M., & Pinska, E. (2007). Complexity Reduction: theory, metrics and applications. In *2007 IEEE International Conference on Research, Innovation and Vision for the Future* (pp. 65-70). IEEE.
- Timsit-Berthier, M. (2007). Approche «biosémiotique» des unités sémiotiques temporelles. *Mathématiques et sciences humaines. Mathematics and social sciences*, 17), 57-62.
- Urdapilleta, I., Tijus, C. A., & Nicklaus, S. (1999). Sensory evaluation based on verbal judgments. *Journal of Sensory Studies*, 14(1), 79-95.
- Zibetti, E., Quera, V., Beltran, F. S., & Tijus, C. (2001, July). Contextual categorization: A mechanism linking perception and knowledge in modeling and simulating perceived events as actions. In *International and Interdisciplinary Conference on Modeling and Using Context* (pp. 395-408). Springer, Berlin, Heidelberg.

COMPLEXITÉ ET TRANSDISCIPLINARITÉ : NOUVELLES MÉTHODES, NOUVEL OUTIL

Note 1. Les 19 figures sonométriques repérées par le Laboratoire Musique et Informatique de Marseille (MIM) comme Unités Sémiotiques Temporelles : Chute, Contracté étendu, Elan, En flottement, En suspension, Etirement, Freinage, Lourdeur, Obsessionnel, Par vagues, Qui avance, Qui tourne, Qui veut démarrer, Sans direction par divergence d'information, Sans direction par excès d'information, Stationnaire, Sur l'erre, Suspension Interrogation, Trajectoire inexorable.

Note 2. Les trois niveaux les plus élevés de l'assistance à la simplification sont les suivants. Au niveau 13, les deux enfants font ensemble ensemble mais le tuteur (A) agit au au niveau de l'enfant (B) qui est aidé. Au niveau 14, l'assistance est métacognitive: A fournit à B une aide visant à le faire réfléchir sur ses actions et ses pensées. Ce type d'assistance est basé sur l'observation par A de ce que B est en train de faire. Au niveau 15, l'assistance est métapédagogique. A apporte à B une aide ajustée à son niveau de compréhension: A modifie sa technique d'assistance lorsque son intervention s'est avérée inefficace.

Note 2. Supposons une situation se déroulant sur une piste de danse telle que « *Jeanne danse seule* ». S'agissant de personnes (interprétées comme telles), la catégorisation contextuelle génère la catégorie des « *personne* » et sa collatérale « *non-personne* » pour regrouper ce qui n'est pas une personne (*meubles, animaux, piste de danse...*). Notons que si « *Jeanne danse seule* » concerne une photo sur le mur de la salle de danse, elle risque d'être exclue. Parmi les personnes « *personne* »,

LA GOUVERNANCE DANS LES SYSTÈMES

deux sous-catégories collatérales sont créées « *femme* » et « *homme* ». Pour « *femme* », « *danse seule* » et « *ne danse pas seule* » sont générées. Parmi ceux qui sont de type « *danse seule* », supposons deux femmes pour lesquelles sont créées à chacune leur catégorie singulière « *Jeanne* » et « *non-Jeanne* ». Le système cognitif a alors une lignée de catégories « *Personne / femme / danse seule / Jeanne* ». La quantité d'information se mesure alors à partir de cet arbre à partir du nombre de questions à poser pour déterminer la catégorie singulière d'appartenance.

COMPLEXITÉ ET TRANSDISCIPLINARITÉ : NOUVELLES MÉTHODES, NOUVEL OUTIL

TRAITER LE FLOU ET LA COMPLEXITÉ DU DROIT¹

Danièle Bourcier

Directrice de recherche

CERSA-CNRS

Résumé :

En droit, une des façons de traiter la complexité des règles entre elles a été d'inclure de nouveaux types de raisonnement comme le raisonnement flou. Ce choix remettait en cause pour la doxa juridique l'usage de la logique standard, seule acceptée pour l'application juste du droit. On reviendra d'abord sur les critiques qui ont été adressées au choix du raisonnement flou. Puis nous justifierons le bien fondé de cette orientation en montrant son intérêt dans les travaux de Mireille Delmas Marty. La modélisation en intelligence artificielle a pris en charge ces nouveaux raisonnements : nous citerons une expérience de réseaux de neurones appliqués au droit.

Abstract :

In law, one of the ways of dealing with the complexity of the rules between them has been to include new types of reasoning such as fuzzy reasoning. This choice called into question for the legal doxa the use of the only accepted standard logic for the fair application of the law. We will first come back to the criticisms that have been leveled at the choice of fuzzy reasoning. Then we will justify the merits of this

¹ Ce texte est repris d'une contribution écrite publiée dans le liber amicorum fait en l'honneur de Mireille Delmas Marty, ed. Mare & Martin, 2023.

orientation by showing its interest in the work of Mireille Delmas Marty. Modeling in artificial intelligence has supported these new reasonings: we will cite an experience of neural networks applied to law.

Présentation

Autour d'un oxymore, « la rigueur informelle »

La notion de « marge nationale d'appréciation », reconnue aux États souverains dans leur prise de décision a été élaborée à partir de la jurisprudence de la Convention européenne des droits de l'homme : elle fonde une méthode d'interprétation des textes utilisée pour tenir compte de la juridiversité de l'Europe, considérée comme patrimoine commun de l'humanité : le juge contrôle le « seuil de compatibilité » entre une décision nationale et le droit international. Dans « L'imprécis et l'incertain »², Mireille Delmas-Marty justifiait ainsi cette méthode en se demandant comment concevoir autrement « les contours d'une communauté de droit et de valeurs, par-delà la diversité des cultures et l'opposition des intérêts ». Elle montrait ainsi que la méthode du raisonnement flou, ou souple, à partir d'un concept ouvert comme celui de « mesures nécessaires dans une société démocratique », rejoignait la théorie des « hard cases » qu'avait

² M. Delmas-Marty & J.-F. Coste, « L'imprécis et l'incertain, Esquisse d'une recherche sur Logiques et Droit » in *Lire le droit Langue, Texte, Cognition*, D.Bourcier & P. Mackay eds, p. 109-1

développée H.L.A Hart.³ en tenant compte de *l'open-texture of law*. Cette position remettait en cause, pour la doxa juridique, l'idée que le droit ne pouvait être légitime que s'il respectait la logique standard. Or cette logique-là ne permet pas l'application juste du droit.

Revenir sur les critiques qui ont été adressées à cette position et sur l'intérêt qu'elle présente au-delà de l'exemple de la jurisprudence européenne des Droits de l'homme constituera la première partie de cette intervention (I).

Nous justifierons ensuite (II) le bien fondé de cette orientation 'traiter du flou et de l'incertain' en montrant comment, au-delà du droit, les paradigmes ont changé en science pour privilégier la démarche émergente par l'expérience, l'exemple, ou les données, et remplacer celle de la *hypothesis driven science* fondée sur les logiques descendantes de découverte. La modélisation en Intelligence Artificielle est venue à point pour prendre en charge ces nouvelles méthodes qui dépassent les logiques standards : nous citerons une expérience de réseaux connexionnistes appliquée au droit.

³H.L.A. Hart, *le concept de droit*, Publications Fac. Universitaires Saint-Louis, Bruxelles, 2006.

De l'imagination en droit

Ces observations ont été particulièrement fructueuses pour la recherche juridique en général. Le paradigme du flou du droit a permis de rapprocher des hypothèses plus adaptées pour comprendre de nouvelles formes de rationalités juridiques.

J'aimerais revenir sur la façon dont s'ouvrent des chemins nouveaux pour la science du droit. De l'ensemble des concepts substantiels issus des travaux de M. Delmas-Marty, deux aspects de l'humanisme sont évoqués à côté de celui de l'émancipation venue des lumières⁴ : l'humanisme des *interdépendances* (entre humains et non humains, entre l'humain et le vivant, entre l'homme présent et les générations futures) et l'humanisme de l'*indétermination* (entre l'homme et la machine, ou l'homme machine). Problématiques qui *a priori* semblent bien éloignées l'une de l'autre. Pourtant nous y avons découvert un lien qui a surgi de façon inattendue entre ces deux notions d'interdépendances et d'indétermination et ce type de découverte m'amène à introduire un autre « concept outil », celui de sérendipité. Beaucoup de chercheurs et de philosophes se souviennent de ces moments de révélation où une idée, une forme, un concept se sont imposées à eux dans un certain contexte, de façon inopinée. Paul Valéry qualifiait ces découvertes de « hasard interne », et H. Poincaré,

⁴ J. Caillosse, « La complexité du « droit de l'action publique » comme problème théorique » in *Politiques publiques Systèmes complexes* (D. Bourcier, R. Boulet P. Mazzega eds) Hermann, 2012. P. 71.

d'*illuminations*. Voici comment le philosophe Zygmunt Bauman raconte un de ces instants qui l'a conduit à dégager la notion de « modernité liquide » qui devait caractériser la suite de ses travaux sur la postmodernité. Le philosophe américain venait de publier son livre *Modernity and the holocaust* après plusieurs années de recherches. Il se trouvait dans une salle de concert, absorbé par le jeu du grand violoncelliste YoYo Ma. Il était transporté hors de ses soucis quotidiens, et ses pensées lui paraissaient hors de contrôle. Relatant cette expérience de découverte, il poursuit : « Durant le Prélude de la suite pour violoncelle de Bach, tout d'un coup, et sans signe avant-coureur, ce qui allait devenir mon prochain livre *Modernity and ambivalence* m'apparut, in toto, complet dans l'ordre des chapitres ». ⁵ Ce nouveau livre, auquel il n'avait jusqu'alors pas songé, complétait sa trilogie sur la modernité et allait lui ouvrir le chemin qui allait le mener graduellement à l'idée de « liquidité ». Comme il ne cherchait rien en particulier, et suivait seulement un courant de pensées disséminées au hasard, il en conclut : « L'approfondissement de cette idée fugace et son élaboration en système de pensée cohérent pendant plusieurs années a été déclenché par un moment de sérendipité ». Cette idée l'a conduit en 1998 de la critique de la première modernité (« solide ») à la seconde qu'il appela, par opposition, « liquide », en ce sens que désormais les vies individuelles et les structures sociales se

⁵M. Delmas-Marty, *Une boussole des possibles*, Collège de France éditions, p. 79.

LA GOUVERNANCE DANS LES SYSTÈMES

fluidifient en une succession de moments fragmentés sans rapport *apparent* les uns avec les autres.

Enfin, ces réflexions sur la sérendipité m'amène à citer un autre exemple d'inattendu puisé dans la lecture des travaux de M. Delmas-Marty : deux thèmes de colloques en 2019, avaient été lancés parallèlement et au même moment dans notre laboratoire : un premier thème sur les « Dynamiques du commun », l'autre sur « l'Humain et le non humain » dans la perspective de l'extension de la notion de sujet de droit. Autant ces deux sujets paraissaient au départ assez éloignés, j'ai trouvé récemment lors de la publication des actes⁶ le lien secret qui les rapprochait : la « responsabilité de protéger » au sein d'une communauté de destin⁷.

Je n'extrapolerai pas plus en parlant de sérendipité dans les processus conceptuels ni même de la notion de « liquidité ». Même si on lit le diagnostic suivant, dans le Flou du droit⁸ : « fluidité, incertitude, désordre : au jeu des multiples, l'image se brouille en même temps qu'elle se dynamise ... » : ce récit m'a évoqué les liens et les nœuds inattendus qui reliaient les concepts nouveaux dans sa recherche et qui semblent relever de cette

⁶ P. Van Andel, D. Bourcier, *C'est quoi la sérendipité ?* Le Courrier du Livre, p. 230.

⁷ G. Aidan D. Bourcier (eds) *Humain/non humain Repenser l'intériorité du sujet de droit*, LGDJ, 2001.

⁸ M. Delmas-Marty, *Le flou du droit*, *op. cit.* p. 169.

illumination que chacun peut reconnaître dans sa propre démarche personnelle pour comprendre l'émergence d'un concept, d'une idée ou de liens qui vont permettre de partager l'expérience d'une découverte cruciale surprenante.

1- Logiques traditionnelles et concept de flou

La Recherche sur de nouvelles logiques dites « semi-formelles » (Grize)⁹ a fait l'objet de travaux en psychologie (Piaget) et en linguistique sur ce qu'on a appelé globalement la logique naturelle. Pour M. Delmas-Marty, tant la découverte de principes transversaux que celui des méta-raisonnements plus adaptés au foisonnement des règles de droit et des réseaux d'acteurs ont été à l'origine de ses travaux sur les logiques floues. Ces logiques sont fondées par exemple sur le degré d'appartenance à des sous-catégories et se distingue de la logique classique aristotélicienne binaire fondée sur les principes d'identité, du tiers exclu, et de la non-contradiction. Après avoir été le raisonnement judiciaire standard, le syllogisme ne semblait plus un raisonnement adapté à la recherche d'une solution par le juge dans un univers complexe. Comme le signalait Grize, « *mon postulat de départ est que la nature du raisonnement dépend de celle des objets de pensée sur lesquels il porte* ». C'est pourquoi si les sources et la configuration du droit changeaient, le raisonnement utilisé pour les traiter devait lui aussi évoluer.

⁹ J. - B. Grize, « Les raisonnements semi-formels » in *Lire le droit*, D. Bourcier P. Mackay, eds, p. 99-107.

LA GOUVERNANCE DANS LES SYSTÈMES

Ainsi l'ordre pénal international a été bouleversé par le développement de normes supra- nationales (communautaire et sur les droits de l'homme). Ces systèmes normatifs ont dû être mis en cohérence avec les pratiques nationales. Le travail du juge a été d'appliquer le droit national à des ensembles normatifs nouveaux qui relèvent d'autorités multiples. Partant de l'exigence de concilier la pluralité de modèles de référence en Europe, le modèle de la complexité a émergé comme pouvant concilier « la fragilité du modèle libéral et sa force par rapport au modèle totalitaire, qui, par nature a horreur du multiple »¹⁰. Le modèle adaptable à cette fragmentation des éléments à prendre en compte doit être recomposé selon une autre logique qui organise le multiple et met en cohérence la pluralité de réseaux et de normes applicables dans chaque réseau, La notion de « marge nationale d'appréciation » que nous avons décrite plus haut a permis ainsi à la CDSH de préserver l'autonomie des États (comme par exemple sur la « matière pénale ») et l'émergence d'un Droit commun jurisprudentiel, *sans uniformiser le droit*.

Revenons sur le flou du droit, notion à partir de laquelle M. Delmas-Marty a élaboré une grande partie de ses travaux. Cette caractérisation n'est pas à prendre comme une insuffisance de rationalité ou un défaut du droit, mais comme une opportunité sous-jacente qui permet à un droit de plus en plus complexe de

¹⁰ M. Delmas-Marty, *Le flou du droit*, *op.cit.* p. 172.

s'adapter à des exigences parfois contradictoires simultanées ou incompatibles (élaboration d'une jurisprudence cohérente européenne et prise en compte de la souveraineté des États). Et c'est cette opportunité-là que M. Delmas-Marty a saisie pour faire avancer la théorie du droit sous-jacente à toute son œuvre. Pourtant ce concept a été souvent mal compris et mal interprété, comme elle l'a rappelé dans son dernier ouvrage¹¹ : « Il s'agissait de contribuer à sortir de la logique binaire pour introduire une logique de gradation – *que je n'ose plus appeler logique floue depuis les mésaventures que j'ai connues pour avoir publié sous un titre un peu provocateur le Flou du droit* (je souligne) ». Elle préfère l'appeler aujourd'hui « logique de la gradation » comme moyen de ménager des marges, les limites de la vision hiérarchique des normes ainsi que les transitions entre des concepts binaires. On voit deux raisons qui limitent la représentation mentale traditionnelle des juristes : l'organisation enchevêtrée des connaissances de leur domaine et la connaissance insuffisante des liens et de la dynamique qui relient ces composants¹².

¹¹ M. Delmas-Marty, *Les boussoles des possibles*, op.cit. p. 69.

¹² D. Bourcier, « Régulation juridique, complexité et sérendipité » in *Politiques publiques Système complexes*, R. Boulet et al., eds. Hermann, p. 39.

Les insuffisances de la logique pour représenter le droit

Le paradigme de flou du droit est donc devenu nécessaire face à la complexité croissante des systèmes de droit et de leurs enchevêtrements.

« *Le réalisme est peut-être de faire le pari que le flou, le doux et le mou pourraient être les garde-fous de cette complexité qui nous protège du risque d'unification bureaucratique ou hégémonique* » (M. Delmas-Marty).

Elle n'était pas la première à introduire la nécessité pour le droit d'adapter ses outils de pensée. La réflexion avait déjà été amorcée par Jean Carbonnier avec *Flexible droit*¹³, qui avait brisé le tabou suivant lequel le droit ne pouvait être pensé que dans sa rigidité.

Le droit pendant près de 25 siècles avait été aristotélien. Aristote (384-322 av. J.-C.) est certes le père fondateur de la logique classique : le raisonnement standard du droit était le syllogisme d'exposition. Le **syllogisme**, raisonnement judiciaire par excellence se déroule en trois étapes : l'énoncé de la règle de **droit**, l'énoncé des **faits**, l'application de la règle de **droit** aux faits (la conclusion).

Cette logique s'est avérée simplificatrice car elle nécessitait de réfléchir en termes binaires, exclusifs. Surtout elle assimile la langue naturelle à une combinaison ensembliste de mots-

¹³ J. Carbonnier, *Flexible droit Pour une sociologie du droit sans rigueur*, Paris LGDJ, 2001.

éléments, et les mots à des concepts bien définis. Même Aristote avait eu l'intuition de l'insuffisance de la logique puisqu'il avait développé à côté de la logique du syllogisme, une logique de l'argumentation¹⁴.

Cette représentation rigide de la pensée juridique était possible dans un univers où le droit était centralisé et où le nombre d'acteurs était limité. Mais le droit a évolué : avec un droit globalisé, des sources diverses s'affrontent, le nombre de ses interprètes s'est multiplié et les systèmes juridiques sont entrés en concurrence. Avec l'inflation normative et l'« excessive complexité » des réseaux de règles¹⁵ qui en a résulté, le droit ne peut plus se fonder sur le paradigme cartésien des lois simples pour décrire l'univers complexe qu'il doit réguler.

D'abord on peut avancer un argument linguistique : comme le droit s'exprime en langue naturelle, on ne peut écarter deux caractéristiques de la langue naturelle : l'ambiguïté et le flou. Dans un travail sur la définition¹⁶, nous avons montré combien la définition juridique (ensembliste et performative) et la définition lexicale (descriptive) se différenciaient. La définition

¹⁴ Rappelons d'ailleurs qu'Aristote a conçu sa logique dans l'ordre suivant : les Premiers analytiques ou étude analytique du raisonnement et de sa forme principale, le syllogisme, ensuite, les Topiques, en fait probablement rédigés avant les Premiers analytiques et les Seconds analytiques, proposent une méthode d'argumentation à partir de prémisses probables.

¹⁵ Décision du Conseil constitutionnel n° 2005-530 du 29 décembre 2005.

¹⁶ D. Bourcier, « Argumentation et définition en droit ou Les grenouilles sont-elles des poissons ? » in *Langages*, Argumentation et discours scientifique, Larousse, n° 42, 1976. p. 115-124.

LA GOUVERNANCE DANS LES SYSTÈMES

juridique fait de la liste des caractéristiques du concept les conditions d'application de la norme.

Pour la raison que les éléments de la définition juridique sont stricts, mais que ces éléments (sauf régression à l'infini) peuvent avoir des références sémantiques non strictes, le système juridique ne peut être un système axiomatique formalisé : fermé, complet, univoque, cohérent. Ch. Perelman signale que « dans les défauts soi-disant rédhibitoires de l'argumentation juridique se trouvent les conditions de possibilité d'une rhétorique judiciaire ». Il ajoutait que « le système de droit est ouvert et doit le rester ». Comme cela a été précisé plus tard par Luhmann « le droit est un système de connaissances fondé sur la langue naturelle qui hérite des mêmes caractéristiques » et il est donc un « système normatif fermé mais cognitivement ouvert ».

D'autres caractéristiques du discours ont été dégagées des travaux en pragmatique linguistique. Beaucoup d'entre elles comme l'implicite ou la présupposition ne sont pas représentables par des unités lexicales ou des ontologies strictes et échappent donc à tout traitement logique.

La fonction du flou dans le discours juridique n'est donc pas un défaut mais une ressource. Les termes indéterminés ou vagues de la loi constituent une sorte de délégation d'interprétation aux autorités judiciaires. C'est sur cette même caractéristique que se fonde la notion de pouvoir discrétionnaire.

Le flou, le complexe et la théorie de l'argumentation : au-delà du positivisme

Avec le développement des sciences cognitives, ont été mis en lumière de nouveaux types de raisonnements.

Prenons celui de la complexité.

On a eu besoin de la théorie des systèmes complexes, quand il a paru évident que les raisonnements déterministes ne pouvaient suffire à représenter un cadre utile pour l'action ou la décision quand la causalité constitue la pierre angulaire du lien de responsabilité. Dans les processus décisionnels enchevêtrés auxquels sont confrontés l'administration et le juge, il est souvent difficile de trouver le lien de causalité déterminant. Ainsi une décision prise par un comité de sélection pour les concours d'admission au CNRS illégalement nommé peut-elle être annulée de ce fait ? Établir le lien de causalité (déterministe) entre l'irrégularité de la constitution d'un jury et d'une nomination n'est pas facile à établir. Le juge administratif a donc élaboré la notion de « décision complexe » où la causalité est imbriquée dans une série de procédures et où le lien direct n'a pas à être démontré entre une irrégularité survenue au cours de la procédure et la décision finale.

La querelle autour du syllogisme judiciaire qui s'est développée depuis l'École de l'Exégèse a réhabilité la rhétorique

LA GOUVERNANCE DANS LES SYSTÈMES

au moment même où se développait une nouvelle branche de la logique, la logique juridique : pour Perelman, le droit, truffé d'antinomies et de lacunes interdit simplement au raisonnement judiciaire de n'être qu'un syllogisme.

La pensée disjonctive a envahi alors l'univers des juristes au point d'être devenue l'aune de la vérité d'une conclusion. On peut se demander paradoxalement pourquoi le raisonnement déductif rigoureux créé sur le modèle mathématique qui a inspiré la tradition juridique et philosophique serait différent du résultat d'une machine. Même si la langue du droit est semi formelle, on a vu qu'elle est aussi une langue naturelle avec ses ambiguïtés, ses présupposés interprétatifs que la logique formelle préfère oublier. Quand Montesquieu demande au nom de la séparation des pouvoirs que le juge ne soit que la bouche de la loi, il signifie que la logique ne crée rien puisque le résultat est entièrement déterminé. Le juge ne peut interpréter au-delà du syllogisme. Les critiques que l'on adresse actuellement à la machine à juger étaient déjà celles que l'on pouvait déjà faire au raisonnement du juriste comme être humain.

En ce qui concerne le droit, les mêmes métaphores ont accompagné le développement de ses formalisations successives. Pour Frédéric de Prusse déjà, le code devait être aussi précis qu'une horloge. Ce n'est donc pas la première fois que se pose la question du droit comme machine. De nombreux travaux de

cybernétique puis de systémique depuis Leibniz tentent de faire du droit un mécanisme¹⁷.

Pour l'école de l'Exégèse, la loi est complète, tout est dans la loi, et on doit tout pouvoir déduire de la loi. Geny a aussi été critique de la méthode *more geometrico*. Le point de départ de sa méthode est l'affirmation d'un « seuil d'interprétation ». L'interprète ne doit plus prétendre interpréter mais admettre que la loi présente des lacunes et qu'elle ne permet pas de résoudre le conflit soumis au juge. Il devient donc artificiel de solliciter une intention supposée, fictive du législateur. Chez lui, le stade supérieur est celui de la libre recherche scientifique : cette liberté ne doit être ni arbitraire ni purement subjective. L'interprète doit étudier toutes les données de la vie sociale de son époque (données sociologiques, économiques, psychologiques...). Le but de la méthode de Geny est d'élaborer des règles les mieux adaptées aux besoins actuels de la société et de permettre au juge d'échapper aux formules rigides par des formules dites « élastiques »¹⁸. Geny assimile d'ailleurs la libre recherche scientifique à cette marge d'appréciation. Ce qui le rapproche de la méthode de Mireille Delmas-Marty. Un siècle plus tard, dans les débats sur la machine et le droit, Mosconi¹⁹ entend séparer la

¹⁷ L. Mehl, "Automation in the legal world. From the machine processing of legal information to the law machine", *Mechanisation of Thought processes*, vol. 2, National physical Library, Symposium n° 10, 1959.

¹⁸ F. Geny, *Méthode d'interprétation et sources en droit privé positif*, LGDJ 1954 p. 183.

¹⁹ J. Mosconi, « Logique et machine : quelques réflexions sur leur application au droit » in *Le droit l'information et l'arbitraire*, Épicure, 1991, Université

démonstration du calcul. « *Si le calcul est l'exécution aveugle de consignes préétablies, la démonstration demande de l'invention* »²⁰, comme le droit.

II- De modèles plus souples pour traiter la complexité du droit : les apports de l'Intelligence Artificielle

La logique s'est enrichie avec l'arrivée des technologies. Les mathématiques et l'informatique ont renforcé la manipulation logique des unités juridiques (propositions, concepts, notions) et même la codification assistée par ordinateur. Le développement de l'algorithmique et la théorie de la complexité ont fait déborder de toutes parts le raisonnement déductif formel sous contrainte. Le trait commun développé dans un pays cartésien comme le nôtre reste d'être sceptique vis à vis de tout système qui sortirait de la chaîne des raisons fondée sur des idées « claires et précises ». Pourtant de plus en plus de travaux montrent que l'on peut développer d'autres rationalités avec d'autres logiques (non monotone, floue, naturelle).

Les modèles de l'intelligence artificielle se sont développés depuis quelques décennies. Fondés au départ sur une logique aussi stricte que le syllogisme, ces modèles ont tenté de mieux

Paris 1, Préface de P. Legendre.

²⁰ J. Mosconi, op.cit p. 94.

prendre en charge certaines caractéristiques du droit, notamment le flou et le complexe.

Les sciences de l'artificiel pénètrent toutes les sphères de la décision (médecine, économie, gestion) ; le droit ne pouvait y échapper. Ce rêve de *mathesis universalis* avait parcouru toute la pensée occidentale depuis Ramus et Leibniz. En 1748, un médecin, philosophe des Lumières, publiait à Leiden l'Homme-machine²¹. Sa principale thèse était d'opposer le déterminisme de la machine – l'homme fait partie de la machine en question - à l'exercice d'une quelconque volonté interne. L'opposition entre la machine et la volonté définie comme la faculté pour l'être humain de n'être soumis qu'à son libre arbitre (sans être contraint par une quelconque "force extérieure" comme le dit Descartes) est devenue depuis trois siècles le thème central du débat qui allait opposer les monistes et les dualistes.

Malgré son radicalisme, La Mettrie anticipe les débats qui se sont développés dans la deuxième partie du XXème siècle autour de la robotique, de l'intelligence artificielle et des neurosciences. Ce n'est plus le mécanisme qui intéresse les ingénieurs philosophes actuels mais la machine cognitive : peut-elle simuler des comportements humains, comme l'exercice du jugement, du raisonnement, de la mémoire ? En réponse à cette question, une hypothèse théorique va se dessiner avec le

²¹ J. Offray de La Mettrie, *L'homme machine*, (1747), Éditions Bossard, 1921.

LA GOUVERNANCE DANS LES SYSTÈMES

développement de l'informatique : si le cerveau fonctionne peu ou prou comme une machine (de Turing), compte tenu des moyens de calculs nouveaux offerts par l'ordinateur, des "dispositifs formels" ne peuvent-ils apprendre et effectuer des actions proches des actions humaines ?

Les travaux d'apprentissage cognitif des tâches physiques ou mentales lancés dans les années 70-80 ont mené à des recherches complètement nouvelles consistant à approfondir la description *opératoire* des activités humaines. La modélisation va ensuite consister à simuler les différentes démarches cognitives dans une machine et d'en évaluer les limites et les impacts en milieu ouvert. Que l'on veuille mécaniser ou simuler des activités ne signifie pas qu'il faille procéder à un réductionnisme mécanique des opérations de jugements ni qu'il faille remplacer définitivement les procédures institutionnelles par des processus automatiques. Dans tous les cas, la question scientifique et surtout cognitive de la représentation décisionnelle mérite une vaste réflexion.

Deux modèles ont été explorés en intelligence artificielle. Les modèles à base de règles (les systèmes experts) et les modèles à base de cas (les systèmes neuronaux ou connexionnistes). Ils correspondent aux deux modes d'apprentissage dégagés par Piaget²² dans la psychologie du développement de l'enfant - par les règles et par les exemples.

²² J. Piaget, B. Inhelder, *La psychologie de l'enfant*, Paris, PUF, 2011.

Mais ils renvoient aussi à ...deux systèmes de droit - le monde romano-germanique légicentré et le monde de la Common Law à raisonnement casuistique. Revenons au cœur de la prise de décision juridique. La spécificité de l'acte de juger réside dans le fait que des parties de la décision sont « calculables » (modélisation logique qui renvoie aux *easy cases* de Hart) et que d'autres ne le sont pas (langage naturel et *hard cases* de Hart). Ainsi le langage naturel dans lequel sont écrites les règles de droit implique toujours une autre interprétation possible. Les modèles à base de règles explicites sont les systèmes experts (systèmes symboliques). Les deuxièmes systèmes sont appelés connexionnistes, ou réseaux de neurones artificiels (RNA). Ils se déclinent aussi sous le nom de *Neurolaw*. Ces systèmes à base de cas sont des systèmes qui raisonnent *sans règles* (systèmes subsymboliques). Soit que les règles ne sont pas données par le législateur (indétermination légale), soit qu'il existe une variété de paramètres qu'il est difficile de représenter (qu'est-ce qu'une « privation de liberté » ? comment définir la « matière pénale » ?) Leur expertise vient donc d'une base d'exemples analysée automatiquement par la machine (*machine learning*).

On crée donc, pour un domaine de décision donné, une base d'apprentissage de cas (jurisprudences ou dossiers) qui va constituer la base de référence. Ce phénomène est parfois comparé à ce qui se passe pour l'apprentissage humain. Ces

LA GOUVERNANCE DANS LES SYSTÈMES

données fournies en vrac vont former la couche d'entrée dans le système. Le réseau va donc convertir la valeur des entrées en un signal qui se propage le long de ses connexions. En faisant la somme de l'influence de chaque connexion relative à chaque entrée et en les comparant les unes aux autres, on peut déterminer le sens de l'influence de chaque entrée et l'importance relative de leur influence sur le résultat final (c'est une sorte de mise à plat automatique des variables et de leur pondération). Cette démarche ressemble à celle du juge de la cour de justice CDSH quand il évalue la « marge nationale d'appréciation » : en les comparant les uns aux autres, on peut déterminer le sens de l'influence de chaque entrée et l'importance relative de leur influence sur le résultat final.

Les technologies de l'intelligence artificielle ont donc su s'échapper de la logique stricte et s'adapter au flou du droit (Bourcier) :

« Les RNA sont particulièrement adaptés à ces connaissances floues, incertaines et bruitées. De nombreux tests ont été faits pour utiliser des modèles connexionnistes dans le traitement du droit » et l'on a reconnu leur pertinence pour traiter les parties les plus ouvertes du raisonnement. Indépendamment du fait que ces systèmes sont bien adaptés au régime de *Common law* (plutôt fondé sur des cas de jurisprudence), ils sont utiles quand on n'a pas de règles explicites. On leur a reconnu d'autres intérêts : ils peuvent intégrer des cas fondés sur des raisonnements prenant en

compte des paramètres et des pondérations variés, conduisant à des décisions divergentes.

Le réseau de neurones artificiel disperse l'information à travers sa structure et le poids de ses connexions. Les RNA peuvent ainsi mettre en évidence des processus cognitifs plus fins, plus dynamiques. Ils ont pu se servir de leur puissance de généralisation de façon à échapper à la justification que l'on voulait lui imposer et trouver, au moyen des autres critères d'entrée, une nouvelle manière cohérente de parvenir à un résultat satisfaisant. On leur accorde une propension à prédire de nouveaux raisonnements ou, simplement, à en adopter de plus efficaces.

La théorie des systèmes complexes

Depuis plusieurs décennies, l'étude des systèmes complexes a fait de grand progrès du point de vue des méthodes et de la formalisation. Un système complexe peut être défini comme un système composé de nombreux éléments en interactions dynamiques.

C'est autour de la construction de concept comme celui de l'intérêt général, de « droits de l'homme » ou de « marge d'appréciation » qu'émergent les difficultés méthodologiques. Comment prendre en compte les frontières public/privé » et les diverses échelles d'intervention ? Comment analyser des intérêts diversifiés de publics hétérogènes ? Le positivisme technicien

vient se superposer au positivisme juridique et enferme les juristes dans des agencements conceptuels trop étroits. Des experts en politique publique proposent de créer de nouvelles « cartes mentales » faisant appel à l'interdisciplinarité²³ et d'alléger un « État surmené » pour traiter l'inévitable complexité du droit²⁴.

Les outils de lecture et d'analyse, voire de visualisation de la complexité²⁵ peuvent donc être une ressource pour traiter de façon dynamique un univers normatif qui a cessé d'être linéaire. Comme les règles ne peuvent pas tout anticiper et qu'elles ne peuvent tout classifier dans un monde qui ressemble plus à un nuage qu'à une horloge²⁶ (lire p. 19) les comportements flexibles et auto régulés peuvent être pris en charge par d'autres modèles plus adaptés.

La logique disposait d'un modèle standard pour décrire le raisonnement du juge. Il doit être remis en cause. Valéry

²³ J. Caillosse, « La complexité du « droit de l'action publique » comme problème théorique » in *Politiques publiques Systèmes complexes* (D. Bourcier, R. Boulet P. Mazzega, eds) Hermann, 2012

²⁴ L. Baslé « L'État surmené entre l'indécidable et l'ingouvernable : une perspective luhmannienne », op.cit. *Politiques publiques Systèmes complexes* (D. Bourcier, R. Boulet P. Mazzega, eds) Hermann, 2012.

²⁵ Voir d'autres modèles comme P. Saurel, « Modélisation macroscopique de l'écosystème politique de gestion des données personnelles en France : un exemple de modèle d'une hétérarchie » in *Politiques publiques Systèmes complexes* (D. Bourcier, R. Boulet P. Mazzega eds) Hermann, 2012, pp. 259-272.

²⁶ D. Bourcier, « L'émergence d'une problématique : l'approche cognitive du droit » in *Lire le droit*, op. cit. p. 19

protestait ainsi contre la contrainte de la logique dans nos raisonnements :

« Qu'est-ce qui nous force à tirer la conclusion d'un syllogisme, rien dans la logique ne répond »²⁷

J. L. Le Moigne appelait les rhéteurs à revenir enrichir « un art de penser » qui se limitait à la seule forme de la déduction syllogistique. Il demandait à aller au-delà des quatre préceptes du Discours de la méthode et de la tyrannie de la raison.

Aujourd'hui, peut-on éthiquement se priver de créer des objets de simulation qui nous renseignent sur nos comportements cachés ou simplement sur nos choix implicites ? Cette interrogation ne prend-elle pas un sens particulier quand il s'agit de mettre à jour l'exercice des principes fondateurs de nos sociétés : la justice, l'équité, l'égalité devant la loi, les droits de l'homme.

Se saisir d'un lien d'opportunité entre l'humain/le non humain et le Commun

Revenant au début de ce chapitre, il convient de réhabiliter l'intuition mais aussi le hasard comme opportunité dont l'essor des technologies pourrait être un facteur accélérateur²⁸ . « *Si le hasard n'est autre que la rencontre fortuite de séries causales hétérogènes on peut penser que les progrès technologiques*

²⁷ P. Valéry, *Cahiers 94-14* Tome III p.320

²⁸ M. Delmas Marty, *Une boussole des possibles*, op. cit. p. 75.

LA GOUVERNANCE DANS LES SYSTÈMES

augmentent, non pas les dangers, mais la part de hasard ». La topographie imaginaire du droit a fait bouger les frontières, et les a rendues « poreuses et relatives ».²⁹ Défendre la complexité du droit n'est plus un tabou. « Le droit prend en charge sa propre complexité »³⁰ notamment par le changement de lexique : le flou du droit appartient à ce nouveau lexique.

Aujourd'hui la mondialisation a montré la fragilité des humains et leur interdépendance avec le vivant non humain (on parle maintenant du « bien être des glaciers »). Construire un bien commun comme le climat, consistera à redéfinir collectivement un équilibre entre développement durable et développement équitable. La recherche de cet équilibre fait partie de la dynamique du Commun entre État et marché, puisqu'un devoir de vigilance des sociétés mères et des entreprises donneuses d'ordre pourrait être négocié pour prévenir les atteintes aux droit fondamentaux et à l'environnement.

Est-ce que l'intelligence artificielle peut ordonner le multiple et résoudre les contradictions de l'État de droit comme le suggérait Mireille Delmas-Marty dans le Flou du Droit ? La réponse peut être positive si les modèles de l'IA sont susceptibles de traiter des cas « bruités », « hétérogènes » contenant des

²⁹ J. Caillosse, « La complexité du « droit de l'action publique » comme problème théorique » in *Politiques publiques Systèmes complexes* (D. Bourcier, R. Boulet P. Mazzege, eds) Hermann, 2012. p. 83.

³⁰ J. Caillosse, « La complexité du « droit de l'action publique » comme problème théorique » op. cit. . p. 71.

indicateurs et des paramètres variés et de pondérations différentes mieux que les humains.

Nous avons commencé cette réflexion autour des travaux de M. Delmas-Marty par un oxymore. La notion de « rigueur informelle » a été lancée par un logicien contemporain G. Kreisel³¹ qui estime qu'en mathématiques, quoique la rigueur soit essentielle, il y a de la place pour une « rigueur informelle » dont la tâche serait d'analyser les notions mathématiques intuitives et de préciser les relations qu'elles entretiennent avec les notions formelles axiomatiques correspondantes. On peut suggérer qu'en droit toute instance interprétative pourrait s'en inspirer...

³¹ G. Kreisel, « Informal rigor and completeness proofs » in *Problems in the philosophy of Mathematics*, ed. J. Hintikka Oxford LIP, 1969.

LA GOUVERNANCE DANS LES SYSTÈMES

LA FONCTION ζ OU LE PASSAGE DU DISCRET AU CONTINU

Philippe Riot,

chercheur rattaché au laboratoire SCQI de l'ESIEA

« *Peut-être le mystère est-il trop clair.* » E.-A. Poe dans Histoires
extraordinaires

Résumé : *Nous proposons une nouvelle interprétation de la fonction ζ de Riemann, ce qui permet d'appréhender en particulier la conjecture de Riemann sous un nouvel angle. Il apparaît que son énoncé s'identifie à un axiome qui fixe un modèle du continu.*

Summary : *We propose a new interpretation of the Riemann ζ function, which makes it possible to apprehend in particular the Riemann conjecture from a new angle. It appears that his statement is identified with an axiom that fixes a model of the continuous.*

Remerciements : Le travail théorique dont le présent texte constitue une restitution partielle a été suscité par l'intuition initialement formulée en début de 2013 par Alain Le Méhauté, physicien-chimiste autrefois membre du laboratoire de chimie au centre de recherche de Marcoussis de la société ALCATEL, avec lequel je coopère depuis environ trente ans. A partir de ses travaux de modélisation relatifs aux phénomènes de relaxation dans les milieux diélectriques engendrant la

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

création d'énergie électrique par des piles, Alain avait émis l'hypothèse d'un lien possible entre la fonction ζ , en particulier sous l'angle de certaines conjectures majeures dites de Goldbach et de Riemann, et les propriétés usuellement dénommées fractales caractéristiques de ces processus.

1 – Appréhender la complexité du monde consiste principalement à ramener le fouillis du réel à une formulation ramassée dans un langage à syntaxe maîtrisée. Établir des lois revient à résumer une multitude de situations concrètes, potentiellement en quantité infinie et suffisamment cohésives pour être assimilées à un continu, dans une formule de nature discrète et mettant en jeu des paramètres en quantité finie. En d'autres termes, il s'agit toujours de ramener l'infini au fini.

L'objectif de la communication est de montrer que la fonction ζ permet de rendre compte formellement du passage du discret au continu, donc également du fini à l'infini. Néanmoins, le continu est mathématiquement largement indéterminé ; il est nécessaire en général d'introduire de nouveaux axiomes pour le fixer. Cela

s'applique à la fonction ζ ; concrètement il existe un axiome permettant de définir le continu associé naturellement à cette fonction qui s'exprime selon l'énoncé de la conjecture de Riemann.

2 – Toute démarche rationnelle, sinon scientifique, repose sur quatre opérations fondamentales simples qui sont effectives, c'est-à-dire calculables, sous condition de dénombrabilité :

- Lister des objets, impliquant l'introduction d'un ordre linéaire, voire d'un ordre linéaire total,
- Nommer ou étiqueter des objets ou points, ce qui présuppose une hypothèse de séparation,
- Typer ou encore attribuer des propriétés, autrement dit regrouper des objets partageant des caractéristiques communes ce qui consiste à identifier un système d'ouverts topologiques ; cela appelle une hypothèse d'effectivité qui est alors appelée propriété de Lindelöf,

COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

- Relier les propriétés entre elles, en particulier pour rendre compte d'une dynamique par exemple paramétrée par le temps ; cela est modélisé par une seconde relation qui peut prendre la forme d'une structure d'ordre partiel ou plus généralement une structure de catégorie.

La construction d'un modèle, quel que soit son degré de mathématisation, repose sur l'usage d'un langage qui introduit la dualité syntaxe et sémantique ; une syntaxe effective est nécessairement au plus dénombrable, et même pratiquement finie quoiqu'éventuellement très grande, tandis que la sémantique est potentiellement supposée très riche jusqu'à atteindre ultimement la puissance du continu, même si formellement on peut tenter de viser au-delà. La capacité de relier de manière canonique le dénombrable et le continu constitue la trame systématique, mais la plupart du temps masquée, de la rationalité.

3 – Il ne s'agit pas ici de détailler la démonstration complète des résultats principaux énoncés, mais d'en

dégager la justification de manière synthétique et intuitive. Les démonstrations formelles feront l'objet d'une autre publication dont la rédaction est en cours.

4 – L'ensemble des entiers naturels \mathbb{N} est caractérisé par l'axiome du successeur de Peano avec la donnée d'un élément initial et l'opérateur s engendrant l'élément noté $n+1$ à partir de l'élément n . La structure ainsi créée est un monoïde. Il existe une autre manière d'aboutir à ce résultat.

Considérons en effet deux ensembles de petite taille, le premier ne comprenant qu'un seul élément noté $\dot{0}$ et le second comprenant ce même élément $\dot{0}$ et un autre noté \blacksquare ; il existe deux seuls morphismes, ou flèches, entre le premier et le second. Ce fait peut se lire comme rendant compte du fait que l'élément $\dot{0}$ demeure égal à lui-même, dans ce cas le morphisme est l'identité, ou bien que cet élément est transformé en un autre, dans ce cas le morphisme est appelé différence ; ce qui est synthétisé par le diagramme suivant :

COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

$$\begin{array}{ccc} & \text{id} & \\ & \longrightarrow & \\ \{*\} & & \{*, \blacksquare\} \\ & \xrightarrow{\text{dif}} & \\ & & \end{array}$$

La construction, classiquement appelée conoyau, consiste à prolonger les deux morphismes précédents dans un morphisme supplémentaire de telle sorte que les deux compositions résultantes soient égales. Autrement dit, les deux éléments $*$ et \blacksquare sont plongés dans un ensemble plus grand par rapport auquel le déplacement de l'un vers l'autre ne crée pas de différence puisque la liste des éléments potentiellement accessibles par l'itération de tels déplacements demeure de la même taille, à savoir l'infinité dénombrable, donc bijective à un même unique ensemble identifiable à \mathbb{N} tout entier (une expérience de pensée illustre bien la situation : une personne grimpe le long d'une échelle infiniment allongée, en passant d'un barreau au suivant, cette personne a l'impression de faire du sur-place puisqu'elle voit toujours une infinité de barreaux devant ses yeux). On peut résumer la situation

en disant que l'ensemble \mathbb{N} , modèle canonique de l'infini dénombrable, « co-égalise » l'identité et la différence. Ce schéma de création de nouveaux objets est un procédé très présent dans de nombreuses théories mathématiques. Plus précisément, l'identification de \mathbb{N} comme conoyau est une autre manière d'explicitier le principe de récurrence selon lequel une propriété vérifiée pour un élément, puis transféré systématiquement par l'opérateur successeur, est en fait valide sur l'ensemble \mathbb{N} tout entier.

5 – L'ensemble des entiers naturels est classiquement muni d'une seconde opération, la multiplication. La plus simple manière de l'appréhender consiste à poser la multiplication comme une itération de l'addition ; ainsi, pour illustrer cette propriété, 2×3 peut se définir comme $2+2+2 = 6$. Comme cette opération est commutative, $2 \times 3 = 3 \times 2$, la même opération se lit également comme $3+3 = 6$. Par ailleurs, l'itération se comprend aussi comme un changement d'échelle, autrement dit comme un changement d'unité sur une règle graduée. La

COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

multiplication arithmétique est l'addition vue à une autre échelle.

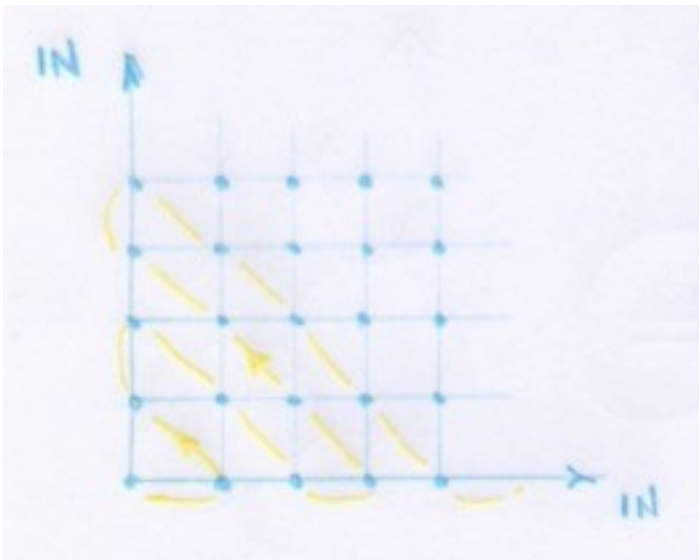
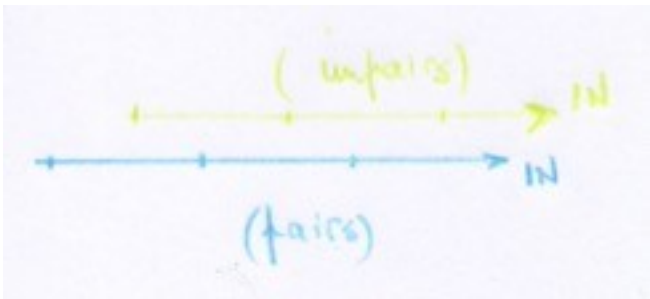
Le recours à une première opération introduit le concept d'algèbre en tant que structure close pour une opération combinant deux éléments pour en obtenir un troisième appartenant à cette même structure. D'un point de vue formel, l'opération $+$ se comporte comme l'union ensembliste de deux ensembles disjoints. En parallèle, l'opération \times (multiplication) se comporte comme l'intersection ensembliste, et peut être engendrée par changement d'échelle de telle sorte que l'introduction de la multiplication engendre le concept de voisinage et fait émerger une structure topologique. Il en résulte que \mathbb{N} muni des deux opérations $+$ et \times relève à la fois de l'algèbre et de la topologie. A l'intersection de ces deux structures fondamentales se trouve être celle de compacité qui consiste formellement et intuitivement à « rabattre » l'infini sur le fini. En effet, la compacité est généralement abordée en topologie par les deux propriétés équivalentes suivantes (équivalence acquise moyennant le respect de certaines conditions sur lesquelles nous faisons l'impasse

pour éviter trop de détails techniques): un espace topologique est réputé compact si, à partir d'un recouvrement de taille quelconque en général infini d'ouverts, il est possible d'en extraire un recouvrement fini. Comme un ouvert topologique correspond à un collectif de points de l'espace qui vérifient une propriété donnée, l'hypothèse de compacité signifie que l'espace concerné, dont la description comporte initialement une infinité de propriétés, peut être décrit grâce à une liste finie de propriétés caractéristiques. De toute suite d'éléments d'un espace compact on peut en extraire une sous-suite convergente, la convergence étant en particulier exprimée sous la forme du critère de convergence de Cauchy et signifiant qu'au-delà d'un certain rang deux éléments quelconques de cette suite se trouvent écartés l'un de l'autre d'une valeur infiniment petite. En adoptant une topologie particulière dite topologie de Scott qui permet d'identifier les fonctions calculables avec les fonctions continues, le critère revient à dire que la quantité limite peut être approchée d'aussi près qu'on le souhaite en un nombre fini d'étapes de

COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

calcul. Les deux expressions de la compacité qui viennent d'être rappelées explicitent clairement la possibilité de saisir l'infini par le fini.

Puisque les deux opérations, l'addition et la multiplication, respectent par construction la structure arithmétique, il en résulte que \mathbb{N} vérifie la double propriété fondamentale d'invariance d'échelle : $\mathbb{N} \times \mathbb{N} \cong \mathbb{N} \cong \mathbb{N} \mathbb{N}$ (union disjointe). Ce double isomorphisme est illustré par les deux exemples simples suivants. Si vous distinguez les entiers pairs et impairs vous obtenez deux copies distinctes de \mathbb{N} en lisant de manière ordonnée et en faisant de nouveau appel à ce même ensemble \mathbb{N} pour étiqueter leurs éléments respectifs. La première équivalence s'illustre aisément grâce à la figure suivante qui rend compte du fait que l'on peut aussi énumérer tous les éléments du produit $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ en les étiquetant par une nouvelle règle grâce au seul ensemble \mathbb{N} de départ.



COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

6 – L'addition dans \mathbb{N} introduit une relation d'ordre naturelle : l'entier n est dit inférieur à l'entier m si l'on peut obtenir m en partant de n et en appliquant plusieurs fois l'opérateur successeur. Cela s'écrit $n \leq m$. L'ensemble \mathbb{N} muni de cette relation constitue l'exemple canonique d'une structure d'ordre dite linéaire où deux éléments quelconques sont systématiquement classés l'un par rapport à l'autre avec la propriété fondamentale additionnelle que toute collection finie d'entiers admet un plus petit élément ; on dit alors que cette structure d'ordre constitue un bon ordre.

La multiplication, quoique directement issue de l'addition, débouche sur un enrichissement considérable de la structure interne de \mathbb{N} au travers de la relation de divisibilité. En effet, si l'on considère un couple d'entiers n et m , en général il n'est pas possible de trouver un troisième entier permettant de passer de l'un à l'autre par multiplication par ce troisième. Lorsque cela est possible les deux entiers considérés sont dits appartenir à la même classe de divisibilité et sont considérés comme

équivalents. Cette configuration est appelée relation de congruence et les classes d'équivalence sont appelées des idéaux. Sous l'angle de la divisibilité, des entiers se distinguent par la propriété remarquable qu'ils ne sont divisibles que par 1 et par eux-mêmes ; ils sont dits premiers. De plus, tous les entiers s'écrivent de manière uniques comme produits d'une quantité finie de puissances d'entiers premiers, les exposants étant eux-mêmes des entiers.

La particularité des entiers premiers est de servir de pivot pour relier directement les structures ensembliste, algébrique, topologique et probabiliste sous-tendant \mathbb{N} . En effet, le concept d'idéal est l'outil majeur pour étudier la structure algébrique d'anneau ; ce concept peut être appréhendé de manière duale sous la dénomination de filtre, famille de sous-ensembles stable par intersection finie et par l'opération de sur-ensemble à partir d'un sous-ensemble appartenant à la famille. Ainsi la notion de filtre permet de traiter des « grands » ensembles et débouche sur la notion de propriété presque partout définie, et sert

COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

finalemt à formaliser la notion de convergence de suite d'éléments.

7 – Rappelons à ce stade que l'ensemble des entiers naturels peut être agrandis en plusieurs étapes en acquérant de nouvelles propriétés ; il en résulte les emboîtements suivants :

$\mathbb{N} \subset \mathbb{Z} \subset \mathbb{Q} \subset \mathbb{R}$ tels que :

- Passage à \mathbb{Z} (entiers relatifs) : structure d'anneau par classe d'équivalences à la Grothendieck
- Passage à \mathbb{Q} (nombres rationnels) : structure de corps par calcul de fractions (changements d'échelle)
- Passage à \mathbb{R} (nombres réels) : structure de corps complet (critère de Cauchy) par coupures de Dedekind

Toutes ces structures sont des ordres linéaires non isomorphes entre eux.

Cependant il apparaît une incompatibilité remarquable, à savoir l'opérateur successeur dans \mathbb{N} n'est pas continu

dans \mathbb{R} muni de sa topologie usuelle. Cela se manifeste de plusieurs manières que nous rapportons succinctement. Une fois encore les entiers premiers se distinguent en ce qu'ils sont seuls assimilables à des nombres réels. Leur propriété caractéristique d'être premier se réfléchit dans une propriété que partagent certains ouverts de \mathbb{R} muni de la topologie usuelle, celle d'être irréductibles. A tout point x d'un espace topologique X est naturellement associé l'ouvert $X \setminus \overline{\{x\}}$. Un ouvert W , ici pris égal à $X \setminus \overline{\{x\}}$, est dit irréductible si pour deux autres ouverts U et V l'implication suivante a lieu :

$$U \cap V \subseteq X \setminus \overline{\{x\}} \implies U \subseteq X \setminus \overline{\{x\}} \text{ ou } V \subseteq X \setminus \overline{\{x\}}$$

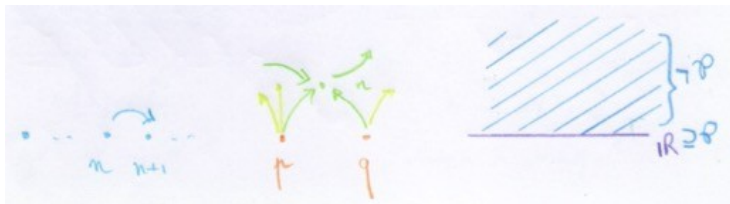
Il en résulte que seuls les entiers premiers sont identifiables, d'un point de vue topologique, à des éléments de \mathbb{R} .

Par ailleurs, revenons à l'opérateur successeur de l'arithmétique de Peano, noté S , et supposons le continu pour la topologie de \mathbb{R} . Comme \mathbb{R} est un espace connexe (on peut toujours relier deux points quelconques de \mathbb{R} en demeurant dans cet espace), si S est continue,

COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

alors son image est également connexe, tandis que le complément d'un point dans \mathbb{R} ne l'est pas, fait résultant de la dimension 1 de celui-ci. Par définition de l'opérateur successeur, l'image de S omet un unique point et, par suite, son image n'est pas connexe. Par conséquent S n'est pas continue dans \mathbb{R} . En faisant appel à un théorème classique de Brouwer, S demeure non continue dans un espace topologique produit \mathbb{R}^n . Il paraît cependant raisonnable de déployer la structure complète de \mathbb{N} dans le demi-plan au-dessus de la droite réelle. Pour cela il est judicieux de faire appel à l'algèbre en identifiant tout sous-espace de \mathbb{R}^2 comme sous-espace du corps des complexes \mathbb{C} . Soit M un modèle topologique de taille $\leq \aleph_1$ (puissance du continu) pour représenter les corps algébriques ; les entiers dans ce modèle constituent le demi-anneau \mathbb{Z}^M . A partir de ce dernier nous construisons le corps des fractions et le corps des nombres algébriques A . A est un corps algébriquement clos de caractéristique 0 ; il s'en suit que A est isomorphe à \mathbb{C} . De plus, l'arithmétique des nombres complexes est continue par rapport à la

topologie usuelle de \mathbb{R}^2 . Par conséquent, \mathbb{M} et donc \mathbb{C} est un modèle topologique de l'arithmétique dans lequel l'opérateur successeur est continu. Ce résultat manifeste le caractère fondamentalement bidimensionnel de \mathbb{N} et justifie le fait, de prime abord surprenant, que l'étude fine des propriétés arithmétiques exige le recours au corps des complexes en lieu et place de celui des réels. Ce fait remarquable est bien établi en théorie de l'arithmétique dans laquelle l'étude fine des entiers naturels exige le recours aux nombres complexes et à la théorie des fonctions analytiques.



8 – La fonction ζ dite de Riemann est un exemple canonique d'une famille plus large de fonctions qui a été initialement définie et étudiée par Gian-Carlo Rota, famille de fonctions associée à un ordre partiel localement

COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

fini, c'est-à-dire dans lequel tout intervalle est fini, et à une algèbre commutative A . L'algèbre de convolution, encore appelée algèbre d'incidence consiste dans les morphismes :

$$f : P \times P \rightarrow A \quad f(x,y) = 0 \text{ si } x \not\leq y$$

L'opérateur de convolution qui lui est attaché est classiquement défini par l'identité :

$$(f * g)(x, y) = \sum_{z|x \leq z \leq y} f(x, z)g(z, y)$$

L'identité pour cet opérateur vaut : $\delta(x, y) = 1$ si $x = y$ et 0 ailleurs. La fonction zêta pour cette algèbre est alors définie par l'égalité : $\zeta(x, y) = 1$ si $x \leq y$ et 0 ailleurs. Une troisième fonction joue également un rôle important ; elle est mentionnée pour compléter le tableau même si elle ne sera pas utilisée dans la suite de l'exposé. Il s'agit de la fonction de Möbius μ qui vérifie l'identité : $\zeta \circ \mu = \mu \circ \zeta = \delta$.

Dans le cas particulier de la structure de divisibilité dans N ; l'intervalle $[m, n]$ constitue le treillis des diviseurs de n/m et $\zeta(m, n) = \zeta(1, n/m) = \zeta(n/m)$.

De telles structures se généralisent aux catégories grâce en particulier aux travaux de Lawvere. La fonction ζ permet de dénombrer les flèches qui arrivent ou qui partent d'un objet donné, ou encore de dénombrer les flèches qui s'intercalent entre deux objets.

9 – La fonction zêta attachée à \mathcal{N} admet une double égalité définitoire :

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} n^{-s} = \zeta(s) = \prod_{p \in \mathcal{P}} (1 - p^{-s})^{-1}$$

Le membre de droite se développe de manière plus explicite puisque l'inverse donne lieu à la série formelle :

$$(1 - p^{-s})^{-1} = 1 + p^{-s} + p^{-2s} + \dots$$

Il est éclairant de conserver liée cette double écriture et de la lire en interprétant le symbole Σ soit comme le quantificateur existentiel, soit comme l'opérateur booléen « ou » (exclusif), et en parallèle le symbole Π soit comme le quantificateur universel, soit comme l'opérateur booléen « et ». La double identité ne dit pas autre chose que la propriété fondamentale de l'arithmétique signifiant la décomposition de tout entier

COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

en produit de nombres premiers. En d'autres termes, la formule $\zeta(s)$, à la présence près de l'argument s , joue le rôle d'un prédicat énonçant cette propriété qui caractérise la nature arithmétique des grandeurs impliquées.

Cette lecture, qui peut apparaître en première analyse comme un simple artefact, est justifiable d'un point de vue théorique. Sans entrer dans les démonstrations détaillées, nous pouvons néanmoins avancer les arguments suivants pour expliquer le bien-fondé de cette lecture. Deux ordres d'arguments qui sont au demeurant reliés entre eux corroborent cela.

La notion d'adjonction en théorie des catégories généralise cette même notion existant en algèbre linéaire et qui exprime une forme d'inversion. Soit un couple de foncteurs entre deux catégories \mathcal{A} et \mathcal{B} :

$$\begin{array}{ccc} & \mathcal{F} & \\ \mathcal{A} & \xrightarrow{\quad} & \mathcal{B} \\ & \xleftarrow{\quad} & \\ & \mathcal{G} & \end{array}$$

Cette situation est notée : $F \dashv G$ et signifie au plan des ensembles des homomorphismes :

$$B(F(A), B) \cong A(A, G(B))$$

Dans le cas particulier des structures d'ordre, l'adjonction prend la signification suivante :

$$f : X \rightarrow Y \text{ et } g : Y \rightarrow X \quad f(x) \leq y \iff x \leq g(y)$$

Pour f monotone, son adjoint g est défini par : $g(y) = \bigvee \{x \in X \mid f(x) \leq y\}$ et alors f préserve tous les sup.

Il est alors possible d'établir plusieurs schémas de doubles adjonctions qui correspondent fondamentalement à une structure fibrée commune :

$$\exists \dashv \text{id} \dashv \forall \quad \text{ou encore } \{ \text{dom} \dashv \text{id} \dashv \text{cod} \}$$

COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

$$\text{Colim}_{\mathbb{I}} \left(\begin{array}{c} \varepsilon^{\mathbb{I}} \\ \downarrow \uparrow \downarrow \\ \varepsilon \end{array} \right) \text{Lim}_{\mathbb{I}} + \left(\begin{array}{c} \varepsilon \times \varepsilon \\ \downarrow \uparrow \downarrow \\ \varepsilon \end{array} \right) \times \exists \left(\begin{array}{c} \varepsilon \\ \downarrow \uparrow \downarrow \\ \varepsilon \end{array} \right) \forall$$

Comme cela a d'ores et déjà été mentionné, il est possible d'identifier les foncteurs Σ et Π avec respectivement \exists et \forall ; de plus grâce au développement $(1 - p^{-s})^{-1} = 1 + p^{-s} + p^{-2s} + \dots$, la correspondance $p^{-s} \mapsto$ exposant de p^{-s} se lit comme opérateur d'implication d'Heyting impliqué dans le calcul de l'adjonction. Ainsi la fonction ζ se substitue, en tant qu'interpolateur, au foncteur identité dans le double schéma d'adjonction précédent.

Le rôle de la fonction ζ se lit également comme prédicat interpolateur entre les deux quantificateurs \exists et \forall . En effet, la double égalité de définition :

$$\sum_{n \in \mathbb{N}} n^{-s} = \zeta(s) = \prod_{p \in \mathcal{P}} (1 - p^{-s})^{-1}$$

s'écrit dans le langage de la logique des prédicats :

$$\alpha(n, s) \vdash \zeta(s) \vdash \gamma(s, p)$$

Il suffit alors de faire appel à un théorème important établi en 1957 par Craig, lequel théorème a été redémontré dans le cadre de la théorie des catégories par Pitts en 1983 pour identifier la fonctionnelle $\zeta(s)$ comme le prédicat interpolateur entre les deux prédicats \exists et \forall . Sans entrer dans les détails de la démonstration de ce résultat intéressant, il est néanmoins utile de fournir quelques éléments de justification. Selon une intuition fondamentale mise à jour par W. Lawvere, ces deux quantificateurs sont les adjoints à gauche et à droite de l'opération de substitution de telle sorte que le rôle des quantificateurs s'interprète comme suppression de certaines variables :

COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

$$\begin{aligned} \varphi(y) \vdash \forall z. \varphi(z, y) &\Leftrightarrow \varphi(\bar{z}, y) \vdash \varphi(z, y) \\ \exists z. \varphi(z, y) \vdash \varphi(y) &\Leftrightarrow \varphi(\bar{z}, y) \vdash \varphi(\bar{z}, y) \end{aligned}$$

L'interpolation est possible sous l'hypothèse d'indépendance des variables exprimée sous une forme communément appelée condition de Beck-Chevalley; ainsi toute variable est invariante sous quantification portant sur d'autres variables. Cela est équivalent à affirmer que différentes variables n'interfèrent pas les unes avec les autres dans une démonstration comme $\alpha(x, y) \vdash \gamma(y, z)$ dans laquelle x ne tient aucun rôle dans la démonstration de $\gamma(y, z)$, z ne tient aucun rôle dans la démonstration de $\alpha(x, y)$. Le théorème d'interpolation signifie que dans une telle situation, il existe un prédicat intermédiaire dit interpolant $\beta(y)$ tel que :

$$\alpha(x, y) \vdash \beta(y) \vdash \gamma(y, z)$$

10 – Repartons une fois encore de la double égalité :

$$\sum_{n \in \mathbb{N}} n^{-s} = \zeta(s) = \prod_{p \in \mathbb{P}} (1 - p^{-s})^{-1}, \text{ si l'on néglige la}$$

présence de l'exposant en « $-s$ », le membre de gauche

consiste à sommer les entiers et aboutit au cardinal infini dénombrable \aleph_0 , tandis que le membre de droite met en jeu des facteurs qui sont des puissances entières quelconques d'entiers, autrement dit des éléments de $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$ (ensemble des fonctions de \mathbb{N} vers \mathbb{N}), ensemble de cardinal $2^{\aleph_0} = \mathfrak{c}$, puissance du continu. Ce constat met en évidence que la fonction ζ organise une liaison entre l'infini dénombrable et le continu :

$$\aleph_0 \stackrel{\zeta}{\Rightarrow} 2^{\aleph_0} = \mathfrak{c}$$

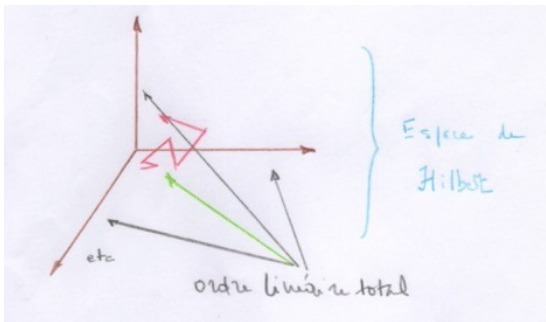
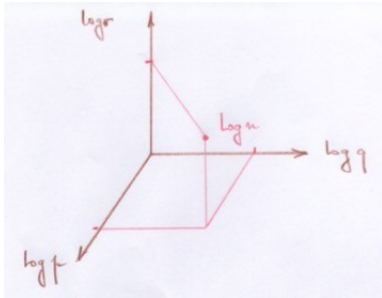
Il existe une autre façon d'explicitier ce passage du dénombrable au continu. La décomposition de tout entier en produit de facteurs premiers se transforme par la fonction logarithme, qui avec son inverse exponentielle respecte la structure d'ordre, en l'égalité :

$$n = \prod_{p \in P} p^{\alpha_{n,p}}, \log n = \sum_{p \in P} \alpha_{n,p} \log p$$

en considérant la puissance n^{-s} , on aboutit à une expression similaire par multiplication du facteur

COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

complexe « $-s$ ». Cette écriture invite à introduire l'espace linéaire engendré par une quantité infinie dénombrable d'axes étiquetés par les grandeurs indépendantes entre elles $\log p$ avec p entier premier. Un entier n engendre un vecteur dans cet espace admettant qu'un nombre fini de coordonnées non nulles. Ces vecteurs sont en correspondance biunivoque avec les termes n^{-s} , la sommation de tous ces termes redonne la grandeur $\zeta(s)$. Autrement dit la fonction $\zeta(s)$ s'obtient comme superposition d'espaces discrets de même dimension infinie dénombrable avec des axes indépendants étiquetés par les entiers premiers, superposition paramétrée par le coefficient complexe « s » qui parcourt un domaine ayant la puissance du continu.



11 – Nous venons de voir que \mathbb{R}^n sert d'interpolation ; constatons à présent que cette fonction réalise également une opération de compactification par référence à une topologie adaptée, celle de Scott. Si X est un ensemble

COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

quasi-ordonné, $D \subseteq X$ orienté quand deux points de D admettent une borne supérieure dans D . Un ouvert de Scott est un ensemble $U \subseteq X$, $U^\uparrow = U$, pour toute famille orientée $\{x_i\}$ avec $\sup x_i$ existant et $\sup x_i \in D$, alors il existe i tel que $x_i \in U$. Cette topologie a été introduite pour transformer les procédures de calcul en opérateurs topologiques ; un calcul répond à un programme et la relation d'ordre \leq reçoit une interprétation de nature informationnelle de telle sorte que, si $x \in U$ est le résultat d'un calcul, il existe n fini (nombre fini d'étapes de calcul) tel que $x_n \in U$. Ainsi un ouvert de Scott correspond à sous-ensemble accessible par calcul en temps fini. Il en résulte qu'une fonction continue s'identifie à une fonction calculable, en tant que résultat d'un programme.

Alors U ouvert si $\chi_U : U \rightarrow \mathcal{S}$ avec $\chi_U(x) = V$ si et seulement si $x \in U$ (la fonction χ_U est appelée la fonction caractéristique de l'ensemble U). Les axiomes des ouverts, à savoir la stabilité par \cup quelconque, et la stabilité par \cup fini, sont naturellement satisfaits.

Avec la topologie de Scott, le quantificateur existentiel est toujours continu ; cela rend compte du fait intuitif que pour prouver l'existence d'un élément il suffit d'examiner les éléments les uns après les autres, dès qu'un élément atteint en temps fini vérifie la propriété considérée la preuve existentielle est acquise. En revanche le quantificateur universel n'est pas toujours continu puisque précisément il faut parcourir l'ensembles des éléments avant de garantir la satisfaction universelle d'une propriété ; cela n'est naturellement acquis que pour un ensemble fini ; plus généralement cela sera aussi obtenu si l'ensemble est compact. Comme la fonction \exists est définie par la double identité impliquant à la fois les deux quantificateurs, il en résulte que cette fonction est continue pour la topologie de Scott grâce à la présence de \exists , et qu'en parallèle l'ensemble des entiers premiers est nécessairement compact au travers de la présence de \forall .

12 – A ce stade et en résumé, \exists est constitué comme « \exists copies de \mathbb{N} », qui peut être considéré comme la construction d'un modèle de l'arithmétique stable par

COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

invariance d'échelle absolue ; en parallèle, ζ procède à une compactification de \mathbb{N} . Cette double caractérisation permet d'appréhender la construction de ζ comme un emboîtement de suites dans \mathbb{N} avec la règle selon laquelle à chaque étape tout ensemble d'entiers naturels est identifié à un filtre de Fréchet, c'est-à-dire que deux ensembles sont identifiés s'ils ne diffèrent que par un sous-ensemble fini de leurs éléments. L'introduction de ce filtre permet de raisonner avec \mathbb{N} traité comme compact. Il est possible de montrer que ce mécanisme de compactification se révèle dans l'expression de ζ par la présence du signe « $-i$ » devant l'argument complexe « s ».

Mais la convergence de suites, permise grâce à l'hypothèse de compacité, dans le cadre de la composition de suites emboîtées ne permet pas de dépasser le premier ordinal non dénombrable, ordinal naturellement limite (qui n'est donc pas un successeur d'ordinaux) usuellement noté ω_1 . Or par construction la fonction ζ implique d'explorer l'intervalle ordinal situé entre ω_1 et \aleph_1 (puissance du continu).

Il est important de souligner que le continu (\mathfrak{c}) n'est pas déterminé dans le cadre classique de la théorie des ensembles, à savoir la théorie dite de Zermelo-Fraenkel auquel est adjoint l'axiome du choix (la théorie correspondante est usuellement dénommée par l'acronyme ZFC), ce dernier axiome est essentiel pour garantir l'existence de filtres optimaux, appelés ultrafiltres, exigée pour établir la démonstration des résultats rapportés dans la présente note de synthèse. Par conséquent, l'étude fine des propriétés fonctionnelles de \mathfrak{c} ne peut pas être développée en l'absence d'axiomes supplémentaires fixant plus précisément la nature du continu.

13 – Une première option surgit immédiatement à l'esprit. Pourquoi ne pas supposer que :

$$\omega_1 = \mathfrak{c}$$

Cette hypothèse est parfaitement identifiée depuis Cantor ; elle s'appelle classiquement l'hypothèse du continu. Depuis les travaux essentiels de Gödel, puis de Cohen, on sait que cet axiome est indépendant des autres

COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

axiomes de la théorie de base ZFC. En fait, cet axiome s'avère trop exigeant ; nous allons maintenant avancer des arguments en faveur d'un autre axiome nettement moins fort et qui est implicitement suggéré par la construction même de la fonction ζ . Pour l'introduire il convient de partir d'un résultat classique de topologie qui relie \mathbb{N} à \mathbb{R} , autrement dit l'infini dénombrable (\aleph_0) au continu (\mathfrak{c}) ; il s'agit du théorème des catégories de Baire.

Un espace topologique est dit de première catégorie s'il est union dénombrable d'ensembles nulle part denses. Ainsi le complément de tout ensemble de 1^{ière} catégorie sur la droite réelle est dense et aucun intervalle réel n'est de 1^{ière} catégorie ; enfin l'intersection de toute suite d'ouverts denses dans l'intervalle fermé $[0,1]$ est dense. Ce résultat est à rapprocher d'un théorème également classique dans les algèbres de Boole, dû à Rasiowa et Sikorski selon lequel si : (P, \leq) ensemble partiellement ordonné (EPO) et $p \in P$. Si D famille dénombrable de sous-ensembles denses de P , il existe alors un filtre D -générique F de P tel que $p \in F$ où la notion de

COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

$|D| < c$; il existe alors un filtre D -générique F dans \mathbb{P} tel que $p \in F$ (■)

Notons immédiatement que cet énoncé est en accord avec la situation offerte par \mathbb{C} qui introduit une famille ayant la puissance du continu de copies de \mathbb{N} , soit encore de copies de \mathbb{P} , ensembles des entiers premiers. L'énoncé (■) est impliqué par l'hypothèse du continu (HC); il est en revanche faux sous \neg HC. Il est alors nécessaire d'introduire une condition supplémentaire, à savoir la condition d'(anti)-chaîne dénombrable (cad). Cette condition est évidemment satisfaite dans le cas de figure qui nous intéresse ici puisque \mathbb{P} vérifie canoniquement la cad. Nous aboutissons à ce qui est appelé l'axiome de Martin, l'axiome de forcing non trivial le plus simple et le plus fertile proposé en 1970 :

Axiome de Martin (AM) : (\mathbb{P}, \leq) EPO vérifiant la cad. Si D famille de sous-ensembles denses de \mathbb{P} , avec $|D| < c$; il existe alors un filtre D -générique F dans \mathbb{P}

Il est immédiat que : $HC \implies AM$.

Un résultat important de la théorie du forcing signifie que : $AM \not\vdash \neg HC$ est consistant avec la théorie des

ensembles ZFC. De plus AM est compatible avec toute valeur de $\mathfrak{c} \geq \aleph_1$. En ce sens, l'axiome AM est nettement plus faible que l'hypothèse du continu.

Sous AM ; $2^{\aleph^k} = 2^{\aleph}$ pour tout $\aleph < \mathfrak{c}$. Ainsi la combinatoire infinie est uniforme pour tout cardinal inférieur au continu ; nous voyons clairement le profit tiré de cette propriété lorsqu'il s'agit de sommer \mathfrak{c} copies de \aleph , en quoi consiste essentiellement ζ . Ce même résultat peut encore être formulé comme suit : Sous AM toute union de moins de \mathfrak{c} sous-ensembles maigres, ou nuls, de R^n est maigre, ou nul, dans R^n , ce qui correspond une fois encore à la situation étudiée.

14 – Il est pertinent d'examiner s'il est possible d'exprimer l'axiome de Martin d'une autre manière. Pour cela nous nous référons à une mise en forme qui fait appel aux partitions et due à S. Todorcevic et B. Velickovic. Considérons un ensemble indénombrable S tel que l'espace des ensembles finis dans S est l'objet d'une bipartition :

COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

$$S^\omega = K_0 \cup K_1$$

La condition cad précédente se reformule dans ce contexte par la combinaison de trois conditions :

- (a) $|x|$ dans K_0 pour tout élément $x \in S$
- (b) Un sous-ensemble de K_0 est également dans K_0
- (c) Tout sous-ensemble indénombrable dans K_0 possède deux éléments dont l'union est dans K_0

AM est équivalent à l'énoncé (L) :

S de taille \aleph_c , $[S]^\omega = K_0 \cup K_1$ partition cad; alors S peut être recouvert par une quantité dénombrable d'ensembles S_n tels que $[S_n]^\omega \subseteq K_0$ pour tout n

Dans le cas d'espèce, cet énoncé paraît peu lisible. Nous allons l'identifier à un résultat d'ores et déjà acquis portant sur certaines propriétés fonctionnelles déterminantes de \aleph_c . En effet, deux théorèmes ont été obtenus entre 1975 et 1980 par Voronin et Bagchi. Le

premier résultat dit que ζ comme objet fonctionnel terminal ; plus précisément :

Pour K compact dans la bande critique $1/2 < \sigma < 1$ avec complément connexe et pour $f(s)$ fonction continue ne s'annulant pas sur K et analytique dans son intérieur;
Alors

$$\forall \varepsilon > 0, \liminf_{T \rightarrow \infty} 1/T \text{ mes} \{ \tau \in [0, T]; \text{Max} |\zeta(s+i\tau) - f(s)| < \varepsilon \} > 0$$

Le second résultat fournit un énoncé équivalent de la conjecture de Riemann, à savoir que :

l'hypothèse de Riemann est vraie si et seulement si, pour tout compact K de la bande critique $1/2 < \sigma < 1$ avec complément connexe et

$$\forall \varepsilon > 0, \liminf_{T \rightarrow \infty} 1/T \text{ mes} \{ \tau \in [0, T]; \text{Max} |\zeta(s+i\tau) - \zeta(s)| < \varepsilon \} > 0$$

Le critère de Bagchi revient à vérifier les conditions cad de l'énoncé de l'axiome de Martin en termes de particions. En effet, si K_0 est formé d'ensembles N à une échelle « $s + i\tau$ » avec :

$$t - \delta < |s| < t + \delta \text{ et } |\tau - \varphi| < \eta$$

COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

Le critère (c) précédent est satisfait.

En conclusion, l'axiome de Martin est équivalent à l'énoncé de la conjecture de Riemann. Cela implique en particulier que cette conjecture n'est pas prouvable dans la théorie ZFC, mais d'il s'agit d'un axiome qui lui est cohérent. Autrement dit, \aleph_1 met en forme le procédé de la diagonale de Cantor permettant d'engendrer le continu (\mathfrak{c}) à partir du dénombrable (ordinal ω , ou cardinal \aleph_0). L'ajout de l'axiome de Martin/Riemann détermine précisément ce continu.


15 – Le rôle de la fonction ζ est bien connu en arithmétique ; cependant son interprétation est trop fréquemment confusément présentée. Notamment les propriétés de la fonction, y compris la soi-disant conjecture de Riemann, ne servent pas à déterminer la distribution des entiers premiers puisque ceux-ci sont précisément calculés par référence à l'ordre linéaire additif des entiers, et ceci depuis fort longtemps grâce au crible d'Eratosthène, mais bien davantage à « caler » le

continu par rapport au discret décrit par l'ensemble des entiers premiers (alphabet dénombrable) en fixant un modèle déterminé par un axiome adéquat, à savoir l'axiome de Martin généralisant le théorème de la catégorie de Baire. Cet axiome admet une autre formulation mieux adaptée à la description des propriétés fonctionnelles de la fonction ζ sous la forme de l'énoncé classiquement connu sous le vocable de conjecture de Riemann.

16 – La nouvelle interprétation de la fonction ζ permise par les travaux que nous venons de restituer de manière synthétique implique de nombreuses conséquences applicables non seulement en mathématiques pures, mais également dans de multiples domaines puisque le passage du discret au continu, ou plus généralement l'interpolation entre les deux de foncteurs antagonistes tels que colim/lim ou \exists/\forall ou encore \ominus/\boxplus (modalités possible/nécessaire) interviennent de manière fondamentale et récurrente dans presque toute démarche rationnelle.

COMPLEXES SYSTEMES : THÉORIE & PRATIQUES

Bibliographie sommaire :

- **Généralité sur** 
 - G. C. Rota Foundations of combinatorial theory I Z. Wahrscheinlichkeit theo. Verwandte Geb. Z. (1964)
 - W. Lawvere, M. Menni The Hopf algebra of Möbius intervals Theory and Applications of Categories 24 (2010)
 - A.A. Karatsuba, S. Voronin The Riemann Zeta Function, Walter de Gruyter 1992
- **Théorie des catégories**
 - T. Leinster Basic category theory, Cambridge 2014
- **Logique**
 - D. Gabbay L. Maksimova Interpolation and definability - modal and intuitionistic logics, Oxford logic guides 2005
- **Topologie**
 - Oxtoby Category and Measure, Springer 1971
- **Forcing**

- K. Kunen Set theory – An introduction to independence proofs Studies in logic and the foundations of mathematics, 102 (1980) Elsevier

- **Axiome de Martin**

- M. Fremlin Consequences of Martin's axiom, Cambridge University Press 1984

- S. Todorcevic Partition problems in topology Contemporary Mathematics 84, American Mathematical Society 1989

- S. Todorcevic, B. Velickovic Martin's axiom and partitions, Compositio Mathematica tome 63 n° 3 (1987)

- **Autres articles**

- Herrlich Strecker Algebra \cap Topology = Compactness, Gen. Topology Appl. 1 (1971)

- A.M. Pitts Amalgamation and interpolation in the category of Heyting algebras, J. Pure Appl. Algebra 29 (1983)

DE LA CONTRAINTE À L'ÉMERGENCE

COMPRENDRE LA MORPHOGENÈSE PAR LA

MATRICE EXTRACELLULAIRE

Alexandra Fronville¹ & Frédéric Mercier²

1. Université de Bretagne Occidentale

LaTIM - INSERM UMR 1101

alexandra.fronville@univ-brest.fr

2. Society for Fractones

frederic.mercier@fractones.org

Introduction

Un organisme multicellulaire en construction est un système dynamique multivalué en perpétuelle évolution qui atteint un équilibre dynamique à l'âge adulte. Les cellules, tissus et organes d'un animal sont constamment renouvelées à partir de cellules souches pendant toute la vie. Cette reconstruction perpétuelle du corps est donc une composante dynamiquement contrôlée par le système vivant.

Le modèle mathématique que nous proposons pour la création des formes a permis de soulever des questions qui nous ont

poussés à explorer une biologie émergente et de rencontrer des scientifiques qui évoquent l'existence d'un réseau de communication local et global dans l'ECM composée de glycoprotéines complexes. Ce modèle met en évidence l'importance du contrôle et de la régulation du destin des cellules souches. Ces régulations sont produites à travers son organisation physiologique, pour construire, maintenir et faire évoluer ses formes toute la vie. Cette biologie émergente suggère que l'ECM, est sécrétée par les cellules dès le début de la morphogenèse pour construire les formes. La circularité du couplage cellules/ECM ainsi que les régulations de la construction de la forme sont au cœur de ces recherches à l'interface des mathématiques, de l'informatique et de la biologie.

1. Analyse mutationnelle et morphologique

D'un point de vue des mathématiques, la morphogenèse, c'est-à-dire le développement de la forme d'une cellule jusqu'à l'organisme entier est un système dynamique multivalué, contrôlé dans le temps et dans l'espace.

Les outils d'analyse classiques comme les systèmes dynamiques ne sont pas adaptés à l'étude de la morphogénèse car ils sont univalués, et donc incapables de tenir compte de la dynamique tissulaire, multivaluée par nature. En effet, un organisme se développe par prolifération, migration et différenciation cellulaire ainsi que par apoptose (mort

programmée). La diversité des formes biologiques résulte de petits changements dans cette dynamique. La dynamique qui transforme la première cellule souche totipotente en ensembles de cellules différenciées est une dynamique multivoque de cellules contrôlées, soumises à des contraintes. Nous utilisons pour décrire le comportement tissulaire l'analyse mutationnelle, l'analyse morphologique (J.-P. Aubin, 2000) et la théorie de la viabilité (J.-P. Aubin, 1991) qui étend la théorie du contrôle aux sous-ensembles compacts de l'espace euclidien dépendant du temps (T. Lorenz, 2006).

L'objectif principal de la théorie de la viabilité est d'expliquer l'évolution de l'état d'un système contrôlé, régi par une dynamique non déterministe et soumis à des contraintes de viabilité. Il s'agit de révéler les régulations du système. L'évolution des formes au cours de la morphogenèse peut être décrite à l'aide d'équations mutationnelles qui montrent l'évolution dynamique de l'ensemble des cellules. Celles-ci peuvent être étudiées conjointement avec l'évolution de l'état du système dans un environnement dynamique, en utilisant les inclusions différentielles.

2. Algorithme discret pour la morphogenèse

Un algorithme morphologique a été développé dans le système de réalité virtuelle 3D DynCell (Fronville et al., 2010). Ce simulateur permet simuler la dynamique du développement

tissulaire composé de cellules autonomes en interaction sans contrôle central. Les cellules produisent leur environnement et en contrepartie l'environnement rétro-agit sur les cellules. Chaque cellule avance différemment dans la lecture d'un code, mémoire de la forme qui s'est construite pendant la phylogenèse, en fonction de son environnement. Cet algorithme (Fronville, 2017) conduit à une forme solide, relativement stable et reproductible. Il permet d'explorer le lien entre le code utilisé par les premières cellules totipotentes et la forme émergente, c'est à dire le lien entre génotype et phénotype.

Nous avons créé un dictionnaire des formes atteignables qui permet de comprendre comment les organismes créent et régulent leur forme en constante évolution et quels contrôles sont utilisés pour les atteindre. La forme spécifique de certains organismes donne quelques idées sur ces contrôles mais il n'est pas possible de retrouver le code d'une forme complexe (Fronville et al., 2012). Nous avons ensuite cherché les codes d'exemples comme le « french-flag » de Wolpert et l'invagination d'un tissu (Fronville et al. 2014).

Cet algorithme permet donc à toutes les cellules d'avoir une information de position sans utiliser les équations de réaction-diffusion. L'information de position et les frontières entre les tissus sont plus précises que pour les simulations qui utilisent la concentration de morphogène comme déclencheur de différenciation.

Ce modèle évolutif discret a ensuite été couplé à une équation différentielle contrôlant l'accès aux nutriments. Ces automates hybrides régissent le comportement des cellules et celui de l'organisme. La contrainte que nous avons choisi est le maintien, dans un intervalle donné, du nombre de cellules composant le tissu à un certain horizon de temps donné (A. Sarr et al., 2016). Pour cela, nous avons programmé l'algorithme du noyau de viabilité pour approcher le sous-ensemble d'états initiaux (formes) pour qu'il existe au moins une évolution viable avec une certaine gestion des éléments nutritifs qui leur permettent de proliférer et de se différencier. Le noyau de viabilité contient peu de formes qui satisfont cette contrainte après un certain nombre de cycles (A. Fronville et al., 2017). Pour toutes les formes appartenant à l'ensemble des 1029 tissus de 16 cellules. Ce noyau de viabilité contenait 402 tissus après 100 cycles, 102 après 1000 cycles et 5 après 10000 cycles.

Cet algorithme permet de comprendre un certain nombre de phénomènes biologiques mais l'équilibre dynamique et les interfaces entre les tissus différenciés ne sont pas maintenus lorsque les cellules se renouvellent. Ceci nous oblige donc à approfondir notre compréhension de ce qui existe dans les organismes biologiques afin de dépasser cette difficulté.

3. Structures biologiques contrôlant la morphogénèse

D'un point de vue biologique, existe-t-il comme le suggère notre modèle un mécanisme biologique qui contrôle dans le temps et dans l'espace la prolifération, la différenciation, la migration et l'apoptose c'est à dire les événements morphogéniques? Il existe plus de mille facteurs de croissance, cytokines et chemokines qui influencent le devenir cellulaire mais comment toutes ces molécules diffusibles sont elles contrôlées pour générer des formes? La réponse est venue des recherches en biologie fondamentale, des éléments de la niche des cellules souches (F. Mercier et al. 2002, 2016). Ces éléments, appelés fractones ont été caractérisés dans la niche à cellules souches du cerveau de souris. Les fractones sont des structures extracellulaires en contact direct avec les cellules souches, et sont composées de collagènes, de laminines et de nombreuses formes de protéoglycanes de type héparane sulfate (HSPG) qui lient et concentrent les facteurs de croissance pour les diriger vers les cellules souches, leur permettant de proliférer, migrer, mourir ou se différencier. Ces fractones agissent comme des co-récepteurs essentiels au choix et à l'activation des facteurs de croissance circulant dans l'espace extracellulaire, contrôlant ainsi le destin des cellules souches (V. Douet et al. 2012, A. Kerever et al. 2007). Bien qu'initialement caractérisées dans le cerveau adulte des mammifères, les fractones sont présentes dans tout les organismes adultes et pendant tout le développement dès qu'il y

a des cellules souches et de la dynamique cellulaire. Leur rôle en tant que capteurs/activateurs des facteurs de croissance permettrait la construction biologique sur un mode beaucoup plus contrôlé que les modèles classiques. La distribution et la composition des fractones pourraient coordonner dans le temps et dans l'espace la prolifération cellulaire, guidant ainsi la morphogenèse et une certaine dynamique d'évolution pendant la vie adulte.

4. Stabilisation des formes biologique

Notre algorithme évolutif permet d'atteindre une forme cible si on connaît le code de la première cellule qui va créer le tissu. Mais que se passe-t-il quand certaines cellules du tissu meurent? Notre modèle réagit correctement au centre des tissus mais ce n'est pas le cas à l'interface de deux types de cellules différentes ou sur les bords de notre organisme.

La réponse vient de nouveau de la biologie : les lames basales, dont la composition chimique est proche de celle des fractones, définiraient l'interface de communication entre tous les tissus et organes (Mercier et al. 2004). Si nous ajoutons cette interface à notre modèle, à la limite des tissus différenciés et tout autour et à l'intérieur de l'organe, le modèle construit la forme cible et la forme devient robuste, elle se maintient dans le temps avec le renouvellement des cellules. Cet ensemble de lames basales et de cellules spécialisées (fibroblastes/macrophages) constitue ce que

l'on appelle le tissu conjonctif (Mercier et al. 2002). L'ECM est produite localement par ces cellules et agirait sur les cellules souches pour les activer et définir leur devenir (stem cell fate) à l'aide de facteurs de croissance. Les membranes basales et les fractones initieraient et contrôleraient le développement mais aussi la plasticité et la viabilité de la forme des organismes biologiques. Dans cette hypothèse, le tissu conjonctif fonctionnerait comme un échafaudage de la forme qui se construit et réagit aux changements.

Conclusion

Le réseau de fibroblastes/macrophages serait un continuum fonctionnel dans l'organisme contrôlant la dynamique tissulaire pendant le développement et la vie adulte. Le système que nous avons décrit apporte une nouvelle dimension épigénétique via ce réseau. Bien que ces hypothèses soient spéculatives, il serait intéressant de savoir si certains événements induits par ce réseau cellulaire peuvent se transmettre et intervenir dans l'hérédité.

Notre modèle doit maintenant évoluer en ajoutant les composantes de l'ECM et intégrer des cellules de fibroblaste à pieds allongés en réseau capables de détecter des facteurs environnementaux et de communiquer entre elles par une signalisation électro-chimique de type gap-jonctions (Mugnaini et al., 1986). Ce modèle sera utilisé pour comprendre le lien entre la viabilité d'un organisme qui se crée et la forme de cet

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

organisme avec une contrainte forte : la distance restreinte de toutes les cellules au réseau de fibroblastes/macrophages. Nous voulons ainsi comprendre comment la co-évolution des cellules du parenchyme et celles du réseau conjonctif permettraient la création et la stabilisation de la forme.

Ce travail interdisciplinaire a permis de valider les hypothèses mathématiques par des simulations de systèmes hybrides. Ces modèles ont été confirmés par l'existence de structures qui guident le comportement des cellules souches. Ils intègrent des ingrédients lamarckiens - la notion de transformisme - qui permettent à l'organisme de réagir aux influences du milieu et d'évoluer vers des formes nouvelles inattendues mais reproductibles (Lamarck 1809).

Bibliographie

J.-P. Aubin, *Viability theory*. Birkhauser, 1991.

J.-P. Aubin. *Mutational and morphological analysis : tools for shape regulation and morphogenesis*. Birkhauser, 2000.

V. Douet, E. Arikawa-Hirasawa, et F. Mercier. *Fractone-heparan sulfates mediate bmp-7 inhibition of cell proliferation in the adult subventricular zone*. *Neuroscience Letters*, 528(2) :120–125, 2012.

A. Fronville et al. *Simulation tool for morphological analysis*. ESM 2010, pages 127–132, 2010.

A. Fronville, A. Sarret V. Rodin. *Modelling multi-cellular growth using morphological analysis*. Discrete and Continuous Dynamical Systems - Series B, 22(1) :83–99, 2017.

A. Fronville, A. Sarr, P. Ballet et V. Rodin. *Mutational analysis-inspired algorithms for cells self-organization towards a dynamic under viability constraints*. 2012 IEEE Sixth International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems, pages 181–186, 2012.

A. Fronville, A. Sarr, P. Ballet et V. Rodin. *French Flag Tracking by Morphogenetic Simulation Under Developmental Constraints*. In Springer International Publishing, editor, Lecture Notes in Computer Science, CIBB, pp 90–106. Springer, Cham, July 2014

A. Fronville, A. Sarr et V. Rodin. *Viability kernel algorithm for shapes equilibrium*. AIMS Cell and Tissue Engineering, 1(2) :118–139, 2017.

A. Kerever, J. Schnack, D. Vellinga, N. Ichikawa, C. Moon, E. Arikawa-Hirasawa, J. T. Efir, et F. Mercier. *Novel extracellular matrix structures in the neural stem cell niche capture the neurogenic factor fibroblast growth factor 2 from the extracellular milieu*. Stem Cells, 25(9) :2146–2157, 2007.

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

J.B. de Monet de Lamarck, . *Philosophie zoologique, ou Exposition des considérations relatives à l'histoire naturelle des animaux*. 1809.

T. Lorenz. *A viability theorem for morphological inclusions*. SIAM Journal on Control and Optimization, 47(3) :1591–1614, 2006.

F. Mercier, J.T. Kitasako et G. I. Hatton. A. *Anatomy of the brain neurogenic zones revisited : Fractones and the fibroblast/macrophage network*. Journal of Comparative Neurology, 451(2) :170–188, 2002.

F. Mercier and G. I. Hatton. *Meninges and perivasculature as mediators of cns plasticity*. In Non-Neuronal Cells of the Nervous System : Function and Dysfunction, volume 31 of Advances in Molecular and Cell Biology, pages 215–253. Elsevier, 2003.

F. Mercier *Fractones : extracellular matrix niche controlling stem cell fate and growth factor activity in the brain in health and disease*. Cellular and molecular life sciences : CMLS, 73(24) :4661–4674, Jul 2016.

E. Mugnaini. *Cell junctions of astrocytes, ependyma, and related cells in the mammalian central nervous system, with emphasis on the hypothesis of a generalized functional syncytium of supporting cells*. Astrocytes, Academic Press : 329-371, 1986.

**CARTOGRAPHIER LE PAYSAGE SÉMANTIQUE DE
LA SCIENCE DES SYSTÈMES COMPLEXES**

Compte rendu d’atelier cartographique

Quentin Lobbé & Alexandre Delanoë

CNRS- ISC-PIF

Lors des journées scientifiques de Rochebrune 2022, nous avons proposé aux participants de suivre un atelier de cartographie collective centré sur l’exploration d’un corpus de publications liées à la science des Systèmes Complexes. Nous nous sommes servi du logiciel libre d’analyse du langage naturel GarganText³² – un projet logiciel mené par Alexandre Delanoë, et développé à l’Institut des Systèmes Complexes Paris Île-de-France et soutenu par le CNRS.

GarganText permet de reconstruire – suivant diverses dimensions – le paysage sémantique d’un corpus de plusieurs milliers de documents textuels. Le logiciel analyse les interactions locales entre des mots ou des groupes de mots extraits des documents d’origine afin de reconstruire à échelle

³²<https://gargantext.org/>

globale la structure et la dynamique de l'ensemble du corpus. En outre, GarganText dispose de mécanismes collaboratifs permettant d'étudier un corpus en équipe et de manière décentralisé.

Le corpus utilisé pour cet atelier était un corpus de publications scientifiques³³ extraites des bases de données *Web of Science*, *Pubmed*, *Scopus*, *Jstor* et répondant à la requête suivante : ("complex system*" OR "complex adaptive system*" OR "complex network*" OR "complexity science" OR "complex social system*") AND ("network dynamic*" OR "swarm intelligence" OR "multi agent" OR "multiagent" OR "morphogenes*" OR "network analysis" OR "agent based" OR "biological network*" OR "self organi*" OR "econophysic*" OR "sociophysic*" OR "social network*" OR "collective intelligence" OR "collective behavior*" OR "evolutionary comput*" OR "opinion dynamic*" OR "pattern formation" OR "social simulation" OR "distributed system*" OR "distributed cognition" OR "multiscale" OR "multi scale" OR "multifractal" OR "multi fractal" OR "cell* automat*" OR "artificial societ*" OR "morphodynam*" OR "socio-semantic network*" OR "sociosemantic network*" OR "interaction* netw*" OR "nature-inspired comput*" OR "open-ended evolution" OR "evolutionary

³³Nous avons utilisé les méta-données de ces publications : titre, résumé, auteurs, date de publications, etc.

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

robot*" OR "hypernetw*" OR "nonequilibrium statistical physic*"). Ce faisant, nous avons récolté plus de 32000 publications liées à la science des Systèmes Complexes et publiées entre 1970 et 2022.

Lors de l'atelier, nous avons demandé à l'ensemble des participants d'annoter certaines publications de ce corpus suivant leurs domaines de recherche respectifs. Ce travail d'annotation a permis d'enrichir une première liste de mots / groupes de mots extraits automatiquement par GarganText en amont de l'atelier. Nous nous sommes ensuite servi de ce vocabulaire nouvellement créé afin de générer deux visualisations interactives : une carte sémantique et une phylométrie.

Ces deux représentations, annotée par des experts du domaine, participent aujourd'hui d'une meilleure compréhension de la science des Systèmes Complexes dans son ensemble. Cet atelier n'est pourtant qu'une première étape, le travail de cartographie est amené à se poursuivre par l'enrichissement du corpus et l'approfondissement de l'étape d'annotation en ouvrant la carte à l'ensemble de la communauté scientifique Systèmes Complexes.

1) Carte sémantique

Dans GarganText la carte sémantique n'est pas un nuage de points dans un espace métrique a priori comme peuvent l'être

des projections issues de réductions de dimensions du type «Analyses factorielles» de correspondances ou «analyse en composantes principales». Dans notre cas, la carte sémantique est représentée par un graphe, seules les relations de liens sont signifiantes et non pas la distances dans l'espace de visualisation du graphe. Les nœuds du graphe sont les termes sélectionnés par les analystes de manière collaborative. Les relations entre les termes sont construites à partir de leurs co-présences contextuelles dans les unités élémentaires, c'est-à-dire les méta-données (titre et résumé des publications scientifiques du corpus considéré).

Deux types de graphes sont proposés dans l'interface GarganText selon le choix de la mesure de similarité choisie. Chacune des mesures possède des propriétés interprétatives différentes que nous allons illustrer avec le corpus *Systemes Complexes*.

Le graphe avec une mesure de similarité d'ordre 1 est dite conditionnelle et probabiliste étant donné le contexte d'apparition d'un terme en sachant l'autre. *La mesure de similarité d'ordre 2 dite distributionnelle évalue les profils d'interchangeabilité d'un terme étant donné l'ensemble de ses voisins dans les contextes élémentaires d'apparition.*

- «complex networks», adaptation, évolution
- les modèles agents

Ces thèmes apparaissent récurrents dans l'état de la littérature systèmes complexes mais ils représentent aussi surtout les termes choisis par l'équipe d'analystes dans l'interface collaborative GarganText : la carte représente ainsi l'objet d'intérêt des participants.

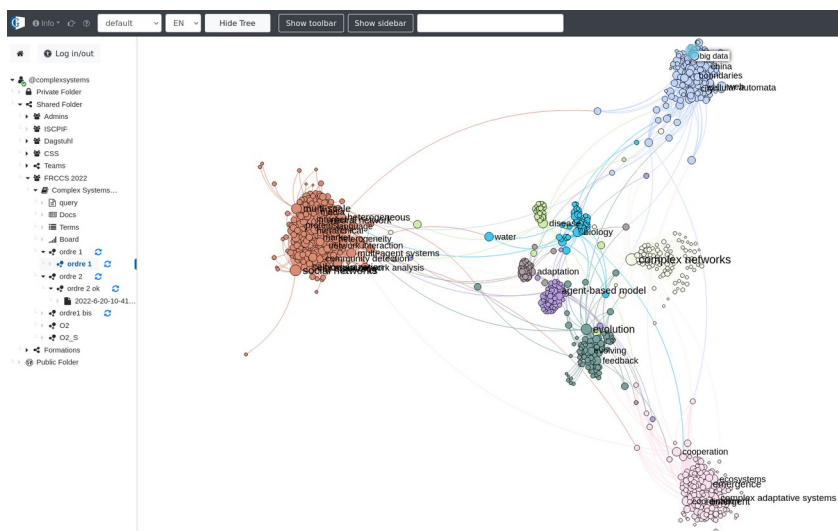


Figure 2 : carte sémantique des méta-données de 32000 publications liées à la science des systèmes complexes. Carte générée par GarganText à partir d'une mesure de similarité d'ordre 2

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

Par contraste, le graphe d'ordre 2 (voir *Figure 2*) fait apparaître les concepts mobilisés par discipline, disciplines qui ne sont pas pourtant étiquetées comme telles a priori ; elles émergent donc des propriétés du graphe :

- Les systèmes complexes en biologie par leurs interactions cellulaires ;
- La dynamique des réseaux appliqués aux éco-systèmes et à l'économie ;
- Les applications en sciences sociales et leurs disciplines comme la psychologie et la prévalence des réseaux temporels comme outil d'analyse ;
- Les Systèmes sociaux, apprenants ou morphogénétiques avec les interactions des agents et l'usage de l'intelligence artificielle ;
- Enfin les effets d'échelles ou l'auto-organisation sont aussi des thématiques transverses que l'on voit émerger de cette carte.

Ainsi, les 2 types de graphes font émerger par contraste différents niveaux d'interprétation : soit au niveaux des sujets d'étude en tant que tels soit les disciplines avec leurs concepts privilégiés associés.

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

regroupe un nombre fini de champs de recherche eux mêmes constitués de mots / groupes de mots fréquemment utilisés ensemble au sein d'une ou plusieurs publications et sur une période précise. Ces champs sont liés entre eux par proximité sémantique.

La Figure 3 est un export de la phylométrie interactive créée lors de notre atelier. Nous avons ici choisi de mettre en valeur (aplats jaunes) certaines branches qui nous semblent importantes pour comprendre l'évolution de la science des Systèmes Complexes. De la même manière, nous avons mis en avant certains des termes émergents les plus fréquemment utilisés dans ce corpus.

La Figure 3 retrace ainsi l'évolution de la Science des Systèmes Complexes à travers différents moments clefs de son histoire : les travaux pionniers dans les années 80 et 90 portés principalement par des physiciens et des mathématiciens, l'importance de la création de l'institut de Santa Fe en 1984 et plus encore de la structuration de l'ensemble de la communauté Systèmes Complexes autour des conférences CCS dès 2004, l'ouverture de cette science à d'autres domaines (biologie, géographie, économie, etc.) dans le courant des années 2000 et par là même son caractère intrinsèquement inter-disciplinaire.

Références

- [1] Chavalarias, D., Lobbé, Q. & Delanoë, A. Draw me Science - multi-level and multi-scale reconstruction of knowledge dynamics with phylomemories. *Scientometrics* (2021)
- [2] Lobbé, Q., Delanoë, A. and Chavalarias, D. [Exploring, browsing and interacting with multi-level and multi-scale dynamics of knowledge](#), *Information Visualization*. (2021)

POUR UNE APPROCHE SYSTÉMIQUE DES GROUPES SOCIAUX

René Padieu

INSEE

RÉSUMÉ :

Mieux conduire les dynamiques sociales est un besoin. La Systémique explique qu'on y réussisse mal. Elle montre aussi que c'est faisable mais qu'il faudrait procéder autrement. Pour argumenter cela, ce texte lui-même se fait système en croisant quatre trames³⁴ : un tissage qui ne saurait être mis à plat ni, moins encore, réduit à l'itinéraire linéaire qu'imposent les textes ordinaires. Le lecteur doit prêter simultanément attention à ces mailles enlacées. Pour cela, nous adoptons la forme littéraire des tragédies antiques. Là, hors du Monde et du Temps, le chœur connaît ce que les acteurs – et les spectateurs – ignorent ; et, déjà sait ce qu'ils auront oublié. Pour autant, la matière, les idées et les mots sont d'aujourd'hui.

===

³⁴ Ce texte résulte d'une présentation, sous le même titre, aux *Journées Scientifiques de Rochebrune*, avril 2022, laquelle partait de quatre fiches – intitulées “Sociétés”, “Réentrance”, “Socianalyse” et “Simulation” –, que l'on proposait de mettre en interaction sans préjuger de leur ordre.

Abstract:

Better management of social dynamics is needed. Systemics can explain why this has been so unsuccessful. It also shows that while it is feasible, we will have to go about it in a different way. To argue this, this text itself constitutes a system by braiding four threads together: a weaving that ought not be flattened out nor reduced to the linear path that ordinary texts impose. The reader should pay attention to these intertwined closely knit connections simultaneously. To this end, we will adopt the literary form of ancient tragedies, where, beyond World and Time, the choir knows what the actors – and the spectators too – ignore; and already knows what they shall have soon forgotten. However, the matter, the ideas, and the words are modern.

« Si l'entendement doit décrire le divers terme à terme pour constituer une expérience, il pense ce divers comme donné à la fois par la chose, ce qui exprime encore sa finitude, l'inadéquation de sa connaissance et la possibilité pour lui de se penser comme une partie du monde dans une communauté d'existence avec les phénomènes externes. »³⁵

Acte I

Le chœur : Sur cette île perdue, Par tous les vents battue, Quatre navires arrivent Des quatre continents. Orge, lin, nitre, airain : Qu'ont-ils donc en commun ? Et, de quoi les marins Vont-ils

³⁵ Jacques Havet, *Kant et le problème du temps*

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

bien se parler ? S'ils n'ont pas de langage Qu'ils puissent partager... Écoutons-les ! Sinon, ils vont se taire Et la Terre oubliera Qu'ils voulaient commercer.

Scène 1

Demos : Les hommes sont divers cependant qu'ils s'assemblent. Ils font des *collectifs*, unis par un dessein ; ils se savent une histoire, ils se veulent un futur. *Imaginant* le monde et s'il évoluerait, ce qu'ils sont, ce qu'ils feront, s'y *cooptant* l'un l'autre. Autant de nations, familles ou villages, autant de sociétés, d'entreprises, de clubs³⁶. Ils forment aussi des *catégories* : de sexe, âge ou métier, de résidence ou de culture. C'est leur *identité*, plus ou moins leur destin.

Histos : Il en va là de toute humanité. A la catégorie, on se trouve assigné. On ne s'y connaît guère, mais on s'y reconnaît. D'un groupe organisé, voulu ou assumé, on sait que l'on est membre. Souvent on s'y connaît et l'on agit ensemble : c'est un "*nous cognitif*". [Van Bockstaele, 2004]

Demos : De plus on voit des sous-catégories dans les catégories ; et des catégories de collectifs et des groupes de groupes qui se fédèrent. Ou bien, un collectif organise en son sein divisions ou équipes...

Histos : Mais l'humain n'est pas seul à faire de la sorte. A des degrés divers, des animaux aussi ont ces comportements : surtout des

³⁶ Ainsi, dans les années 1950, Jacques et Maria Van Bockstaele ont mis au jour l'« *imaginer-coopter* » comme moteur essentiel des sociétés humaines.

mammifères et même des oiseaux. Chez l'Homme, c'est bien plus développé, complexe. Car il jouit d'une conscience supérieure de tout ce qui l'entoure, et de ses congénères autant que de lui-même. Tout cela émergeait avec l'apparition de la mémoire : elle conserve à l'organisme son expérience propre. A l'aube du vivant, l'organisme restait comme il naissait. L'expérience s'inscrivait dans la population. Puis certains ont acquis l'aptitude à garder la trace d'un signal en l'associant à un comportement approprié. L'organisme apprenait, de sa propre expérience.

Or, fortuit, peu précis, un même signal constitue en catégorie des émetteurs qui ne justifient pas tous le comportement déclenché. Une forme, un bruit, une odeur... suffit pour alerter. Une corrélation lâche. Il fallait en revanche mobiliser vigoureusement l'organisme : par sécrétion d'hormones. Par la suite, le cerveau s'est développé pour construire des souvenirs plus riches, programmer des actions finement ajustées. Mais l'association réflexe d'un signal à la mise en mouvement (é-motion !) s'est conservée. Une activité cognitive considérable sous-tend nos structures psychiques et sociales. Elles restent tributaires de nos émotions, de la perception de catégories ; dont celles, symboliques, engendrées par l'activité cognitive.

[entre Klinis, qui entend ce qui suit]

Demos : On attribue donc même signification à des situations ou à des personnages qui se ressemblent ; en partie sans rapport avec

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

ce qui a lieu d'être espéré ou craint ? Les catégorisations sont nées, vitales pour survivre, il y a des millions d'années. Elles durent encore et leur pouvoir s'impose à notre esprit. Ce serait l'origine de tous les préjugés « de classe, de race et de nation »³⁷ !

Le chœur : Amours et haines ainsi nous viennent de l'animalité ! D'utilité première, ces sentiments deviennent aujourd'hui cause de nos tourments...

Scène 2

Klinis : Ces jugements catégoriels alimentent la discorde ; or, aussi, des projets communs rassemblent. Portée par ce désir, la raison engendre l'organisation, qui canalise les passions. Depuis quelque temps, nous découvrons comment, par l'*imaginer-coopter*, cultiver ces projets et les coordonner.

Histos : Oui, l'humanisation – conscience supérieure, langages et cultures, science et prospérité – ont permis un essor et réduit les conflits. Il reste fort à faire : il faut y travailler. Maîtriser le social demeure cependant hors de notre portée, de notre entendement : comme aucun des neurones avec lesquels je pense ne peut savoir ce que penser veut dire, de même nous ne pouvons penser la dynamique sociale... Du moins, sans pouvoir la comprendre, nous comprenons pourquoi nous ne le pouvons pas.

Demos : Quitte à ne pas comprendre, n'est-il pas des recettes pour mieux nous gouverner ?

³⁷ Julien BENDA, *La trahison des clercs*.

Klinis : Je crois que c'est possible, bien que paradoxal. De façon empirique, nous avons mis au point deux ou trois procédés qui semblent efficaces. Histos dira pourquoi, sans pouvoir le comprendre, il se fait que ça marche !

Le chœur : L'intelligence, sans le vouloir, enfante le malheur. Elle pourrait, sans l'expliquer, inventer le bonheur !

Demos : Comment avez-vous fait ?

Klinis : Nous avons commencé par le plus évident : comment fonctionne *un groupe*. Des chercheurs étudiaient sa dynamique interne. Nous avons ajouté *l'interaction* entre deux groupes. On étudiait déjà des groupes, mais formés pour le temps de l'expérience. Nous avons découvert qu'il fallait ajouter leur *historicité* : les groupes naturels ont une histoire et un futur ! Ils sont unis par un *projet* ; on y entre, on en sort. On y partage espoir, précaution et action. *Imaginer* et *coopter* : ressorts existentiels.

Il faut, pour observer un groupe en profondeur, être soi-même un groupe : afin que leur complexité soit homologue³⁸. Et, pour avoir accès à l'essence de l'être, il faut le respecter et qu'il y ait profit. Surtout, on ne peut pas l'examiner sans qu'il nous voie le regarder : donc sans en altérer le fonctionnement. Cette *rétroaction observateur-observé* amenait le chercheur à une *clinique*, tout comme un médecin : au chevet du sujet – là personne, ici groupe – augmenter le savoir en soignant le patient.

³⁸ Complexité homologue : c'est la règle d'Ashby.

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

Histos : Comprendre et contrôler ce que vous désignez comme *catégories* est autrement ardu car il faut percevoir et aussi maîtriser les émotions ancrées dans le jeu des hormones. Le “cerveau reptilien” est en adéquation, pas le néocortex.

Demos : Votre clinique est donc encore très partielle !

Klinis : Aucun de nous n’en doute. Ayant quelques outils pour nous saisir des groupes, nous avons constaté que les catégories y restent influentes. On voit que, traversant les organisations, la familiarité qui s’étend dans chacune est un précieux moyen de communication utile à leur commerce³⁹. Mais, au contraire, l’hostilité catégorielle oppose les personnes, bloquant les organismes. Là, d’autres procédés sont expérimentés pour en venir à bout.

Chœur : Le soleil apparaît au milieu des nuées. On nous annonce là le remède aux querelles ? On résout les blocages, mais pas encore les guerres... La route est longue encore ! Et, bien qu’*Histos* approuve, a-t-on quelque raison, là, de croire *Klinis* ? *Demos* a le souci du Monde ; *Histos* en sonde la genèse ; *Klinis* invite l’Homme à saisir son destin. Aucun ne pouvait seul avancer ce projet : Seul du concert des hommes émergera la science.

³⁹ Les ingénieurs, entre eux, les financiers, les juristes, les commerciaux, etc. se parlent et se comprennent. Les socialistes appellent ceci la *double-division*. Toutefois, à l’inverse, d’autres affinités, étrangères aux organisations en cause, peuvent créer des collusions ou des transgressions indues.

Acte II, Scène 1

Klinis : L'autre jour ô Histos, tu disais à Demos par ta science expliquer les passions. Et, de là l'amitié liant la catégorie autant que la défiance que l'une aurait pour l'autre. Tu fais remonter ça au Paléolithique. C'est un réflexe acquis, fondé sur l'apparence et parfois fourvoyé. Fondé sur l'émotion : échappant donc à la raison. Celle-ci régit mieux les organisations.

Histos : Tu redis à merveille ce que je voulais dire ! Sur l'émergence de l'humain, je pourrai te répondre. En retour, pourras-tu éclairer la merveille que l'on puisse infléchir la dynamique humaine, lorsque "ma science" – puisqu'ainsi tu l'appelles – croit démontrer que ce n'est pas possible ?

Klinis : Je le pourrai peut-être, pourvu que tu m'exposes ce que tu sais du fonctionnement humain.

Histos : Tout vient de la mémoire. Laissons l'Evolution, tenons-nous en à l'Homme.

Chaque élément de la mémoire est un système de fort nombreux neurones : qui accomplit un traitement "massivement parallèle". Le processus à l'œuvre s'appelle *réentrance* : c'est là le maître-mot ! [EDELMAN, 1992]

Schématiquement, une colonne de neurones, en forme de réseau entrecroisé, reçoit en entrée des stimuli simultanés ou décalés, provenant de capteurs soit externes (les cinq sens) soit proprioceptifs. Ce signal complexe cascade dans le réseau par des voies multiples. Il y est transformé, selon l'état présent du

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

réseau. Et, en même temps, les connexions de celui-ci (les synapses) sont modifiées par son passage. Ce signal modifié, parvient à la sortie : il est alors réinjecté à l'entrée de la même colonne. Il retransverse le réseau qu'il vient de modifier. Et ainsi de suite : ils se modifient mutuellement. Peut-être atteindraient-ils une configuration stationnaire... Mais, à chaque réentrée, le flot se mêle à de nouveaux signaux : il s'actualise. C'est donc là une super-boucle, qui garde la trace cumulée de tous les signaux qui l'ont traversée.

Klinis : Comme le sentier que trace avec le temps dans un pré le passage des promeneurs.

Histos Tout à fait ! Mais, c'est encore plus complexe ! Le cerveau est un énorme système fait de myriades de telles "colonnes" reliées par tout un câblage avec diverses "tours de contrôle". Et, ce n'est pas tout ! Le souvenir d'un événement, d'une personne, d'une scène n'est pas stocké en bloc : il est "démonté", réparti entre une foule d'"étagères" : couleurs là, sons ici, concepts ailleurs, formes, grammaire, règles, croyances, etc. en divers lieux du cerveau. On appelle *qualia* ces divers éléments. Lorsqu'on rappelle un souvenir, il faut qu'il soit réassemblé. Cette complication a son utilité ; on y risque des confusions, mais cela permet les associations d'idées et donc l'imagination, la créativité. Tout cela – qui *émerge* du substrat neuronal – donne lieu à une autre émergence : notre psyché, notre pensée. Chez

l'Homme, elle est bien plus développée : conscience, langage, raisonnement, stratégie.

En un niveau de plus, ces psychés humaines communiquent – bien imparfaitement du reste – entre les personnes par diverses sortes de langages. Et, à nouveau, de cela des représentations collectives, des usages, croyances et cultures forment une émergence encore plus formidable.

Klinis : De cet empilement de formes émergées, ressort qu'il nous est impossible de conduire les communautés auxquelles nous appartenons ?

Histos : “Appartenons”, c'est bien le mot ! Qui appartient à quoi ? Je signalais hier qu'aucun de mes neurones, par lesquels je pense ne s'en doute ni ne sait ce que penser veut dire. N'en va-t-il pas de même à tout étage de la pile ? Ce qui émerge de notre pluralité, aucun de nous n'y a accès : aucun ne saurait le décrire, ni donc le dire. On ne peut en parler pour décider quoi faire.

Klinis : Ce que tu dis m'éclaire. L'obstacle identifié, du moins peut-on chercher comment le contourner. S'agit-il de comprendre ? ou bien d'influencer ? Nous ne saurions soumettre à notre analyse ce qui de nous émerge. Or bien ! puisque c'est de nous qu'elle émerge, prenons-la à son jeu !

Histos : Mais ce jeu nous échappe ! Nous ignorons la règle.

Klinis : Nous ignorons ce qui la règle, sait-elle ce qui nous régit ?
Toi-même, savais-tu le jeu de tes neurones dès lors que tu

pensais ? Elle se nourrit de nous : faisons-lui une offrande. Elle s’y fera prendre...

« A tout étage » disais-tu. Vois cette conjecture ; à tout étage, l’émergence se nourrirait de réentrance ? Dans mon laboratoire, nous nourrissons la mémoire collective par un procédé qui y ressemble fort. Mettons-en dans l’offrande : qu’elle soit appétissante !

Histos : Qui saura concevoir ce subtil stratagème ?

Klinis : Je le connais peut-être : allons le voir ensemble.

Le chœur : Ô Muse ! perçois-tu le complot qui s’ourdit ? Nous-mêmes n’en parlons qu’en termes assourdis Car nul ne voudra croire à ce que tu lui dis...

Acte III, Scène 1

Klinis : Salut à toi Simul, que les dieux te protègent !

Simul : Et de quoi voudrais-tu que je sois protégé ?

Klinis : C’est que certains d’entre eux te diraient sacrilège. Ne vas-tu pas, bravant leurs lois, franchir insolemment quelque Styx improbable ... Mais j’ai besoin de toi pour un nouveau défi : l’Homme voudrait se libérer. Or, c’est de ce qu’il crée qu’il devrait être libre : la servitude irrépessible qu’il s’inflige à lui-même. Histos que tu vois là dit que c’est impossible.

Simul : L’impossible est souvent l’excuse du complexe...

Histos : Demos a le souci qu’un groupe humain – fût-il petit ou grand, fût-il un agrégat de mille collectifs – puisse se gouverner selon la vocation qu’il a reçue, qu’il s’est donnée ou que d’autres

voudraient pour leur intégrité. Mais notre Monde est ainsi fait – la Systémique nous l’explique – que l’étagement des émergences met hors de la portée d’une communauté sa propre gouvernance... Et ceci, d’autant plus que cette gouvernance est en interaction avec celle de mille autres : il y faudrait aussi une hyper-gouvernance de tout l’Humanité...

Simul : Le problème est de taille !

Klinis : Ne pourrait-on tenter, de façon plus modeste, à plus petite échelle, d’avoir une recette d’apaisement local ?

Simul : Oui, on peut essayer : qui ne tente pas meurt. Lorsqu’un problème échappe à notre entendement, on peut le transposer, traiter son effigie. L’image transformée, qui ressemble à l’objet, nous fait voir autrement que ce que nous osions. Le simulacre nous libère, si nous savons le manier. La Technique aujourd’hui, y recourt chaque jour, la Science tout autant.

Il y a deux façons. On peut faire un *modèle* de l’objet convoité : un modèle réduit (une maquette : plus simple ou plus petite, plus rapide, moins chère, moins dangereuse) ; ou bien, l’on transpose à un autre domaine (un réseau de transport ainsi est imité par un autre réseau, électrique, hydraulique ... ; ou, l’on essaie sur l’animal avant d’intervenir sur l’homme) ; ou encore, on repère les règles de l’objet, on mesure ses grandeurs, on met en équations ses relations. Et ce modèle virtuel permet de calculer les effets présumables d’actes hypothétiques et de voir à l’inverse quel acte peut produire les effets qu’on escompte.

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

Dans tous ces cas, le complexe insondable n'est plus un obstacle. L'incertitude est moindre.

Histos : Mais pour nos sociétés, quel modèle aurons-nous ?

Simul : Elles sont trop complexes et ta crainte est fondée. Je parlais de deux voies pour la simulation. La première consiste à simuler l'objet. La seconde s'applique à entraîner l'acteur. C'est lui qui, trop complexe, n'est pas modélisable. On le laisse donc faire comme à son habitude ; on lui offre un contexte en excluant le risque et les interférences. Voyons ce qu'on appelle "simulateur de vol" : les pilotes s'y forment. Ce que je vous propose est donc d'imaginer quel cadre nous allons offrir aux collectifs : où ils apprennent sans querelle à régler leur conduite.

Klinis : Je t'entends à merveille; et je crois reconnaître ce que nous essayons dans mon laboratoire. Depuis quelques années, de manière empirique, nous invitons des collectifs dits "naturels" à venir s'exercer, sur un objet-détour. Pour qu'il soit pertinent, c'est eux qui le choisissent. Ils y sont à distance des enjeux quotidiens, afin que les conflits, les points de vue adverses ne viennent pas bloquer l'esprit de la recherche. L'écoute est plus féconde sans négociation.

Histos : Klinis suggère d'y mettre un procédé de réentrance.

Simul : Ce mot m'est inconnu, mais je crois deviner. Dans le simulateur le pilote recommence ! Nous en reparlerons. Nous tenons là ce qu'il faut essayer. *Klinis* : Le difficile est de convaincre d'essayer, car c'est inhabituel. Qui nous croira ? .

Puis, il faut que chacun, bien qu'il ait l'habitude de vouloir amener l'autre à sa certitude, accepte d'écouter. Il n'a pas à se déjuger pour reconnaître que l'autre est légitime à voir un même objet autrement qu'il le voit. Jean Rostand « aimait mieux se donner tort qu'aux autres : c'est plus intéressant ! » Même : il n'est pas besoin de s'être donné tort pour éprouver cet intérêt.

Histos : Le monde est illisible : l'incertitude nous effraie et nous nous cramponnons à notre conviction ! Les princes nous amusent lorsque par ruse ils nous assignent à notre propre séduction. Et ce n'est donc pas eux qui vont vouloir nous déciller. Il faudrait que certains parmi nous s'y essaient, qui pourraient témoigner qu'on peut changer d'avis : non tant sur ce qu'on croit, mais sur ce qu'on dénie...

Klinis : Mais ce n'est pas si simple : car « lorsqu'on a changé de façon de penser, on ne s'en rend pas compte : puisque l'on a changé de façon de penser ! »⁴⁰ C'est là que nos techniques écartent le sujet des certitudes apaisantes – catégorielles notamment – sans qu'il se sente menacé. Il ne s'agit pas tant de vouloir modifier ce que pense chacun, que de déverrouiller le penser collectif.

Simul : « Le difficile est le chemin » enseigne le Tao. Ainsi, une « *préparation* » permettrait de déjouer l'effet indésirable

⁴⁰ Maria Van Bockstaele.

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

qu'induit ce qui émerge de nos institutions et, que vient attiser le besoin ancestral d'attribution simpliste !

Histos : Simul montre la voie. Allons vite porter la nouvelle à Demos ; et, qu'il nous aide à mettre la méthode à l'épreuve.

Le chœur : Ô divin Dionysos accueille cette annonce. Accorde ton soutien à ces hardis pionniers de l'harmonie sociale. Leur science est admirable. L'enjeu en est sublime !

BIBLIOGRAPHIE :

LA BOËTIE, Etienne de, *Discours de la servitude volontaire*, (1576), Paris, Flammarion, 1993.

BENDA, Julien, *La Trahison des clercs*, Grasset, 1927 /1975.

BOUDON, Raymond, *L'art de se persuader*, Paris, Fayard, 1990.

EDELMAN, Gerald, *Biologie de la conscience*, Odile Jacob, Paris, 1992

VAN BOCKSTAELE, Jacques, VAN BOCKSTAELE, Maria, *La Socianalyse – imaginer-coopter*, Economica, Paris, 2004.

VERS UNE PERCEPTION DE L'IDENTITÉ NUMÉRIQUE COMME SYSTÈME COMPLEXE

Batoul Betty Merhi

CERSA-CNRS

*“But let there be no scales to weigh your unknown treasure; And
seek not the depths of your knowledge with staff or sounding line.*

For self is a sea boundless and measureless.”

(Khalil Gibran, 2015)

Résumé :

L'individu du 21^{ème} siècle impacté par le développement des technologies vit et évolue au quotidien avec différentes identités et représentations, y compris leur prolongement numérique. Or, nous vivons dans l'illusion que l'identité, une production sociale et cognitive complexe, est une et indivisible, alors que nous sommes tous des êtres poly-identitaires unissant plusieurs facettes et traces de nous-même. Face à la révolution numérique, les constructions et développements identitaires s'opèrent désormais dans un double espace, physique et numérique. Pour saisir la portée de la notion d'identité numérique en sciences sociales et juridiques, cette étude tente de la percevoir et de la modéliser comme un système complexe donc comme un « système considéré par définition irréductible à un modèle fini aussi sophistiqué soit-il » ; la personne humaine étant tout autant de nature et adoptant des comportements irréductibles et imprévisibles, caractérisée par son autonomie, son auto-détermination,

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

sa dignité, son intégrité, sa singularité quelconque, in fine son soi irréductible, sujet et objet de cette identité numérique émergente.

Mots-clés : identité ; complexité ; émergence ; révolution numérique ; auto-détermination et auto-organisation ; TIC ; irréductible humain ; théorie du droit

Abstract :

The individual of the 21st Century impacted by the development of technologies lives and evolves daily with different identities and representations, including their digital extension. However, we live in the illusion that identity, a complex social and cognitive production, is one and indivisible, while we are all poly-identity beings uniting several facets and traces of ourselves. In the face of the digital revolution, identity constructions and developments are now operating in a dual space, physical and digital. In order to grasp the scope of the notion of digital identity in the social and legal sciences, this study attempts to perceive it and model it as a complex system and thus as a “system considered by definition irreducible to a finite model as sophisticated as it may be”; the human person being equally of nature and adopting irreducible and unpredictable behaviours, characterised by autonomy, self-determination, dignity, integrity, singularity of any kind, in fine the irreducible self - subject and object of this emerging digital identity.

Key words: Identity; complexity; emergence; digital revolution; self-determination and self-organisation; ICT; irreducible human; theory of law.

Introduction

L'être humain, à l'époque du XXI^e Siècle et de la société de l'information, vit et évolue davantage avec différentes identités et représentations, y compris l'identité et les représentations dans leur dimension numérique ; or, « nous vivons dans l'illusion que l'identité est une et indivisible, alors que c'est toujours un *unitas multiplex*. Nous sommes tous des êtres poly-identitaires » (Morin, 1990) dans le sens où nous unissons en nous plusieurs facettes identitaires. Ces dernières se construisent et se développent dans le cadre de sociétés, de communautés, de groupes sociaux, asseyant la dimension sociale et légale de la réalité complexe entourant et affectant la notion d'identité. Précisément, « nous avons besoin d'une méthode de connaissance qui traduise la complexité du réel, reconnaisse l'existence des êtres, approche le mystère des choses » (Morin, 2014), afin d'étudier de manière efficace et objective la portée de l'identité numérique et des enjeux sociojuridiques qu'elle induit.

Pour appréhender l'étendue des implications de cette notion en sciences sociales et juridiques, une autre méthode de connaissance s'avère nécessaire engageant, en particulier, la science et les théories des systèmes complexes. Dans cette perspective, « en traitant le droit comme un écosystème, on ne pense plus l'écart entre la complexité du droit et la complexité du réel comme irréductible, mais on enrichit notre vision du monde en introduisant l'émergence, l'auto-organisation et la dynamique

des phénomènes qu'on observe » (Bourcier, Boulet & Mazzega, 2012). Cette méthode permet ainsi d'observer la complexité et la dynamique des phénomènes impactant et contribuant à la construction de soi et à la détermination des attributs de son identité ; cet « irréductible humain » (Delmas-Marty, 1994) qui, au regard des dernières évolutions de la société numérisée, ne peut que sporadiquement se passer de sa dimension numérique pour ce faire.

En réponse à la vaste problématique entourant le concept d'identité numérique, une des approches, telle que préconisée par cette étude, est celle qui consiste à la percevoir comme un système complexe, permettant alors d'analyser l'étendue des interprétations et implications de cette notion. L'identité numérique peut ainsi être envisagée comme un « système considéré par définition irréductible à un modèle fini aussi sophistiqué soit-il » (Lugan, 2009) comprenant la notion d'identité humaine, caractéristique du soi « irréductible » (I) ainsi que celle d'identité numérique émergente, caractéristique du « soi connecté » (III), tout en tenant compte de la confusion d'espaces provoquée par la révolution numérique et la numérisation progressive de la société, corollaire de l'émergence de la notion en question (II).

Face à la rapidité des évolutions numériques, il y a urgence « à mieux cerner cet irréductible humain qui, au nom des droits indérogeables, protégerait en effet bien plus que la vie ou même

la dignité d'un individu, car il s'agit d'une valeur à la fois individuelle (le plus précieux de chaque être) et collective (l'idée même d'humanité) » (Delmas-Marty, 1994).

I. L'identité humaine, caractéristique du soi « irréductible »

La connaissance de soi, de son identité, incarne, en elle-même, une question aussi complexe que centrale, sujette fréquemment à des évolutions, des développements, des constructions, des influences, des mutations et métamorphoses, compte tenu du fait que « la prise de conscience d'une identité se fait dans et par une interaction continue de l'individu avec son environnement » (Zavalloni & Louis-Guérin, 1984). Tenter de définir la notion large d'identité et d'envisager ses contours et interprétations sans toutefois la réduire ou la délimiter devient de plus en plus nécessaire au regard des évolutions et des choix sociétaux entrepris, l'identité étant « tout sauf une notion « inconsistante » : elle est, au contraire, constitutive de l'existence humaine, à condition qu'on la définisse correctement » (Heinich, 2018). En effet, l'identité se définit par ce qu'elle n'est pas, entendue comme « la résultante de l'ensemble des opérations par lesquelles un prédicat est affecté à un sujet » (Heinich, 2018).

Cette notion incarne une dimension transversale et interdisciplinaire dont la construction et la mise en œuvre ont été, fondamentalement et simultanément, marquées par le monde

social ainsi que par le monde légal. Le premier joue un rôle majeur dans la perception, la construction et l'élaboration de l'identité qui s'avère être le fruit d'un processus d'interaction et d'appartenance tout en étant le fruit d'un processus de représentation et d'évaluation.

En raison de sa transversalité disciplinaire, la notion d'identité s'avère être polysémique, complexe et multiforme, caractéristique de l'être humain, cet être « irréductible ». De façon générale, elle représente un ensemble de caractéristiques individuelles et collectives qui permettent de définir clairement un objet, lui accordant ainsi une identité. Dans la psychologie et la philosophie sociale, l'identité se définit comme le résultat d'une interaction particulière entre le psychologique et le social chez un individu. En d'autres termes, elle est le produit des processus interactifs entre l'individu et la société, donc le champ social, qui s'actualise dans une représentation de soi. Dès lors, il semblerait que le rapport entre identité personnelle et identité sociale, souvent assimilé à une opposition entre le personnel et le collectif, représente le noyau principal de la problématique de l'identité. C'est « dans l'interaction avec autrui que se construit, s'actualise, se confirme ou s'infirme l'identité » (Lipiansky, 1992). Elle représente donc une tension entre ces deux pôles, ce qui rejoint également la philosophie de Ricœur sur la notion d'identité qui considère que le soi renvoie à la question de l'identité (Ricœur, 1990). Selon l'auteur, l'identité elle-même a

deux facettes : d'un côté, elle renvoie au même, au semblable, celui dont il est question sur la « carte d'identité », par exemple ; d'autre part, elle signifie le « soi-même », le propre, l'unique que je suis par rapport à un autre, et l'autre que je suis par rapport à lui. Cette interrogation sur le même – idem – et le propre – ipse – renouvelle l'ancienne dialectique du Même et de l'Autre, puisque l'autre se dit de multiples façons et que le soi peut aussi être considéré en tant qu'autre. Soi-même comme un autre : l'ipséité est impossible sans l'invariant de l'identité, mais l'identité prend sens par la singularité affirmée de l'ipséité (Ricoeur, 1990). En outre, Mucchielli, dans son ouvrage *Identité*, définit celle-ci comme « un ensemble de significations apposées par des acteurs sur une réalité physique et subjective, plus ou moins floue, de leurs mondes vécus, ensemble construit par un autre acteur. C'est donc un sens perçu donné par chaque acteur au sujet de lui-même ou d'autres acteurs » (Mucchielli, 2013). Dans cette perspective, l'identité semble être unique, permettant de se distinguer des autres, de se reconnaître et de s'identifier à autrui. Selon l'auteur, l'identité de chaque individu a une double face : l'une, intérieure, subjective, c'est la valorisation de soi et l'autre extérieure, objective, celle énoncée par autrui.

L'approche de Mucchielli rejoint celle multidimensionnelle développée par Erikson. Le concept de ce dernier, s'inspirant des apports de la psychanalyse, se traduit par la définition de soi, à savoir par les caractéristiques qu'un individu identifie comme

étant siennes et auxquelles il accorde une valeur importante pour s'affirmer et se reconnaître. Le terme d'identité, ou de « sentiment d'identité », correspond pour Erikson au « sentiment subjectif et tonique d'une unité personnelle (*sameness*) et d'une continuité temporelle (*continuity*) » (Erikson, 2011). Ce sentiment constitue alors le résultat d'un double processus s'opérant en même temps « au cœur de la culture de l'individu ainsi qu'au cœur de la culture de sa communauté » (Erikson, 1982). Zavalloni développe en ce sens un concept égo-écologique (Zavalloni, 2007) dans lequel se manifeste la nature interactive et dynamique de l'identité. L'auteure met notamment en valeur l'interdépendance étroite qui existe entre les processus intrapsychiques et socio-psychologiques dans la formation de l'identité. L'identité sociale désigne pour Zavalloni la représentation que le sujet se fait de son environnement social, à savoir des différents groupes sociaux auxquels l'individu s'associe, de ses groupes d'appartenance mais également de ses groupes d'opposition (de non appartenance). Selon la conceptualisation de l'auteure, les notions d'identité et d'appartenance sont étroitement liées et l'identité se manifeste comme une structure organisée des représentations de soi et des autres. C'est donc l'ensemble des représentations vécues découlant du rapport entre individu et société. Ainsi, l'identité se forme à partir des organisations de soi et de groupes d'appartenance en tant qu'entité ou « structure cognitive liée à la

pensée représentationnelle » (Baugnet, 2001). En d'autres termes, le concept d'identité « désigne donc le noyau central de la personnalité individuelle, sorte de résultante d'un ensemble donné de composantes psychologiques et sociologiques » (Zavalloni, 1972).

Afin de comprendre la construction de la réalité sociale, l'identité semble donc être un objet privilégié puisque le rapport à la société, au monde, s'élabore à travers ces appartenances sociales et culturelles (Zavalloni & Louis-Guérin, 1984), dénotant par là-même le processus de représentation et d'évaluation qui contribue à la construction de soi, de son identité.

Dans ce contexte, l'égo-écologie comprend l'étude de soi dans ses relations complexes et fluctuantes avec son environnement : « l'identité serait constituée par le contenu, la structure et l'organisation dynamique de l'environnement intérieur subjectif en tant que lieu de contrôle et d'anticipation et en même temps, reflet des actions quotidiennes. Les concepts d'identité psychosociale et d'environnement intérieur opératoire peuvent ainsi être considérés comme interchangeables dans cette perspective » (Zavalloni & Louis-Guérin, 1984).

Sous l'influence du monde légal, la notion d'identité s'est progressivement assimilée à des questions d'identification et d'authentification, réduite conséquemment à une simple

discussion autour de la problématique de l'état civil. Dans un cadre purement juridique, l'identité est conçue comme « l'ensemble des composantes grâce auxquelles est établi qu'une personne est bien celle qui se dit ou que l'on présume telle (nom, prénoms, nationalité, filiation, etc.) » (Guinchard & Debard, 2012). Elle désigne, en particulier, l'identité civile, judiciaire et s'envisage comme un agrégat de composantes permettant de différencier une personne de ses semblables. Néanmoins, dresser une liste exhaustive des attributs composant l'identité d'une personne semble être, même du côté du droit, un défi quasi-irréalisable.

L'individualisation, ou individuation, s'est ainsi déclenchée, et de façon irréversible, par le biais de l'identité civile, propriété de sa singularité, une singularité partiellement « quelconque » ; son *principium individuationis* caractérisant de manière jaillissante le lieu de la singularité quelconque (Agamben, 1990). Précisément, « pour l'être qui est sa propre manière, celle-ci n'est pas, en effet, une propriété qui le détermine et l'identifie comme une essence, mais plutôt une impropriété ; ce qui toutefois le rend exemplaire, c'est que cette impropriété est assumée et appropriée comme son être unique. L'exemple n'est que l'être dont il est l'exemple : mais cet être ne lui appartient pas, il est parfaitement commun » (Agamben, 1990).

Les documents administratifs, notamment la carte nationale d'identité ainsi que le passeport, permettant de constater l'état

civil d'une personne, comportent, aux termes de la loi sur la protection de l'identité de 2012, des impropriétés manifestées chez toute personne communément recouvrant les données suivantes : « le nom de famille, le ou les prénoms, le sexe, la date et le lieu de naissance, le nom dont l'usage est autorisé par la loi, le domicile, la taille et la couleur des yeux, les empreintes digitales ainsi que la photographie de l'individu » (Loi n° 2012-410, art. 2). Certains de ces éléments forment, par conséquent, le noyau dur de l'identité d'une personne, à savoir le nom de famille, le sexe, la nationalité ainsi que la filiation, éléments qui contribuent directement à l'individualisation de la personne, sans pour autant être exhaustifs. À cet égard, il est utile de noter que la Cour européenne des droits de l'homme a eu maintes occasions pour affirmer et constater que des éléments comme le sexe, le nom, l'orientation sexuelle ou la vie sexuelle, composants les éléments d'identité de ces documents officiels, constituent des composantes importantes de la sphère personnelle des individus, se rapportant à « un aspect intime de la vie privée », tel qu'il est prévu et protégé par l'article 8 de la Convention⁴¹. Dans ce contexte, la « singularité » ne paraît pas être « ici une détermination extrême de l'être, mais la manière dont ses limites s'effrangent ou s'indéterminent : une

⁴¹ CEDH, *Affaire Dudgeon c. Royaume-Uni* du 22 octobre 1981, Requête N° 7525/76, § 41 ; *Affaire B. c. France* du 25 mars 1992, Requête N° 13343/87, § 63 ; *Affaire Burghartz c. Suisse* du 22 février 1994, Requête N° 16213/90 ; et *Affaire Laskey, Jaggard et Brown c. Royaume-Uni* du 19 février 1997, Requête N° 21627/93, 21826/93 et 21974/93, § 36.

individualisation paradoxale par indétermination » (Agamben, 1990).

En effet, l'identité d'une personne peut être indirectement reconnue et établie, et ce à l'aide d'autres attributs identitaires : ainsi, un individu peut être rattaché à un lieu de résidence, ou à l'endroit où il est susceptible de se retrouver et d'être « géo-localisé ». Cette identification peut aussi s'opérer à travers un numéro, particulièrement le numéro d'inscription au répertoire national d'identification des personnes physiques (NIR), plus communément connue comme le « numéro de sécurité sociale »⁴². Celui-ci a la capacité d'identifier jusqu'à 10 000 milliards de personnes et est utilisé par la sécurité sociale, mais aussi, par d'autres services de l'administration, ainsi que par des entités privées⁴³. L'identité peut également être dévoilée via le numéro

⁴² Historiquement connu comme le « numéro Carmille » d'après son créateur René Carmille, contrôleur général de l'Armée, pionnier de la mécanographie. Il avait travaillé depuis 1934 sur un numéro de matricule militaire qui se fonde sur la date et le lieu de naissance, et en avait même proposé, en 1938, un modèle à 12 chiffres. En 1940, il reçoit l'ordre de créer un « Service de la démographie », devenu « Service national des statistiques » (SNS) puis récemment l'Insee en 1946, qui était principalement chargé de gérer les soldats démobilisés et les prisonniers de guerre, et reprendre les services de recrutement. Puisqu'il s'agissait d'un projet à finalité civile, le numéro de matricule, ou numéro de code individuel fut alors également attribué aux femmes, d'où l'avènement d'un treizième chiffre, première colonne, permettant de distinguer les hommes (1) et les femmes (2) » : Pour plus de détails, E. BLACK, *IBM and the Holocaust : The Strategic Alliance between Nazi Germany and America's Most Powerful Corporation*, Dialog Press, Expanded Ed., 2012, 592 p. & P. PIAZZA, *Histoire de la Carte Nationale d'Identité*, Ed. Odile Jacob, Coll. Histoire et Document, 2004, 462 p.

⁴³ En ce sens, le décret n° 2019-341 du 19 avril 2019 relatif à la mise en œuvre de traitements comportant l'usage du numéro d'inscription au répertoire national d'identification des personnes physiques, pris en application de la loi n° 2018-493 du 20 juin 2018 relative à la protection des données personnelles, précise les conditions du traitement du NIR (numéro de sécurité sociale) en précisant les catégories de responsables de traitement et les finalités autorisées, comprenant, entre autres, les

de téléphone d'une personne ou encore sa date de naissance qui permet, notamment, de déterminer l'âge pour la conclusion d'actes juridiques. Dans ce cadre, tout possesseur d'une carte nationale d'identité ou d'un passeport peut prouver son identité « à partir des données inscrites sur le document lui-même ou sur le composant électronique sécurisé » (Loi n° 2012-410, art. 6). L'identité civile s'implique dans la numérisation de la société et des activités multipliant ainsi, de manière radicale, les traces que chaque personne laisse dans les systèmes et sur les réseaux. De plus, les informations physiologiques et biologiques participent également à la singularité de l'individu concerné et à son individualisation. Le corps humain fournit des éléments d'identification infaillibles – certains désormais inclus dans les composants de la carte d'identité : que ce soit l'ADN, l'ARN, la voix, les empreintes, l'iris ou autre, ils représentent des sources illimitées permettant d'extraire des renseignements importants sur l'individu et touchant sa vie privée.

Le tissage d'un lien entre identité, informations personnelles et vie privée s'observe alors, révélant l'implication de nombreux droits et libertés fondamentales correspondant aux nombreuses facettes identitaires caractérisant l'identité d'une personne. En ce

organismes de sécurité sociale, les professionnels de santé, les employeurs, publics ou privés, ou certains organismes autorisés de manière ponctuelle, et ce dans différents champs comme celui de la protection sociale, de la santé, du travail et de l'emploi du secteur privé et du secteur public, de la justice, de l'éducation, du logement ou dans les champs financier, fiscal et douanier (décret n° 2019-341 du 19 avril 2019, art. 2).

sens, la Cour Européenne des droits de l'homme a déclaré dès 1989 que « le respect de la vie privée exige que chacun puisse établir les détails de son identité d'être humain et que le droit d'un individu à de telles informations est essentiel du fait de leurs incidences sur la formation de la personnalité » (CEDH, Affaire Gaskin c. Royaume-Uni du 7 juillet 1989).

Dès lors, le respect de la vie privée en ligne et hors ligne s'exprime dans une perspective dynamique, évolutive, en mutation continue, comprenant, mais sans en être dépendant, la protection des données personnelles, de la vie privée, de la liberté d'expression, de l'autodétermination informationnelle, de l'intimité, de l'autonomie et de la dignité de la personne à travers ses activités quotidiennes et numériques ; ces concepts caractérisent, *a fortiori*, celui de l'identité, dans sa dimension numérique ou physique. Il serait fallacieux de les circonscrire, les délimiter ou les réduire à une définition unique, unifiée et/ou arrêtée, voire à une seule conceptualisation théorique. D'autant que, rappelons-le, « la spécificité de la vie privée dans le web social et des relations équipées par les technologies mobiles est un processus décentralisé, complexe et multidirectionnel » (Casilli, 2014).

Le droit et les politiques publiques adoptées, « conçus comme un système de normes » visant à réguler les comportements individuels ou institutionnels et à les rendre conformes aux objectifs et orientations fixés, deviennent, au fil du temps, de

plus en plus complexes (dans leur compréhension) et semblent bien mettre de côté cette indétermination dans la définition de l'humain ou de son identité, mais aussi cet aspect imprévisible de l'Homme, une des caractéristiques essentielles de l'espèce humaine pouvant induire et provoquer les idées, la créativité, l'adaptabilité, la complexité (dans ses rôles et ses représentations) ou encore l'innovation, si chère à la société numérique. Pourtant, selon Bourcier, appréhender le droit d'une autre manière, moyennant d'autres théories, systèmes et principes comme par exemple les systèmes complexes, permet de « visualiser les lieux souvent inattendus de cette complexité » et « force à renouveler certains aspects de la théorie du droit » (Bourcier, 2012). Précisément, « les travaux actuels sur la sérendipité et les effets inattendus des interactions et décisions humaines viennent apporter un éclairage nouveau sur les limites des études d'impacts et de l'évaluation des lois » (Bourcier, 2012). Le choix actuel des autorités (que ce soit dans le cadre de la loi sur la protection de l'identité, du programme interministériel FIN « France Identité Numérique »⁴⁴ ou de la mise en place de la CNIe⁴⁵ ou du moyen d'identification

⁴⁴ Lancement en 2018 du programme interministériel « France identité numérique », sous l'impulsion des ministères de l'intérieur, de la justice, et du secrétariat d'État au numérique chargé de concevoir et de mettre en œuvre une solution d'identification numérique pour l'ensemble des citoyens : <https://france-identite.gouv.fr/en-savoir-plus/de-quoi-s-agit-il/> & <https://france-identite.gouv.fr/assets/files/France-identite-lettre-de-mission-identite-numerique.pdf>

⁴⁵ Décret n° 2016-1460 du 28 octobre 2016 autorisant la création d'un traitement de données à caractère personnel relatif aux passeports et aux cartes nationales d'identité, JORF du 30 octobre 2016, Texte n° 18 sur 94.

électronique dénommé « SGIN »⁴⁶) souhaitant remédier aux lacunes juridiques manifestées face aux développements massifs des technologies et de leur utilisation est celui de prévoir de nombreux instruments juridiques qui suscitent une complexité plus aggravée des règles juridiques en la matière ; des instruments qui se présentent de telle façon qu'ils empêchent un citoyen d'en imaginer les conséquences, ou l'étendue des notions en cause, et les acteurs politiques d'en prévoir les impacts. Dans ce cadre, en souhaitant simplifier voire éviter des dilemmes pratiques soulignés par l'époque de la révolution numérique, il semblerait que l'on provoque « d'autres effets inattendus dans une autre échelle du temps » (Bourcier, 2012) à l'image de ce qui s'observe avec la banalisation de la notion d'identité et de sa portée.

Envisagée ainsi, l'identité incarne une production sociojuridique et cognitive, processus pendant lequel il est possible d'observer le « co-engendrement des éléments et de la forme » du système ago-antagoniste que l'identité, le soi dans sa réalité, caractérise, où l'état global du système – de la personne – dépend des états locaux, qui dépendent eux-mêmes de l'état global, valorisée juridiquement (tel qu'il est perçu à travers les

⁴⁶ Décret n° 2022-676 du 26 avril 2022 autorisant la création d'un moyen d'identification électronique dénommé « Service de garantie de l'identité numérique » (SGIN) et abrogeant le décret n° 2019-452 du 13 mai 2019 autorisant la création d'un moyen d'identification électronique dénommé « Authentification en ligne certifiée sur mobile », JORF du 27 avril 2022, Texte n° 27 sur 171.

définition larges adoptées pour les notions d'identité, de données personnelles et de vie privée) et désormais numériquement (reflétant l'importance et la valeur des données et des traits de la personnalité).

Cette notion souligne bien une complexité qui ne peut être délimitée par des variables ou des propriétés bien définies qu'il serait possible d'analyser positivement ou causalement, et qui implique l'imprévisibilité, la logique floue et la sérendipité, des caractéristiques propres à un système donné ainsi qu'à la personne humaine, cet « irréductible humain » (Delmas-Marty, 1994). Comme le souligne Castoriadis, lors de l'émergence d'une nouvelle forme/identité, cette « apparition » a un caractère « intrinsèquement circulaire », d'où l'impossibilité de la « produire » ou de la « déduire » d'éléments déjà donnés — car les « éléments » présupposent la forme, laquelle présuppose les « éléments ». » (Castoriadis, 1993). Autrement dit, c'est la logique floue propre à l'espèce humaine à travers laquelle il est possible de voir même « le fondement de notre pensée qui traite la connaissance suivant les principes flous, même si en fin de raisonnement, la déduction de l'est plus. Et ne jamais perdre de vue que « la différence entre la machine et l'homme provient de l'aptitude du cerveau humain à penser en termes imprécis, non quantitatifs, flous... » » (Delmas-Marty & Coste, 1990).

Dans cette perspective, l'identité humaine, ce système qui fonctionne en boucle autonome, caractérise une « singularité

quelconque », notamment compte tenu du fait que « quelconque est la figure de la singularité pure » (Agamben, 1990). La singularité quelconque n'a pas une seule identité, n'est pas déterminée par rapport à un concept, mais elle n'est pas non plus simplement indéterminée ; « elle est plutôt déterminée uniquement à travers sa relation à une idée, c'est-à-dire à la totalité de ses possibilités » (Agamben, 1990). Les réponses apportées par le corpus juridique voulant, pour des raisons de nécessité et d'utilité, éradiquer les menaces, les risques et les interdits fournit alors des critères permettant de caractériser l'humain tel que conçu par le droit : « sa singularité, liée au processus culturel de l'humanisation, et son égale appartenance à la communauté humaine, liée au processus biologique de l'hominisation » (Delmas-Marty, 2013).

Avec les avancées et les développements sociaux, technologiques et scientifiques, notamment des technologies de l'information et de la communication et de leurs usages quotidiens, qu'en est-il du caractère complexe et polymorphe de l'identité, composée de nombreuses facettes et d'une multitude d'attributs irréductibles et en interaction continue avec son environnement ? Cette identité humaine qui ne semble pouvoir être définie que de manière apophatique, à partir de ce qu'elle n'est pas, à l'image de la définition de la nature humaine ou de ce qui fait que l'humain est humain, un être qui ne peut être déterminé qu'à partir de ce qui est inhumain et qui est le fruit

d'un processus constant et dynamique d'interaction, d'appartenance, de représentation, d'évaluation, de perception de soi et d'autodétermination suivant une logique floue déterminée par indétermination cristallisant cette singularité quelconque, particularité de l'être humain ; est-elle destinée à disparaître, à prendre une autre forme et une autre nature, celle alliant l'humain à l'inhumain, le vivant au non-vivant ?

La question semble donc fondamentalement toucher la nature et les comportements humains, *a fortiori*, l'identité humaine – dans son autonomie, dans sa dignité, dans son intimité, dans sa singularité, dans son humanité ; cet « irréductible humain » qu'on essaie, via la révolution numérique, les moyens et outils qu'elle offre, la confusion d'espaces qu'elle induit et la banalisation du concept d'identité qu'elle véhicule, de réduire à une définition figée, à un profil déterminé, à une identité unique et centralisée. Cela semble être le prix du développement et des innovations technologiques, l'intention ultime avancée étant le bien-être de l'humanité et l'amélioration de la vie humaine et de l'être humain par le numérique.

II. La confusion d'espaces, corollaire de l'émergence de l'identité numérique

L'écllosion des nouvelles technologies dans le quotidien des individus a davantage bouleversé cette quête continue de la connaissance, du soi et de sa réalité, en rajoutant une couche de complexité : les constructions et développements identitaires s'opèrent désormais dans un double espace, physique et numérique, générant ainsi la mise en place du système numérique révolutionnaire provoquant, conséquemment, l'émergence de l'identité numérique ; d'autant plus que « c'est simplement l'existence du système lui-même qui les a fait émerger à partir d'une masse indéfinies de possibles » (Varela, 1996), dans ce contexte, la masse indéfinie de données et de technologies disponibles.

De façon similaire et circulaire, la numérisation de la société a potentiellement des effets sur la vie des personnes, et surtout sur leurs constructions, perceptions, représentations, autonomies, choix et décisions, ainsi que sur leurs libertés, puisque « c'est le processus continu de la vie qui a modelé notre monde par ces aller et retour entre ce que nous appelons, depuis notre perspective perceptuelle, les contraintes extérieures et l'activité générée intérieurement » (Varela, 1996). Ceci dit, il est nécessaire de laisser le choix du résultat, l'aboutissement de ce jeu d'aller et retour, à la personne concernée afin qu'elle en déduise les conséquences souhaitées et privilégiées en vue de se

construire et de se développer, et ce, de manière libre et autonome.

Que ce soit la version 2.0 du web ou la version 3.0, les deux se ressemblent en ce sens qu'elles collectent et indexent toutes les informations mises en ligne par les individus utilisateurs-acteurs. Avec l'accroissement du rôle de l'internaute en tant que contributeur au web, se manifeste parallèlement un accroissement du rôle de l'intimité des internautes, du rôle de leurs vies privées dans le jeu des données ainsi produites et gérées. Une sorte de *continuum* stable semble, par conséquent, se mettre en place entre les identités, les documents et les comportements qu'ils soient en ligne ou hors ligne ; et des applications visant à supprimer la frontière entre le monde connecté et celui déconnecté émergent progressivement, à l'image du système Cache API, de la mise en place du Metaverse voire de la mise en œuvre du système de crédit social chinois. Grâce aux nouvelles pratiques et technologies qui se développent, tout sur le web est en permanence collecté, agrégé, analysé, indexé, documenté, sauvegardé ; et la plupart des informations faisant l'objet de ces divers traitements se rapportent aux relations numériques des individus, qu'elles soient sociales, professionnelles, personnelles, médicales, administratives. Il est notable que « la dichotomie réel/virtuel fut graduellement abandonnée au profit d'une vision plus complexe

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

des interactions entre ces deux dimensions, de plus en plus imbriquées l'une dans l'autre » (Loveluck, 2015). L'accent est aujourd'hui mis sur les stratégies, toujours plus sophistiquées et différenciées, d'exposition sur le réseau et tiennent compte du fait que ces réseaux, y compris le plus célèbre des sites dits de « réseau social », à savoir Facebook, « fonctionne à partir de l'identité réelle des utilisateurs – et limite donc le jeu « libre » et « émancipateur » sur l'identité, initialement associée au cyberspace » (Loveluck, 2015).

La numérisation progressive de la vie quotidienne est porteuse d'un impact indéniable modifiant le processus de perception, de représentation et de construction de l'identité des individus ; ce processus s'opérant de plus en plus dans et avec l'aide de l'espace numérique, les contraintes extérieures affectant *a fortiori* l'activité intérieure. Et ce, sans compter que, « avec la massification de ces espaces, l'endossement d'une identité numérique se banalise tandis que les pratiques de “reliance” à distance, de conversations triviales, mais aussi de partage d'écrits multimédias avec des internautes connus ou inconnus, proches ou lointains, est en voie de devenir une pratique de la vie quotidienne qui reconfigure le lien aux autres » (Loveluck, 2015).

Cette confusion d'espaces contribuant à la production de l'individualité, cette singularité déterminée et attestée à l'heure

du numérique, s'opère et se renforce par le biais d'un accroissement de la relation de pouvoir par une relation de savoir créant ainsi une réalité qui est « produite en permanence, autour, à la surface, à l'intérieur du corps par le fonctionnement d'un pouvoir qui s'exerce sur ceux qu'on régule, surveille, qu'on dresse et corrige »⁴⁷ (Foucault, 2013). Cette réalité, indique Foucault, représente l'espace « où s'articulent les effets d'un certain type de pouvoir et la référence d'un savoir, l'engrenage par lequel les relations de pouvoir donnent lieu à un savoir possible, et le savoir reconduit et renforce les effets de pouvoir. Sur cette réalité-référence, on a bâti des concepts divers et on a découpé des domaines d'analyse : psyché, subjectivité, personnalité, conscience etc. ; sur elle on a édifié des techniques et des discours scientifiques ; à partir d'elle, on a fait valoir les revendications morales de l'humanisme. Mais il ne faut pas s'y tromper » (Foucault, 2013). Des domaines, concepts, théories et revendications qu'on essaie (avec acharnement) de catégoriser ou de modéliser en vue de les simplifier réduisant, par

⁴⁷ Foucault souligne ainsi que « dans toute société, le corps est pris à l'intérieur des pouvoirs très serrés qui lui imposent des contraintes, des interdits ou des obligations. Plusieurs choses cependant sont nouvelles dans ces techniques. L'échelle, d'abord, du contrôle : il ne s'agit pas de traiter le corps, par masse, en gros, comme s'il était une unité indissociable, mais de le travailler dans le détail ; d'exercer sur lui une coercition ténue, d'assurer des prises au niveau même de la mécanique – mouvements, gestes, attitudes, rapidité : pouvoir infinitésimal sur le corps actif. L'objet, ensuite, du contrôle : non pas ou non plus les éléments signifiants de la conduite ou le langage du corps, mais l'économie, l'efficacité des mouvements, leur organisation interne ; [...]. La modalité enfin : elle implique une coercition ininterrompue, constante, qui veille sur les processus de l'activité plutôt que sur son résultat et elle s'exerce selon une codification qui quadrille au plus près le temps, l'espace, les mouvements [...]. » (Foucault, 2013).

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

conséquent, l'étendue des analyses scientifiques et sociojuridiques possibles, là où la complexité pourrait servir comme nouveau paradigme d'étude pour comprendre les dilemmes et anomalies pratiques auxquels la société numérisée est confrontée (Bourcier, 2012). Dans ce contexte, tout semble alors faire régner « l'universalité du normatif », où l'Homme ne semble être autre que cette individualité, et l'identité l'élément permettant d'asseoir cette individualisation ; ce qui renforce l'objectivation de l'individu, devenu objet de la science, ainsi que la « nouvelle économie du pouvoir » et la « formation du savoir »⁴⁸ (Foucault, 2013), des objectifs essentiels pour le développement profitable et valorisant des nouveaux modèles économiques fondés sur l'économie des données.

En outre, les espaces numériques impliquent nécessairement l'acte de communiquer, un acte qui ne s'exprime pas simplement par le transfert d'informations depuis l'expéditeur vers le destinataire mais plutôt par le « modelage mutuel d'un monde commun au moyen d'une action conjuguée : c'est notre réalisation sociale, par l'acte de langage, qui prête vie à notre monde » (Varela, 1996). Il existe des actes que nous effectuons

⁴⁸ Foucault nous apprend ainsi que « « [...] si les [sciences] ont pu se former et produire dans l'épistémè tous les effets de bouleversement qu'on connaît, c'est qu'elles ont été portées par une modalité spécifique et nouvelle de pouvoir : une certaine politique du corps, une certaine manière de rendre docile et utile l'accumulation des hommes. Celle-ci exigeait l'implication de relations définies de savoir dans les rapports de pouvoir ; elle appelait une technique pour entrecroiser l'assujettissement et l'objectivation ; elle comportait des procédures nouvelles d'individualisation. [...]. L'homme connaissable (âme, individualité, conscience, conduite, peu importe ici) est l'effet-objet de cet investissement analytique, de cette domination-observation » (Foucault, 2013).

continuellement, tels que des affirmations, promesses, requêtes ou déclarations, que ce soit dans l'espace réel ou virtuel : « en fait, un tel réseau continu de gestes conversationnels, comportant leurs conditions de satisfaction, constitue non pas un outil de communication, mais la véritable trame dans laquelle se dessine notre identité » (Varela, 1996) ; une trame qui nécessite de maintenir l'espace de jeu dans lequel se construit l'identité de manière libre et autodéterminée conformément aux droits et libertés fondamentales. L'acte de communiquer implique, par ailleurs, le traitement computationnel des informations, « une opération qui est effectuée sur des symboles, c'est-à-dire sur des éléments qui représentent ce à quoi ils correspondent. La notion en jeu ici est la représentation, ou l'intentionnalité, terme du philosophe pour la qualité de ce qui est « à propos de quelque chose » » (Varela, 1996) ; des représentations, interactions et évaluations qui, comme il a été vu précédemment, constituent des processus permettant, *in fine*, d'aboutir à la connaissance, particulièrement de soi, de son environnement et de sa réalité.

En tout état de cause, il ne faut perdre de vue que dans le cyberspace les enjeux qui y sont liés sont « inextricables », et « parce qu'en raison de l'omniprésence des systèmes d'information et de communication dans nos vies quotidiennes, les décisions qui y seront prises affecteront tous les aspects de notre vie » (Douzet, 2014).

L'identité humaine semble alors être le produit de processus interactifs, itératifs et dynamiques entre l'individu et la société, à savoir son environnement réel et/ou virtuel, qui s'actualise dans une représentation de soi, et qui se prolonge dans l'architecture des réseaux numériques, le cyberspace, moyennant les données personnelles et leurs traitements. Ainsi, des variables externes (intrants et extrants) impactent simultanément la composition interne – le soi tel qu'il est perçu et vécu – mais aussi la composition externe – la société, sa gestion, l'environnement dans lequel l'individu vit, interagit et se développe.

Émerge donc la notion d'identité numérique dans différents secteurs et disciplines, ainsi que dans différents aspects de la vie des personnes, engageant une multitude de facettes identitaires aussi diverses que variées, transposées en données, métadonnées, voire en traces et signaux numériques, par le biais, notamment, des nouvelles technologies et réseaux de l'information et de la communication développés et en développement.

III. L'identité numérique émergente, caractéristique du « soi connecté »

Il s'avère qu'en admettant le processus de construction et d'auto-détermination de l'identité, celle-ci s'étend pour comprendre une multitude d'attributs autres que ceux présents dans l'état-civil tel que déterminé par l'État pour les besoins

d'identification, tout en contribuant à l'individualisation des personnes. Comme le précise Lessig, par identité, on entend quelque chose de plus que ce que vous êtes. Cela inclut vos « attributs », ou « plus largement, tous les faits qui sont vrais à votre sujet » (Lessig, 2006). Votre identité, en ce sens, comprend votre nom, votre sexe, où vous vivez, ce qu'est votre éducation, votre numéro de permis de conduire, votre numéro de sécurité sociale, vos achats, si vous êtes un avocat ou un ingénieur - et ainsi de suite. Ces attributs sont connus par d'autres lorsqu'ils sont communiqués. Dans l'espace réel, certains sont communiqués automatiquement : pour la plupart, le sexe, la couleur de la peau, la taille, la tranche d'âge, et si vous avez un bon sourire se transmet automatiquement. D'autres attributs ne peuvent pas être connus à moins qu'ils ne soient révélés soit par vous, soit par quelqu'un d'autre : votre moyenne générale au lycée, votre couleur préférée, votre numéro de sécurité sociale, vos derniers achats – y compris en ligne, si vous avez passé / réussi l'examen du barreau ou non, etc. (Lessig, 2006). Dans cette perspective, l'identité – réelle ou numérique – caractérise toute information provenant de l'esprit, de l'activité ou de l'action humaine.

En effet, une 'seule' identité numérique n'existe pas : « on confond trop souvent dans le discours courant identité, identité numérique et identifiant. L'identité numérique est un agrégat, aux contours assez flous, de notions éparses : pseudo, identifiant,

log, donnée à caractère personnel et/ou technique, IP... si l'on demeure au plan du droit, ce concept d'identité, invoqué à tout crin, n'existe pas » (Forest, 2012). La loi réduit la définition de ce concept à la question de l'état civil et d'identification invoquant des caractéristiques invariables, des impropriétés comme le nom, prénom(s), ou le sexe voire les données biométriques ; ou bien la protège de manière parcellaire à travers des dispositions ponctuelles, à l'image du délit d'usurpation d'identité. Or, « c'est trop réducteur pour une notion si complexe, il faudrait idéalement pouvoir intégrer la notion d'identité au sens psychologique et sociologique dans le Code Civil » (Forest, 2012). En ce sens, les autorités publiques ont admis que l'usage de toute donnée, de tout type ou de toute nature, permet d'identifier une personne : « au-delà des noms et prénoms d'une personne, il peut donc s'agir d'une adresse électronique, du numéro de sécurité sociale, d'un numéro de téléphone, d'un numéro de compte bancaire, d'un pseudonyme ... » (Circulaire du 28 juillet 2011). Il est évident que cette liste n'est pas exhaustive, l'image, les cookies, l'adresse IP, les logins et mots de passe, l'historique des recherches et ainsi de suite peuvent y figurer, traduisant la massification des données et l'avènement du Big data. Ce qui répond par ailleurs à la définition large et étendue des données personnelles adoptée par les législateurs nationaux et européens qui affirment qu'elles désignent « toute information relative à une personne physique

susceptible d'être identifiée directement ou indirectement » (RGPD, loi Informatique et libertés, Convention 108, directive 95/46/CE), et ce, quelle que soit sa nature, son contenu, son support, son format, sa finalité ou son résultat. Une définition étendue et non exhaustive a donc été ratifiée afin de couvrir toutes les informations pouvant être liées à un individu précisait la Commission des communautés européennes : en fonction de l'utilisation voulue, toute donnée relative à un individu, bien qu'elle paraît inoffensive, peut être sensible (par ex. une simple adresse postale). Afin d'éviter une situation dans laquelle des moyens d'identification indirecte permettent de contourner cette définition, il est indiqué qu'une personne identifiable est une personne qui peut être identifiée par référence à un numéro ou à une caractéristique d'identification similaire (Commission des Communautés européennes, COM(90) 314).

Avec l'avancée des outils et des moyens informatiques et technologiques, connaître l'identité d'une personne n'est plus véritablement requis pour l'identifier – la définition large des données personnelles reflète ce constat. En effet, « les fichiers informatiques enregistrant les données à caractère personnel attribuent habituellement un identifiant spécifique aux personnes enregistrées pour éviter toute confusion entre deux personnes se trouvant dans un même fichier. Sur internet aussi, les outils de surveillance du trafic permettent de cerner facilement le

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

comportement d'une machine et, derrière celle-ci, de son utilisateur. On reconstitue ainsi la personnalité de l'individu pour lui attribuer certaines décisions. Sans même s'enquérir du nom et de l'adresse de la personne, on peut la caractériser en fonction de critères socio-économiques, psychologiques, philosophiques ou autres et lui attribuer certaines décisions dans la mesure où le point de contact de la personne (l'ordinateur) ne nécessite plus nécessairement la révélation de son identité au sens étroit du terme » (G29, Avis 4/2007). De plus en plus, les données à caractère personnel se situent au centre du processus d'information représentant, *in concreto*, des mesures ou des observations d'attributs ou de variables économiques ou sociales.

Appréhendée ainsi, et suivant l'approche de la science des systèmes complexes, l'identité numérique représente le faisceau d'identités d'une personne « pris électroniquement / informatiquement » matérialisé par les données et traces numériques générées par la personne concernée et faisant l'objet d'innombrables opérations de traitements ; opérations qui conduisent vers un traitement, voire un façonnage, des personnes humaines – sujet et objet de cette identité numérique – mais aussi vers une nouvelle gouvernance juridique et sociale. Dans ce contexte, cette identité peut être perçue comme un système complexe entendu « comme un système qui fonctionne en boucle autopoïétique étrange — comme un système susceptible de

déclencher un co-engendrement éléments-forme » (Sallaberry, 2021).

Il apparaît alors que ce sont les personnes derrière les données qui font l'objet de traitements et subissent subtilement les changements de politique publique et de paradigmes socioculturels manifestés, induisant la société de l'information et de contrôle telle qu'elle se concrétise à l'heure actuelle. Celle-ci s'apparente désormais à une société de régulation, de prévision, d'anticipation, de connectivité, de gestion, de communications et résultats instantanés, de réseaux, d'applications, d'innovations, de plateformes et de services en ligne etc., et leurs corollaires que sont l'asservissement, la surveillance, la gouvernance, le conditionnement, voire les régimes d'exception et mesures de sécurité ; société dans laquelle « *Web services are impossible without identity* » (Lessig, 2006) et où l'art de communiquer instantanément et assidûment domine désormais toutes les sphères, qu'elle soit personnelle, professionnelle, médicale, sociale, légale ou administrative.

Précisément, il semblerait qu'à travers son interaction avec le cyberspace, le monde des machines et du numérique, l'identité d'une personne, caractéristique d'une « singularité quelconque » et d'une « pensée/logique floue » irréductible, tend à être réduite, unifiée et modélisée en une qui soit identifiable, authentifiable, quantifiable, individualisante, personnalisable, incapable d'auto-construction, d'autodétermination ou d'autoréflexion

indépendante et non influencée, non biaisée. L'identité numérique, ce « *networked self* » (Cohen, 2012), qui finalement ne représente qu'une transposition, une extension de l'identité perçue, conçue et vécue dans le monde du web, traduite dans un langage informatique, interagit et affecte l'identité vécue et ressentie physiquement, mais aussi le rôle choisit consciemment ou inconsciemment par l'individu ; les deux étant, tout compte fait, interchangeables et inséparables.

Aspirant à plus de liberté, à plus de communication et de connectivité, à plus d'autonomie dans son quotidien, l'humain développe finalement une relation intime avec les technologies offrant de combler ces aspirations, de sorte qu'il en devient dépendant pendant qu'elles deviennent plus autonomes et indépendantes. Ces outils et objets technologiques, étant en relation et en interaction continue avec le soi, le fascinant et lui accordant un semblant de liberté non exploitée auparavant, modifient indubitablement la manière dont ce soi - cette identité - se réfléchit et se construit : « *Computers, like dreams and beasts, are objects against which we can measure ourselves ; they have an evocative quality in that “interacting with them provokes reflection on the nature of the self”* » (Turkle, 1997).

L'humain, son corps, ses données et sa vie privée semblent donc devenir l'objet et le produit ultime en matière de nouvelles technologies et d'opérations de traitement de données, faisant,

inter alia, l'objet de négociation, de surveillance, de gestion, de prédiction, de prévision, de computation, de convention et de marchandisation ; pourtant, « la vie privée n'est pas un produit négociable » (Communication de la Commission, COM/2017/07), tout comme le corps humain ne peut être négociable ou en libre disposition moyennant une valeur patrimoniale ou marchande. Ce corps humain « porte notre personne, sa chair, nous donne un visage, nous identifie : nous sommes un homme, une femme, petit, grand, laid, beau, gros ou maigre. C'est aussi ce corps qui nous expose socialement, nous fait passer de l'identification à l'identité, individuelle certes, mais aussi collective »⁴⁹ (Etoa, 2017). Le corps physique est donc composé de chair et d'os, celui social de représentations, interactions, appartenances et évaluations, et, celui numérique de données, traces, signaux et bits ; l'ensemble interagit et nous expose socialement, et consacre notre faisceau d'identités multiforme et complexe caractérisant notre identité corporelle, civile, sociale, numérique, professionnelle ou personnelle.

Face au développement des technologies, des biotechnologies, des nanotechnologies ou encore des neurotechnologies, parallèlement à la montée en puissance de la société numérisée et de ceux qui se proclament des mouvements idéologiques du « bio-progressisme » ou du « transhumanisme/posthumanisme », il

⁴⁹ « Axée traditionnellement sur la protection du domicile et des correspondances, la notion de vie privée tend toutefois à dépasser ce domaine pour aborder les rivages de l'identité et de l'intimité. Le domaine de la sexualité en est l'exemple paradigmatique. » (Etoa, 2017).

faudrait plutôt, « tout au contraire, renforcer le lien entre les deux processus d'évolution, biologique (l'hominisation marquée par le souci de survie de l'espèce) et culturelle (l'humanisation et le respect de la dignité humaine) » (Delmas-Marty, 2011).

Cet ensemble révèle dès lors l'urgence qu'il y a à mieux cerner et à mieux préserver l'irréductible humain, sa singularité quelconque tout comme son appartenance à l'humanité, et à se détacher de l'impulsion et des aspirations réductibles visant, simplement et sporadiquement, à protéger et à préserver la vie humaine ou la dignité humaine. Finalement, « si l'on admet la singularité et l'égle appartenance comme composantes de l'humanité comprise comme pluralité d'êtres uniques, cela revient à dire que l'expression de crime contre l'humanité pourrait désigner toute pratique délibérée, politique, juridique, médicale ou scientifique, comportant **soit** la violation du principe de singularité (exclusion pouvant aller jusqu'à l'extermination de groupes humains réduits à une catégorie raciale, ethnique ou génétique ou, à l'inverse, fabrication d'êtres identiques), **soit** celle du principe d'égle appartenance à la communauté humaine (pratiques discriminatoires, telles que l'apartheid, création de « sur-hommes » par sélection génétique ou de « sous-hommes » par croisement d'espèces) » (Delmas-Marty, 1994).

Il s'avère que la vraie question n'est plus la seule atteinte à la vie privée ou à la protection des données à caractère personnel :

elle a plutôt changé de paradigme se positionnant, aujourd'hui, autour de l'atteinte à la liberté personnelle de se construire et de se développer, l'atteinte à la liberté de choisir et de déterminer sa propre identité ; et ce, particulièrement en raison du fait qu'avec tous les progrès et les développements technologiques entrepris, la distinction entre données personnelles et données non personnelles devient progressivement chimérique, complexe et énigmatique. À ce propos, l'OCDE précise qu'il est de plus en plus difficile de discerner les données à caractère personnel des données à caractère non personnel : « une fois qu'une donnée a été liée à l'identité réelle d'une personne, toute association entre ces données et une identité virtuelle brise l'anonymat de cette dernière » (OECD, 2013). Les techniques actuelles permettent souvent de relier les données relatives aux termes de recherche, aux sites Web visités, aux positions GPS ou à l'adresse IP à une personne identifiable (OECD, 2013).

Conclusion

En cette période de mutations technologique et sociale majeures, « l'enjeu essentiel est la préservation de l'équilibre complexe et fragile entre la construction de soi et le pouvoir formatif de la technologie, par lequel cette dernière façonne nos existences » (Khatchatourov & Chardel, 2016). Or, construire et développer son identité de manière libre et autonome requière la

préservation d'un « espace de jeu », un espace d'engendrement de la boucle action/perception, où la perception englobe et structure l'action, espace dans lequel l'initiative de négociation des frontières entre le soi et la société est laissée à l'individu et dans lequel il peut se retrouver dans l'intimité d'un chez soi tout en préservant sa vie privée mais surtout sa dignité humaine, son identité irréductible.

À l'heure actuelle, n'importe quelle manifestation de commentaire, opinion, avis, tweet, like, click ou autre, a la possibilité de provoquer des effets et/ou dégâts inimaginables par le passé, créant en conséquence des anomalies et des paradoxes, de nature technique, légale ou sociale. Dans le cadre d'une vision réductrice de la notion d'identité et de sa portée, chaque individu vit et évolue dans sa bulle personnalisée – caractérisant en soi un système complexe imbriqué parmi tant d'autres composant la société numérisée ; bulle dans laquelle il reste confiné et prévisible, réduit à un certain nombre de gestes, d'habitudes, de modèles et de discours, permettant de prédire ses pensées, comportements, actions, contributions et achats futurs. *In fine*, une capacité de traitement des sociétés en masse, à l'image du traitement de leurs données personnelles, paraît ainsi voir le jour et se cristalliser. En effet, il existe en droit une nette différence entre la liberté, d'une part, et la libre disposition, de l'autre, ramenant la liberté à une faculté d'agir ou de ne pas agir, donc à un pouvoir d'autodétermination : « la problématique se déplace

d'autant puisqu'il n'est plus question de se demander si l'homme est libre dans l'absolu, mais dans quelle mesure les normes juridiques offrent à l'individu la possibilité de se déterminer, autrement dit dans quelle mesure le droit permet à ses sujets d'opérer leurs propres choix » (Etoa, 2017) et d'être soi.

Mots-clés : identité ; complexité ; émergence ; révolution numérique ; données à caractère personnel ; autodétermination ; vie privée ; irréductible humain ; dignité humaine ; droit et libertés fondamentales.

Références

Agamben G. (1990), *La communauté qui vient : Théorie de la singularité quelconque*, Ed. Seuil, Coll. La librairie du XXI^e siècle, 128 p.

Baugnet L. (2001), *Métamorphoses identitaires*, P.I.E.- Peter Lang S. A., Éditions scientifiques internationales, 245 p.

Bourcier D. (2012), « Régulation juridique, complexité et sérendipité », In Bourcier D., Boulet R. et Mazzega P. (éds.), *Politiques publiques – Systèmes complexes*, Ed. Hermann, p. 31-48.

Bourcier D., Boulet R. et Mazzega P. (2012), « La gouvernance des systèmes complexes : Réflexions et recherches sur les politiques publiques aujourd'hui », In Bourcier D., Boulet R. et Mazzega P. (éds.), *Politiques publiques – Systèmes complexes*, Ed. Hermann, p. 9-18.

Casilli A. A. (2014), « Quatre thèse sur la surveillance numérique de masse et la négociation de la vie privée », In Conseil d'État, *Le numérique et les droits fondamentaux, Étude annuelle 2014*, La documentation française, Les rapports du Conseil d'État n° 65, p. 423- 434.

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

Castoriadis C. (1993), « Complexité, magma, histoire », In Castoriadis C., *Les Carrefours du Labyrinthe V*, Ed. Seuil, Coll. La couleur des Idées, 1997, p. 219-221.

Circulaire du 28 juillet 2011 relative à la présentation des dispositions de droit pénal général et de procédure pénale générale de la loi n° 2011-267 du 14 mars 2011 d'orientation et de programmation pour la performance de la sécurité intérieure, Bulletin Officiel du Ministère de la Justice et des libertés n° 2011-08 du 31 août 2011 (NOR : JUSD1121169C).

Cohen J. E. (2012), *Configuring the networked self – Law, Code, and the play of everyday practice*, Yale University Press, 350 p.

Commission des Communautés européennes (COM(90) 314), “Commission Communication on the protection of Individuals in relation to the processing of personal data in the Community and Information security”, COM(90) 314 final - SYN 287 and 288, Bruxelles, 13 Septembre 1990, 133 p.

Communication de la Commission (COM/2017/07) au parlement européen et au Conseil, « Échange et protection de données à caractère personnel à l'ère de la mondialisation », COM/2017/07 final, Bruxelles, 10 janvier 2017, 18 p.

CEDH, Cour (Plénière), *Affaire Gaskin c. Royaume-Uni* du 7 juillet 1989, requête n° 10454/83, série A n° 160.

Décret n° 2016-1460 du 28 octobre 2016 autorisant la création d'un traitement de données à caractère personnel relatif aux passeports et aux cartes nationales d'identité, JORF du 30 octobre 2016, Texte n° 18 sur 94.

Décret n° 2019-341 du 19 avril 2019 relatif à la mise en œuvre de traitements comportant l'usage du numéro d'inscription au répertoire national d'identification des personnes physiques ou nécessitant la

consultation de ce répertoire, JORF n° 0095 du 21 avril 2019, Texte n° 4 sur 90.

Décret n° 2022-676 du 26 avril 2022 autorisant la création d'un moyen d'identification électronique dénommé « Service de garantie de l'identité numérique » (SGIN) et abrogeant le décret n° 2019-452 du 13 mai 2019 autorisant la création d'un moyen d'identification électronique dénommé « Authentification en ligne certifiée sur mobile », JORF du 27 avril 2022, Texte n° 27 sur 171.

Delmas-Marty M. (1994), « Le crime contre l'humanité, les droits de l'homme, et l'irréductible humain », RSC 1994, p. 477.

Delmas-Marty M. (2011), Les forces imaginantes du droit (IV) – Vers une communauté de valeurs ?, Ed. Seuil, Coll. La couleur des idées, 448 p.

Delmas-Marty M. (1990), COSTE Jean-François, « Politique criminelle et droits de l'homme : vers une logique floue », In Revue interdisciplinaire d'études juridiques, N° 1, Vol. 24, p. 1-24. (DOI : 10.3917/riej.024.0001).

Delmas-Marty M. (2013), Résister, responsabiliser, anticiper, Ed. Seuil, Coll. Débats, 208 p.

Douzet F. (2014), « La géopolitique pour comprendre le cyberspace », In Hérodote N° 152-153, Cyberspace : Enjeux géopolitiques, Ed. La Découverte, 1er-2ème trimestre 2014, p. 3-25.

Erikson E. (2011), Adolescence et crise. La quête de l'identité, Ed. Flammarion, Coll. Champs Essais, 352 p.

Erikson E. (1982), Enfance et société, Ed. Delachaux et Niestlé, 285 p.

Etoa S. (2017), « Corps humain et liberté », In Cahiers de la Recherche sur les Droits Fondamentaux, Le corps humain saisi par le droit : entre

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

liberté et propriété, N° 15, p. 19-26 ; Disponible en ligne : <https://journals.openedition.org/crdf/543>

Forest D. (2012), « Identité(s) Numérique(s) : Tous authentifiés ? », In CNIL – Cahier IP Innovation & Prospective N° 01, Vie privée à l’horizon 2020, p. 38-40.

Foucault M. (2013), Surveiller et Punir, Ed. Gallimard, Coll. Tel, 360 p.

Guinchard S. et Debard T. (dir.) (2012), Lexique des Termes Juridiques, Dalloz, 19ème Ed., 918 p.

Groupe de travail « Article G29 » (G29), Avis 4/2007 sur le concept de données à caractère personnel, n° 01248/07/FR WP 136, adopté le 20 juin 2007, 29 p.

Heinich N. (2018), Ce que n’est pas l’identité, Ed. Gallimard, Coll. Le débat, 134 p.

Khalil Gibran G. (2015), The Prophet, Vintage Books New-York, reprinted ed., 112 p.

Khatchatourov A. et Chardel P.-A. (2016), « Fiche 1. La construction de l’identité dans la société contemporaine : enjeux théoriques », In Chaire Valeurs et Politiques des Informations Personnelles, Cahier N°1 Identités numériques, coordonné par C. Levallois-Barth, Institut Mines-Télécom, p. 11-16.

Lessig L. (2006), Code – Version 2.0, Ed. Basic Books, 410 p.

Lipiansky E.-M. (1992), Identité et Communication : l’expérience groupale, PUF, Coll. Psychologie sociale, 262 p.

Loi n° 2012-410 du 27 mars 2012 relative à la protection de l’identité, JORF n°0075 du 28 mars 2012, Texte n° 2 sur 102.

Loi n° 2018-493 du 20 juin 2018 relative à la protection des données personnelles, JORF n° 0141 du 21 juin 2018, Texte n° 1 sur 111.

Loveluck B. (2015), Réseaux, Libertés et Contrôle : Une généalogie politique d'internet, Ed. Armand Colin, Coll. Le temps des idées, 368 p.

Lugan J.-C. (2009), « La modélisation des systèmes complexes chez E. Morin et J.-L. Le Moigne », In Lugan J.-C., La systémique sociale, Ed. PUF, Coll. Que sais-je ?, p. 99 à 116.

Morin E. (2014), La Méthode 1. La Nature de la nature, Ed. Seuil, Coll. Points Essais, 416 p.

Morin E. (1990), Penser l'Europe, Ed. Gallimard, Coll. Folio actuel n° 20, 288 p.

Mucchielli A. (2013), L'Identité, PUF, Coll. Que sais-je ?, 128 p.

OECD (2013), "Exploring the Economics of Personal Data: A Survey of Methodologies for Measuring Monetary Value", n° DSTI/ICCP/IE/REG(2011)2/FINAL, OECD Digital Economy Papers, N° 220, OECD Publishing, 39 p. ; Disponible en ligne: <http://dx.doi.org/10.1787/5k486qtxldmq-en>

Ricœur P. (1990), Soi-même comme un autre, Éd. Seuil, Coll. L'ordre philosophique, 432 p.

Sallabery J.-C. (2021), « Complexité : jalons pour une définition », In ISTE OpenScience 21, ISTE Ltd. London, UK – openscience.fr ; Disponible en ligne: http://www.openscience.fr/IMG/pdf/iste_ingecog21v5n1_1.pdf

Turkle S. (1997), "Computational technologies and images of self", In Social Research, In Technology and the rest of culture, N° 3, Vol. 64, p. 1093-1111.

Varela F. J. (1996), Invitation aux sciences cognitives, Ed. Seuil, Coll. Points sciences, 123 p.

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

Zavalloni M. (2007), *Égo-écologie et Identité : une approche naturaliste*, PUF, Coll. Psychologie sociale, 216 p.

Zavalloni M. et Louis-Guérin C. (1984), *Identité sociale et Conscience : Introduction à l'égo-écologie*, Presses Universitaires de Montréal, 284 p.

Zavalloni M. (1972), « L'identité psychosociale, un concept à la recherche d'une science », In Moscovici S. (éd.), *Introduction à la psychologie sociale*, t. II, Librairie Larousse, p. 245-265.

COMPLEX SYSTEMS SCIENCE AND URBAN SCIENCE: TOWARDS APPLICATIONS TO SUSTAINABILITY TRADE-OFFS IN TERRITORIAL SYSTEMS

J. Raimbault^{1,2,3,4} & D. Pumain⁴

¹LASTIG, Univ Gustave Eiffel, IGN-ENSG

²CASA, University College London

³UPS CNRS 3611 ISC-PIF

⁴UMR CNRS 8504 Géographie-cités, Université Paris 1 Panthéon-
Sorbonne

juste.raimbault@ign.fr

Abstract

Urban systems are at the core of current sustainability concerns, and their study from a complexity perspective has a long history in several disciplines. We survey this literature and discuss future research directions relevant to sustainable planning, in particular the construction of integrative approaches. We finally illustrate this research program with the coupling of urban simulation models to explore trade-offs between sustainable development goals in systems of cities.

Keywords: SDGs; Urban complexity; Model coupling; Sustainability trade-offs

Résumé

Les systèmes urbains sont au cœur des problématiques actuelles de durabilité, et leur étude vue sous l'angle de la complexité témoigne d'une longue histoire dans différentes disciplines. Nous présentons cette littérature et discutons de futures directions de recherche pertinentes pour la planification durable, notamment la construction d'approches intégratives. Nous illustrons finalement ce programme de recherche par le couplage de modèles de simulation urbains pour explorer des compromis entre objectifs de développement durable dans les systèmes de villes.

Mots-clés: SDGs; Complexité urbaine; Couplage de modèles; Compromis pour la durabilité

1 - Introduction

The main ecological and societal challenges of this early 21st century are tightly intertwined into complex problems, partly captured by the Sustainable Development Goals (SDGs) as they were put forward by the United Nations (2016). These imply contradictory objectives implemented by multiple stakeholders at various scales. Cities and more generally urban systems are a central aspect to tackle these, concentrating simultaneously many issues (congestion, emissions, increased economic activities) but also solutions (social and technological innovation, economies of scale) related to sustainable development. While many disciplines have extensively studied these urban sustainability

questions (urban economics, urban geography, sustainability science, political science to give a few), the rise of an interdisciplinary urban science (Batty, 2021), inheriting from former strong links between complexity science and urban questions, appears as a relevant candidate to bring new answers to the sustainability conundrum. Indeed, when looking at complexity from a theoretical viewpoint as Edgar Morin put it throughout the whole transdisciplinary perspective of *La Méthode* (Morin, 2014), accounting for the intrinsic complexity of systems (whatever the operational definition of complexity used, e.g. chaotic dynamics or the presence of emergence) cannot be dissociated from a multi-scale understanding of systems, and therefore is a knowledge that transcends traditional disciplines. From an empirical viewpoint, an integration of dimensions seems necessary to handle the SDGs, due to the numerous negative (trade-offs) or positive (co-benefits) interactions between these goals (Nilsson et al., 2018).

This contribution aims at giving an overview of this research perspective focusing on complexity and urban systems. More precisely, we survey the existing links between complex systems approaches and urban science, suggest some paths forward for the application of such integrative approaches to the planning of sustainability, and illustrate this with a case study of urban system dynamics models applied to the search of trade-offs between SDGs.

2 - Complexity and urban science

We first give a broad overview of how scientific paradigms related to complexity have been applied to the study of urban systems in the literature. This is far from an exhaustive review, as the goal is rather to highlight the diversity of methods and the overarching complexity of urban systems.

The link between complexity approaches and the study of urban systems has historically always been strong, starting already with the precursors. The systems dynamics modelling technique, which was developed in the early 70s through the transfer of concepts from cybernetics (Schwaninger and Rios, 2008), found its most notable application with the Meadows report on the limits of growth (Meadows et al., 1974), but was also an important entry for enquiries on urban complexity at larger scales: Forrester's (1970) work on urban dynamics was among the first to propose a holistic simulation approach of such systems. This modelling technique later diffused into quantitative geography, with applications at regional scales (Chamussy et al., 1984), in some cases related to decision-making stakeholders.

Another stream of research with fruitful applications to the study of cities was fractals, in particular to the understanding and quantification of urban form (Batty and Longley, 1994). A fractal nature of the urban fabric and different fractal dimensions have implications for various urban phenomena, including for

example social dynamics, urban climate, energy efficiency, access to amenities. This approach is still active nowadays, in the theoretical (Chen, 2018), empirical (Salat et al., 2018) or applied fields (Frankhauser et al., 2018).

The physics of dissipative structures explored in the 80s following Prigogine also found rapid applications to the modelling of urban systems. According to Pumain et al. (1984), an intra-urban dynamical model proposed by P. Allen is relevant for planning application, while a comparable model by A. Wilson has a more robust theoretical basis while being more difficult to apply. Relatedly, the foundational work by Wilson (1971) on spatial interaction modelling is a direct application of entropy maximisation concepts imported from statistical physics. Around the year 2000 flourished different fields related to complexity. The study of complex networks witnessed a theoretical renewal associated with new empirical observation, data and models with rapid applications to the study of urban networks (Derruder and Niel, 2018; Neal and Rozenblat, 2022) or urban street networks (Jiang and Claramunt, 2004) - the later being already investigated with a different theoretical background for a long time through the space syntax approach for example (Hillier et al., 1976).

The study of urban scaling laws somehow got a lot of attention at around the same time. They express different urban indicators as scaling with city size, either sub- or super-linearly through a

power-law (Pumain, 2004). The particular case of city size power law had already been known and studied since at least the beginning of the 20th century with precursors such as G. Zipf. Explaining the striking regularity of such power laws across urban systems is still an open question (Ribeiro and Rybski, 2021), for which inter-urban innovation dynamics are a possible explanation for example (Pumain et al., 2006).

This last example relates to the study of urban evolution, in the sense of a geographical theory accounting for the complex and adaptive nature of urban systems introduced by Pumain (1997), and which can be interpreted as an extension of social and cultural evolution (Raimbault, 2020a). This stream of research has been fruitful for the development of complexity approaches in urban studies, with among the first agent-based models applied to a geographical system (Sanders, Pumain et al., 1997), and more recently a collection of urban systems simulation models applied to urban systems worldwide and an associated set of tools and methods to explore and validate spatial simulation models (Pumain and Reuillon, 2017) (Reuillon et al., 2013).

The use of Cellular Automata models to simulate the growth of urban form also quickly developed at the same time (Batty, 1997). Many operational land-use change models are now based on this paradigm. The question of urban morphogenesis, in particular how simple processes can be complementary to simulate urban growth (Raimbault, 2020b) and the link between

urban form and function, remains rather open. The transfer of complexity paradigms originating in biological sciences, such as the field of artificial life, finds relevant applications in the study of urban systems. The study of co-evolution in urban systems is core to Pumain's (2018) theory of urban system, and was recently modelled in the case of transportation networks and territories by Raimbault (2018).

These examples of complexity approaches of urban systems are not exhaustive - other complexity related fields such as participatory modelling, game theory, chaos, statistical physics, microsimulation, artificial life, artificial intelligence, etc., have found application in urban settings; see e.g. (Raimbault, 2020c) for a literature mapping in the case of artificial life). This however illustrates the productive exchanges between urban science and complexity in history and in many contemporary fields still very active.

3 - Perspectives towards sustainable planning

Within this broad framework of urban complexity, we can sketch some research directions that we estimate crucial to address the current challenge of sustainable transitions. More particularly, we postulate that the construction of integrated approaches will be fruitful for sustainable planning. This position was developed with more details by Raimbault (2021a). Although a proper definition of "integration" still lacks, we consider the coupling of heterogeneous simulation models as a medium to couple and

thus integrate perspectives. Following the Complex Systems roadmap (Chavalarias et al., 2009), integration can either be horizontal (transversal research questions spanning all types of complex systems) or vertical (construction of multi-scalar integrated disciplines). In terms of urban modelling, this translates in the case of horizontal integration through multi-modelling (Cottineau et al., 2015), model benchmarking (Raimbault, 2020c) and model coupling. This horizontal integration is necessary to capture the complementary dimensions of urban systems, and the potentially contradictory SDGs. Vertical integration relates to the construction of multi-scalar models accounting for both top-down and bottom-up feedbacks between scales, which is still an open issue but remains essential for the design of policies suited for each territory (Rozenblat and Pumain, 2018). The three typical scales to be accounted for are the micro scale of intra-urban processes, the meso scale of the urban area, and the macro scale of the system of cities (Pumain, 2018).

Within this context, reflexivity is key to ensure a consistent horizontal integration, and the development of associated tools providing literature mapping and corpus exploration is a component of this research program (Raimbault et al., 2021). This furthermore requires a full practice of open science, to understand and validate the components integrated. This validation must furthermore be achieved using dedicated

methods and tools. The OpenMOLE platform for model exploration (Reuillon et al., 2013) provides a seamless framework to embed models, couple them through the workflow system, and apply state-of-the-art sensitivity analysis and validation methods using high performance computing.

To summarise, we claim that sustainable planning taking into account contradictory SDGs can be achieved using integrated approaches. A first step of this long-term research objective relies on the coupling of heterogeneous urban simulation models and the construction of multi-scale urban models, both facilitated by innovative model validation methods and tools. The question of the actual transfer of results to policies remains an open question at this stage, but for which several suggestions can be done, including e.g. participatory modelling and the interactivity of models (see (Raimbault, 2021a)).

In the remainder of this contribution, we illustrate the application of this framework to the specific case of trade-offs between SDGs in synthetic systems of cities, using systems of cities simulation models.

4 - Trade-offs between SDGs in systems of cities

4.1 - Urban dynamics and innovation diffusion: bi-objective trade-offs

In (Raimbault and Pumain, 2022), an urban system dynamics model coupling population dynamics with the diffusion of

innovation is applied to the search for bi-objective trade-offs in synthetic systems of cities. More precisely, the urban evolution model described by (Raimbault, 2020a) based on the innovation diffusion model by (Favaro and Pumain, 2011) considers cities characterised by their population and an “urban genome” which consists in adoption shares of a given innovation. Iteratively, the model updates population through spatial interaction models, with an attractivity given by the level of innovation. In turn, innovations are diffused between cities using another spatial interaction model. Finally, new innovations emerge randomly in cities following a scaling law of population. The model is applied to synthetic systems of cities, and two SDGs are captured using proxies for transport emissions (spatial interaction flows) and for innovation. Using a genetic algorithm for optimisation, we obtain a Pareto front between these two objectives, confirming the existence of a trade-off in this setting. Varying the scaling exponent for new innovations, we find that a more balanced innovation system is always preferable rather than something highly centralised.

4.2 - Towards many-objective trade-offs

The previous results remain highly stylised and within a reduced dimension objective space. Current work in progress aims at extending this work on different points, for which several difficulties however arise.

The first extension is to investigate whether trade-offs occur in practice. The investigation of empirical stylised facts on SDGs proxies compared across different urban systems would provide an insight, but remains limited by the lack of unified and comparable databases. As a comparison, constructing a consistent database for populations including 7 large urban systems worldwide necessitated a large effort including an ERC project and several PhD students (Pumain, 2015). Extending this to multiple dimensions requires mapping existing databases, potentially undergoing some time-consuming collection work, and finally harmonising the data to ensure comparability.

A second and related point lies in the parametrisation of simulation models on real configurations rather than synthetic systems. In the particular case of urban dynamics and innovation diffusion, population data from (Pumain, 2015) has already been used to benchmark such macroscopic simulation models (Raimbault, Denis and Pumain, 2021). The innovation data is however much more problematic. A standard entry is to use patent data as a proxy for innovation. Recent patent datasets have been geocoded in terms of inventor address, for example by (De Rassenfosse et al., 2019). Historical geocoded patent data (for example before 1976 for the US Patent Office), which is needed for this model running on long time scales, is much more rare to find. An initiative to build such an open database for Europe is currently ongoing by (Bergeaud and Verluise, 2021). Then,

either an extension of the innovation diffusion model to include multiple types of innovations (matrix genome instead of a vector genome), or a selection of typical technological classes that were empirically correlated with city attractivity, would be necessary. An alternative approach can rely on the semantic content of patents rather than their exogeneous classification (Bergeaud et al., 2017) to better characterise the spatial diffusion of innovation and parametrise the model using the principal component across semantic dimensions.

Finally, extending the study of trade-offs across other SDGs - there are 17 distinct goals in total, with numerous subgoals and quantitative indicators - is an important research direction. The aforementioned model shares a common basis with other urban systems dynamics models (Pumain and Reuillon, 2017), and thus can be coupled with these to include other dimensions. An economic exchange model described by (Cottineau et al., 2015) allows including the aspects of wealth and inequalities, while a co-evolution model between cities and transport networks introduced by (Raimbault, 2021b) accounts for infrastructure. These layers - which were separately benchmarked by (Raimbault, Denis and Pumain, 2021) - are strongly coupled into a multi-modelling framework. The resulting simulation model provides 5 proxy indicators for SDGs, and is being explored and optimised on these possibly conflicting dimensions using a many-objective genetic optimisation algorithm.

Conclusion

Complexity approaches have always cultivated deep ties with studies of urban systems in different disciplines and more recently with the emerging urban science. We believe that the future of urban sustainability cannot be conceived without such a multidimensional and complex approach, and therefore suggest that one relevant research direction among others to achieve this is the construction of integrated approaches, in practice by coupling urban simulation models and building multi-scale urban models.

References

- Batty, M. (1997). Cellular automata and urban form: a primer. *Journal of the American planning association*, 63(2), 266-274.
- Batty, M. (2021). Defining urban science. In *Urban Informatics* (pp. 15-28). Springer, Singapore.
- Batty, M., & Longley, P. A. (1994). *Fractal cities: a geometry of form and function*. Academic press.
- Bergeaud, A., Potiron, Y., & Raimbault, J. (2017). Classifying patents based on their semantic content. *PloS one*, 12(4), e0176310.
- Bergeaud, A., & Verluise, C. (2021). Patentcity: A century of innovation: New data and facts.

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

Chavalarias, D., Bourguine, P., Perrier, E., et al. (2009). French roadmap for complex systems 2008-2009.

Chen, Y. G. (2018). Logistic models of fractal dimension growth of urban morphology. *Fractals*, 26(03), 1850033.

Chamussy, H., GUÉRIN, J. P., Le Berre, M., & Uvietta, P. (1984). La dynamique de systèmes une methode de modélisation des unités spatiales. *L'Espace géographique*, 81-93.

Cottineau, C., Reuillon, R., Chapron, P., Rey-Coyrehourcq, S., & Pumain, D. (2015). A modular modelling framework for hypotheses testing in the simulation of urbanisation. *Systems*, 3(4), 348-377.

De Rassenfosse, G., Kozak, J., & Seliger, F. (2019). Geocoding of worldwide patent data. *Scientific data*, 6(1), 1-15.

Derudder, B., & Neal, Z. (2018). Uncovering links between urban studies and network science. *Networks and Spatial Economics*, 18(3), 441-446.

Favaro, J. M., & Pumain, D. (2011). Gibrat Revisited: An Urban Growth Model Incorporating Spatial Interaction and Innovation Cycles. *Geographical Analysis*, 43(3), 261-286.

Forrester, J. W. (1970). Urban dynamics. *IMR; Industrial Management Review (pre-1986)*, 11(3), 67.

Frankhauser, P., Tannier, C., Vuidel, G., & Houot, H. (2018). An integrated multifractal modelling to urban and regional planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 67, 132-146.

Hillier, B., Leaman, A., Stansall, P., & Bedford, M. (1976). Space syntax. *Environment and Planning B: Planning and design*, 3(2), 147-185.

Jiang, B., & Claramunt, C. (2004). Topological analysis of urban street networks. *Environment and Planning B: Planning and design*, 31(1), 151-162.

Meadows, D. L., Behrens, W. W., Meadows, D. H., Naill, R. F., Randers, J., & Zahn, E. (1974). *Dynamics of growth in a finite world* (p. 637). Cambridge, MA: Wright-Allen Press.

Morin, E. (2014). *La méthode*. Editions du Seuil, Paris.

Neal Z. P. & Rozenblat C. (2022) *Handbook of Cities and Networks*. Northampton MA: Edward Elgar Pub.

Nilsson, M., Chisholm, E., Griggs, D., et al. (2018). Mapping interactions between the sustainable development goals: lessons learned and ways forward. *Sustainability science*, 13(6), 1489-1503.

Pumain, D. (1997). Pour une théorie évolutive des villes. *L'Espace géographique*, 119-134.

Pumain, D. (2004). Scaling laws and urban systems. *Santa Fe Institute, Working Paper*, (04-02), 002.

Pumain, D. (2018). An evolutionary theory of urban systems. In *International and transnational perspectives on urban systems* (pp. 3-18). Springer, Singapore.

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

Pumain, D., Saint-Julien, T., & Sanders, L. (1984). Vers une modélisation de la dynamique intra-urbaine. *L'Espace géographique*, 125-135.

Pumain, D., Paulus, F., Vacchiani-Marcuzzo, C., & Lobo, J. (2006). An evolutionary theory for interpreting urban scaling laws. *Cybergeog: European Journal of Geography*.

Pumain, D., Swerts, E., Cottineau, C., et al. (2015). Multilevel comparison of large urban systems. *Cybergeog: European Journal of Geography*.

Pumain, D., & Reuillon, R. (2017). *Urban dynamics and simulation models*. Cham: Springer International Publishing.

Raimbault, J. (2020a). A model of urban evolution based on innovation diffusion. In *The 2020 Conference on Artificial Life* (pp. 500-508). MIT Press.

Raimbault, J. (2020b). A comparison of simple models for urban morphogenesis. *arXiv preprint arXiv:2008.13277*.

Raimbault, J. (2020c). Cities as they could be: Artificial life and urban systems. *arXiv preprint arXiv:2002.12926*.

Raimbault, J. (2021a). Integrating and validating urban simulation models. *arXiv preprint arXiv:2105.13490*.

Raimbault, J. (2021b). Modeling the co-evolution of cities and networks. In *Handbook of Cities and Networks* (pp. 166-193). Edward Elgar Publishing.

Raimbault, J., Denis, E., & Pumain, D. (2020). Empowering urban governance through urban science: Multi-scale dynamics of urban systems worldwide. *Sustainability*, *12*(15), 5954.

Raimbault, J., Chasset, P. O., Cottineau, C., Commenges, H., Pumain, D., Kosmopoulos, C., & Banos, A. (2021). Empowering open science with reflexive and spatialised indicators. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, *48*(2), 298-313.

Raimbault, J., & Pumain, D. (2022). Trade-offs between sustainable development goals in systems of cities. *Journal of Urban Management*.

Reuillon, R., Leclaire, M., & Rey-Coyrehourcq, S. (2013). OpenMOLE, a workflow engine specifically tailored for the distributed exploration of simulation models. *Future Generation Computer Systems*, *29*(8), 1981-1990.

Ribeiro, F. L., & Rybski, D. (2021). Mathematical models to explain the origin of urban scaling laws: a synthetic review. *arXiv preprint arXiv:2111.08365*.

Rozenblat, C., & Pumain, D. (2018). Conclusion: Toward a methodology for multi-scalar urban system policies. *International and Transnational Perspectives on Urban Systems*, 385.

Salat, H., Murcio, R., Yano, K., & Arcaute, E. (2018). Uncovering inequality through multifractality of land prices: 1912 and contemporary Kyoto. *PloS one*, *13*(4), e0196737.

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

Sanders, L., Pumain, D., Mathian, H., Guérin-Pace, F., & Bura, S. (1997). SIMPOP: a multiagent system for the study of urbanism. *Environment and Planning B: Planning and design*, 24(2), 287-305.

Schwaninger, M., & Ríos, J. P. (2008). System dynamics and cybernetics: a synergetic pair. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 24(2), 145-174.

United Nations (2016). *The Sustainable Development Goals*.

Wilson, A. G. (1971). A family of spatial interaction models, and associated developments. *Environment and Planning A*, 3(1), 1-32.

LE CERVEAU, UN SYSTÈME COMPLEXE

Salma Mesmoudi

Université Paris1 Sorbonne-Panthéon

MATRICE

CESSP-UMR 8209

Résumé :

Le cerveau est un système complexe à plusieurs échelles d'espace et de temps peut être décomposé en sous-composants qui interagissent entre eux. Il est important de noter que les propriétés graphiques des réseaux du cerveau humain ont été directement liées au fonctionnement du système par des corrélations avec des variables comportementales et cognitives, notamment la fluidité verbale, le QI et la précision de la mémoire de travail. Cependant, certaines études ont mis en évidence correspondance des propriétés métaboliques du cerveau avec l'organisation du réseau, ce qui suggère des contraintes énergétiques sur l'architecture sous-jacente du connectome. Ces résultats sont cohérents avec nos travaux caractérisant l'intégration topographique de l'organisation du réseau cérébral dans l'espace et dans le temps.

Mots clés : cerveau, complexité, topographie, intégration

Abstract :

The brain is a complex system at multiple scales of space and time that can be broken down into subcomponents that interact with each

other. Importantly, the graphical properties of human brain networks have been directly linked to system functioning through correlations with behavioral and cognitive variables, including verbal fluency, IQ, and working memory accuracy. However, some studies have shown correspondence of metabolic properties of the brain with the organization of the network, suggesting energetic constraints on the underlying architecture of the connectome. These results are consistent with our work characterizing the topographic integration of brain network organization in space and time.

Key words : brain, complexity, topography, integration

I. Introduction

Le cerveau est un organe complexe que les chercheurs en neurosciences et d'autres disciplines continuent d'examiner en détail. Cette complexité se traduit par la multiplicité des échelles (l'échelle spatiale et temporelle), son irréductibilité, ainsi que l'émergence qui pourrait être un cadre pour la relation esprit-cerveau (Bassett & Gazzaniga, 2011).

L'organisation anatomique et fonctionnelle du cerveau des mammifères englobe de multiples sous-réseaux, dotés de connexions intrinsèques denses et regroupés sur différents sites anatomiques. Ces réseaux sont relativement spécialisés dans le traitement et le routage de différents flux d'informations liés à l'intégration sensorimotrice et cognitive, par exemple le système visuel, avec ses régions sensorielles précoces et ses multiples flux (ventraux et dorsaux). Ils sont reliés les uns aux autres de

manière partiellement hiérarchique (Eckert et al., 2008). Les systèmes modaux, par exemple les systèmes visuels, auditifs, somatosensoriels, y compris les régions primaires et secondaires, sont intégrés au niveau des régions bimodales ou multimodales, pour le transfert d'informations inter-modales, elles-mêmes intégrées au niveau des régions d'association d'ordre supérieur, qui sont souvent en position de hubs par rapport à ces autres systèmes cérébraux (van den Heuvel & Sporns, 2011). Pour que l'organisation de ces réseaux soit efficace, il est important qu'ils « se plient » à certaines contraintes. Ces contraintes impliquent que : 1) les régions du cerveau sont énergiquement actives de façon différentielle et évolutive, soutenant des quantités variables de développement et de développement des synapses ou de plasticité. 2) Sur le plan anatomique, ce principe organisationnel de modularité hiérarchique est potentiellement compatible avec une pression évolutive pour la réduction de la taille des synapses et de la plasticité de manière générale. 3) Les régions proches les unes des autres dans l'espace physique interagissent fortement alors que les connexions anatomiques ou les interactions fonctionnelles à longue portée relient les régions entre elles avec les modules disparates. 4) Le pliage du feuillet cortical ainsi que son positionnement à l'extérieur du cerveau permet au schéma du réseau complexe du cerveau de contenir des connexions à courte portée énergiquement efficaces.

Parmi les solutions architecturales documentés dans la littérature, l'architecture en anneau semble optimale (Mesmoudi et al., 2013) pour mettre en œuvre un réseau résilient en temps réel de l'accès aux informations. Ce type d'architecture présente un coût d'énergie inférieur à celui des réseaux entièrement connectés, tout en préservant un niveau élevé de résilience. Les architectures en anneau sont très évolutives et offrent une résilience grâce à la redondance. Pour que cette architecture réponde aux contraintes cités plus haut, il est impératif que :

1) les régions cérébrales sensorimotrices d'ordre supérieur qui intègrent les informations sensorimotrices en cours devraient être connectées deux par deux en une chaîne fermée ;

2) des ondes progressives mesurables de signaux électriques devraient circuler le long de cet anneau anatomique, reflétant l'acheminement de la récupération des informations dans le magasin distribué ;

3) le système global devrait être résistant aux petites lésions mais très sensible aux lésions plus importantes ;

4) l'anneau et le système global de traitement en temps réel devraient contenir des connexions fortes et à courte portée ;

5) néanmoins, la dépense énergétique devrait être relativement faible dans ce système.

Dans le reste de l'article nous développerons la capacité de cette architecture en double anneaux à répondre aux spécificités et aux contraintes.

II. Intégration en temps réel dans l'anneau VSA et intégration multi-temporelles dans l'anneau PTF

L'architecture en double anneaux entrelacée semble également souligner un double processus d'intégration : l'anneau VSA effectue une intégration multimodale rapide en temps réel des informations sensorimotrices, pour contrôler les interactions avec l'environnement, tandis que l'anneau PTF effectue des intégrations multi-temporelle (c'est-à-dire mettre en relation les représentations passées, présentes et futures à différentes échelles temporelles), comme décrit ci-dessous.

Le traitement sensorimoteur dans l'anneau VSA implique de fortes contraintes "temps réel", conçues pour relier ensemble diverses sources d'informations auditives, visuelles et somatomotrices et pour contrôler le comportement réel. Ces interactions en temps réel sont importantes, non seulement au sein de chaque modalité comme sensorielle ou motrice, mais aussi pour toutes leurs interactions bimodales : entre visuel et moteur (par exemple, saisir, atteindre, imiter) ; entre information auditive et somatomotrice (par exemple, reconnaître et produire des phonèmes) ; et entre information auditive et visuelle

(importante pour la communication). Nos résultats montrent que l'anneau PTF met en oeuvre au moins quatre groupes principaux de fonctions : (1) régulation biologique, olfaction, goût et émotion, (2) mémoire de travail et attention, (3) fonctions cognitives supérieures et cognition sociale et (4) langage. Les processus neuronaux communs qui soutiennent ces fonctions (par opposition aux processus sensorimoteurs en temps réel) intègrent différentes sources d'information de manière "multi-temporelle", à différentes échelles de temps, y compris le rappel du passé et les projections dans le futur.

Les régulations et les rythmes biologiques (dans la partie médiane et antérieure de l'anneau PTF (Laird et al., 2011), fonctionnent à différentes échelles de temps et sont fortement influencés par (1) l'hypothalamus et les régulations hormonales allant de quelques minutes à quelques jours et mois et par (2) le système dopaminergique impliqué dans la conduite, la récompense et le renforcement, allant de quelques minutes à quelques heures. De même, les émotions sont des réactions prolongées, qui durent beaucoup plus longtemps que les stimuli sensoriels émotionnels induits : l'olfaction et le goût produisent des effets neuronaux qui durent beaucoup plus longtemps que ceux produits par la vision, l'audition ou le toucher en temps réel.

La planification et la mémoire de travail (dans le réseau frontal latéral de l'anneau PTF) sont basées sur l'intégration de

l'information à travers le temps par des activations neuronales soutenues et sont capables d'intégrer dans une même séquence, plusieurs événements sensoriels et moteurs séparés par des délais longs et variables (Kovach et al., 2012; Mesulam et al., 2002; Milner et al., 1985; Northoff & Bermpohl, 2004; Vogeley & Fink, 2003). Les fonctions cognitives supérieures (dans la partie fronto-pariétale médiane de l'anneau PTF) nécessitent l'intégration d'informations à différentes échelles temporelle du passé (mémoire), du présent et du futur (Andrews-Hanna et al., 2010; Buckner et al., 2009; Decety & Sommerville, 2003; Gallagher & Frith, 2003; Gusnard et al., 2001; Kiviniemi et al., 2011; Schacter et al., 2007; Yan et al., 2009). Ces régions sont actives à la fois lorsque les sujets considèrent leur état mental actuel et lorsqu'ils font des déductions sur l'état mental des autres (théorie de l'esprit et de la cognition sociale) (Buckner & Carroll, 2007; Fuster, 2006; Ochsner et al., 2004; Saxe & Kanwisher, 2003). Ces processus peuvent durer de quelques minutes à quelques heures.

Le traitement du langage (partie temporo-pariéto-frontale gauche de l'anneau PTF) nécessite la formation de représentations conceptuelles significatives intégrant les événements et leurs conséquences sur de longues lignes de temps. Il est frappant de constater que les régions de l'anneau PTF correspondent à des régions qui sont plus fortement activées pour les mots ayant un sens que pour les pseudo-mots, qui, en

revanche, ne sont traités que dans l'anneau VSA [11]. L'anneau PTF a une topographie assez similaire aux activations cérébrales liées au traitement sémantique (Binder et al., 2009; Buckner et al., 2008; Fuster & Bressler, 2012). En revanche, le traitement de la parole nécessite un traitement en temps réel de la perception de la forme visuelle, de l'articulation motrice et de la perception auditive et, par conséquent, les TBN correspondants se trouvent dans l'anneau

VSA. Les processus doubles que nous postulons à travers les deux anneaux (c'est-à-dire l'intégration en temps réel et multi-temporelle), sont proches du processus double proposé par Fuster (Fuster, 2006; Kravitz et al., 2011) avec à la fois des cycles perception-action et des processus de mémoire de travail (WM pour working memory). Un cycle de perception-action nécessite une contiguïté temporelle entre les différents signaux. En revanche, la mémoire de travail basée sur une activation neuronale soutenue est essentielle à l'intégration des informations dans le temps pour le comportement, le raisonnement et le langage, qui font le pont entre le temps et le cycle de perception/action. La WM a une fonction rétrospective de rétention et une fonction prospective d'anticipation et de préparation des actions à venir. Elle permet de stocker en mémoire les structures temporelles des stratégies, des mélodies, des phrases, des scripts, etc. De plus, les processus de la WM dépendent des interactions entre les réseaux à grande échelle du

cortex cérébral, impliquant la co-activation de plusieurs zones corticales non contiguës (par exemple, une région préfrontale latérale et, une région du cortex postérieur).

EEG : Les réponses sélectives aux objets sont apparues dans les régions pariétales, frontales et temporales liées à l'utilisation d'outils et à la reconnaissance d'objets (Vlcek et al., 2020).

III Avantages topologiques de l'entrelacement

L'architecture en deux anneaux entrelacés constitue un avantage topologique important, car elle crée de multiples interfaces entre les deux anneaux dans chaque hémisphère pour une grande variété de fonctions cognitives et sensorimotrices. Tout d'abord, l'architecture entrelacée forme trois grandes interfaces entre les deux anneaux, qui correspondent à trois grands sillons : le sillon pré-central, le sillon STS et le sillon intrapariétal. Le sillon pré-central forme une interface VSA-PTF pour les tâches associant des objectifs multi-temporelle et des sous-objectifs (zones frontales) avec une commande en temps réel de chaque action (zones somatomotrices). Le sillon STS forme une deuxième interface VSA-PTF pour les tâches associant la parole en temps réel (les aires temporales supérieures) à la signification multi-temporelle des mots (les aires temporales inférieures). Le sillon intrapariétal forme une troisième interface VSA-PTF pour les tâches impliquant le

traitement visuomotrice en temps réel de scènes et d'événements et le traitement multi-temporelle de ces scènes en termes d'interactions sociales.

Deuxièmement, l'architecture entrelacée place les zones pariétales associatives BA#39 et 40 (qui font partie de l'anneau PTF) dans le trou central de l'anneau VSA à la confluence des flux de traitement visuel, spatial, somatosensoriel et auditif (voir (Golland et al., 2007)). Cette même région BA#39 est également liée à la partie médiane de l'anneau PTF qui est impliquée dans les représentations des intentions et des interactions sociales. La BA#39 peut donc transformer l'observation en temps réel des actions, des scènes et des événements traités dans l'anneau VSA en prédictions et interprétations à plus long terme liées aux intentions et aux interactions sociales traitées dans l'anneau PTF (voir (Fair et al., 2007, 2008)). Troisièmement, l'architecture entrelacée place les régions somatomotrices VSA dans une position centrale entre les zones pariétale et frontale du PTF, qui sont elles-mêmes reliées par le réseau pariétal-frontal. Les régions somatomotrices peuvent commander des actions en fonction à la fois des objectifs et des sous-objectifs (liens avec les régions frontales) et de l'interprétation des scènes (liens avec les régions pariétales).

IV L'architecture en double anneau et la plasticité du cerveau

Il existe des preuves bien documentées de changements neuroplastiques intermodaux importants à la suite d'une privation sensorielle chez les personnes atteintes de cécité ou de surdité précoce. Plus précisément, il semble qu'il y ait un recrutement fonctionnel des zones corticales normalement associées au traitement de la modalité sensorielle perdue par les autres sens intacts. Ces changements neuroplastiques peuvent être de nature adaptative et compensatoire (Bavelier & Neville, 2002; Pascual-Leone et al., 2005; Rauschecker, 1995). Par exemple, le cortex occipital est normalement associé au traitement des informations visuelles, mais en cas de cécité, il est recruté pour traiter les informations tactiles (y compris la lecture du braille et la reconnaissance de formes tactiles complexes), les informations auditives (pour la localisation des sons et le traitement de la parole) et les tâches de mémoire verbale (Collignon et al., 2007; Merabet et al., 2005; Théoret et al., 2004).

Dans une étude qui a exploré à l'aide de l'IRMf les corrélats neuronaux associés au traitement du langage chez un individu unique, aveugle précoce, sourd congénital et possédant un haut niveau de fonction langagière, des résultats très intéressants ont été obtenus pour l'anneau VSA (Obretenova et al., 2010). En effet, la tractographie basée sur l'imagerie du tenseur de diffusion a révélé des différences compatibles avec une connectivité

occipitale-temporale accrue chez le sujet sourd-aveugle. Les zones corticales activées chez ce sujet sourd-aveugle sont cohérentes avec les régions corticales caractéristiques du VSA.

V L'architecture en double anneau et la gestion énergétique.

À l'aide de données de la Tomographie à Emission de Positons (TEP) existantes et de parcellations de réseaux fonctionnels, certains auteurs ont examinés les différences métaboliques dans les réseaux fonctionnels corticaux différemment myélinisés. Les réseaux d'association cognitive légèrement myélinisés ont tendance à présenter une glycolyse aérobie plus élevée que les réseaux sensori-moteurs précoces fortement myélinisés (Glasser et al., 2014). En effet, dans ces travaux, il a été trouvé une glycolyse aérobie plus faible dans les réseaux sensori-moteurs, auditifs et visuels. Ces réseaux appartenant à l'anneau VSA reflètent peut-être des processus corticaux anaboliques dynamiques plus importants.

VI Émergence : fonctionnement à deux échelles temporelle

L'ensemble des contraintes d'un fonctionnement complexe auxquelles répondent l'architecture en double anneaux entrelacée semble faire émerger à l'échelle fonctionnelle un double processus d'intégration : l'anneau VSA effectue une intégration multimodale rapide en temps réel des informations sensorimotrices, pour contrôler

les interactions avec l'environnement, tandis que l'anneau PTF effectue des intégrations multi-temporelle (c'est-à-dire mettre en relation les représentations passées, présentes et futures à différentes échelles temporelles), comme décrit ci-dessous. Le traitement sensorimoteur dans l'anneau VSA implique de fortes contraintes "temps réel", conçues pour relier un ensemble de diverses sources d'informations auditives, visuelles et somatomotrices et pour contrôler le comportement réel. Ces interactions en temps réel sont importantes, non seulement au sein de chaque modalité comme sensorielle ou motrice, mais aussi pour toutes leurs interactions bimodales : entre visuel et moteur (par exemple, saisir, atteindre, imiter) ; entre information auditive et somatomotrice (par exemple, reconnaître et produire des phonèmes) ; et entre information auditive et visuelle (importante pour la communication). L'anneau PTF met en oeuvre au moins quatre groupes principaux de fonctions : (1) régulation biologique, olfaction, goût et émotion, (2) mémoire de travail et attention, (3) cognition sociale et (4) langage. Les processus neuronaux communs qui soutiennent ces fonctions (par opposition aux processus sensorimoteurs en temps réel) intègrent différentes sources d'information de manière "multi-temporelle", à différentes échelles de temps, y compris le rappel du passé et les projections dans le futur.

Les régulations et les rythmes biologiques (dans la partie médiane et antérieure de l'anneau PTF (Laird et al., 2011), fonctionnent à différentes échelles de temps et sont fortement influencés par (1) l'hypothalamus et les régulations hormonales allant de quelques minutes à quelques jours et mois et par (2) le système dopaminergique impliqué dans la conduite, la

récompense et le renforcement, allant de quelques minutes à quelques heures. De même, les émotions sont des réactions prolongées, qui durent beaucoup plus longtemps que les stimulus sensoriels émotionnels induits : l'olfaction et le goût produisent des effets neuronaux qui durent beaucoup plus longtemps que ceux produits par la vision, l'audition ou le toucher en temps réel.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'équipement d'excellence MATRICE". (matricememory.fr) et du programme de la prématuration de CNRS-innovation. Le programme MATRICE est parrainé administrativement par l'Université HESAM. Nous tenons également à remercier l'Allen Institute for Brain Science pour avoir partagé ses données d'expression génétique du cerveau humain.

Références

- Bassett, D. S., & Gazzaniga, M. S. (2011). Understanding complexity in the human brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(5), 200. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.03.006>
- Eckert, M. A., Kamdar, N. V., Chang, C. E., Beckmann, C. F., Greicius, M. D., & Menon, V. (2008). A cross-modal system linking

primary auditory and visual cortices: Evidence from intrinsic fMRI connectivity analysis. *Human Brain Mapping*, 29(7), 848–857. <https://doi.org/10.1002/hbm.20560>

Mesmoudi, S., Perlberg, V., Rudrauf, D., Messe, A., Pinsard, B., Hasboun, D., Cioli, C., Marrelec, G., Toro, R., Benali, H., & Burnod, Y. (2013). Resting State Networks' Corticotopy: The Dual Intertwined Rings Architecture. *PLoS ONE*, 8(7), e67444. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067444>

Mesmoudi, S., Rodic, M., Cioli, C., Cointet, J.-P., Yarkoni, T., & Burnod, Y. (2015). LinkRbrain: Multi-scale data integrator of the brain. *Journal of Neuroscience Methods*, 241, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2014.12.008>

van den Heuvel, M. P., & Sporns, O. (2011). Rich-Club Organization of the Human Connectome. *The Journal of Neuroscience*, 31(44), 15775–15786. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3539-11.2011>

LES GRANDS PROJETS INFRASTRUCTURELS – QUESTIONS SUR LA RELATION AUX ESPACES DE DÉPLACEMENT

Auguste Cicchi & Laure Bertrand

Kyoto Institute of Technology - Japon

Résumé

Un siècle et demi d'implantations infrastructurelles va profondément marquer les êtres, les groupes humains comme les territoires, transformant à toutes les échelles du temps comme de l'espace, aussi bien les relations entre les villes ou quartiers que les parcours et déplacements, ces mutations s'invitant aussi dans notre espace psychique. Ces implantations, fruits de systèmes urbains qui, au fil du temps vont se modéliser, s'organiser, s'appuyer sur des modèles scientifiques de divers horizons (mathématiques, sociologiques, géographiques ou politiques,...) de plus en plus sophistiqués pour déboucher aujourd'hui sur les recherches et expériences utilisant les systèmes complexes (smart city, ville intelligente,...). Pour autant, l'histoire de ces implantations en prenant pour exemple la façon dont elles se sont stratifiées dans la région parisienne de 1850 à 1970 nous montre que les modélisations et systèmes qui ont présidé à ces implantations ont produit un certain nombre de ruptures en même temps qu'elles ont façonné la ville. L'articulation entre les visions humaines telles qu'elles s'élaborent et se représentent elles-mêmes au

cours des planifications urbaines successives et des grands projets infrastructurels et les réalités de cette relation aux espaces des déplacements s'écrit comme un langage croisé. Ce texte propose de revenir sur l'entrelacs et les disjointures entre idéaux politiques, réalisations, adaptations et expériences singulières.

Abstract :

A century and a half of infrastructural settlements had a profound effect on people, human groups and territories, transforming at all scales of time and space, both the relationships between cities and neighbourhoods and journeys and movements, with these changes also invading our psychic space. These settlements, the fruit of urban systems which, over time, will be modelled, organised, and based on increasingly sophisticated scientific models from various horizons (mathematical, sociological, geographical or political,...), lead today to research and experiments using complex systems (smart city, intelligent city, etc.). However, the history of these settlements, taking as an example the way in which they were stratified in the Paris region from 1850 to 1970, shows us that the models and systems that governed these settlements produced a certain number of ruptures at the same time as they shaped the city. The articulation between human visions as they were elaborated and represented in the course of successive urban planning and major infrastructure projects, and the realities of this relationship to the spaces of travel, is written as a cross-language. This text proposes to return to the intertwining and disjointedness between political ideals, achievements, adaptations and singular experiences.

Mots clés

Planifications urbaines, systèmes complexes, région parisienne 1850-1970, projets infrastructurels parisiens, espace des déplacements

Keywords:

Urban planning, complex systems, Paris region 1850-1970, Parisian infrastructure projects, travel space

Il n'est pas de projet qui ait autant cristallisé et nourri les fantasmes que les grands projets infrastructurels dont il est intéressant de rappeler qu'il ne s'agit d'un duo infrastructure-machine mais d'une triade infrastructure-machine-homme, ce dernier y étant intégré de façon opérationnelle. En marge du bruit assourdissant des grands travaux et des promesses de progrès, cette co-projection, processus par lequel le milieu s'écrit en même temps que nous nous y adaptons, fait que de façon aussi imperceptible qu'inéluctable, nous nous sommes adaptés aux espaces que nous avons produits au nom du « progrès ». Au fil des planifications urbaines, le « progrès » ne semble dire son nom que de façon indirecte, on lui préfère les mots nouveaux que s'approprient les idéologies successives (hygiénisme,

fonctionnalisme...) plus susceptibles de remporter l'adhésion et de figurer dans les textes de lois ou le langage politique urbain.

La relation à l'espace dans les trajets urbains

Comme des espaces dont le langage aurait perdu des mots, l'espace des déplacements et parmi ceux-là, celui des infrastructures routières et ferroviaires, lequel sollicite des heures durant, la quasi totalité de nos facultés cognitives et proprioceptives, nous consigne dans une sorte d'inertie passive, semblant ne laisser que peu de place à un espace psychique de l'imaginaire. Pour autant, cette relation singulière que nous entretenons avec les espaces qui nous entourent et dont celui des déplacements représente une part primordiale, est constitutive de notre psychisme. Des premiers pas au chemin de l'école et tout au long de notre vie, trajets aux multiples motifs, parcours quotidiens, promenades ou migrations pendulaires, ils se stratifient en nous comme une écriture mémorielle autant que nous les écrivons.

Par un procédé en miroir, ces considérations peinent à s'inviter dans les projets urbains liés aux espaces de déplacement. Comme une écriture qui aurait du mal à trouver sa place entre langue morte et novlangue, aggravée d'une temporalité urbaine longue (décisions, financements, mise en chantier) au regard du temps humain, la question du

renouvellement urbain infrastructurel s'enferme dans les méandres d'une structuration théorique compartimenté. Augustin Berque ouvre la voie : « Entre le vivant et son milieu, il ne s'agit pas d'un rapport de deux objets constitués, mais d'une relation constituant au fur et à mesure les deux termes qu'elle relie.⁵⁰»

Lors de nos déplacements, le lien entre l'espace extérieur et l'espace de notre pensée se construit de façon informelle et propre à chacun, mais celui-ci, évoluant intrinsèquement en même temps que les hommes, les machines, les voies,... aurait-il subi des altérations en matière de langage urbain, de savoirs, de relations sociales, de possibilité de se construire dans un mouvement vivant ?

Les raisons de ces possibles altérations sont fort nombreuses et on ne saurait toutes les relater, ou tenter même d'en rationaliser le sens. Si on prend l'exemple à grand traits de l'histoire infrastructurelle⁵¹ de la région parisienne dans le contexte des modélisations successives qui ont porté les projets et leurs réalisations émerge alors un ensemble de questionnements sur la façon dont les grandes décisions se sont articulées ou désarticulés entre elles et avec leur contexte politique ainsi qu'avec les réalités de leurs impacts territoriaux, sociaux ou personnels,

⁵⁰. BERQUE Augustin et al. « Le lien au lieu » Actes de la chaire de mésologie de l'Université de Corse – Editions éoliennes, 2012-2014, p.21,22

⁵¹. Développé dans la thèse mais résumé dans cet article

Les disjointures ferroviaires, grandes gares parisiennes, petite ceinture et métropolitain

L'implantation des grandes gares parisiennes est l'un des premiers événements infrastructurels qui marque radicalement l'urbanisme parisien, mettant en scène entre 1850 et 1860 un jeu d'influence, de négociations et d'actions conjuguées entre pouvoirs publics et grands groupes financiers. Pour en rappeler le contexte, dès le milieu du XIX^{ème} siècle en France, le rail, promu par des grandes compagnies privées et soutenu par le second empire, s'étend rapidement du transport de marchandises à celui des voyageurs. Les compagnies se diversifient dans de nombreux autres secteurs (transport, tourisme, BTP,...) afin d'augmenter la fréquentation de leurs lignes.

En France, les pouvoirs publics, affairés de conforter Paris dans son rôle de capitale européenne et craignant la pression que ces grands groupes pourraient exercer, partagent le territoire en réseaux séparés convergeant vers Paris et imposent que chaque compagnie⁵² implante sa propre gare terminale à l'intérieur de la barrière d'octroi. Avec cinq gares terminales, dont l'emprise de voies comme de bâti est considérable, la capitale devient un point de rupture géant pour les voyageurs. Sur ce point particulier, on peut évoquer l'implantation des premières gares tokyoïtes dont les façades se développent en parallèle des lignes

⁵². Au nombre de cinq pour les grandes compagnies : Paris-Orléans, Cie du Nord, PLM, Cie de l'Est, Cie de l'Ouest.

et non en perpendiculaire et dont les lignes se superposent en diminuant ainsi l'emprise et modifiant au plan spatial les notions d'avant et d'arrière.

Les lignes de petite et de grande ceinture assureront ultérieurement la jonction entre les réseaux. Si les quartiers aisés du centre parisien ont pu se sentir valorisés par ces « monuments », il en va autrement des villages et quartiers arrière, brusquement isolés par les lignes, entrepôts, gares marchandes qui s'y déploient, qui ne bénéficient d'aucun aménagement intéressant (gares, ouvrages d'art traversant...) et dont les habitants continuent de se déplacer en charrette ou avec le tramway naissant.

Quelques décennies plus tard, le réseau métropolitain qui devait initialement être relié à la petite ceinture, va finir par s'implanter à distance du réseau national car la ville de Paris a souhaité conserver son indépendance vis-à-vis des grands groupes et du pouvoir central.

Le passage du crédo ferroviaire au crédo routier, un choix décisif

Après la première guerre mondiale, la planification urbaine devient le maître mot du contrôle de l'extension et des formes que la ville doit prendre. La découverte des vues aériennes qui permet de dessiner tout ceci à grand trait renforce ces

possibilités, prémisse d'un changement d'échelle et de vision de l'être humain dans ce nouveau dispositif.

En France, jusqu'alors, le ferroviaire règne en maître sur le transport, exception faite du transport suburbain détenu par de petites compagnies privées qui peinent à survivre. Pour autant l'automobile va bientôt supplanter le rail. Jouissant d'une bonne image acquise pendant le conflit (Taxis de la Marne, rôle des camions), le moteur thermique apparaît vite comme un moyen de relance économique efficace, qui va faire l'objet d'une communication politique intense. Dans une vision qui atteint son apogée dans les années 1960, le futur « homme moderne » est au volant d'une voiture circulant sur une autostrade lisse et droite. Le tramway semblant appartenir à un autre temps, subit le même revers que le rail, aussitôt remplacé par des autobus qui sont loin d'avoir les mêmes possibilités capacitaires. Aidé par un régime fiscal favorable, le transport de marchandises par camions de fort tonnage supplante bientôt le transport ferroviaire. Le réseau ferré est nationalisé en 1938, de nombreuses lignes ferment et la projection ferroviaire disparaît des nouvelles planifications urbaines de l'entre deux guerres pour ne laisser la place qu'à un futur dispositif routier et autoroutier.

Les projets urbains sur la zone non aedificandi

La périphérie parisienne va, à son tour, être le théâtre d'opérations d'envergure et d'une bataille propagandiste intense qui se fonde sur les théories hygiénistes et va priver le paysage parisien d'une ceinture d'environ 800ha dont la population a atteint jusqu'à 40 000 personnes selon les périodes. En 1919, l'enceinte de Thiers (35km), devenue militairement obsolète, est déclassifiée⁵³. Celle-ci, composée d'une ceinture de fortifications dont les terrains seront cédés par l'Etat à la Ville de Paris, et d'une zone appartenant à de multiples propriétaires, constitue un ensemble disjoint dont l'histoire conflictuelle va perdurer jusqu'à l'implantation du futur boulevard périphérique. Si les fortifications sont démolies par la Ville de Paris pour planter une épaisse ceinture d'Habitations Bon Marché, celle-ci convoite les terrains zoniers attenants sur lesquels elle ambitionne de multiples aménagements (boulevard circulaire, parcs, équipements sportifs,...) qui semblerait avoir eu aussi pour intérêt de mettre à distance la banlieue, menace pour le foncier parisien. La zone, qui avait été décrétée non aedificandi en raison de la servitude militaire, n'autorisait que des installations légères et de faible hauteur et abritait de nombreux zoniers qui possédaient des savoir-faire multiples (artisanat, maraîchage, retraitement des déchets...) jouant un rôle majeur pour la capitale. Malgré leur pauvreté, les villages et cités zonières constituaient une société

⁵³. Loi sur la déclassification de l'enceinte de Thiers du 19 avril 1919

urbaine et humaine organisée et sédimentée⁵⁴ qui, en son temps, n'a non seulement pas suscité l'intérêt ou fait l'objet d'études mais s'est vue appliquer les nouveaux systèmes urbains liés à l'hygiénisme. Deux lois opportunes (« Cornudet »⁵⁵ sur l'extension des villes et déclassification de l'enceinte de Thiers⁵⁶), portées par un nombre considérable de personnalités comme d'organes influents, vont alors être adoptées à un mois d'écart. Déroulant toute la succession des algorithmes décisionnels : élaboration stratégique des projets de loi en antichambre, appropriations idéologiques simplifiées de courants de pensée influents, communication d'État, celles-ci vont permettre de maintenir une servitude non aedificandi sur la zone en substituant le motif d'hygiène au motif militaire. Anne Granier rapporte : «La zone, assimilée à une "ceinture de misère" indigne de la capitale, devait disparaître pour être remplacée par une "ceinture des parcs et de sports" » lesquels, précise l'auteur, étaient « censés empêcher l'étiollement de la classe ouvrière et devaient permettre à la ville, envisagée de manière quasi-organique, de respirer.⁵⁷» Les campagnes de dénigrement

⁵⁴. FERNANDEZ Madeleine, « La zone mythe et réalités », Ministère de la Culture, Direction du patrimoine, Ethnologie, Ref 81/06/24/EL/MD, Paris, 1983

⁵⁵. Loi Cornudet du 14 mars 1919, parue au Journal Officiel de la République Française du samedi 15 mars 1919

⁵⁶. Loi du 19 avril 1919, parue au Journal Officiel de la République Française du samedi 20 avril 1919

⁵⁷. GRANIER Anne, « La Zone et les zoniers de Paris, approches spatiales d'une marge urbaine (1912-1946)», Carnets du LARHRA, [Online], 1 | 2017/2018

s'accroissent contre ces populations qui (hors conflit) vivaient depuis un siècle sur ces terrains militaires. De nombreux méfaits vont être commis à leur encontre et le coup fatal leur sera porté sous le régime de Vichy.

Le nouveau quadrillage - l'être humain/usager, acteur du dispositif fonctionnel

C'est en plein conflit de la seconde guerre mondiale que s'entérinent les fondements d'un urbanisme, modèle d'un nouvel ordre fonctionnel pour l'édification des villes. Publiée en 1941 (issue du CIAM⁵⁸ de 1933) et remaniée par Le Corbusier, la charte d'Athènes est apparue comme l'aboutissement d'un courant fonctionnaliste qui, dépassant largement le cadre de l'architecture, a semblé proposer un avenir organisé pour l'homme et son espace autant qu'il entendait mettre un terme autoritaire aux courants stylistiques qui l'avaient précédés.

L'histoire de l'architecture et de l'urbanisme a été jalonnée de courants stylistiques souhaitant imposer leurs visions comme l'« an 1 » de la pensée urbaine mais dont certains effets dévastateurs vont parfois s'inviter dans le réel. Pour autant, le mouvement fonctionnaliste est une arborescence qui s'ancre dans de multiples courants de pensée et ne saurait être réduit à quelques principes simples même s'ils se sont voulus basiques et

⁵⁸. IVème Congrès International d'Architecture Moderne, 1933, Athènes, Grèce

rationnels. Au plan urbain et architectural, il semble intéressant de le resituer dans le contexte historique dans lequel il se concrétise, c'est-à-dire au sortir de cette première guerre qui se définit elle-même comme mondiale, si profondément marquée par les changements d'échelle, de l'horreur et des moyens, mais aussi de la vision de l'espace avec le développement de l'aviation. On ne peut s'empêcher de mettre en regard cette vision de l'être humain, de sa fragilité et de sa « multitude », plongé dans le chaos et la nuit... avec la proposition fonctionnaliste qui, dans une sorte de célébration de l'abstraction et de la désincarnation, met en scène l'ordre, la lumière qui pénètre partout, le tout dans une vision aérienne d'hommes, petits points vivants actifs et protégés par les masses de béton d'un monde nouveau et organisé. Le Corbusier et Ozenfant écrivent en 1925 : « J'éprouve ce besoin d'ordre qui domine l'homme et, quand, revenu à la raison, je regarde les figures que j'ai faites avec mes miettes de pain, alors je me sens bien : j'ai fait un dieu. Cet ordre, c'est la loi du monde sensible : Le besoin d'ordre est le plus élevé des besoins humains; il est la cause même de l'art.⁵⁹»

Après-guerre et dans le contexte favorable de la reconstruction, de grands ensembles s'inspirant des principes de

⁵⁹. JEANNERET Charles-Edouard (Le Corbusier) et OZENFANT Amédée, « Sur la plastique », Editions de L'Esprit Nouveau, Numéro 1, Paris, 1925, p.40

séparation fonctionnelle (habiter, circuler, travailler) s'implantent massivement en périphérie proche ou lointaine dans des territoires qui peineront à s'urbaniser (emploi, équipement, lien social,...). A cela s'est ajouté un choix de l'automobile versus le rail lequel a installé ces nouveaux pôles peuplés de familles aux revenus modestes le long des axes autoroutiers. L'écriture morphologique issue de ces modèles a fait d'emblée l'objet de vives critiques dénonçant un urbanisme incapable d'appréhender les complexités sociales (Henri Lefebvre), ou des fondements théoriques erronés (situationnistes). Outre les multiples analyses formulées, on peut essayer de comprendre comment la déconstruction des principes millénaires comme celui de la rue par exemple s'applique massivement. La construction en retrait de parcelle, visant à écarter le bâti en vue d'un meilleur ensoleillement crée des espaces vides au niveau du sol qui ne vont pas bénéficier d'un travail d'urbanisation suffisant pour en compenser les effets. Le paysage urbain subit un changement d'échelle fondamental qui lors des déplacements se « décadre » par rapport au temps du déplacement ; les parcours longeant des enfilades d'équipements, d'infrastructures ou de bâti de grandes dimensions, renvoient le marcheur à son seul mouvement. Le zoning va aussi avoir pour effet l'abandon progressif d'un paysage urbain polymorphe. Les rez-de-chaussée deviennent essentiellement livrés à des parkings ou des espaces techniques.

En parallèle de ces nouveaux principes urbains, la vision humaine qui s’y est associé de façon presque imperceptible, appliquant une posture théorique similaire à celle utilisée pour décrypter les fonctions essentielles des objets, va modifier l’image que l’être humain/usager a de lui-même selon des modalités qu’il serait intéressant d’investiguer. S’incorporant au dispositif fonctionnel et urbain qui l’y intègre comme un élément opérationnel, la personne qui se déplace est mise en demeure de s’y adapter, d’en apprendre les modes d’emploi et les codes⁶⁰. Celui qui participe et se fond dans ce nouvel ordre devrait être « parfait », performant et éminemment attentif. Le langage urbain qui s’offre à lui et qu’il pratique à son tour est également simplifié et quadrillé. Même si celui-ci semble ne rien comporter de particulièrement complexe pour un cerveau humain, mais exige, malgré tout, un apprentissage qui se traduit, lors des déplacements, par l’emploi de toute ou partie des facultés cognitives (signalisations à respecter, messages à lire et à trier, informations à percevoir et comprendre en instantané, obstacles à éviter,..) auxquelles s’ajoutent les injonctions passives (annonces sonores, appel à la vigilance...), et les sollicitations invasives (manque d’espace personnel, bruit, agressions lumineuses,...).

⁶⁰. LE BRETON Eric in ORFEUIL Jean-Pierre (dir.), « Transports, pauvretés, exclusions : pouvoir bouger pour s’en sortir », édition de l’Aube, Collection Monde en cours/essai, Série Bibliothèque des territoires, 2004, La Tour d’Aigues, p.62

Le crédo de l'enfouissement infrastructurel - Le boulevard périphérique et le RER

Au début de la cinquième république, en plein essor industriel et avec une crise du logement persistante, l'implantation d'un réseau ferroviaire suburbain devient une nécessité malgré la mauvaise image dont souffre le rail. Pourtant, en dépit de la saturation du réseau routier, l'industrie automobile reste un objectif prioritaire de l'État. Les décisions infrastructurelles qui en découlent telles qu'elles sont présentées dans les planifications successives (plan Lafay-1954, PADOG⁶¹-1960 ; SDAURP⁶²-1965) témoignent des différences d'idéalisation et de projections autour du rail et de l'automobile.

Contrairement à d'autres pays (comme le Japon par exemple), en France l'enfouissement des réseaux est un crédo culturel et historique mis à part quelques ouvrages comme le métro aérien parisien pour des motifs géologiques, entre autres. Dans un contexte où l'industrie automobile est devenue prioritaire, les autoroutes urbaines vont faire l'objet d'un traitement d'exception et seront essentiellement prévues en surface. En 1954, le boulevard périphérique qui se construit sur l'ancien terrain zonier est complété par la planification d'un important réseau autoroutier urbain (rocade intérieure, axe nord-sud,

⁶¹. Plan d'Aménagement et d'Organisation Générale

⁶². Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Parisienne

radiales de desserte des grandes gares, deux voies express longeant la Seine).

Mais pour le futur RER (Réseau Express Régional), la construction des jonctions parisiennes sera souterraine et va figurer parmi les actes les plus problématiques de l'histoire urbaine de la région. Pour rendre ce nouveau dispositif ferroviaire attractif, il semble indispensable qu'il traverse Paris qui souffre depuis un siècle d'un manque de liaisons. Décidé en 1965, le projet débute par la construction des deux tronçons extérieurs Ouest et Est et occasionne d'emblée des dépassements de budget conséquents. La poursuite de la réalisation de ce nouveau réseau qui comporte de considérables travaux souterrains (tronçons intérieurs, trois gigantesques gares,...) semble compromise mais l'enjeu politique est majeur et la réalisation sera menée à son terme au prix de lourds compromis sur tous les plans (constructifs, patrimoniaux, sociaux, financiers,...). Si en 1970 et avec ce nouveau RER, le rail périurbain change un peu de statut, avec le Grand Paris Express, prévu en enfouissement sur 85% d'un parcours de 200 km, le contexte demeure hostile aux superpositions infrastructurelles. Dans le nouveau dispositif ferroviaire, il est envisagé de faire circuler des personnes dans des tunnels souterrains d'une longueur inégalée.

Par ailleurs, tant que des visions esthétiques ne s'ouvriront pas sur d'autres considérations que des crédos tutélaires, toute entreprise plastique visant à travailler ces infrastructures (allègement, abords, horizons, perspectives, cadrage...) ne peut trouver un écho. Considérant d'emblée celles-ci comme susceptibles de « détruire le paysage », le crédo de l'enfouissement est très tenace en France (contrairement aux villes Japonaises par exemple) et met sur le même plan la pollution des sous-sols d'une région entière et celle, visuelle, que constituerait le passage d'un monorail au-dessus de quelque structure.

Le déplacement, une fenêtre ouverte sur l'espace intérieur et sur le roman urbain

La question de la relation entre l'espace des déplacements et notre psychisme a des aspects tautologiques car celle-ci a longtemps été donnée comme naturelle. Découlant d'une expérience intime et singulière et sous réserve que cette relation reste suffisamment libre, spontanée et disponible, elle est celle qui, délimitant le dedans du dehors, apporte la conscience d'être là et permet un accès à nous-même dans notre pensée comme dans notre corps. Echappant à un décryptage statisticien, ce langage s'ouvre sur une expression littéraire de la ville comme de nous-même, et fait entrer en résonance les aspects

émotionnels, symboliques et oniriques, les aspirations et les désirs. Le paysage qui se déroule n'est pas un tableau que l'on contemple comme un élément extérieur⁶³ mais un espace dont la personne qui se déplace fait partie, porte ouverte vers une pensée réflexive en mouvement.

Il n'existe pas vraiment de terme permettant d'englober les qualités requises pour mettre cette relation en mouvement et permettant de s'ouvrir sur un espace porteur d'une pensée personnelle. Celui de « promenade » pourrait convenir mais il renvoie fréquemment à une idée d'inutilité qui s'oppose aux déplacements pendulaires privilégiant l'efficacité dans un contexte de pression du quotidien.

Conclusion

Les aménagements infrastructurels, qui mettent en scène de façon frontale des vitesses de 300km/h à l'immobile (ou aux 4km/h de la marche humaine) requiert des maîtrises d'une telle complexité qu'elle confère à ces projets des dimensions titanesques et fantasmatiques au point d'oblitérer le langage sensible et singulier de la ville.

⁶³. COLLOT Michel, « Point de vue sur la perception des paysages », *L'espace Géographique*, n° 3, 1986, - 8, place de l'Odéon, Paris-VIe. p. 211-217

Au travers des questions qui émergent dans cet exemple de décryptage des articulations et disjointures entre les grands projets infrastructurels parisiens et les contextes territoriaux, politiques et humains dans lesquels ils se sont développés, on peut voir ce que génèrent les élaborations systémiques de ruptures en même temps qu'elles apportent de solutions.

En s'appuyant sur l'étude historique, comment appréhender les écueils et risques que comportent les processus de modélisation et les systèmes complexes ? Comme d'autres systèmes, quelles sont les limites de captation et de prise en compte des aspects sensibles, mémoriels,... ou du moins, à défaut de les saisir et de les incorporer dans le dispositif, comment éviter que ces systèmes comportent des composantes qui enferment, excluent ou ignorent ces aspects. En corollaire, comment ces systèmes complexes en développement dans la sphère urbaine peuvent-ils articuler les questions pratiques et les aspects sensibles, volatiles, imaginaires de la ville tels qu'identifiés par des chercheurs comme les architectes japonais Yoshiharu Tsukamoto et Momoyo Kajima concernant la spatialité sur les interstices urbains ; ou encore ceux de la géographe Nadja Victor qui étudie les modalités qui président aux choix dans les déplacements urbains au travers de critères liant et intéressant les aspects pratiques et des qualités urbaines et qu'elle objective, dans un contexte de développement de modes de déplacements alternatifs ; ou encore les travaux de l'équipe de Jean-pierre

Orfeuil qui souligne les multiples modes d'exclusion relatifs aux problèmes de mobilité parmi lesquels l'inadaptation à de nouveaux codes d'usage de la ville représente un facteur aggravant.

BIBLIOGRAPHIE

BERQUE Augustin et al., « Le lien au lieu », Actes de la chaire de mésologie de l'Université de Corse – Editions éoliennes, 2012-2014, p.21-22

COLLOT Michel, « Point de vue sur la perception des paysages », L'espace Géographique, n° 3, 1986, - 8, place de l'Odéon, Paris-VIe. p. 211-217

FERNANDEZ Madeleine, « La zone mythe et réalités », Ministère de la Culture, Direction du patrimoine, Ethnologie, Ref 81/06/24/EL/MD, Paris, 1983

GRANIER, Anne, « *La Zone et les zoniers de Paris, approches spatiales d'une marge urbaine (1912-1946)* », Carnets du LARHRA, [Online], 1 | 2017/2018 | 2018, URL : <https://publications-prairial.fr/larhra/index.php?id=375>

JEANNERET Charles-Edouard (Le Corbusier) et OZENFANT Amédée, *Sur la plastique*, Editions de L'Esprit Nouveau, Numéro 1, Paris, 1925, p.40

LE BRETON Eric in ORFEUIL Jean-Pierre (dir.), « Transports, pauvretés, exclusions : pouvoir bouger pour s'en sortir », édition de

l'Aube, Collection Monde en cours/essai, Série Bibliothèque des territoires, 2004, La Tour d'Aigues, p.62

VICTOR Nadja, « Evaluation des déplacements quotidiens : Application à la ville de Luxembourg », Géographie. Univ. Jean Monnet, Saint-Etienne, 2016. p.72

UNE MODÉLISATION CATÉGORIELLE DU DÉBAT NUMÉRIQUE

Antsa Nasandratra Nirina Avo¹, Dominique Luzeaux², & Jean
Sallantin³

1. IST Ambositra, Madagascar, nirhina_avo@yahoo.fr

2. Agence Numérique de Défense, dominique.luzeaux@polytech-
nique.org

3. DR émérite LIRMM Montpellier, jean.sallantin@gmail.com

Résumé

Dans un débat numérique, l'indexation du contenu de chaque propos se fait par des termes du français, déterminés par une intelligence artificielle. Cette indexation est flexible et réflexive car renouvelée sous la supervision de tous les débattants. Certaines relations entre deux termes de cette indexation, dévoilent des propriétés caractéristiques du débat en cours qui suscitent une réaction des débattants, et relancent ainsi le débat de manière ciblée. Nous montrons comment un topos de Grothendieck modélise le débat numérique en définissant de manière cohérente ses éléments constitutifs, leurs traitements algorithmiques et les interventions des débattants.

Abstract

In a digital debate, the indexation of the content of each statement is done by French terms determined by an artificial intelligence. This in-

dexation is flexible and reflexive because it is updated under supervision of all the debaters. Specific relations between two terms of this indexation reveal paradigms of the debate in progress, which generate a reaction of the debaters and thus relaunch the debate in a targeted way. We show how a Grothendieck topos models the digital debate by defining in a coherent way its constitutive elements, their algorithmic treatments, and the debaters' interventions.

Mots clés : Grothendieck topos, digital debate, artificial intelligence

Introduction

De nombreuses civilisations pratiquent une forme normée de débat pour fonder leur gouvernance. Par exemple, dans la



civilisation grecque, le principe de l'isègoria, désignait l'égalité de droit à la parole des citoyens dans le débat public.

Nous avons des techniques numériques pour rendre effective une égalité de droit à la parole dans le débat public. Aussi la question est de faire du débat numérique le support d'un exercice d'intelligence collective.

Il y a des conditions préalables pour qu'un débat puisse servir à penser ensemble :

- 1) Un débat est indépendant des langues, du statut social des participants.
- 2) Tous les propos d'un débat – anciens comme récents – restent discutables.
- 3) Tout débattant apporte librement des opinions et des arguments.
- 4) L'indexation des propos est automatique et supervisée par tous les débattants.
- 5) La structuration du débat se ramène à celle des sous-ensembles de propos.
- 6) La progression du débat vient de l'apport de nouveaux arguments.

En français, il existe plus de trente millions de termes susceptibles d'indexer un propos tenu (Lafourcade 2007). La supervision de l'indexation se fera en observant comment l'indexation des propos structure par inclusion les sous-ensembles de propos et dégage du débat des conditions favorables à la formulation de propos originaux.

L'ensemble des calculs à faire pour indexer les propos est important et doit se faire automatiquement par une intelligence artificielle (IA). Mais la supervision par les débattants est indispensable pour améliorer la pertinence de l'indexation. Encore faut-il que cette supervision aboutisse à dégager quelques paradigmes intéressants pour relancer le débat.

Le rôle de la modélisation mathématique, comme celle que nous allons introduire, est ici de fonder la supervision du débat numérique sur une indexation de ses propos.

Plus précisément cette modélisation doit rendre compte de :

- A) la modélisation de l'indexation de chaque propos par des termes ;
- B) la modélisation de la structuration d'un débat dont les propos sont indexés ;
- C) la modélisation de la supervision de l'indexation et de la structuration des propos.

Les modélisations des outils réalisant A) et B) posent que les termes servant à indexer sont ordonnés, et qu'il existe une correspondance appelée correspondance de Galois entre les sous-ensembles ordonnés de termes et les sous-ensembles ordonnés de propos.

La modélisation de la supervision de l'indexation C) se fait en supposant qu'il existe un objet final, noté **1**, qui est associé à tous les termes indexant un propos. Cela revient ici à permettre à tout débattant d'établir si un terme proposé pour indexer un propos est « à propos », « hors de propos » ou « manquant ».

La modélisation catégorielle que nous allons décrire est faite avec un topos de Grothendieck. Elle rend compte des modélisations A), B) et C).

Un premier essai de modélisation de l'argumentation numérique a été réalisé avec des topos élémentaires (Nirina Avo, 2020). Cette modélisation suppose que les opinions et les arguments sont des propos portant sur des propos. En effet le nouveau propos apporte une justification à un jugement sur une reformulation partielle d'un propos. Pour justifier d'un jugement, un débattant peut se servir de dispositifs de preuve. S'il ne s'en sert pas il profère une opinion. S'il s'en sert, il profère un argument. No-

tons qu'un argument est pas prouvé et pas réfuté (remarque : pour éviter toute ambiguïté, nous préférons être plus précis sur le plan logique et moins sur celui de la langue française, *hic* et *infra*). Si la preuve ou la réfutation d'un argument se font par un seul dispositif de preuve, cet argument est qualifié d'incertain et sa justification portera sur l'estimation de son incertitude. Si le débattant se sert de plusieurs dispositifs de preuve, par exemple s'il est pas prouvé par un dispositif de preuve formelle et pas réfuté par un dispositif de preuve empirique, alors une hypostase désignera la nature attendue à la justification de l'argument (Sallantin, Nirina Avo, et al., 2019).



Par exemple, considérons le propos « planter un arbre a un intérêt écologique », qui utilise le terme T1 « planter un arbre » et T2« impact écologique », ainsi que la relation « $T1 \Rightarrow T2$ ». Des débattants peuvent en faire un argument du débat se justifiant comme une hypothèse, un problème, une définition, une théorie. Chaque fois, l'hypostase désigne la nature de la justification attendue de l'argument (Sallantin, Pinet, et al., 2019).

Ainsi dans le débat numérique, des techniques d'IA produisent une indexation de l'ensemble des propos, une structuration des sous-ensembles de propos, la mise en évidence de certains termes qui caractérisent des sous-ensembles indivisibles de propos, des relations d'implication entre certains termes. Ces dernières suggèrent parfois aux débattants des arguments nouveaux, car ils ne sont pas tirés d'un propos précédent, mais rendent compte de relations entre des sous-ensembles de propos.

La notion d'argumentation sera modélisée ici par un topos élémentaire, alors que celle du débat numérique sera faite par un topos de Grothendieck. La mise en correspondance de ces deux formalismes catégoriels se pose donc : on montre que tout topos de Grothendieck est un topos élémentaire (P.T. Johnstone, 1977), et que la topologie de Lawvere-Tierney généralise celle de topologie de Grothendieck à tout topos, mettant en relation les logiques correspondantes (P.T. Johnstone, 1977 ; Prouté, 2019).

Modéliser avec des catégories

L'objectif est de donner une formalisation des différentes notions introduites précédemment, sans rentrer dans les détails mathématiques, mais en introduisant de la manière la plus intuitive possible les définitions avec le vocabulaire technique approprié. Le lecteur curieux pourra ainsi se référer aux ouvrages de référence comme *Sheaves in geometry and logic: a first introduction to topos theory* de Saunders MacLane et Ieke Moerdijk, paru en 1992 aux éditions Springer (1992), ainsi que *Topos theory* de P.T. Johnstone, paru en 1977 aux éditions Academic Press pour les détails. Pour réaliser une modélisation avec la théorie de catégorie, l'identification des objets et les relations ou morphismes sont des étapes essentielles. Connaître le sens de ces morphismes permet une meilleure compréhension de chaque objet de la catégorie, surtout ses objets particuliers (objet final, initial, exponentiel, etc.). Une formalisation catégorielle de l'argumentation numérique permet donc de comprendre les unités qui composent une argumentation, leur relation et l'importance de chaque élément caractéristique.

Des formalisations catégorielles de l'argumentation et de débat ont été mentionnées. Ces deux concernent une catégorie en particulier, qui est un **topos**.

La capacité de la théorie des catégories à faciliter la généralisation d'un système et fournir un langage commun, un ensemble d'unification de concepts est ici essentielle (Luzeaux, 2015). Deux modélisations sont utilisées ici, la modélisation par topos élémentaire et la modélisation par topos de Grothendieck.

La formalisation avec le **topos élémentaire** est longue, séquentielle, pour parvenir à définir la différence entre argument et opinion grâce aux hypostases (Nirina Avo, 2020). Mais elle est facile à comprendre dans la mesure où les correspondances entre les éléments du topos et l'argumentation dans un débat se font de manière relativement intuitive.

La **reformulation** d'un propos comme étant un passage nécessaire pour formuler une opinion ou un argument se modélise par l'opération d'exponentiation dans une catégorie : cette opération classique en informatique revient à identifier une fonction à n paramètres avec un ensemble de fonctions à $n-p$ paramètres indexées par les autres p paramètres. La reformulation est ainsi une fonction paramétrée par la justification d'un jugement sur un propos.

En revanche, la formalisation avec un **topos de Grothendieck** est plus souple (on pourrait dire qu'elle est « *bottom-up* » alors que l'autre modélisation est « *top-down* »), et se construit avec

une telle finesse que les éléments du débat se placent de façon évidente dans le formalisme. La modélisation en catégorie de faisceaux d'ensembles des termes dans le débat démontre de manière subtile l'importance de la place de termes et permet une indexation et une structuration des propos par des termes.

La modélisation catégorielle du débat

les termes

On se donne un ensemble d'éléments, appelés *termes*. On va munir cet ensemble d'une structure de catégorie \mathbf{T} , c'est-à-dire que l'on peut définir des associations (appelées *morphismes de \mathbf{T}*) entre termes (appelée *objets de \mathbf{T}*), de telle sorte que chaque terme soit associé avec lui-même et que si un terme est associé avec un deuxième terme qui lui-même est associé avec un troisième, alors le premier terme est associé avec le troisième (dit autrement, l'association est une opération *associative* !).

Pour avoir une représentation intuitive de la catégorie \mathbf{T} , il suffit d'imaginer un graphe quelconque dont les sommets seraient des termes et les arêtes des associations.

les propos

Informellement, un propos est un fragment de texte, et il est indexé par une liste finie de termes : on peut voir cela comme une fonction multivoque qui associe soit des termes à un propos, soit des propos à un terme. Ce qui nous intéresse donc est cette association entre un terme et un ensemble d'éléments, qui ontologiquement ne nous intéressent pas si ce n'est par l'existence de cette association. C'est donc ceci qui va définir ce que nous appellerons un propos.

Un propos est une application de \mathbf{T} dans \mathbf{Set} , la catégorie des ensembles (ses objets sont des ensembles, ses morphismes sont des fonctions entre ensembles). Ceci permet alors de définir \mathbf{P} , la catégorie des propos, comme étant $\mathbf{Set}^{(\mathbf{T}^{op})}$, où \wedge est l'opérateur d'exponentiation, et op est une subtilité mathématique pour faciliter la suite de l'exposé (mathématiquement, on a inversé le sens des morphismes entre les termes, ce qui ne change rien épistémologiquement, comme la relation d'association n'est pas fondamentalement dirigée).

On définit un morphisme entre deux propos q et p , quand le sous-ensemble de termes associé au propos p est inclus dans celui associé à q : on dira que le propos q est un successeur au propos p . Cela permet de définir une relation d'ordre entre p et q , $p < q$, si q est un successeur de p .

La catégorie des propos est $\mathbf{Set}^{\mathbf{T}^{\text{op}}}$ souvent appelée catégorie des *préfaisceaux d'ensembles* construite sur \mathbf{T} . C'est une structure mathématique bien connue qui a de très bonnes propriétés mathématiques : c'est un *topos de Grothendieck*. On peut donc en particulier définir des intersections de propos, mais aussi des réunions de propos ; on peut aussi définir ce que l'on appelle l'exponentielle de propos, ce qui revient à être capable de définir un propos qui représente une application associant un propos à un autre (l'idée est la même qu'en informatique où une fonction à deux variables peut être vue comme une fonction à une variable et paramétrée par l'autre : $f(x,y) \equiv f_x(y)$). On peut déjà remarquer les propriétés remarquables de la catégorie des propos, telle que définie, qui permet d'internaliser les opérations d'intersection, de réunion, d'exponentiation, y compris pour un nombre quelconque d'opérandes.

Il est alors possible d'utiliser un résultat classique de théorie des catégories, le *lemme de Yoneda*, qui permet de plonger pleinement (on a bien accès à toute l'information) et fidèlement (on ne perd pas de l'information) toute catégorie dans la catégorie des préfaisceaux d'ensembles construite sur elle-même.

Par rapport à ce qui précède, cela revient à pouvoir identifier un propos à tous ses successeurs possibles, tout en gardant toutes les bonnes priorités mathématiques qui vont nous intéresser dans la suite (mathématiquement on identifie un objet p à tous les objets pouvant être mis en relation avec p , à savoir

$Hom(_,p)$: c'est pour cela que les morphismes ont été définis à partir de la notion de successeur). Ceci n'est pas choquant dans la vision synthétique adoptée ici, puisque la catégorie des propos rassemble globalement tous les propos potentiels pouvant être indicés à partir des termes : ce ne sera qu'en lui rajoutant des propriétés particulières qu'il sera possible de distinguer des structures parmi tous ces propos potentiels.

Un topos de Grothendieck peut aussi être vu comme un treillis de Heyting (en fait c'est le treillis des sous-objets de l'objet terminal du topos), ce qui permet d'interpréter alors l'intersection comme une conjonction, la réunion comme une disjonction, l'exponentiation comme une implication.

Les notions d'intersection (respectivement réunion, exponentiation) de propos s'interprètent alors comme la conjonction (respectivement disjonction, implication), ce qui donne un sens formel aux acceptions habituelles.

les agents intervenant dans le débat

Précédemment, on a défini une structure globale incluant tous les propos potentiels. Maintenant on va identifier des sous-structures : cela va permettre de définir pour un agent les propos qu'il est susceptible de tenir potentiellement, de les distinguer de ceux d'un autre agent, et également de définir des logiques asso-

ciées à chaque agent permettant de passer des propos aux arguments, et formaliser la notion d'hypostase.

On va définir des *topologies de Grothendieck* sur la catégorie des propos, ce qui revient à choisir pour chaque propos p un sous-ensemble de ses successeurs $J(p)$ (J est appelé une famille couvrante ou recouvrement, et $J(p)$ un *crible*), qui vérifie certaines propriétés. Sans rentrer dans les détails mathématiques, les idées sous-jacentes sont qu'un recouvrement se doit d'être recouvert par lui-même, qu'un recouvrement se doit de recouvrir également les recouvrements plus petits, et enfin que pour être un recouvrement, il suffit d'en être un sur chaque morceau d'un autre recouvrement (ces deux dernières propriétés correspondent mieux à l'intuition véhiculée par la traduction anglo-saxonne « *sieve* » d'un crible, qui signifie aussi « *tamis* »).

L'intérêt de la topologie de Grothendieck est que si on considère ensuite les faisceaux (qui sont des préfaisceaux recollés localement là où ils se superposent) construits sur une catégorie munie d'une topologie de Grothendieck (appelée alors *site*), on obtient un topos de Grothendieck qui est immergé dans la catégorie des préfaisceaux construite sur la catégorie (Grothendieck & Dieudonné, 1971).

Dit autrement, si un agent A_I a une topologie de Grothendieck T_I qui lui permet de définir « ses » successeurs d'un propos (ce sont les propos qu'il est susceptible de tenir), l'ensemble de

tous ces propos a encore de très bonnes propriétés mathématiques comme précédemment, permettant notamment de définir la conjonction et la réunion de propos pour A_1 (attention ce ne sont pas forcément les mêmes conjonctions et réunions que dans \mathbf{P} , car A_1 n'a pas accès à tous les propos potentiels mais seulement aux siens).

la reformulation de propos

Si on se donne maintenant un autre agent A_2 avec une topologie de Grothendieck T_2 , il se peut que le propos p formulé par A_1 ne soit pas immédiatement compréhensible par A_2 (car pas dans la sous-structure associée à l'agent A_2). Il est alors nécessaire à A_1 de *reformuler* son propos.

Or, on peut montrer que l'ensemble des topologies de Grothendieck peut être muni d'une structure de treillis, ce qui permet de définir en particulier l'intersection de deux topologies données. Il suffit donc de prendre dans les successeurs de p le plus petit qui est dans l'intersection de T_1 et de T_2 .

De même, si q est un propos formulé par A_2 suite à un propos p formulé par A_1 , q peut être reformulé pour A_1 comme le plus petit des successeurs de p (au sens de T_1) tel que son intersection avec q soit toujours celle de p et q (au sens de l'intersection de T_1 et T_2). Si l'on n'avait pas les restrictions liées aux topologies propres à chaque agent, donc si on raisonnait simple-

ment dans la catégorie \mathbf{P} , alors cette reformulation serait tout simplement l'implication q implique p , c'est-à-dire l'exponentiation au sens catégoriel.

les arguments

La formalisation présentée va trouver son intérêt dans le fait qu'elle permet de faire de l'algèbre, de la topologie et de la logique en même temps : au prix d'une complication initiale, elle offre en fait du coup le champ permettant d'unifier toutes ces problématiques de manière naturelle ! L'algèbre et la topologie ont été rapidement évoquées précédemment. En ce qui concerne la logique, il convient de rappeler que l'on peut associer à tout topos une logique interne intuitionniste du premier ordre, et réciproquement on peut associer canoniquement un topos à toute logique intuitionniste du premier ordre.

En effet, il y a bijection entre une topologie de Grothendieck sur \mathbf{T} et ce que l'on appelle une *topologie de Lawvere-Tierney* (ou aussi opérateur local ou *modalité locale*) sur $\mathbf{Set}^{\mathbf{T}^{op}}$, qui est un opérateur tel que : $x < y$ implique $j(x) < j(y)$; $x < j(x)$; $j(j(x)) = j(x)$; $j(x \cap y) = j(x) \cap j(y)$. L'appellation de modalité locale n'est pas fortuite, car d'une part les propriétés rappelées ci-dessous sont en fait analogues à celles qu'a un opérateur de possibilité \diamond dans une logique modale, d'autre part tout topos a un objet particulier, noté classiquement Ω , qui corres-

pond aux valeurs de vérité quand on munit un topos de sa logique interne, et l'opérateur j est défini de Ω dans Ω et correspond donc à un opérateur logique.

Via cette bijection, on peut donc définir une modalité \diamond_1 (respectivement \diamond_2) pour l'agent A_1 (respectivement A_2). Ceci permet donc pour tout agent d'appliquer cet opérateur modal sur les propos qu'il formule, ce qui permet de passer d'un propos à un *argument*. Par ailleurs, cela permet, quand on a un propos p et 2 agents A_1 et A_2 de définir les formules du type : $\diamond_1 p$ et $\diamond_2 \text{ non } p$, c'est-à-dire les *hypostases*. On retrouve aussi l'incertitude qui a été évoquée dans l'introduction.

Conclusion

Le débat public est posé par les Athéniens comme étant un fondement de la démocratie. Le débat numérique ici consiste à se servir des développements actuels du numérique pour donner à tous citoyens un droit égal à la parole publique. L'utilisation de l'intelligence artificielle est nécessaire pour indexer le contenu de chaque propos tout en laissant au citoyen la faculté de superviser cette indexation et de s'en inspirer pour relancer l'argumentation du débat.

La modélisation catégorielle du débat est indispensable pour donner une base solide à cette pratique qui met en jeu différents

algorithmes d'IA, et qui doit donner, aux débattants observant l'ontologie en cours de construction, un regard sur le déroulement du débat, ces zones stériles, fécondes et confuses, et une incitation à y intervenir par ses propres propos.

Références

Grothendieck, A., & Dieudonné, J. (1971). *Éléments de géométrie algébrique* (Vol. 166). Springer Verlag.

Lafourcade, M. (2007). Making people play for lexical acquisition. Symposium on Natural Language Processing.

Luzeaux, D. (2015). A Formal Foundation of Systems Engineering. In F. Boulanger, D. Krob, G. Morel, & J.-C. Rousset, *Complex Systems Design & Management*, Springer Verlag.

MacLane, S., & Moerdijk, I. (1992). Sheaves in geometry and logic: A first introduction to topos theory. Springer Science & Business Media.

Nirina Avo, A. N. (2020). Modélisation mathématique de l'argumentation numérique. Thèse Université de Fianarantsoa, Madagascar.

Johnstone, P.T. (1977). *Topos theory*, Academic Press.

Prouté, A. (2019). *Introduction à la logique catégorique*, cours
http://163.172.10.123:8080/cours_2010.pdf

VERS UNE THÉORIE SUPERSYMMÉTRIQUE DES DYNAMIQUES COMPLEXES

Paul Bourguine

Complex Systems Digital Campus⁶⁴

Résumé

Les systèmes complexes sont omniprésents dans la nature à tous les niveaux d'organisation. La thèse de cet article est que « *ce qu'il est convenu d'appeler 'la phénoménologie d'un système complexe' peut être reconstruite exactement par une 'dynamique complexe'* ». La 'théorie supersymétrique des dynamiques stochastiques' se charge d'opérer cette reconstruction exacte comme *l'addition de sa dynamique moyenne espérée et des fluctuations autour de cette dynamique, l'une et l'autre fonction à chaque instant de toute la phénoménologie passée*. Une « dynamique complexe » est définie comme l'addition d'une dynamique moyenne allant vers le bord du chaos (*signée par une entropie croissante de Kolmogorov-Sinai*) et de fluctuations propres à un état critique autoorganisé (*signé par des lois puissances*). La reconstruction exacte permet de falsifier cette

⁶⁴ UNESCO UniTwin CS-DC. Le 'Complex Systems Digital Campus' est un réseau d'universités dans 50 pays créant un e-Campus global formé d'équipes interdisciplinaires visant à relever les défis de la modélisation posée par les systèmes complexes.

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

définition d'une 'dynamique complexe' pour mieux en reformuler la définition.

Abstract

Complex systems are ubiquitous in nature at all levels of organization. The thesis of this article is "*what is commonly called 'the phenomenology of a complex system' can be reconstructed exactly by 'complex dynamic'*". The 'supersymmetric theory of stochastic dynamics' is responsible for operating this exact reconstruction as *the addition of its expected mean dynamics and of the fluctuations around this dynamic, one and the other function at each time of all past phenomenology*. A "complex dynamic" is defined as the addition of a mean dynamics going towards the edge of chaos (*signed by an increasing entropy of Kolmogorov-Sinai*) and of fluctuations proper to a self-organized critical state (*signed by power laws*). The exact reconstruction makes it possible to falsify this definition of a 'complex dynamic' to better reformulate it.

Mots clefs : systèmes complexes, thèse, théorie supersymétrique des dynamiques stochastiques, paradigme scientifique exact, intégrale de chemins, phénoménologie, bord du chaos, criticalité autoorganisée, épistémologie formelle.

« Avec les systèmes complexes, la question n'est plus de prédire ce qui va arriver mais ce qui peut arriver »

- Ilya Prigogine

Introduction

La thèse de cette article a été présentée dans le résumé de l'article et sera à nouveau discutée dans la conclusion.

Une thèse consiste à affirmer qu'un 'concept sémantique intuitif' correspond exactement à une définition formelle dans un système logique ou une théorie mathématique⁶⁵. Une thèse n'est pas démontrable car le concept sémantique n'a pas de définition formelle. Mais la définition formelle est falsifiable comme il est requis lorsqu'il s'agit de science et, en ce cas, modifiable théoriquement par sa communauté scientifique, ici celle de la science des systèmes complexes.

La théorie utilisée est la « théorie supersymétrique des dynamiques stochastiques » comme point de départ d'une de ses branches comme « théorie supersymétrique des dynamiques complexes ». Cette dernière abrite déjà les travaux théoriques d'Ilya Prigogine, de Giorgio Parisi et de toute la communauté de physique statistique et de mathématiciens sur les systèmes complexes sans oublier les contributions théoriques venant de toutes les disciplines expérimentales. Et cette construction

⁶⁵ Une thèse célèbre est celle de Church (1930) : « tout calcul peut se ramener à un lambda-calcul ». Cette thèse s'est ensuite appelée thèse de Church-Turing après l'article de Turing sur le « calculabilité » (1936). Dans les années 1930 d'autres définitions sont apparues comme les fonctions récursives, les machines de Post, les machines à compteurs. Elles ont toutes été prouvées équivalentes.

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

théorique n'a de sens que confrontée en retour à tous les travaux expérimentaux sur les systèmes complexes qui traversent tous les champs disciplinaires.

1. La théorie supersymétrique des systèmes dynamiques

Le principe de moindre action : il est né au 18^{ème} siècle avec Leibnitz, Maupertuis, Euler et Lagrange. Au 20^{ème} siècle, il a été généralisé par le théorème de Noether et les intégrales de chemins de Feynman. Il ne s'agit pas d'un minimum absolu mais d'un principe extrémal local. C'est aussi ce principe d'extremum local avec les théorèmes d'Hamilton-Jacobi-Bellman et de Pontriaguine qui vaut pour les systèmes relevant de la théorie des jeux face à la Nature ou entre des joueurs.

La thèse suivante reste ainsi valide avec le cas déterministe comme cas particulier du cas stochastique. Elle reste valide jusqu'à aujourd'hui pour *toutes les théories de champs en physique, stochastiques (et donc déterministes comme cas particulier)*.

Principe de moindre action (thèse) : toute phénoménologie stochastique entre un état stochastique A et un état stochastique B peut se modéliser par le principe de moindre action comme

extremum local de l'intégrale stochastique de son action représentée son Lagrangien L entre A et B

Les grands théorèmes de Noether en physique ou de Hamilton-Jacobi-Bellman-Pontriaguine en théorie des jeux disent que cet extremum local est réalisé par l'intégrale de chemins⁶⁶ de l'Hamiltonien H dérivée du Lagrangien L.

La théorie supersymétrique des dynamiques stochastiques en mécanique statistique se donne pour but de produire le meilleur modèle d'une phénoménologie quand la théorie du niveau microscopique est connue mais que les états microscopiques ne peuvent pas être mesurés. Elle est basée sur un 'opérateur de projection exact dépendant du temps' dont la définition est la suivante : *en l'absence de toute information sur les états microscopiques, l'opérateur de projection projette la configuration macroscopique observée sur les états microscopiques inconnus, en leur attribuant des valeurs uniformes conformément à un principe de maximum de vraisemblance*⁶⁷ (principe supersymétrique). Une synthèse des

⁶⁶ L'intégrale de chemin est relative aux processus stochastiques et quantiques. Elle fournit la base pour la grande synthèse des années 1970 qui unifie la théorie quantique des champs avec la [théorie statistique des champs](#) d'un champ fluctuant auprès d'une transition du second ordre.

⁶⁷ Cette règle est celle de Jaynes en théorie de l'information : en l'absence de toute information, la distribution retenue est l'équiprobabilité.

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

méthodes de reconstructions exactes au cours des cinq dernières décennies est proposée par Michael te Vrugt et de Raphael Wittkowski⁶⁸. Les deux premières décennies ont été consacrés à un hamiltonien et un opérateur de projection indépendant du temps^{69 70 71}, *i.e.* un *phénomène stationnaire avec fluctuations*. Les deux décennies suivantes ont proposé un opérateur de projection dépendant du temps avec un hamiltonien invariant dans le temps. Le cas plus général d'hamiltoniens dépendant eux-mêmes du temps⁷² est apparu ensuite pour prendre en compte des phénomènes de croissance/décroissance-

Théorème(s) de la théorie supersymétrique :

Toute phénoménologie observée avec son Hamiltonien dépendant du temps peut être reconstruite exactement comme dynamique stochastique par l'opérateur de projection dépendant

⁶⁸ Michael te Vrugt and Raphael Wittkowski: *Projection operators in statistical mechanics: a pedagogical approach* (2019), <https://arxiv.org/abs/2001.01572v1>

⁶⁹ S. Nakajima, "On quantum theory of transport phenomena: steady diffusion", *Progress of Theoretical Physics* 20, 948–959 (1958).

⁷⁰ R. Zwanzig, "Ensemble method in the theory of irreversibility", *Journal of Chemical Physics* 33, 1338–1341 (1960).

⁷¹ H. Mori, "Transport, collective motion, and Brownian motion," *Progress of Theoretical Physics* 33, 423–455(1965).

⁷² H. Grabert, *Projection Operator Techniques in Nonequilibrium Statistical Mechanics*, 1st ed., Springer Tracts in Modern Physics, Vol. 95 (Springer, Berlin, 1982).

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

du temps défini ci-dessus : cette reconstruction exacte est la somme d'une trajectoire en moyenne et de ses fluctuations stochastiques autour de cette moyenne, toutes les deux construites comme une mémoire dynamique de l'histoire de la phénoménologie observée⁷³.

Il est remarquable que ce même théorème puisse être décliné pour reconstruire les dynamiques thermodynamiques, de transport et de toutes données phénoménologiques. Il est aussi remarquable que la *rétro-prédiction fonctionne exactement de la même manière que la prédiction⁷⁴*. Il faut en effet noter que la prédiction stochastique fonctionne aussi en marche arrière vers un passé inconnu⁷⁵.

Le caractère *exact* d'un modèle dynamique supersymétrique fournit *de facto* un critère de falsifiabilité de l'Hamiltonien lui-même ou de l'hypothèse sur l'opérateur de projection si la reconstruction de la trajectoire moyenne et de ses fluctuations

⁷³ Les "réseaux neuronaux récurrents" fonctionnent selon le même principe, par exemple celui qui devine les prochaines lettres et corrige les dernières ou, encore, de manière plus spectaculaire développe un sujet comme ChatGPT.

⁷⁴ Par exemple, le procédé a été utilisé à chaque instant pour la prédiction en France du futur de l'épidémie de la 1^{ère} vague de Covid : à chaque instant, le procédé consiste à reconstruire le début mal connu de l'épidémie puis, fort de ces progrès stochastiques sur l'origine de la pandémie, de repartir vers le futur avec une histoire mieux connue en probabilité. Cela n'a pas été fait internationalement !

⁷⁵ Par exemple, pour une épidémie dont on ne connaît pas bien de démarrage spatiotemporel, à chaque nouvelle donnée en marche avant, on peut repartir en arrière pour mieux préciser le démarrage spatiotemporel avant de repartir vers la prédiction des instants futurs.

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

autour de la moyenne⁷⁶ produit des résultats inattendus ou si des propriétés supplémentaires sont attendues.

La théorie supersymétrique des dynamiques stochastiques construit des ‘dynamiques stochastiques’ en fonction du type de réseau selon qu’il est ‘aléatoire’, ‘*petit monde*’ ou ‘invariant d’échelle’ :

Réseau aléatoire : Ce modèle s’appelle aussi ‘gaz sur réseau’ avec émergence d’une dynamique de ‘fluide au sens large’ avec des phénomènes de transport et de transfert d’énergie libre (e.g. de température). Le réseau est fait de cases occupées ou libres. Chaque nœud se déplace dans sa direction et un choc peut se produire. Cela peut être aussi bien des molécules de différents types y compris des petites avec des grandes en train de se polymériser comme dans une cellule biologique.

Réseau ‘petit monde’ : Ces réseaux émergent avec un diamètre qui reste petit. Cette limite a été mesurée à environ 6 pour des réseaux neuronaux comme pour des réseaux sociaux. Dans les deux cas, cette limite est nécessaire pour obtenir des consensus au sein du réseau, par exemple par un processus de synchronisation⁷⁷. De même dans une conférence scientifique,

⁷⁶ Par exemple s’il y a une erreur sur le choix de l’hamiltonien ou des évidences théoriques sur la nature des lois stochastiques.

⁷⁷ Hubel et Wiesel ont obtenu le prix Nobel de biologie pour avoir mis en évidence que deux neurones très éloignés dans le réseau neuronal d’un chat étaient synchronisés.

chaque présentateur crée des synchronies de synchronies neuronales qui valident ou falsifient ses propositions scientifiques. Dans les deux cas, pour qu'une telle synchronisation soit possible, il ne faut pas que le diamètre du réseau soit trop grand : un 'petit monde est nécessaire'. Le paradigme théorique est ici le 'réseau de verre de spins' dont une *théorie supersymétrique comme théorie du champ moyen* a été proposée par Giorgio Parisi⁷⁸. Cette théorie est *exacte lorsque la taille du réseau croît à l'infini* mais reste une excellente approximation théorique pour des réseaux finis comme les petits mondes.

Réseau invariant d'échelle⁷⁹ : Dans ces réseaux *invariants d'échelle*, le nombre des voisins suit une *loi puissance*. Ils sont très fréquents dans la nature : le métabolisme cellulaire, le réseau internet, un dictionnaire, l'arbre phylogénétique, le réseau trophique dans un écosystème terrestre ou marin etc...

Ces réseaux présentent dynamiquement une règle d'attachement préférentiel : par exemple, Albert-László Barábasi a proposé la '*règle de l'attachement préférentiel d'un nouveau*

⁷⁸ Giorgio Parisi a reçu le prix Nobel de physique pour ses travaux sur les verres de spins et d'autres systèmes complexes comme, par exemple, les grands nuages d'oiseaux au-dessus de Rome qui sont aussi un désordre gelé où chacun garde sa place au milieu des autres pendant le vol.

⁷⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/Preferential_attachment

*nœud à un nœud existant avec une probabilité proportionnelle au nombre de ses liens déjà créés*⁸⁰.

2. Vers une théorie supersymétrique des dynamiques complexes

Cette partie commence avec une définition récursive de la phénoménologie d'un système complexe. Cette définition récursive force l'étude de leur causalité ascendante et descendante sur plusieurs niveaux d'organisation qui sont responsable des phénomènes de viabilité et de coévolution internes au système complexe.

Phénoménologie d'un système complexe (propriétés principales) : *Au cours de son cycle naissance/vie/disparition, la phénoménologie d'un système complexe est celle de l'émergence spontanée d'un réseau capables de créer de nouveaux nœuds et de nouveaux liens pour maintenir son auto-organisation dans des environnements changeants. Ses nœuds sont récursivement des systèmes complexes avec des causalités ascendantes et descendantes entre les niveaux d'organisation.*

⁸⁰ Albert-László Barabási et Réka Albert, *Emergence of scaling in random networks*, Science, 286:509-512,, 15 octobre 1999

1^{er} principe : la causalité descendante et ascendante des « effets tunnels ».

Le grand théorème de Freidlin & Wentzell⁸¹ démontre que « tout système stochastique soumis à un bruit tendant vers 0 parcourt de façon ‘déterministe’ l’ensemble de ses attracteurs en cycles, hypercycles, hyper-hypercycles ...et ainsi de suite lorsque l’horizon temporel croît vers l’infini⁸². Et plus le bruit tend vers 0 et plus le « saut spontané » est proche du saut minimum entre l’attracteur et sa frontière (e.g. sortie en K_4 de l’attracteur K_2 dans la figure 1d) ».

Les lignes orientées sont les dynamiques déterministes. Avec son non-déterminisme local, la dynamique stochastique fabrique progressivement un *halo en probabilité* (i.e. un attracteur stochastique, non représenté) au voisinage de chaque attracteur déterministe, ici K_2 . La 1^{ère} fois que le halo rencontre la frontière de l’attracteur, un non-déterminisme global se produit comme brisure de symétrie : le système change de bassin d’attraction (ici

⁸¹ Il fait 150 pages in [Freidlin, Mark I.; Wentzell, Alexander D. \(1998\). Random perturbations of dynamical systems. Grundlehren der Mathematischen Wissenschaften \[Fundamental Principles of Mathematical Sciences\] 260 \(Second ed.\). New York: Springer-Verlag. pp. xii+430. ISBN 0-387-98362-7. MR1652127](#)

⁸² Ilya Prigogine parle de cette petite fluctuation thermodynamique dans un coin de l’univers qui a créé la biosphère en 3 milliards d’années. Et les phénomènes co-évolutionnaires de la biosphère ont un horizon temporel non limité.

K_3) et construit un *nouvel attracteur stochastique point par point, dans ce bassin.*

Fig.1d : Le 3^{ème} type d'attracteur appartient à la famille des 'attracteurs étranges' qui présentent de larges déviations déterministes à partir de deux points ayant un écart aussi petit que l'on veut. La figure représente le célèbre attracteur de Lorentz⁸³.

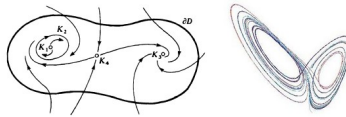


Fig.1 : La figure de gauche met en scène un exemple minimal d'un processus naissance/vie/mort d'un niveau macro : a. la nucléation du système dans l'attracteur initial instable K_1 ; b. son développement avec l'attracteur cyclique K_2 puis c. le saut dans l'attracteur de sénescence K_3 en passant par K_4 d. pour finalement sortir de son domaine de viabilité ∂D .

Quel que soit le saut entre deux attracteurs, ce saut spontané est 'instantané' et son 'coût' (par exemple en énergie libre) est nul à l'échelle macro ! Ce saut spontané provient de cascades descendantes toutes aussi spontanées jusqu'à « l'effet tunnel » au

⁸³ Il est célèbre parce qu'il est à l'origine de l'effet dit « papillon » avec la théorie des attracteurs chaotiques, « le battement des ailes d'un papillon peut entraîner une modification du climat dans une autre partie du globe ». Notons toutefois que la déviation inverse peut tout aussi bien empêcher un tel changement.

niveau quantique : l'effet tunnel désigne la propriété que possède une onde quantique de franchir une barrière de potentiel même si son énergie est très inférieure à l'énergie minimale requise pour franchir cette barrière⁸⁴ (fig.2).

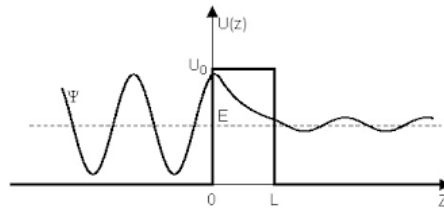


Fig.2 : effet tunnel : l'onde d'énergie E de haute fréquence se transmet à travers la barrière en une onde de plus basse fréquence et d'énergie voisine de celle d'entrée.

En réalité, le saut d'attracteur à tout niveau d'organisation suppose aussi des cascades ascendantes sophistiquées de synchronisation (exacte et/ou avec délais) depuis le niveau quantique jusqu'au niveau macroscopique.

2^{ème} principe phénoménologique : la route vers le bord du chaos

Les cascades descendantes d'effets tunnel et les cascades de synchronisations/coordinations ascendantes avec retard⁸⁵ sont en

⁸⁴ Chacun de nous se déplace, active son réseau neuronal et change 30 milliards de cellules chaque jour avec 2500 kcals soit 100 watts, i.e. l'énergie d'une ampoule. Les autres animaux font de même à la proportionnelle de leur poids, soit, par exemple, $3 \cdot 10^{-3}$ watts pour un insecte.

⁸⁵ La synchronisation est au 1/1000 s dans les assemblées de neurones synchrones. Ce type de synchronie est mis en scène par le modèle de Y. Kuramoto, *Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence* (Springer, Berlin,

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

réalité le fait de moteurs avec ses mini-moteurs puis ses micromoteurs ...

On peut alors esquisser une démonstration de la route vers le chaos de la façon suivante. La partie déterministe de la dynamique se produit comme dans le théorème de Freidlin et Wentzel lorsque le bruit tend vers 0: à chaque niveau d'organisation, chaque moteur parcourt son cycle d'attracteurs de façon déterministe et, dans son cycle, active les mini-moteurs en hypercycle, puis les micromoteurs en hyperhypercycle, ..., et ceci se reproduit dans un grand nombre de cycles basiques dans la vie du système complexe. Celui-ci trace ainsi *sa propre route vers le bord du chaos tout au long de sa vie (fig.3)*. Cet emboîtement d'hypercycles fractionne le temps dans des intervalles de plus en plus petits. Tout se passe donc comme si le temps devenait très long comme dans le théorème de Freidlin et Wentzel qui met en scène une route à l'extrême bord du chaos pour un temps infini. En conséquence, tout se passe comme si le bord du chaos était toujours plus approché quand le nombre de niveaux d'organisation croît, jusqu'à la biosphère⁸⁶.

1984).

⁸⁶ Un article dans Nature a réévalué le nombre d'espèces dans l'écosphère : l'estimation précédente de 100 millions d'espèces a été corrigé en 100 milliards d'espèces.

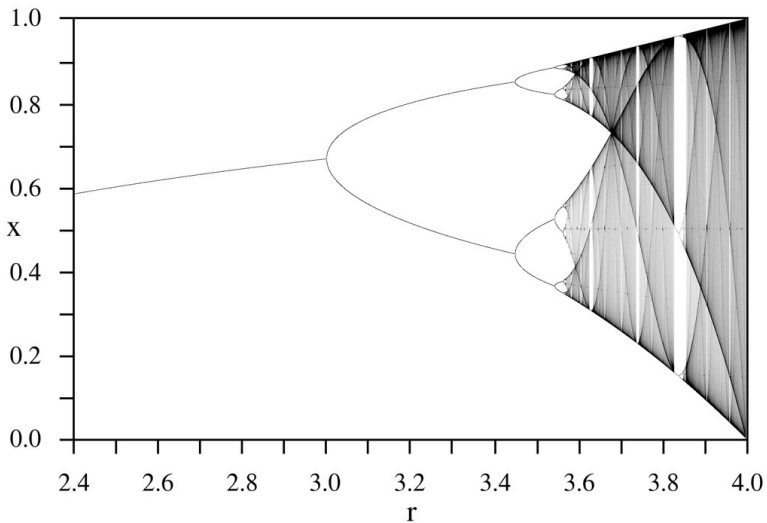


Fig.3 : Mitchell Feigenbaum a proposé cette route vers le bord du chaos par doublement de période qui démarre avec un cycle ($r = 3.2$) puis devient un cycle double ... jusqu'à un nombre infini de cycles. Cette figure est la même que celle du théorème de Feidlin et Wentzel. Cette route vers le chaos se reproduit à nouveau pour des valeurs supérieures du paramètre.

3^{ème} principe phénoménologique : la criticalité autoorganisée.

Selon le 2^{ème} principe ci-dessus, le bord du chaos est un attracteur de tout système complexe autoorganisé tout au long de son évolution. Cet attracteur est invariant d'échelle en tant qu'il se produit quel que soit la taille du système. Cette invariance d'échelle est une propriété caractéristique d'un état critique : il

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

porte le nom « d'état critique autoorganisé ». Comme tout état critique invariant d'échelle, ses lois sont toutes des lois puissances. Le bord du chaos est reconnu comme procurant des capacités à traiter l'information et à mémoriser. Et le franchissement du bord du chaos est synonyme d'oubli catastrophique, d'incapacité à traiter l'information et de non-intégrabilité (cf fig 4.).

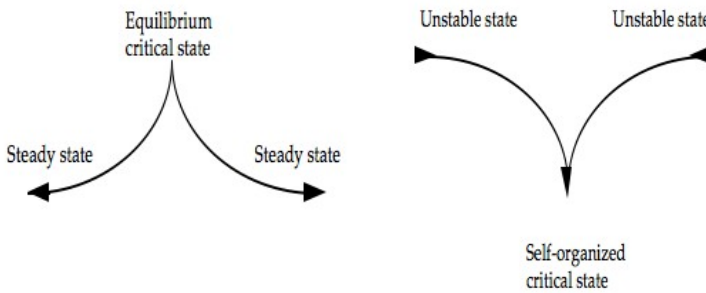


Fig.4 : État critique auto-organisé dont on vient de traiter de la généralité pour les systèmes complexes est un attracteur. C'est une transition de phase du 2^{ème} ordre. A l'inverse, l'état d'équilibre d'une transition de phases du 1^{er} ordre à une température donnée est instable entre deux phases qui, elles, sont stables.

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

Le nouveau paradigme des « états critiques autoorganisés » proposé par Per Bak⁸⁷ prend ainsi place au cœur de la modélisation des systèmes complexes.

L'état critique autoorganisé n'est plus un état instable entre deux phases stables comme c'est le cas dans la plupart des transitions de phases habituelles. L'état critique autoorganisé est bien un attracteur des états dans son voisinage. Mais il est *métastable et d'autant plus métastable qu'il est au bord du chaos comme dans l'exemple du tas de sable(fig.5).*

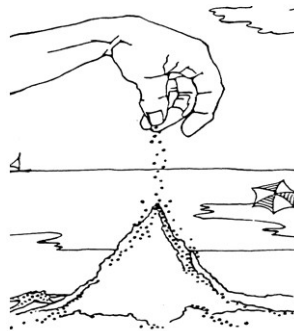


Fig. 5 : Exemple du tas de sable avec sa pente critique (le paramètre de contrôle) et ses avalanches (la pente en chaque point est le paramètre d'ordre : une avalanche ne se produit qu'au-delà de la pente critique)⁸⁸.

⁸⁷ Par exemple, Per Bak & Stefan Boettcher, 1997: <https://arxiv.org/pdf/cond-mat/9701157.pdf>

⁸⁸ Si l'on considère le tas de sable (fig 3), le paramètre de contrôle est la pente critique. Chaque fois que la pente dépasse cette pente critique, une avalanche (c'est le paramètre dit d'ordre) se déclenche pour remettre l'ensemble des pentes en dessous de la pente critique. Il y a rétroaction du paramètre d'ordre

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

Du fait de la criticalité, les avalanches, leur durées et leurs spectres d'énergie obéissent à des lois puissance⁸⁹. Tout phénomène critique est invariant d'échelle et se modélise grâce à la 'théorie de la renormalisation' des phénomènes critiques : cette théorie démontre que ces lois puissances ont des exposants qui vérifient des *lois d'échelle* invariante quand la dimension de l'espace du même phénomène augmente : les lois d'échelle entre les exposants des lois puissance du tas de sable en 2D sont les mêmes que les tas en 3D, 4D, ..).

La figure de la criticalité autoorganisée peut se résumer par des équilibres stationnaires ponctués par des avalanches co-évolutionnaires en lois puissances.

4^{ème} principe phénoménologique : le bord du chaos dans le diagramme général des phases :

On peut maintenant situer les systèmes complexes dans le diagramme de phase général ci-dessous⁹⁰ : « *T* » est la partie

(i.e. l'avalanche) sur le paramètre de contrôle (i.e. la pente). Le tas de sable est métastable autour de son état critique et sa métastabilité est maximale quand sa pente est partout égale à sa pente critique : un seul grain de sable à n'importe quel endroit va déclencher de façon immédiate une de ses plus grandes avalanches.

⁸⁹ Tels les feux de forêt, les ouragans, les tempêtes, les tsunamis, les maladies et les épidémies, etc..

⁹⁰ Le diagramme ci-dessous est extrait de l'article anglais de Wikipedia sur la place de la supersymétrie dans la théorie des dynamiques stochastiques. Il est à noter qu'une large place y est faite aux travaux de Giorgio Parisi, le 1^{er} prix

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

intégrable symétrique, ordonnée comme l'est le cristal. « C » est la partie non intégrable du chaos stochastique comme l'est la fumée. Et « N » est la partie ordonnée au bord du chaos entre le cristal « T » et la fumée « C »⁹¹. « N » est le lieu où se placent les systèmes complexes avec leur route vers le bord du chaos et leur criticalité autoorganisée même au voisinage du zéro absolu (selon l'esquisse de la démonstration ci-dessus).

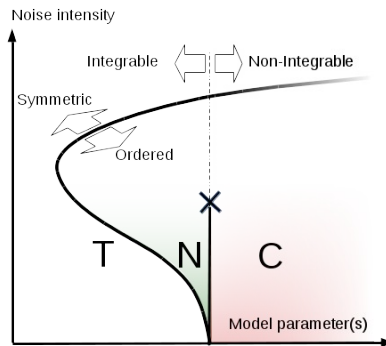


Fig. 6 : By Vasiliï Tiorkin - [Own work](#), CC BY-SA 4.0,

Le point de rencontre de 'N' avec l'axe horizontal correspond à un bruit nul, e.g. le zéro absolu en température : c'est la situation limite qui correspond au grand théorème de Freidlin et Wentzell et aux systèmes complexes. C'est la situation limite au bord du chaos entre le cristal (un ordre parfait) et la fumée (un désordre

Nobel en physique pour l'étude des systèmes complexes.

⁹¹ La complexité émerge 'Entre le cristal et la fumée', selon le beau titre d'un livre d'Henri Atlan.

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

parfait) où il n'y a qu'un seul bassin d'attraction y compris quand le bruit augmente. -

Ces résultats ont des implications immédiates importantes au voisinage du bruit nul (par exemple, la température absolue nulle) : ou bien il n'a qu'un seul bassin d'attraction (c'est le cas du 'cristal' à gauche ou de la 'fumée' à droite dans la phase chaotique). Ou bien le parcours n'est autre qu'une route au bord du chaos et la criticalité autoorganisée. Et le système complexe reste au bord du chaos, au moins tant que le bruit (e.g. la température) n'est pas trop important pour causer sa disparition.

3. Conclusion : définition d'une « dynamique stochastique complexe »

On peut résumer ainsi les propriétés d'une 'dynamique stochastique complexe' ou « dynamique complexe » puisque toute dynamique complexe est stochastique.

***Définition** : une « dynamique complexe » est une dynamique stochastique dont la trajectoire moyenne va vers le bord du chaos (propriété falsifiable mesurée par l'entropie de*

Kolmogorov-Sinai) et les fluctuations sont les lois puissances⁹² (propriété falsifiable) d'une criticalité autoorganisée⁹³.

Thèse : Tout ce que nous appelons *phénoménologie d'un système complexe* peut se reconstruire exactement comme une *dynamique complexe*.

La phase N (fig.6) contient clairement les dynamiques des systèmes complexes. Elle embrasse aussi bien la *morphogénèse* de la matière condensée, des tas de sable, des organismes vivants, les écosystèmes ou encore l'*émergence* de l'intelligence individuelle et collective et les territoires intelligents à toutes les échelles jusqu'à l'écosphère. Chacun de ces systèmes est le lieu de toutes sortes d'avalanches comme les feux de forêt, les ouragans, les tempêtes, les tsunamis, les maladies et les épidémies, les news de toutes sortes, etc... Ces avalanches sont de toute taille et de toute durée suivant *une 'loi puissance'* signature de tout état critique, *ici désigné sous label d'état critique autoorganisé*'. Tout phénomène critique est invariant

⁹² Tels la turbulence, les avalanches co-évolutionnaires, l'échelle de Richter des tremblements de terre, la formation de patterns, les bruits en 1/f, les feux de forêt .. Et bien d'autres phénomènes de rupture de l'ordre spontané.

⁹³ Tels la turbulence, les avalanches co-évolutionnaires, l'échelle de Richter des tremblements de terre, la formation de patterns, les bruits en 1/f, les feux de forêt .. Et bien d'autres phénomènes de rupture de l'ordre spontané.

SYSTÈMES COMPLEXES : THÉORIE & PRATIQUES

d'échelle et se modélise grâce à la 'théorie de la renormalisation' qui rend compte de ses lois puissances dont les exposants obéissent à des *lois d'échelle*.

Ce livre a été imprimé en France

Dépôt légal : Année Mois (exemple : Janvier 2020)