



HAL
open science

L'innovation par l'hybridation

Gilbert Giacomoni, Rémi Jardat

► **To cite this version:**

| Gilbert Giacomoni, Rémi Jardat. L'innovation par l'hybridation. 2013. hal-00786648v3

HAL Id: hal-00786648

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00786648v3>

Preprint submitted on 4 Jun 2013 (v3), last revised 14 Sep 2013 (v5)

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

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

L'innovation par l'hybridation

(Innovation by Hybridization)

Gilbert Giacomoni

IRG - Université Paris 12 (UPEC) CGS □ Chaire TMCI (FIMMM) - Mines ParisTech
61, Avenue de Général de Gaulle, 94010 Créteil 60, Boulevard Saint-Michel, 75006 Paris
gilbert.giacomoni@u-pec.fr gilbert.giacomoni@mines-paristech.fr

Rémi Jardat

Directeur de la recherche (HDR) □ ISTECH
12, Rue Alexandre Parodi, 75010 Paris
Chercheur associé □ CNAM LIRSA EA CNRS n°4633, PARIS
r.jardat@istec.fr

Résumé: D'après l'Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle et l'Organisation Mondiale du Commerce, un élément de nouveauté inclut des caractéristiques nouvelles ne faisant pas partie du fond de connaissances existantes dans le domaine technique considéré. Nous partons de l'idée qu'un concept d'objet, de procédés, d'organisations ou de marchés est novateur quand il y a survenance d'un processus d'hybridation de fonds de connaissances jusque-là indépendants à l'issue duquel, de nouvelles identités émergent sur un nouveau fond de connaissance. Nous proposons une théorie générale pour concevoir de telles hybridations au cours d'un processus d'exploration sélective impliquant la rationalité, l'imaginaire, la mémoire, l'analogie et la réflexivité.

Mots clés: innovation, invention, création, conception, mémoire, imaginaire, hybridation, analogie, réflexivité,

Abstract: According to the World Intellectual Property Organization and World Trade Organization, a novelty item includes new features that are not part of the background of existing knowledge in the technical field. We start from the idea that the concept of object, processes, organizations or markets, is innovative when there is an occurrence of a hybridizing-process of previously independent knowledge backgrounds, after which, new identities emerge on a new unique one. We propose a general theory to design such hybridizations of knowledge backgrounds, during an exploration process involving selective rationality, imagination, memory, analogy and reflexivity.

Keywords: innovation, invention, creation, design, memory, imaginary, hybridization, analogy, reflexivity,

Introduction

La Commission Mondiale pour l'Environnement et le Développement (WCED), dite «Commission Brundtland» a défini comme «durable» "un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs" (1987). Cette définition a été officialisée au Sommet de la Terre à Rio en 1992 en prenant appui sur trois piliers: un développement économiquement efficace, socialement équitable et écologiquement soutenable. L'établissement de nouvelles relations entre le milieu naturel et l'homme s'est déjà produit par le passé, par exemple à la suite du réchauffement de l'Holocène (de Beaune, 2008). Il transforme tous les domaines de la vie. Il concerne les individus, les entreprises, les pouvoirs publics, la société civile, les parties prenantes en général. Ces collectifs peuvent y voir une contrainte (devoir, obligation, demande) s'ajoutant à d'autres déjà pesantes: sécurité (santé publique, protection des biens et des personnes, etc.), efficacité (économique, publique, etc.), droit (social, travail, etc.), etc. Mais comment peuvent-ils y voir, même si cela semble contradictoire, une opportunité (performance, différenciation) plus qu'une contrainte ? Sinon en reconcevant de manière innovante, ce qui fondamentalement les caractérise ou les différencie: leurs produits, leurs procédés, leur organisation, leurs savoirs, leurs marchés, etc. ?

L'innovation est, du point de vue de l'histoire des techniques, de l'économie ou de la gestion, le processus qui conduit la conception d'une idée, d'un comportement ou d'un objet nouveau à son acceptation et à son application généralisée (de Beaune, 2008; Thuderoz, 2004). En nous intéressant aux mécanismes par lesquels un collectif humain organisé peut reconcevoir de nouvelles relations durables avec son environnement, nous cherchons à comprendre la transformation d'un état du développement considéré initialement comme non-(entièrement) durable par un collectif humain, à un état reconnu finalement comme durable par un collectif plus élargi (puisqu'il concerne tout le monde y compris le futur). Les collectifs d'acteurs réunissent et intersectent leurs points de vue, leur fond de connaissance et leurs contraintes au fil du processus, au terme duquel, l'état final est supposé présenter des propriétés d'équité, de soutenabilité ou d'efficacité économique, se conjuguant avec des propriétés originelles des produits, procédés, organisations, marchés, (etc.), toujours reconnaissables, mais dans une nouvelle cohérence, plus générale, où l'identité des objets (procédés, etc.) et des relations est redéfinie. S'opère ainsi ce que nous appelons une «hybridation» au cours d'un processus d'exploration sélective impliquant, la rationalité (1),

l'imaginaire (2), la mémoire (3), l'analogie (4) et la réflexivité (5). Puisque nous allons devoir recourir souvent à ces termes, il convient de leur attribuer d'ores et déjà une première définition tout en sachant que ces notions sont développées plus loin.

La rationalité (1) est à comprendre aux travers des notions de prouvabilité (aspect syntaxique) et de validité (aspect sémantique) du point de vue de la méta-mathématique (Tarski, 1935). L'imaginaire (2) "est le résultat du travail de l'imagination, faculté de se représenter quelque chose qui n'existe pas, à partir du réel. Par suite, il est une sorte de rêverie, une projection dans un temps ou un espace éloignés d'une réalité souhaitée (□)" (Jarrige & Morera, 2005). L'imaginaire est à comprendre au sens de l'artificiel (Simon, 1969, 1996). Un objet imaginaire est un artefact créé (ou plutôt conçu) à partir d'un objet naturel abstrait de son environnement, suspendu au dessus de toute loi, dans le but d'en adapter les caractéristiques à un environnement de destination différent. L'objet imaginaire ou artificiel est ainsi "caractérisé en termes de fonctions, de buts, d'adaptation", "synthétisé par les êtres humains" et peut "imiter¹ les apparences de l'objet naturel, bien qu'il lui manque, sous un ou plusieurs aspects, la réalité de l'objet naturel" (Simon, 1996). Le réel est donc définissable par ce qui, dans l'environnement externe ou interne d'un individu, renvoie à toute chose existant dans l'univers sous une forme ou une autre, qu'elle soit perceptible par les sens ou par la pensée, et susceptible de s'opposer aux intentions de l'individu (l'artificiel étant par opposition conçu par l'individu dans une intention donnée). La mémoire (3) humaine est une capacité d'enregistrer des informations qui peuvent être évoquées par des stimuli appropriés (Simon, 1996). Elle participe à l'apprentissage, c'est-à-dire à tout changement dans un système qui produit un changement plus ou moins permanent dans sa capacité d'adaptation à son environnement. L'analogie (4) est une association d'éléments qui ne se donnent pas d'emblée pour comparables (de Beaune, 2008). Elle intervient pour établir une relation d'équivalence et définir l'identité² (dans le temps ou l'espace). "Invariance is a classification of observations with equivalence relations" (Reuchlin, 1966). La réflexivité (5) est la réflexion se prenant pour objet, une métaréflexion, une métaconnaissance sur la manière dont les savoirs ont été acquis et dont ils peuvent être utilisés et étendus (Morisse, 2003), une abstraction (Piaget, 1977). "L'abstraction réfléchissante porte sur toutes les activités cognitives du sujet (schèmes ou coordinations d'actions, structures, etc.) pour en dégager certains caractères et les utiliser à d'autres fins (nouvelles adaptations, nouveaux problèmes, etc." (Piaget, 1977).

¹ L'imitation révèle la technique d'imitation, c'est-à-dire la chose à produire telle qu'elle a été conçue, l'essence de l'œuvre, de la création [au sens grec de la Tekhnè (Heidegger, 1962)]. La Tekhnè est ainsi associée à l'Epistèmè, c'est à dire la connaissance.

² "Qualité d'être bien celui qu'il prétend être", "qu'une chose est la même qu'une autre" (Littré, 1976).

La transcription du processus d'hybridation (impliquant rationalité, imaginaire, mémoire, analogie et réflexivité), en théorie comme en pratique, est naturellement stratégique sur le plan gestionnaire pour savoir hybrider des positions initialement inconciliables en recherchant une nouvelle cohérence (comme ce peut être le cas pour le développement durable)³ et non à l'intérieur d'une cohérence fixe donnée [Human problem solving] (Newell & Simon, 1972). En corollaire, un concept d'objet (i.e. procédé, etc.) serait novateur par rapport à son aîné quand il y a survenance d'un processus d'hybridation. Il se trouve qu'au sens de l'Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle et de l'Organisation Mondiale du Commerce (2004), un élément de nouveauté inclut des caractéristiques nouvelles ne faisant pas partie du fond de connaissances existantes dans le domaine technique considéré [état antérieur de la technique]⁴. Un changement de taille ou de matériaux ou une substitution par un élément ou une fonction équivalent ne sont pas considérées comme inventives. La capacité de créer en hybridant pourrait donc potentiellement être un avantage compétitif stratégique: "C'est désormais la capacité à innover, à créer, des concepts et à produire des idées qui est devenue l'avantage compétitif essentiel" (Lévy & Jouyet, 2006).

Nous consacrons la première partie à l'illustration du processus de création par l'hybridation, à des exemples, aux cas d'emplois de diverses théories ou méthodes de conception innovante (Biomimétique, Blue Ocean Strategy, Abstraction Operators, Concept-Knowledge, TRIZ, etc.). La seconde partie est consacrée à la compréhension du processus lui-même, à ses ancrages scientifiques et aux questionnements qu'il soulève pour la recherche aussi bien en science de gestion que dans d'autres domaines tels que la psychologie cognitive de la mémoire humaine. La conclusion est de portée plus stratégique en ouvrant le débat sur les implications pratiques.

I ILLUSTRATIONS D'INNOVATIONS PAR HYBRIDATION

La nouveauté par hybridation, comme nous le verrons au travers de quelques exemples, n'est pas que pure combinatoire des éléments constituant les entités-mères. Le processus contient une irréversibilité et produit une forte sensation de plongement dans un

³ Le remplacement d'une substance dangereuse mais indispensable suppose de concevoir une solution de substitution si elle n'existe pas. Le plomb (substance dangereuse) constitue un élément de base des soudures étain-plomb utilisées dans toute l'industrie électronique et il n'existe pas de substitut direct sans plomb. Il en est de même du bisphénol A utilisé notamment pour les emballages en métal (canettes, boîtes rectangulaires, boîtes cylindriques, etc.) qui ne peut être remplacé dans l'ensemble de ces applications par aucun substitut connu car tous partagent une structure chimique commune qui leur confère des propriétés similaires aux oestrogènes.

⁴ Qui détermine les possibilités de classification au sens de l'Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (2001)

univers étrangement nouveau, plus vaste, plus généralisant, faisant voir autrement les contradictions initiales. Nous allons tâcher d'expliquer pourquoi et comment cela se produit.

Les exemples d'hybridation qui vont suivre ont en commun un dépassement des ancrages originels aussi bien des savoirs que des modes de pensée, qui a nécessité notamment de renégocier les relations existantes et d'apprendre à travailler d'une manière inhabituelle, voire inattendue. Sous certains aspects, cette approche réactualise mais surtout généralise à toutes sortes d'objets les propositions désormais classiques de Simondon (1958) relatives à la genèse des ensembles et individus techniques par "intercommutation"⁵ de leurs éléments.

Le septième art a innové en hybridant la prise de vue réelle et le film d'animation (cartoon). Max Fleischer (1919) a introduit des personnages de bande dessinée (Betty Boop) dans un univers réel tandis que Walt Disney (1923) optait pour le principe inverse, avec un personnage réel (Alice) accédant par le rêve à un univers de bande dessinée (Alice's Wonderland). Plus récemment, le film Avatar de James Cameron (2009), plus grand succès de l'histoire du cinéma, a hybridé via le programme "Avatar" un univers virtuel et un univers réel. Ray Charles a hybridé des styles musicaux différents ("crossover"), le gospel avec le Rythm and Blues (R&B) qui a donné la soul (musique de l'âme). Il est aussi le premier artiste noir de l'histoire à être écouté par un public blanc. Le cirque du soleil est une compagnie artistique dont les spectacles sont une hybridation du cirque traditionnel et du théâtre, avec une grande importance donnée aux jeux de comédiens, l'absence d'animaux et principalement des numéros d'acrobaties. La biomimétique hybride des disciplines inattendues en s'inspirant de la nature pour mettre au point des substances plus performantes, des câbles copiant la soie des toiles d'araignée ou des architectures copiant le système de ventilation très performant des termitières. Le logement intergénérationnel est un principe hybride permettant à des étudiants d'être logés chez des personnes âgées en échange d'une présence active. Les hydroliennes sous-marines ou flottantes avec un axe vertical, sont des éoliennes entièrement transformées pour le milieu maritime. L'hydroptère est une hybridation du bateau et de l'avion. Grâce à des ailes immergées, à partir d'une certaine vitesse, la coque décolle pour se maintenir en équilibre hors de l'eau. Dans l'industrie automobile, l'innovation "Hybride Eco" du groupe PSA Peugeot Citroën (co-développée avec les équipementiers Valéo, Bosch, Continental) couple un moteur thermique avec une machine électrique pour optimiser le rendement global, notamment au démarrage à basse vitesse et en phase d'accélération par addition de puissance, procurant de nouvelles expériences de conduite sans bruits ni vibrations. Les véhicules en seront équipés à partir de 2017. La montre "Swatch" (du groupe

⁵ [p.87]

SMH) est une hybridation du métier de l'horlogerie et de celui de la plasturgie (Garel, 2012). SMH a aussi produit une hybridation avec le groupe automobile Mercedes-Benz en donnant naissance à la SMART. L'hybridation est aussi de nature institutionnelle, structurelle et organisationnelle (Guerin Schneider & Nakhla, 2010)⁶. Dans le domaine financier par exemple, pour répondre à un avantage concurrentiel tout en satisfaisant des besoins sociétaux hors de toute logique de profit, ont émergé des «groupes coopératifs hybrides»(Jardat et al., 2010), notamment des banques coopératives avec des filiales ou co-entreprises de statut privé, dans lequel un équilibre métastable s'établit entre logiques de profit à court terme et de finance patiente, d'internationalisation et d'ancrage dans la proximité (dans toutes ses dimensions, géographique, sociale professionnelle).

Parmi les exemples relatés, certains ont été étudiés d'après une théorie ou une méthode de conception innovante. C'est le cas de la Swatch d'après la théorie Concept-Knowledge [s'inspirer de ce qui existe déjà et de connaissances lointaines voire nouvelles, pour envisager des concepts initialement décalés, hors-champ des possibles] (Garel G., 2012; Hatchuel & Weil, 2007) ou du Cirque du Soleil d'après la Blue Ocean Strategy⁷ [s'inspirer de ce qui existe déjà dans des domaines séparés pour envisager un composé nouveau et viable] (Kim & Mauborgne, 1995) ou encore de la Biomimétique [s'inspirer de ce qui existe dans la nature et refaire le cheminement de l'évolution à l'envers pour envisager de nouvelles applications] (Benyus, 2011 ; Freitas Salgueiredo, 2013). Il est intéressant d'observer que ces approches, comme d'autres revendiquant également une capacité de générativité d'innovation, procèdent selon des principes analogues même si les angles d'attaque peuvent varier. Ainsi en est-il du Reverse Engineering [s'inspirer de ce qui existe déjà et refaire le cheminement de conception à l'envers pour envisager de nouvelles opportunités] (Chikofsky & Cross, 1990) ou de la Teorija Reshenija Izobretateliskih Zadatch (TRIZ) [s'inspirer d'un concept et d'une application lointaine pour envisager une transposition inattendue mais fructueuse] (Altshuller, 1946). Le paradoxe et la contradiction entourant la compréhension d'une hybridation se manifestent dans la plupart des méthodes et théories mentionnées [hydroptère (le bateau qui vole), hydrolienne (éolienne flottante à axe vertical ou sous-marine), banques coopératives, etc.].

La recherche d'une nouvelle cohérence qui donne à la métaphore de l'hybridation son sens nouveau et qu'accompagne la sensation de plongement (ou peut-être devrait-on dire

⁶ [This new hybrid regulation, between commission regulation and franchise bidding ()][p.1]

⁷ Cette stratégie marketing est bien une méthode de conception d'un «Blue Ocean»

d'«Eurêka»⁸), entretient avec la cohérence primitive un rapport de procréation⁹ qui a constitué un autre angle d'attaque de la part de théories inter-reliant des sciences telles que la cognition, les mathématiques, la philosophie, l'intelligence artificielle, le marketing ou l'anthropologie et l'ethnologie. Le rapport de procréation entre la cohérence nouvelle et la cohérence primitive tient au fait qu'il ne s'agit pas d'une hybridation générée dans un univers donné et dont le résultat appartiendrait encore à cet univers, mais d'une hybridation générée hors de l'univers primitif, dans un nouvel univers plus général, plus étendu, englobant ce dernier. Toute la question est de savoir comment est procréé (ou reconçu) ce nouvel univers généralisant et comment se coproduit, dans le même mouvement, l'hybridation. D'où la dualité des angles d'attaque théoriques précédemment cités¹⁰. C'est à cette question que nous allons répondre dans la seconde partie. Mais auparavant, il est certainement utile de s'attarder plus longuement sur un exemple illustrant le processus de création dont il est question, de parler des approches théoriques qui lui sont consacrées et de montrer l'étendue des liens avec celles dont les cheminements semblent aussi converger dans le même sens.

L'exemple que nous avons choisi de revisiter est celui qui a initié le Fregean Programme (Frege, 1873, 1879, 1893-1903) et les travaux ultérieurs (Whitehead & Russell, 1910-13 ; Wright, 1983 ; Dummett, 1992) dédiés aux fondements scientifiques des processus de création par abstraction (Hale, 20002 ; Fine, 2002 ; Tennant, 2004) ou par extension (Tappenden, 1995 ; Cook, 2007 ; Shapiro & Weir, 2007), à savoir le passage saisissant de la géométrie plane (d'Euclide)¹¹ à la géométrie projective (avec perspective¹²). Ce passage est saisissant par l'impression de profondeur qu'il produit en donnant l'illusion tridimensionnelle de réalité (notamment avec les ombres) absente en géométrie plane. "La géométrie descriptive a deux objets: le premier, de donner les méthodes pour représenter sur une feuille de dessin qui n'a que deux dimensions, savoir, longueur et largeur, tous les corps de la nature, qui en ont trois, longueur, largeur et profondeur, pourvu néanmoins que ces corps puissent être définis rigoureusement. Le second objet est de donner la manière de reconnaître d'après une description exacte les formes des corps, et d'en déduire toutes les vérités qui résultent et de leur forme et de leurs positions respectives." (Monge, 1827). L'une et l'autre

⁸ Cri qu'aurait poussé Archimède (III^{ème} avant J.C.) en comprenant le principe de la poussée s'exerçant sur un objet plongé dans un liquide.

⁹ Le terme de «procréation» est préféré à celui de «création» car il ne s'agit pas d'une création ex nihilo.

¹⁰ Par exemple, la théorie «Concept-Knowledge» s'appuie sur la méthode du «forcing» (extension générique) développée par le mathématicien Cohen P. en 1963 (Hatchuel & Weil, 2007) ; «Abstraction Operators» (Tennant, 2004) ou «Extending knowledge and fruitful concepts» (Tappenden, 1995) s'appuient aussi sur un principe d'«extension» («Fregean Programme»).

¹¹ III^{ème} avant J.C.

¹² On doit au peintre et architecte florentin Brunelleschi (1377-1446) les bases de la perspective.

géométrie, euclidienne et projective, ont leur cohérence et leur utilité. La géométrie euclidienne autorise l'existence de lignes pouvant ne jamais se croiser, en l'occurrence des parallèles. En géométrie projective, toutes les lignes se coupent nécessairement lorsqu'elles sont prolongées à l'infini, les lignes considérées comme parallèles en géométrie plane convergeant¹³ en géométrie projective vers leur point de fuite commun sur une ligne d'horizon. La géométrie plane est employée pour un acte immobilier notarié, une notice technique d'installation, etc. La géométrie projective est employée pour la conception numérique, les projets architecturaux, etc.

La géométrie projective se fonde sur une cohérence plus générale que celle sur laquelle se fonde la géométrie euclidienne. La représentation en géométrie projective sur une vitre se superpose parfaitement à l'observation. Tous les points de la vitre (ou du tableau) peuvent être perçus avec leur distance et avoir un correspondant réel, sauf un point de fuite, théoriquement à l'infini, qui correspond au point de vue où se situe l'observateur, devant la vitre, à une distance finie, avec lequel il varie (Volken, 2009). Dans la cohérence initiale (en géométrie plane), un point de fuite est hors de l'univers de référence et semble être imaginaire [acception mathématique (Foulquié, 1962) "qualificatif appliqué à un élément qui ne peut (ou qui ne semblait pouvoir) être associé à aucune figuration"]¹⁴ ou comme disait Leibnitz, être "un monstre du monde des idées" (Boyé, 1998) [le terme *monstrum* en latin signifiant "prodige ayant une valeur de présage" (Céard, 2004)]¹⁵. Pour retrouver une correspondance avec le réel, il faut faire une extension de ce réel, c'est-à-dire considérer la scène en englobant l'observateur, ce qui implique une réflexivité, une abstraction, un dépassement. Le passage de la géométrie plane à la géométrie projective consiste à accéder ainsi à l'enveloppe des choses en faisant une extension (projective) de l'espace pour rendre les points de fuite accessibles, les empêcher en quelque sorte de fuir à l'infini (Hartley & Zisserman, 2000) et combler un trou¹⁶ (Sage, 2006). Comblé en fait l'incomplétude de toute représentation aussi cohérente soit-elle et accéder à une nouvelle cohérence où tous les points, revêtant une définition plus générale,

¹³ Cette géométrisation de l'espace conserve le birapport de quatre points alignés par projection centrale (Voelke, 2008) c'est-à-dire que deux perspectives d'une même figure ont des propriétés géométriques communes (L.B. Alberti, en 1511).

¹⁴ Comme ont pu être qualifiés en leur temps les nombres imaginaires (Araujo Silva, 2008 ; Euler, 1777 ; Descartes, 1637)

¹⁵ Dans *Frankenstein ou le Prométhée moderne* (1817), un savant de ce nom construit un être monstrueux différent des êtres humains, sans âme, à l'aide de parties de différents corps d'êtres humains.

¹⁶ S'il avait été question d'une image numérique, divisible en points (pixels) sur un écran, il aurait été impossible de donner une valeur (par exemple d'intensité ou de couleur) au point de fuite. Un trou dans l'image en quelque sorte. Il en va de même du point aveugle dans notre champ de vision, qui correspond au seul point de la rétine qui ne voit pas en raison de l'absence de photorécepteurs à cet endroit où le nerf optique et les vaisseaux sanguins quittent l'œil. Le nerf optique est une extension du diencéphale (Fix, 2012).

en l'occurrence en tant que "direction"¹⁷, font tomber leurs différences et apparaissent de même nature.

L'exemple que nous venons de voir illustre la procréation d'univers nouveaux, par abstraction ou par extension, que nous pouvons retrouver dans des domaines aussi variés que les mathématiques, la philosophie et l'intelligence artificielle (Colton & al, 1999 ; Steel & Al., 2000), mais aussi les arts ["abstraction in art" (Zimmer, 2003) ; Solso, 1996)], le marketing stratégique ["l'extension de marque" (Ladwein, 1993)], le management ["strategy's origin", "interplay between organizational and field-level cognitive processes" (Gavetti & Rivkin, 2007) ; "Strategy as creativity" (Bilton & Al., 2003)], les sciences sociales ["fragmentation et hybridation des disciplines" (Dogan & Pahre, 1991)] et la préhistoire¹⁸ ["processus analogique", "abstraction et généralisation", "réflexivité" (de Beaune, 2008)].

II - FONDEMENTS SCIENTIFIQUES ET CONCEPTS CLES: COHERENCE, IMAGINAIRE, MEMOIRE, ANALOGIE, REFLEXIVITE,

Notre démarche se raccroche à ce qu'il y a de plus général (la méta-mathématique) pour assurer toute la portée souhaitable en vue d'applications ultérieures. Sur le plan formel et symbolique, nous allons donc recourir à des vocables et à des représentations à connotation méta-mathématique, qui demandent au besoin un usage re-délimité avec attention.

[A] Cohérence et réflexivité : un patrimoine axiomatique pour représenter le réel

Ce qui tombe sous le sens du mot cohérence n'a pas nécessité jusqu'ici de définition plus précise pour comprendre provisoirement et de manière acceptable le processus d'hybridation ou son dual, le processus d'extension ou d'abstraction. Il est néanmoins opportun à présent de le faire et de s'appuyer à dessein sur la notion de prouvabilité des constructions purement formelles (Boniface, 2004) et sur la notion de validité dans un univers qui existe bel et bien. La cohérence étant établie lorsque ce qui est prouvable est valide et réciproquement lorsque ce qui est valide est prouvable. La consistance d'une théorie repose sur la prouvabilité de ce qu'elle formule et s'entend d'un point de vue syntaxique dans un

¹⁷ Représentant les droites pointant dans cette direction. "De même direction" est interprétable pour des parallèles en géométrie plane comme en géométrie projective.

¹⁸ Conception de nouveaux outils par l'homme

système de déduction¹⁹ adéquat. La validité repose sur l'existence²⁰ d'un univers adéquat où la théorie est interprétable et pleinement explicative d'un point de vue sémantique. Les deux points de vue, syntaxique et sémantique, sont équivalents (Nagel & Al., 1989). Par exemple, "On voit que, pour arriver à la solution de ces deux questions, il fallait d'abord bien connaître l'analyse et la nature du corps susceptible de fermenter, et les produits de la fermentation ; car rien ne se crée, ni dans les opérations de l'art, ni dans celles de la nature, et l'on peut poser en principe que, dans toute opération, il y a une égale quantité de matière avant et après l'opération ; que la qualité et la quantité des principes est la même, et qu'il n'y a que des changements, des modifications" (Lavoisier, 1789)²¹.

Dire qu'une théorie (T) est consistante d'un point de vue syntaxique signifie donc qu'il n'est pas possible de prouver à partir de (T) une chose et son contraire. Car d'une contradiction, on peut inférer n'importe quelle conclusion et plus rien alors ne tient, tout se défait. Lorsqu'il est établi théoriquement ce qui suit: "si ceci est vrai et que ceci implique cela est vrai, alors cela est vrai". Toute situation réelle dans laquelle ceci est vrai (autrement dit il ne s'agit plus d'une hypothèse théorique mais d'une réalité), autorise à dire aussi (sans redéployer la démonstration) que cela est également vrai et de le vérifier (autrement dit, la conséquence prévisible est elle aussi devenue réalité). Une telle situation dans laquelle on a pu transposer la théorie et la vérifier est un univers "modèle" (terme employé par Tarski, 1935), en ce sens qu'on a pu interpréter ceci et cela sans avoir à considérer quoique ce soit d'autre. On peut dire que la théorie habite son modèle réel, un peu comme les données réelles habitent les variables d'une équation ou d'un logiciel. Pour valider une théorie il faut pouvoir modéliser un univers réel dans lequel elle est vraie (Tarski, 1972-1974). Un peu à la manière dont un architecte modèle l'univers réel à travers une maquette pour donner corps à son futur ouvrage. Modéliser un univers réel consiste à le réduire en ne conservant que ce qui est nécessaire et suffisant pour que les concepts manipulés par la théorie renvoient toujours à un univers réel interprétable (faisant sens)²².

¹⁹ Règles logiques, raisonnements par implication, par l'absurde, etc.

²⁰ Un exemple illustratif est le débat officiel portant sur la validité de la théorie d'une origine génétique [gène de la violence cpy6A20 sur la mouche *drosophile*] du trouble comportemental des enfants, afin d'en faciliter le diagnostic dès l'âge de trois ans et de mettre en œuvre un programme de suivi jusqu'à l'âge adulte. "Le trouble des conduites s'exprime chez l'enfant et l'adolescent par une palette de comportements très divers qui vont des crises de colère et de désobéissance répétées de l'enfant difficile aux agressions graves comme le viol, les coups et blessures et le vol du délinquant" (Rapport de l'unité 666 de l'Institut National de la Santé et de la recherche médicale [INSERM], 2005).

²¹ Lavoisier A., (1789), *Traité élémentaire de chimie*, Cuchet, Paris,

²² Par exemple, les bilans financiers d'une entreprise incarnent un réel modelé d'après une certaine théorie financière. Il en est de même d'une carte de géographie, etc.

En fait, aucune construction théorique ne parvient à épouser parfaitement le réel. "La nature ne nous présente aucune réalisation parfaite de nos concepts abstraits" (Gonseth, 1939). Le raisonnement par analogie²³ entre la théorie et le réel est limité, conditionné par les choix primitifs qui viennent en tête de toute théorie dite axiomatique adoptée en général quand il est malaisé de définir les êtres (et des relations licites) dont on veut étudier les propriétés à partir d'êtres (et de relations licites) plus primitifs encore. Les êtres de base sont alors introduits individuellement ou collectivement (structure des relations) sans chercher à en déterminer la nature (susceptible de changer) mais seulement en recensant leurs propriétés, pour ensuite explorer les conséquences de celles-ci (sur leur comportement), prises comme point de départ axiomatique (Dehornoy, 2004). Il est déterminant de savoir si une propriété dépend ou pas de l'axiomatique. En cas de dépendance²⁴, tous les êtres introduits sans exception satisfont ladite propriété [prouvabilité] (resp. ne la satisfont pas [réfutabilité]). Alors qu'en cas d'indépendance, parmi les êtres introduits certains la satisfont et d'autres pas. La propriété est dite non-triviale dans ce dernier cas d'indépendance [resp. triviale (universelle) dans le cas précédent de dépendance].

[B] Décidabilité et extension du patrimoine axiomatique

Toucher à l'axiomatique peut donc affecter les propriétés des êtres (leur définition, par ricochet leur interprétation) et les règles du jeu (relations licites), ces bien-fondés non-contradictaires desquels tous les autres concepts et propositions sont logiquement déduits. Nous avons vu qu'il paraissait évident en géométrie plane que des droites parallèles ne se rejoignent jamais (axiome), alors qu'elles se rejoignaient en géométrie projective. La manipulation implicite ou inconsciente d'une (future fausse) évidence posée en axiome peut influencer sur les propriétés caractéristiques permettant de définir les choses. Nous avons vu que la définition des points en géométrie plane n'était pas applicable aux points de fuite, alors qu'en géométrie projective ils avaient une propriété caractéristique commune.

Dans un univers où tous les êtres satisfont à des propriétés triviales (universelles), distinguer ceux qui satisfont, en outre, une propriété connue pour être non-triviale, ne présente pas de difficultés. Pour s'en convaincre, il suffit de penser à une sélection de points présentant une propriété d'alignement en géométrie plane, ces points sont d'abord et avant tout des points comme les autres. Savoir qu'une propriété est non-triviale est de ce point de vue

²³ "Un des déterminants fondamentaux du fonctionnement cognitif" (Cauvin, 1978), propos cités (de Beaune, 2008)

²⁴ Cas d'une propriété nocive du plomb, présent dans toutes les soudures étain-plomb et n'ayant aucune substitution directe connue.

indispensable. Mais toute la difficulté se concentre lorsque l'on introduit des êtres ne satisfaisant pas l'une des propriétés triviales de l'univers de départ (exemple de tels êtres: un point de fuite, une soudure sans plomb, etc.) ce qui est contradictoire avec la définition même de la trivialité (universalité). Cette indécidabilité, ce paradoxe²⁵, déplace alors la difficulté vers l'axiomatique: quel(s) axiome(s) reconsidérer sans déstabiliser tout l'édifice? Les propriétés triviales interfèrent avec la cohérence même de la théorie axiomatique or "T [une théorie] ne démontre pas sa propre cohérence²⁶ (\square) pour obtenir la cohérence du système T il faut plus que T" (Girard, 2006). C'est là un problème de réflexivité et d'incomplétude²⁷ (Gödel, 1940 ; Turing, 1936). D'où le recours à un processus d'extension, qui est aussi bien un processus d'abstraction que ce que nous avons choisi ici d'appeler une hybridation.

Mais décider d'enclencher un tel processus, suppose d'accepter provisoirement de s'abstraire d'un univers connu et cohérent, par nécessité de dépasser l'incomplétude d'un tel univers. Ou bien parce qu'un indécidable est rencontré (une entité ne satisfaisant pas à la propriété triviale de l'univers connu)²⁸. Par défaut, le redoutable pouvoir inertiel de vérité absolue (caractéristique, évidence, théorie, logique, etc.) conditionne le possible, le connu, le nécessaire et le suffisant, etc. L'espace des décisions dépend donc des nécessités d'opérer ou non des extensions axiomatiques. Comment crédibiliser scientifiquement des indécidables (paradoxes et imaginaires) comme de futures extensions ou hybridations stratégiques? L'enjeu et les conséquences sur les comportements des systèmes et des individus sont importants. Par exemple, des comportements gouvernés par les objectifs [goal driven] vont travailler en rétroaction de l'objectif visé [backward]. Mais si les objectifs n'apparaissent pas crédibles (s'ils sont paradoxaux ou imaginaires), les comportements sont alors gouvernés par les informations et les connaissances détenues [data driven] (Simon, 1996). Il s'agit donc de privilégier objectivement les choix visant à manipuler ou non les axiomes (modification, suppression, ajouts) en vue de procéder à une extension convenable (et viable) du patrimoine axiomatique. Parmi les risques visibles, il y a celui de rejeter à tort un objectif paradoxal (en conservant intact le patrimoine axiomatique mais en passant à côté d'une innovation) ou de poursuivre à tort un tel objectif inaccessible car l'effort à consentir se révélerait trop important (déstabilisation brutale du patrimoine axiomatique). Les fondements classiques en théorie de

²⁵"The paradox shows in fact an outside defect, something that we do not see: without the paradox, we would not even know that there is something that we do not see. The paradox (\square) indicates a very indirect construction default" (Girard, 2007).

²⁶ \square peut démontrer sa propre cohérence, mais alors prouvera des contrevérités

²⁷ A partir du code source d'un programme, il n'est pas possible si la sortie de dire de ce programme satisfait une propriété non-triviale (pas toujours vraie ou pas toujours fausse) telle que "*le programme calcule un résultat correct par rapport à la spécification*" (Rice, 1953). Ajouter ou modifier une théorie axiomatique ne fait que générer un nouvel indécidable (Delahaye, 1995, 2002).

²⁸ En quelque sorte, une "rencontre du troisième type", film de Spielberg S., 1978

la décision (Savage, 1972) sont inopérants faisant la part belle à la subjectivité (génie, chance) que certains travaux en psychosociologie ont mis en évidence (Rosenthal & Jacobson, 1968). Se dessine donc une nouvelle forme d'économie du décidable et de l'indécidable en fonction du patrimoine axiomatique. Il faudrait pouvoir être équipé d'un "espace" des patrimoines axiomatiques possibles et d'un générateur d'hybridations produisant des extensions stratégiques de cet espace en fonction des données environnementales (rencontre d'un indécidable, production d'un imaginaire, etc.). Cette représentation ne va pas sans rappeler le génie génétique.

Il ne suffit pas de décider d'opérer une extension axiomatique, encore faut-il savoir comment procéder car toute modification axiomatique ne conduit pas à une propriété triviale, à laquelle satisfont à la fois les entités nouvellement introduites et celles préexistantes. D'autant que dans ce même processus, une propriété précédemment universelle (triviale et dépendante de la théorie axiomatique initiale), commune alors à toutes les entités préexistantes, devient une propriété non-triviale, indépendante de la nouvelle théorie axiomatique et caractéristique seulement des entités préexistantes. Certaines méthodes ou théories de conception innovante cherchent ainsi à manipuler, par extension ou par abstraction, des propriétés pouvant interférer avec les axiomes de la théorie axiomatique "ZF"²⁹ en espérant les contrôler [Concept-Knowledge (Hatchuel & Weil, 2007)³⁰, Abstraction Operators (Tennant, 2004), Hume's principles (Cook, 2007 ; Shapiro & Weir, 2007), etc.].

Nous allons tâcher dans la suite, d'expliquer comment les concepts d'imaginaire, d'analogie et de mémoire, s'ajoutent à ceux de cohérence et de réflexivité. Jusqu'ici nous avons expliqué les fondements scientifiques de la cohérence et de l'analogie au réel, par la théorie axiomatique, communément admise par la communauté scientifique. Cette machine définit des êtres abstraits, sans contradictions, par analogie avec un réel modelé à dessein, mais qui ne détient pas le pouvoir d'auto-(re)définition lequel relève de la réflexivité.

[C] Analogie et imaginaire: hybridation de patrimoines axiomatiques à la recherche d'une cohérence nouvelle

Pour explorer l'inconnu et tirer les leçons du passé, il faut dégager ce qui, dans l'expérience vécue, est transposable à la situation nouvellement rencontrée, voire

²⁹ Zermelo-Fraenkel (Russel, 1903 ; Jech, 1978 ; Krivine, 1998). Une des théories axiomatiques à la base de l'édifice mathématique en raison de la possibilité d'y représenter la plupart des objets usuels.

³⁰ La méthode du forcing sur laquelle se fonde la théorie Concept-Knowledge est une extension générique.

généralisable à toute nouvelle situation pouvant être considérée comme analogue. Tout en sachant bien que les conditions qui ont prévalu dans telle ou telle situation ne se reproduisent jamais totalement à l'identique. Comme le disait Héraclite, "on ne se baigne jamais dans le même fleuve". L'analogie est donc sélective [Incomplete descriptions] (Lewis, 1986) de sorte que les choses analogues présentent les mêmes propriétés. Elle est *ipso facto* indépendante des éléments différenciants qui sont (délibérément ou pas) ignorés. A une échelle humaine, l'anticipation doit pouvoir se faire dans un temps fini, avec des ressources et des capacités limitées (Simon, 1969 ; 1976 ; Visser, 2010). A dessein, l'analogie établit les invariances (Reuchlin, 1982 ; 1995) pour trianguler (comparaison de contextes, permanence de méthodes, étalons, etc.) et ajuster des situations réelles ou théoriques. C'est le fondement de l'identité et de la reproductibilité. "La découverte que chaque matin se lève le même soleil, et non pas un nouveau soleil, a bien été une des découvertes les plus fécondes de l'astronomie" (Frege, 1994). L'analogie ne peut s'appuyer sur les apparences et sur les intuitions seulement, car elles peuvent être trompeuses (il suffit de penser à internet). L'assimilation de la situation rencontrée et d'une situation déjà vécue dépend en effet de l'expérience du sujet et de ses émotions (on ne voit parfois que ce que l'on a envie de voir). L'analogie s'appuie donc sur une théorie axiomatique pour établir une identité par abstraction (Frege, 1893-1903 ; Wright, 1983 ; Fine, 2002). "From similarity between elements it is possible to derive [by abstraction] another concept to which no name has yet been given. Instead of "the triangles are similar" we say that "the two triangles are of identical shape" or "the shape of one is identical with that of the other" (Frege, 1893). L'analogie est ainsi relative à un observateur ou à un contexte.

L'analogie et la réflexivité interviennent dans le processus d'hybridation pour que soit définie une identité nouvelle à partir de deux théories axiomatiques³¹. Les êtres issus de cette hybridation sont analogues, dans le sens où ils présentent tous une même nouvelle propriété triviale relativement à une nouvelle théorie axiomatique (elle-même hybride). Il n'est donc pas question, comme d'aucun ont pu l'expliquer jusqu'ici, d'une hybridation au sein d'une théorie axiomatique donnée, car dans ce cas l'être hybride présenterait un assortiment nouveau de propriétés non-triviales, mais sa nature serait fondamentalement analogue à celle des entités mères. Il serait reconnu comme un être appartenant au même univers. Ceci étant dit, revenons à la question où l'hybridation concerne au moins deux théories axiomatiques ou deux univers indépendants.

³¹ Tout du moins deux univers indépendants, chacun étant caractérisable par une propriété triviale différente de l'autre.

Nous avons vu que le processus d'hybridation était intimement lié à celui d'extension, qu'il y avait dualité. L'extension transfère les relations jusque là établies entre des êtres réels (satisfaisant une même propriété triviale dépendante d'une théorie axiomatique) vers un être imaginaire ou entre des êtres imaginaires. Par exemple en géométrie plane, les points réels entretiennent bien une relation d'alignement avec un point de fuite imaginaire pour donner une ligne de fuite. De même que l'alignement entre des points imaginaires fait une ligne d'horizon imaginaire. Ce qui donne l'impression que les relations sont transposables vient de la perspective et de la sensation nouvelle de profondeur. En fait, pour être plus précis, cela vient d'un effet de raccourcissement³² progressif de l'inter-distance entre des points réels se rapprochant d'un point de fuite. C'est donc bien l'introduction de cette relation nouvelle et à travers elle un état des connaissances plus généralisant, qui rend les précédentes relations extensibles entre tous les êtres réels ou imaginaires. En effet, l'analogie s'applique à l'univers des relations, de sorte que les relations de cet univers soient toujours interprétables identiquement quelque soit la nature imaginaire ou réelle des points. Une telle analogie crée ce faisant les conditions nouvelles d'une invariance³³ relationnelle, autrement dit d'une identité relationnelle (isomorphisme). Est ainsi générée une nouvelle propriété structurante et caractéristique de l'univers des relations, donc universelle, triviale. La relation de parallélisme devient par exemple réinterprétable sous un concept plus général de direction ["qui sont de même direction" au sens de Frege], valable aussi bien entre deux points réels, qu'entre un point réel et un point imaginaire.

En marketing, l'extension peut s'appliquer à une marque. Par exemple, l'extension de la marque Caterpillar depuis les machines de chantier à la maroquinerie (chaussures, sacs) et à l'habillement. "Consumers will develop more favourable attitudes towards extensions if they perceive high congruence between the extension and the original brand" (Hem & Al., 2003; Boush & Al., 1987). "Line extension/stretching enabling the marketing organization to introduce new items with new features in the existing product category in order to achieve a number of set marketing objectives" (Ladipo & Al., 2012). Sous de tels auspices, le fonctionnement relationnel du groupe devient effectivement indifférent à l'arrangement des parties (êtres réels ou imaginaires).

³² Préservation du rapport de quatre points alignés, [a, b, c, d, dans cet ordre, le birapport est $(c-a)/(c-b) \div (d-a)/(d-b)$

³³ "Allowing to change the operations order without impact on outcomes" (André, 2009; Weyl, 1949; Connes, 1973). En droit, une novation est "une convention qui a pour objet de substituer à une obligation qu'elle éteint, une obligation différente qu'elle crée" (art 1265). Voir aussi les opérations de transfert par analogie (Hilaire-Pérez, 2000).

Le nouvel univers obtenu par extension est peuplé des êtres primitifs de l'univers initial, qui possédaient déjà la propriété de pouvoir s'inter-relier et des êtres imaginaires (du point de vue de la théorie axiomatique d'origine) venus s'ajouter, en sorte que tous les êtres aient en commun la propriété (triviale) de pouvoir s'inter-relier. Le nouvel univers est restructurant dans le sens où l'introduction d'une nouvelle relation agit sur les structures relationnelles préexistantes et parvient à les rendre extensibles à des êtres de nature différente (imaginaire) au sein d'une population, de fait plus étendue. Le nouvel univers s'appuie sur une nouvelle théorie axiomatique³⁴, donc sur un nouvel état des connaissances, qui en légitime la cohérence et dont la validité s'appuie sur la correspondance à un réel englobant l'observateur³⁵. D'où la sensation de plongement dans cet univers nouveau et en même temps d'abstraction. Une manière de l'illustrer et de faire en même temps la transition avec la question de l'hybridation entre deux théories axiomatiques, est l'exemple de la vision en relief. A partir de deux points de vue séparés, en deux dimensions (2D) chacun, correspondant respectivement à l'œil gauche et à l'œil droit, notre cerveau conçoit une vision unique en relief (3D), interprétable³⁶ à condition que la relation d'écartement interpupillaire corresponde à 65 millimètres environ.

L'hybridation entre deux théories axiomatiques enclenche un double processus d'extension. Les êtres réels du point de vue d'une théorie axiomatique échappent à la cohérence de l'autre théorie axiomatique et réciproquement. On peut être tenté de dire qu'ils apparaissent mutuellement comme des êtres de nature imaginaire. Mais ce n'est pas le cas, car ils correspondent à des observateurs différents, non-interchangeables et pour lesquels la réflexivité ne peut opérer directement. Les imaginaires respectifs sont dépourvus de sens tant qu'il n'y a pas d'analogie entre observateurs, (contrairement à un point de fuite qui produit le même effet sur le peintre ou sur un spectateur), autrement dit tant que l'analogie n'a pas fait son œuvre en créant une nouvelle identité relationnelle commune. L'analogie doit donc pouvoir ouvrir de manière croisée, entre des êtres imaginaires et des êtres réels pouvant être issus de théories axiomatiques sans lien d'extension entre elles. Une manière constructible d'opérer est donc de procéder à une double extension de sorte que les êtres peuplant les deux univers croisent leurs imaginaires³⁷ respectifs. En gardant à l'esprit que l'extension agit sur l'univers des relations entre les objets d'un univers donné, la double extension agit sur

³⁴ Par exemple, en géométrie projective des parallèles peuvent converger et se rejoindre à l'infini

³⁵ Correspondant à tout point imaginaire en géométrie plane.

³⁶ «Normal visual perception is the outcome of a long period of learning» (Reuchlin, 1982). «The perception of invariance is a form of learning» (Bower, 1966).

³⁷ Nous retrouvons là encore, le sens donné à l'artificiel par H. Simon en tant qu'imitation du réel (cf page 3).

l'univers des relations entre des relations. Par exemple, une distance est une relation entre des positions dans l'espace. La vitesse mesure une variation de telles relations dans le temps. Elle est donc une relation agissant sur des relations. La variation peut se faire en direction (une rotation préserve la distance entre les points mais change l'orientation) ou en distance (éloignement ou rapprochement). Les trajectoires se dessinent dans l'univers des points représentant des positions successives. Dans un univers à deux dimensions (un plan) les vitesses y sont représentées en chaque point de la trajectoire sur des lignes tangentes (faisant avec l'horizontale ou la verticale un angle donné). Pour représenter une vitesse un concept hybride de vecteur (une flèche), indique à la fois sa direction (le sens aussi) et son intensité. Les relations entre les vitesses sont formalisées dans un espace de tels vecteurs en sorte qu'ils se combinent convenablement tant en direction qu'en intensité. Les variations de vitesse sont alors interprétables aussi comme résultant de l'action combinées de forces elles-mêmes représentables par des vecteurs. En mécanique classique, pour une masse donnée, l'action de forces combinées est alors interprétable comme une accélération (deuxième loi de Newton).

Le processus d'hybridation modifie, par double extension, chacune des théories axiomatiques initiales, tandis que l'analogie ouvre pour créer les nouvelles conditions d'une identité relationnelle commune. L'enjeu est ainsi de trouver une clé relationnelle commune pouvant agir sur les structures relationnelles préexistantes dans chacun des deux univers, en sorte de les rendre mutuellement extensibles. La théorie axiomatique résultant d'une hybridation, sélectionne³⁸ et combine les axiomes par opération d'intersection ou d'union (conservation, élimination), puis crée aussi des axiomes plus génériques (ajout ou modification) autorisant une double interprétation par analogie. Cette forme de manipulation génétique revient à opérer sur les propriétés triviales des êtres hybrides pouvant être créés. Le processus d'hybridation tend cependant à préserver, autant que possible, les axiomatiques initiales afin d'éviter une déstabilisation trop brutale³⁹ rendant méconnaissances les nouvelles générations d'êtres hybrides par rapport à leurs aînés dans les univers initiaux. La triangulation des correspondances établies par analogie entre les théories axiomatiques et le réel tend aussi à être préservée. D'où une sélection guidée par la validité (au sens de la viabilité) des hybridations possibles. L'hybridation n'est donc pas seulement un formalisme méta-mathématique. Elle est aussi un processus cognitif par lequel non seulement le choix des opérations (conservation, élimination, etc.) et l'objet (quels axiomes) de ces opérations, mais

³⁸ A l'instar de la Blue Ocean Strategy

³⁹ En rupture (par opposition à incrémentale) que l'on peut comprendre au sens de Simondon (Simondon, 1958)

encore l'ordre dans lequel elles sont effectuées, influent sur le choix ultérieur des opérations à venir et donc sur la pertinence du nouvel univers généré.

[D] Mémoire, analogie, imaginaire et réflexivité: hybridations de patrimoines axiomatiques, apprentissage et temporalité

Pour mieux comprendre de quelle manière le processus d'hybridation se déroule, nous proposons de commencer par manipuler à travers un exemple, les opérations d'intersection et de réunion qui sont à la base de la structuration des relations entre entités. Le processus d'hybridation permet en effet de remonter le temps⁴⁰, en refaisant autrement les opérations d'union et d'intersection de propriétés ou d'axiomes à l'origine des théories axiomatiques telles qu'elles existent. Les éléments d'information⁴¹ ignorés et enfouis depuis l'origine (propriétés non caractéristiques indépendantes) reviennent en surface. Imaginons que l'on recherche un cercle gris parmi des formes de différentes couleurs. Il s'agit bien d'une intersection. Il est possible de commencer l'exploration par les formes ou par les couleurs. Le critère d'arrêt étant : trouver la forme correspondant à un cercle et dont la couleur correspond au gris [exploration (1)], ou bien, trouver la couleur correspondant au gris et dont la forme correspond à un cercle [exploration (2)]. On supposera que la forme et la couleur sont des propriétés non-triviales (le cercle n'est pas la seule forme existante et le gris n'est pas non plus la seule couleur). On supposera que leur nombre n'est pas infini pour simplifier la tâche, que du reste, chaque forme est unique, de même que chaque couleur. Nous allons voir qu'en pratique, les deux explorations ne sont pas analogues du point de vue de la mémorisation des connaissances (et donc la part d'inconnu). Dans l'exploration (1), à supposer que toutes les formes soient passées en revue, la recherche s'arrête lorsque la couleur grise est identifiée. Inversement, dans l'exploration (2), à supposer que toutes les couleurs soient passées en revue, la recherche s'arrête lorsque la forme circulaire est identifiée. La rationalité limitée (Newell & Simon, 1972 ; Simon 1969 ; 1976) nous explique bien que la recherche au-delà du critère d'arrêt est peu probable, le compromis étant trouvé lorsque l'objectif fixé au départ est atteint. Par conséquent, dans le premier cas de figure toutes les couleurs ont peu de chance d'être connues et dans le second cas de figure toutes les formes ont peu de chance d'être connues. Il suffit de penser à une chambre totalement noire dans laquelle il nous faudrait tâter différentes formes pour trouver un cercle. Aussitôt trouvé, nous pourrions sortir de la chambre

⁴⁰ La méthode du Reverse Engineering procède ainsi

⁴¹ L'information est ce qui modifie notre vision du monde [qui réduit notre incertitude] [crée une différence] (Reix, 2011)

et allumer la lumière afin de découvrir la couleur. Inversement, imaginons plusieurs portes colorées différemment, avec des formes à découvrir derrière chacune. Nous découvririons derrière la porte grise quelles formes s'y cachent. Dans chacun de ces cas de figure, l'exploration ne permet pas de mémoriser les mêmes informations. Si l'on échange l'épreuve d'intersection [forme et couleur] par celle de l'union [forme ou couleur] les formes et les couleurs sont explorées mais les relations entre les deux sont ignorées. Par conséquent, l'intersection et l'union combinées permettent de mémoriser davantage d'informations et celles-ci sont en tout ou partie complémentaires. Ceci explique pourquoi certaines méthodes et théories de conception innovante passent par une phase de partitionnement [partitioning] (Concept-Knowledge, Blue Ocean Strategy⁴², etc.) qui consiste à envisager toutes les recompositions possibles de propriétés caractéristiques par intersection et/ou union. Lorsque le nombre de propriétés considérées croît, la combinatoire des possibles est inachevable et incomplète. Le raisonnement s'étend à l'analogie [notamment l'égalité], établie par inclusion respective de contextes (A inclus dans B et réciproquement) et qui est donc une intersection particulière impliquant une infinité de contextes possibles [Bounded equality] (Giacomoni, 2012)]. Nous voyons bien que si les mêmes informations ne sont pas mémorisées⁴³ au cours du processus d'exploration (1) et (2), il est néanmoins possible (en acceptant d'ignorer les différences), d'établir une analogie des intersections résultantes, en l'occurrence dans les deux cas (1) et (2), un cercle gris. Mais accepter les différences signifie ignorer provisoirement les facteurs de contingence qui ont pu intervenir pendant la genèse même de l'être nouveau (le cercle gris) et en ont modifié la trajectoire d'exploration dans l'espace des possibles. En revenant sur ces processus exploratoires et sur des informations ignorées, il est ainsi possible de revisiter⁴⁴ l'identité des êtres, construite en son temps sur une trajectoire et une analogie sélectives. D'autant que les capacités d'extension dépendent (au sens du conditionnement⁴⁵) des informations mémorisées. En reprenant l'exemple précédent, pour qui sort de la chambre noire, la part d'inconnu est aussi bien une couleur ignorée qu'une forme qui n'existe pas. A ce stade, il n'est donc pas possible de savoir (à moins que cela ne soit indiqué au départ comme nous l'avons fait artificiellement) si la propriété [couleur] est triviale ou pas (c'est-à-dire si les formes sont toutes grises ou pas). Or, l'extension opère lorsqu'une propriété est triviale (qu'il faut envisager que toutes les formes n'aient plus la même couleur). Si des formes d'une autre

⁴² Par exemple, [the partitioning schedule design [same form; different form / same function; different form and function / same objective]

⁴³ Toutes ces considérations jouent un très grand rôle dans le domaine du génie logiciel ou des bases de données (Giacomoni & Sardas, 2010)

⁴⁴ Dans la théorie axiomatique (ZF), le concept d'ensemble est défini avec celui d'unité (Cantor, 1883) et d'indifférence à l'arrangement des parties (Bolzano, 1993). Autrement dit, une identité indifférente du processus exploratoire (intersection, réunion, etc.) qui l'établit.

⁴⁵ Comme on peut l'entendre en statistiques [Bernardo J.M. & Smith A.F.M., (1994), Bayesian Theory. Wiley].

couleur que le gris existent, mais qu'on en ignore l'existence, l'extension est impuissante. "Aucune ligne précise de démarcation ne sépare les choses qu'on apprend mais qui sont déjà connues des autres, de celles qui sont nouvelles pour tout le monde. Ce qui constitue la nouveauté dépend de la nature des connaissances qui sont déjà dans l'esprit du système de résolution de problème, et du type d'aide qu'on reçoit de l'environnement en complément de ses propres connaissances" (Simon, 1996)⁴⁶. Ce constat n'est pas surprenant si l'on garde à l'esprit que l'extension repose sur une série d'unions et d'intersections qui ne sont commutatives, associatives ou encore distributives l'une sur l'autre que dans l'atemporalité de la logique ensembliste, et non dans la temporalité de la cognition.

Tout au long du processus d'hybridation, l'analogie manipule des êtres imaginaires, en dehors des univers de référence (d'où ils sont générés par extension), et c'est donc sur une nouvelle théorie axiomatique qu'elle se fonde pour considérer les effets sur les théories axiomatiques existantes. La réflexivité est bien à l'œuvre. Et son œuvre est possible parce la mémoire aussi opère son œuvre. Il faut bien une persistance mémorielle pour qu'une analogie entre des êtres imaginaires échappant aux théories axiomatiques de référence soit établie. Réflexivité et mémoire sont coopérantes et ce phénomène produit l'impression d'Eureka à l'issue du processus d'hybridation. La géométrisation de l'espace projectif⁴⁷ englobe la géométrisation plane d'Euclide, pour autant les deux doivent être mémorisées pour qu'une analogie opère. Autrement dit, l'observateur est à la fois dans la scène (pour combler la correspondance avec les points de fuite) et hors de la scène pour pouvoir faire la comparaison. Cette mémorisation à temps suspendu (puisque deux états successifs coexistent), suppose une forme duale, élémentaire et relationnelle. Pour illustrer l'idée, prenons l'exemple de l'imagerie numérique. Elle peut être mémorisée avec une matrice de pixels⁴⁸ [forme élémentaire] ou en mode vectoriel⁴⁹ c'est-à-dire par sa structure [forme relationnelle]. La mémorisation vectorielle permet, lorsque l'on manipule des images, de superposer différents formats facilement. En revanche, la visualisation (l'impression) sur écran et sur papier, impose une conversion en mémorisation matricielle. Cette conversion exige donc le choix⁵⁰ d'un format. De manière très schématique, cela revient à dire que la réflexivité et l'analogie à l'œuvre dans le processus exploratoire d'hybridation, sollicitent un état mémoriel de type vectoriel, opérant en temps imaginaire, avant de revenir à un état de type élémentaire, inscrit

⁴⁶ [Page 191]

⁴⁷ Hilbert D. (1899), [Les fondements] Leipzig, Teubner] a reformulé l'axiomatique d'Euclide et formulé celle de la géométrie projective.

⁴⁸ Unité de subdivision d'une image. La résolution (qualité) d'une image se mesure au nombre de pixels par unité de surface (cm², etc.)

⁴⁹ Objet géométrique tel qu'un cercle avec son rayon et son centre, son équation, etc. Sans lien avec la notion de (cf page 17).

⁵⁰ Le choix a été posé en axiome dans la théorie axiomatique (ZF), son absence autorisant à de changer de taille à volonté⁵⁰ (Girard, 2006).

de nouveau dans la temporalité réelle (d'où l'effet de discontinuité), une fois que la nouvelle théorie axiomatique a absorbé ses aînées⁵¹. Difficile à ce stade de dire lequel de ces deux états peut véritablement être considéré comme transitoire et lequel correspondrait à un état stable. Un formalisme en partie réelle et en partie imaginaire, à l'instar des nombres complexes utilisés pour décrire les phénomènes variationnels tels que les ondes serait-il plus approprié (Giacomini, 2012) ?

Nos développements théoriques semblent corroborés par les résultats des expériences de A. de Groot sur la perception des jeux d'échecs (Simon, 1996). L'expérience consistait à présenter des situations tirées de parties réellement disputées ou purement aléatoires, à des débutants ou à des maîtres. L'épreuve exigeait de retrouver la disposition d'une vingtaine de pièces. Suivant le caractère aléatoire ou non de la disposition initiale, les performances des maîtres et des débutants différaient ou pas. Les résultats suggéraient fortement que l'information représentant l'échiquier était emmagasinée sous la forme de relations entre les pièces plutôt que comme un balayage d'écran de télévision des 64 cases. La comparaison (exploratoire) de représentations des dispositions réelles et imaginaires aurait ainsi privilégié une mémorisation vectorielle.

Remarquons du reste, que la phase exploratoire, ne va pas sans rappeler la procédure de dissociation des processus mémoriels (Jacoby, 1991 ; Nicolas, 2000). Il s'agit en effet de faire ressurgir les informations ignorées (condition d'exclusion), tout en sachant que la remémoration consciente est conjointe (conditionnelle au sens statistique) avec la résurgence d'informations inconscientes [fixation effects (Duncker, 1945)].

Conclusion

"Le processus de conception de nouvelles représentations est le principal chaînon manquant de nos théories de la pensée. Il est désormais un des principaux domaines de recherche en psychologie cognitive et en intelligence artificielle" (Simon, 1996). Nous avons, pour ces raisons, privilégié la théorie à la pratique, en revenant sur des aspects parfois bien connus des spécialistes (même s'ils sont revisités). Ils pourront sauter les passages jugés comme tels. Mais nous avons pensé que nos propos devaient pouvoir être accessibles à des lecteurs d'horizons divers, quitte à sacrifier pour des raisons de volume, les aspects pratiques

⁵¹ On retrouve là, les conceptions que Simondon (1958) avait formulées, dans son approche plus restreinte, quant au rapport entre hommes et machines, à la terminologie près. Les logiciels « vectoriels » n'existaient pas encore et Simondon affirmait, dans un langage plus classique, que (p. 170) : « dans la mémoire humaine, c'est la forme qui se conserve » Rappelons qu'information provient de *in forma* (en forme).

dans nos écrits et de les reporter à plus tard. Cela étant dit, nous pensons qu'un bon nombre de situations pratiques peuvent néanmoins s'inscrire dans une lecture stratégique autrement éclairée. Par exemple les cas d'emplois de théories ou méthodes de conception innovantes, le caractère incrémental ou de rupture d'une innovation, l'ébranlement des repères d'un collectif d'acteurs intervenant successivement ou simultanément dans un processus d'innovation, la fertilité de collectifs hétérogènes et en même temps la difficulté à élaborer une nouvelle cohérence commune, l'effort d'investissement en temps et en énergie pour modifier la chaîne de cohérence d'une filière d'acteurs impliquée dans un processus d'innovation, la perception d'un nouveau marché, l'extension d'une marque, etc. Les conditions d'une hybridation réussie impliquent que des fonds de connaissance se recomposent, grandissent et se transmettent, des concepteurs aux membres de la communauté qui l'acceptent et l'utilisent. Le processus d'hybridation progresse ainsi dans l'espace [à travers différents milieux] et dans le temps [à travers des circonstances différentes]. Le refroidissement progressif après le "big bang" [l'Eureka] initial, solidifie la nouvelle forme de pensée ou la nouvelle invention technique, qui et d'innovante deviendra courante. Certaines questions plus générales se sont aussi exprimées: Quel nouvel équilibre général une organisation innovatrice et durable peut-elle prétendre ainsi concevoir ? Il y a deux cents ans toutes les énergies étaient renouvelables. Quels types d'Objets Génétiquement Modifiés envisage-t-on de créer pour satisfaire nos besoins présents ou futurs ? L'évolution a-t-elle touché les mécanismes qui nous semblent fondamentaux (cohérence, imaginaire, analogie, réflexivité, mémoire) à l'œuvre dans le processus de nouveauté par hybridation ou seulement l'accumulation des connaissances, l'accessibilité et le partage (de Beaune, 2008)⁵² ?

⁵² L'invention revient à combiner de manière nouvelle des éléments déjà présents [qui existaient de manière indépendante; ce que l'expérience dissociait] (p.75). En fait, il semble que presque toutes les inventions de la préhistoire peuvent s'analyser de cette manière. L'immense connectivité d'internet a permis, avec le "foldit" [un jeu en ligne, Université de Washington, 2008] de résoudre en trois semaines le problème du repliement des protéines qui a tenu en échec les spécialistes pendant plus de quinze ans. Encore une hybridation !

Bibliographie

- André Y., (2009), *Leçons de Mathématiques contemporaines à l'IRCAM*, École Normale,
- Araujo Silva M., (2008), "L'imagination dans la géométrie de Descartes", in Serfati M. & Descote D. (dir.): *Mathématiciens français du XVII^e siècle: Descartes, Fermat, Pascal*, Presses universitaires Blaise Pascal,
- Beaune S. A. de, (2008), *L'homme et l'outil*, CNRS Editions,
- Benyus M.J., (2011), *Biomimétisme, quand la nature inspire des innovations durables*, broché, France
- Bilton, C. & Al., (2003), "Strategy as Creativity", in *Images of Strategy*, ed. David Wilson & Stephen Cummings (Blackwells),
- Blum C., Roli A., (2003), "Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison", *ACM Computing Surveys*, Vol. 35, N°3,
- Bochner S, (1991), collected papers, part 3, Gunning R.C. (ed), American Mathematical Society,
- Bolzano B., (1993), *Les paradoxes de l'infini*, Seuil,
- Boniface J., (2004), *Hilbert et la notion d'existence en mathématiques*, vrin, France
- Boush D.M., Shipp S., Loken B., Gencturk E., Crockett S., Kennedy E., Minshall B., Misurell D., Rochford L. & Strobel J., (1987), "Affect Generalization to Similar and Dissimilar Brand Extensions", *Psychology & Marketing*, 4 (3),
- Boyé A., (1998), "L'origine algébrique", in *Images, Imaginaires, Imaginations*, Ellipses Paris,
- Chahira C., (1963), "Mathematical Discovery and Concept Formation", *The Philosophical Review*, Vol.72, N° 1, January,
- Chikofsky E.J. & Cross J.H.II, (1990), "Reverse Engineering and Design Recovery: A Taxonomy" in *IEEE Software*, *IEEE Computer Society* 13:17.
- Colton S., Bundy A., Waish T., (1999), "Automatic concept formation in pure mathematics", *Proceedings, 16th International Joint Conference on Artificial Intelligency*,
- Connes A., (1973), "Une classification de facteurs de type III", *Annales scientifiques de l'école normale supérieure*, série 4, 6 N°2,
- Cook R., (2007), *The Arche Papers on the Mathematics of Abstraction*, Springer (ed),
- Delahaye J.P., (1995), "Logique, informatique et paradoxes", *Pour la science*, Éd., Belin,
- Delahaye J.-P., (2002), "L'intelligence et le calcul: de Gödel aux ordinateurs quantiques", *Pour la science*, Éd. Belin,
- Dehornoy P., (2007), "Au-delà du forcing : la notion de vérité essentielle en théorie des ensembles", in Joinet J.-B., *Logique, dynamique et cognition*, Publications de la Sorbonne, Paris,
- Dogan M & Pahre R., (1991), *L'innovation dans les sciences sociales : la marginalité créatrice*, Puf, Paris
- Duncker, K. (1945). "On problem solving" *Psychological Monographs*, 58:5 (n°270)
- Dummett M., (1992), *Frege: Philosophy of Mathematics*, Duckworth,
- Field H. (2009), "La théorie de la vérité de Tarski", Tr. (Fr) in *Bonnay&Cozic* (2009) ;
- Fine K., (2002), *The Limits of Abstraction*, Oxford University Press,
- Fix J., (2012), *Board Review Series - Neuroanatomy*, Philadelphia, Wolters Kluwer/Lippincott Williams & Wilkins, august 29th, 4^e éd.,
- Foulquié P. & Saint Jean R., (1962), *Dictionnaire de la Langue Philosophique*, PUF,

- Frege G., (1893-1903), *Grundgesetze der Arithmetik*, Band I/II, Jena: Verlag Pohle H.,
- Frege G., (1879), *Begriffsschrift, eine der arithmetischen nachgebildete Formelsprache des reinen Denkens*, Halle a.S.: Nebert L., Bauer S. Mengelberg (tr.), (1879-1931), *Concept Notation: A formula language of pure thought, modelled upon that of arithmetic*, in van Heijenoort J., *From Frege to Gödel: A Sourcebook in Mathematical Logic*, Cambridge, MA: Harvard University Press,
- Frege G. (1994), *Ecrits logiques et philosophiques*, trad. Imbert C., Ed. du Seuil
- Freitas Salgueiredo C., (2013), "Modeling inspiration for innovative NPD: lessons from biomimetics", International Product Development Management Conference (IPDM), Paris, France,
- Furth M. (tr.), (1964), *The Basic Laws of Arithmetic*, Berkeley:U. California Press, vol.I/II,
- Garel G. & Mock E., (2012), *La fabrique de l'innovation*, Dunod
- Gavetti G. & Rivkin J. W., (2007), "On the Origin of Strategy: Action and Cognition over Time", *Organization Science*, Vol.18, N°3, May-June,
- Giacomoni G. & Sardas J.-C., (2010), "PLM et gestion des évolutions de données techniques: impacts multiples et interchangeabilité restreinte", AIM, "Systèmes d'Information et Développement Durable: regards croisés et contributions", La rochelle,
- Giacomoni G., (2012), "On the Origin of Abstraction: Real and Imaginary Parts of Decidability-Making", in *Management Re-imagined*, Proceedings of 11th World Congress of IFSAM, Limerick, Ireland,
- Girard J.-Y., (2006), *Kurt Goedel (1906-1978)*, *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, ed Lecourt,
- Girard J.-Y., (2006, 2007), *Le Point Aveugle*, Cours de Logique, ed. Hermann, Paris, coll. "Visions des Sciences", (I), *Vers la perfection*, (2006), (II), *Vers l'imperfection*, (2007),
- Gödel K., (1940), *Consistency of the axiom of choice and of the generalized continuum hypothesis with the axioms of set theory*, by Kurt, *Annals of Mathematics Studies*, n°3, University Press, Princeton; Humphrey Milford and Oxford University Press, London
- Gonseth F., (1926, 1974), *Les fondements des mathématiques, de la géométrie d'Euclide à la relativité générale et à l'intuitionnisme*, Librairie scientifique Albert Blanchard, Paris,
- Grassmann H., (2011), *From past to Future: Grassmann's Work in Context*, Petsche H.-J., Lewis A.C., Liesen J., Russ S., (eds), Birkhäuser,
- Guerin Schneider L., Nakhla M., (2010), "Emergence of an Innovative Regulation Mode in water Utilities in France: Between Commission Regulation and Franchise Bidding", *Journal of Law, Economics and Organization*, Vol. 29, N°3,
- Hale B., (2000), "Abstraction and Set Theory", *Notre Dame Journal of Formal Logic*, 41(4),
- Hartley R, Zisserman A., (2000), *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press,
- Hatchuel A. & Weil B., (2007), "Design as Forcing: deepening the foundations of C-K theory", Paper submitted at ICED 07, Paris, Jech T., (1978), *Set theory*, Academic Press,
- Heidegger M., (1958), "La question de la technique", *Essais et Conférences*, Gallimard, p.17,
- Hem L, de Chernatony L. & Iversen N., (2003), Factors influencing successful brand extensions. *Journal of Marketing Management*, 19 (7-8),
- Hilaire-Pérez L., (2000), *L'invention technique au siècle des Lumières*, Paris, Albin Michel,
- Jacoby, L.L., (1991), "A process dissociation framework: Separating automatic from intentional uses of Memory", *Journal of Memory and Language*, 30

- Jardat R., Gianfaldoni P., Hiez D. (2010), "Democratic corporate governance within fluctuating cooperative banks : a multidisciplinary diagnosis and propositions of orientations", *Corporate Ownership and Control Journal*, vol. 7,
- Jarrige F. & Morera R., (2005), "Technique et imaginaire", *Hypothèses* 1, p.163-174.
- Krivine J.-L., (1998), *Théorie des ensembles*, Cassini,
- Ladipo P.K.A., Olyfayo T.O., Omoera C.I., (2012), "The Multi-Dimensional Application/Use of Branding in the Universe of Marketers", *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, April, Vol.2, N°4,
- Lewis D., (1986), *On the Plurality of Worlds*, Blackwell,
- Lévy M. & Jouyet J.-P., (2004), rapport au ministre de l'Économie et des Finances, mars 2006, "Cleps de la propriété intellectuelle", CNUCED/OMC & Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle, Genève,
- Littré E., (1976), *Dictionnaire de la langue française*, tome III, éditions Famot, Genève,
- Mawhin J., (2002), "Les monstres mathématiques, ou l'horreur à l'écran", séminaires du Centre de Recherche en Histoire des Sciences,
- Monge G., (1827), "*Géométrie descriptive, Le théorème fondamental de la géométrie projective : évolution de sa preuve entre 1847 et 1900 = The fundamental theorem of projective geometry: evolution of its proof between 1847 and 1900*", Bachelier, Paris,
- Morisse M., (2003), "Écriture et réflexivité, quel(s) rapport(s) ?", *Perspectives documentaires en éducation*, n°58,
- Nagel E., Newman J., Gödel K., Girard J.-Y., (1989), *Le théorème de Gödel*, Le Seuil,
- Newell, A., & Simon H.A. (1972), *Human problem solving*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall,
- Nicolas S., (2000), "La dissociation automatique vs. contrôlée en rappel: application de la PDP de Jacoby (1991, 1998)", *Revue de Neuropsychologie*, Vol. 10, N°1,
- Nicolas S., (2000), *La mémoire humaine: une perspective fonctionnaliste*, L'Harmattan, Paris,
- Peacock G., (1833), "Report on the Recent Progress and Present State of Certain Branches of Analysis", Third Meeting of the British Association for the Advancement of Science,
- Piaget, J. & coll., (1977), "Recherches sur l'abstraction réfléchissante : L'abstraction des relations des relations logico-arithmétiques. Études d'épistémologie génétique", *E.E.G.*, Vol. 34, Vol. XXIV., Paris, PUF.,
- Reix R., Kalika M., Fallery B. & Rowe F., (2011), *Systèmes d'information et management des organisations*, 6e éd., Vuibert,
- Reuchlin M., (1995), *Les méthodes en psychologie*, (10^e éd.), PUF,
- Reuchlin M., (1982), *Les méthodes en psychologie*, (7^e éd.), PUF,
- Reuchlin M., (1966), *Histoire de la psychologie*, (5^e éd.), PUF,
- Rice H.G., (1953), "Classes of recursively enumerable sets and their decision problems", *Trans. Am. Math. Soc.*, vol. 74, n°2,
- Rosenthal R. & Jacobson L.F., (1968), "Teacher Expectation for the Disadvantaged", *Scientific American*, vol. 218, n° 4
- Russel B., (1903), *The principles of mathematics*, New York,
- Sage M., (2006), "Complétion", cours, école normale supérieure, Paris,
- Savage L.J., (1972), *The Foundations of Statistics*, Wiley J., New York, 2nd revised ed.,

- Shapiro S. & Weir A., (2007), "New V, ZF, and Abstraction", Cook R.T. (ed), *The Arché Papers on the Mathematics of Abstraction*, Springer,
- Simon H.A., (1969, 1996), *The science of the artificial*, MIT Press, Cambridge,
- Simon, H.A., (1976), "From substantial to procedural rationality", in Latsis S.J.(Ed.), *Method and Appraisal in Economics*, Cambridge University Press, Cambridge
- Simondon G., (1958), *Du mode d'existence des objets techniques*, Ed. Aubier, Paris : France.
- Solso R. L., (1996), *Cognition and the visual arts*, Cambridge, MA: MIT Press.
- Steel G., Colton S., Bundy A. & Walsh T., (2000), "Cross Domain mathematical formation", Proceedings of the AISB00 Symposium on Creative Cultural Aspects,
- Stigler S.M., (1990), *The History of Statistics: The Measurement of Uncertainty before 1900*, Harvard, Belknap Press of Harvard University Press, 1^{er} éd.,
- Tappenden J., (1995), "Extending Knowledge and 'Fruitful Concepts': Fregean Themes in *the Foundations of Mathematics*", *Noûs*, Vol. 29, N°4,
- Tarski A., (1972-74), "Le concept de vérité dans les langages formalisés", in *Logique, Sémantique, métamathématique*, (1935), Tr.(Fr) Granger G., Colin A., 2 vol.,
- Tennant N., (2004), "A general theory of abstraction operators", *The Philosophical Quarterly*, Vol. 54, N°214,
- Visser W., (2010), "Simon: le design comme activité de résolution de problèmes", Coll. "*Art + Design & Psychology*" (2),
- Voelke J.-D., (2008), "Le théorème fondamental de la géométrie projective: évolution de sa preuve entre 1847 et 1900", vol. 62, N°3, Springer, Heidelberg, Allemagne,
- Volken, H., (2000), "Le syndrome du précipice. La peur du vide symbolique", *Revue européenne des sciences sociales*,
- Weyl H., (1949), *Philosophy of Mathematics and Natural Science*, Princeton University Press,
- Whitehead A.N. & Russell B., (1910-1913), *Principia Mathematica*, 3 Vol., Cambridge University Press,
- Wright C., (1983), *Frege's Conception of Numbers as Objects*, Aberdeen,
- Zimmer R., (2003), "Abstraction in Art with Implications for Perception" *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, Vol. 358, N°1435, The Royal Society,