

AFSCET

Res-Systemica

Revue Française de Systémique
Fondée par Evelyne Andreewsky

Volume 25, Rochebrune 2022

Systemes complexes ; théorie et pratiques

Res-Systemica, volume 25, article 01

De la complexité à la simplicité :
théorie, métrique et applications aux technologies cognitives

Charles Tijus, François Jouen

25 pages



Creative Commons

DE LA COMPLEXITÉ À LA SIMPLICITÉ : 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 Bourgin 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 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 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 affordantes-, 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* » (Bourguine & 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 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 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 accrétion (*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 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 simplexification 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 simplexifiant*).

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 simplexité 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 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 psychophysique 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, (iii) 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 alors la compréhension du complexe et sa simplexification (reconceptualisation).

La simplexification 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 quelque 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

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 lesdites 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 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, Bourguin 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 éenactif 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 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, 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 ($\text{COMP.obj} = N_c \times N_d$). 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 subordonnées*), il en découle des règles pour la simplexification : « *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 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.

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.

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.

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.

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.

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 simplexification sont les suivants. Au niveau 13, les deux enfants font 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 3. 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* », 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.