



HAL
open science

Essai de modélisation du raisonnement humain

Arnaud Kohler

► **To cite this version:**

| Arnaud Kohler. Essai de modélisation du raisonnement humain. 2022. <hal-03195162v6>

HAL Id: hal-03195162

<https://hal.science/hal-03195162v6>

Preprint submitted on 2 Oct 2022 (v6), last revised 29 Oct 2022 (v7)

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.



HAL Authorization

Essai de modélisation du raisonnement humain

Arnaud Kohler

Arnaud.kohler@pacariane.com

Résumé *L'étude du raisonnement a, probablement, débuté avec la philosophie. Une question de fond traverse les réflexions : la logique est-elle la science du raisonnement correct ? La tendance antipsychologiste, qui a dominé les travaux au XIXème siècle, est à l'origine de la philosophie analytique, et influence encore fortement aujourd'hui la logique mathématique contemporaine. A contrario, nous postulons que la logique décrit un de nos processus mentaux. Plus précisément, elle porte la relation entre le langage et la pensée. Partant de cette hypothèse, nous construirons le schéma du processus cognitif du raisonnement humain, et visiterons ce qu'il nous dit sur le langage et sur nos possibilités d'accès à la connaissance. Nous en concluons que la question de fond que pose la logique n'est pas l'identification des règles du raisonnement correct, mais du processus qui porte la sélection des pensées sur lesquelles elles sont appliquées.*

Mots clefs *Philosophie Analytique, Sciences Cognitives, Psychologie, Intelligence Artificielle, Logique, Raisonnement, Langage, Pensée, Faillibilisme, Perspectivisme*

Préambule

L'étude du raisonnement, et, avec lui, du langage et de la pensée, a probablement débuté avec la philosophie. Cela fait donc quelques années, et la richesse et la profondeur de la bibliographie en la matière est à l'avenant. En fil conducteur, une question de fond traverse l'ensemble des réflexions (Osta Vélez M., 2015) : la logique est-elle la science du raisonnement correct ? Elle est au centre, notamment, des travaux de Frege G., réalisés au XIXème siècle. Son approche, résolument antipsychologiste, a initié le divorce entre la logique et la pensée (Stenning K. et Van Lambalgen M., 2008). Les théories qui en sont issues, aux fondements de la philosophie analytique, influencent fortement la logique mathématique contemporaine, et la manière dont les langages formels symboliques sont utilisés dans le domaine de l'Intelligence Artificielle pour modéliser et exploiter la connaissance. *A contrario*, nous postulons que la logique décrit un de nos processus mentaux. Plus précisément, elle porte la relation entre le langage et la pensée. Nous allons partir de cette hypothèse pour construire le schéma du processus cognitif du raisonnement humain.

Le contexte de notre étude

Nous plaçons nos travaux dans le domaine de l'Intelligence Artificielle. Parmi les nombreuses définitions possibles de l'IA (cf. par exemple Ezratti O., 2021), nous retenons celle désignant les études réalisées dans le but de fabriquer un outil qui reproduit l'ensemble des comportements humains relevant de la cognition – c'est-à-dire qui sollicitent les processus mentaux qui sont liés à la fonction de connaissance (cf. Miller G., 2003). Et, par convention de langage, nous appelons IA l'outil cible de l'IA. Cette définition pourrait être précisée. Elle interroge, par exemple, le rôle des émotions et des besoins dans les processus cognitifs (cf. Damasio A., 2006). Elle est néanmoins suffisante pour ce que nous allons présenter.

Ainsi, la conception d'un outil qui conduit une voiture en autonomie est une étape intéressante pour l'IA, mais nous rejoignons Julia L. (2019) lorsqu'il affirme que ce n'est pas de l'IA – de même un outil qui joue aux échecs, ou au football, ou qui élabore des phrases en langage naturel, ou qui reconnaît des formes dans une image, ou qui génère un poème, etc. C'est, à chaque fois, un outil dédié, conçu pour réaliser une opération déterminée dans un contexte particulier (cf. Rougier N., 2019). Selon la définition que nous adoptons, l'IA désigne un outil non dédié, qui a la capacité de faire chacune de ces actions. Au-delà des considérations financières qui contraignent les études fondamentales, ce ne sont donc pas des utilisations spécifiques que nous recherchons dans le cadre de l'IA, mais, idéalement, la modélisation des processus cognitifs de l'humain, seul modèle connu à ce jour comme capable d'*apprendre* tout cela, et, plus généralement, capable d'*apprendre* tout et n'importe quoi.

Le terrain de jeu est vaste. Nous allons l'aborder par le thème de la relation entre la pensée et le langage. Le sujet a été abondamment visité – par Aristote, Kant E., Frege G., Russell B., Wittgenstein L. ou Quine W., pour ne citer que quelques noms. Comme élément nouveau, nous proposons au lecteur d'emprunter un chemin peu exploré, celui de la formalisation de cette relation. En faisant l'exercice, nous constaterons que le processus cognitif qui porte le raisonnement humain est adossé à un ensemble de croyances toutes incertaines. Pour choisir, nous appliquons un principe de non réfutabilité (cf. Popper K., 1934), en retenant les hypothèses qui ne sont pas explicitement incohérentes. Ce processus semble fragiliser la pertinence de nos décisions. Nous établirons pourtant que c'est grâce à elle que nous accédons à l'apprentissage et à l'imagination.

Notre cheminement nous conduira à la constitution d'un schéma qui modélise les relations entre le raisonnement, le langage et la pensée. En réponse aux critiques psychologues (Andler D., 2004) et empiriques (Perkins D., 2002), nous découvrirons que notre faculté à donner un sens (la sémantique) incarne le raisonnement humain. Celui-ci n'est pas syntaxique. Transcendant le raisonnement « pur », il est porté par un processus cognitif composé de plusieurs éléments. Ils forment une cascade, qui génèrent une déformation intrinsèque entre notre perception de ce qui est (à la source) et ce que nous en disons (à l'embouchure). Nous visiterons ce que ce résultat nous dit sur le langage et sur nos possibilités d'accès à la connaissance.

Quel formalisme utiliser pour modéliser la relation entre le langage et la pensée ?

Une première question est de savoir si l'exercice de formalisation de la relation entre le langage et la pensée peut être effectué avec une des nombreuses logiques formelles existantes. Elles ont une origine commune, exprimée par les trois principes d'Aristote : ce qui est est (identité), est vrai ou faux (tiers exclu), et ne peut pas être à la fois vrai et faux (non-contradiction). La logique propositionnelle L_p (cf. par exemple Siegel P., 1987) est la forme mathématique la plus concise qui modélise ces trois principes.

Nous reviendrons plus loin sur le sens du terme proposition dans le cadre d'un langage formel. Pour l'instant, retenons la définition la plus souvent appliquée : c'est un énoncé qui est soit vrai soit faux. Ainsi, la phrase « Les oiseaux volent » est une proposition, mais pas l'injonction « Partons ! ». L'objet de L_p est de modéliser et d'exploiter les relations logiques entre les propositions – par exemple : « Si "Il pleut", alors "Le ciel est gris". "Il pleut". J'en déduis que "Le ciel est gris" ».

Considérons deux propositions, que nous symbolisons par f et g . Notons $non f$ et $non g$ l'expression de leur non véracité. Selon les règles de L_p , $\{f, non f\}$ produit $\{g, non g\}$ quelles que soient f et g . *Ex contradictione sequitur quodlibet* : d'une contradiction, on peut déduire ce qu'on veut, c'est le principe d'explosion. Pourtant, le raisonnement humain est pétri d'approximations et d'incohérences (cf. Andler D., 2004). Cela peut être immédiat (nous acceptons et nous nous satisfaisons, à longueur de journée, du fait de penser f et $non f$), ou la conséquence d'un raisonnement erroné : nombre de nos conclusions sont fausses, alors même

que nous avons, dans le même instant, les connaissances suffisantes pour raisonner justement – dans un sens aristotélicien du moins. Le principe d’explosion n’est donc pas acceptable.

De nombreux essais mathématiques ont été tentés pour y échapper. Ils forment la famille des logiques formelles dites non classiques (para-cohérentes, multivaluées, floues, modales, etc., cf. par exemple Thayse A. & co-auteurs, 1993). Chacune présente des propriétés propres, permettant la conception d’outils capables de réaliser des tâches spécifiques. Mais la solution globale n’a pas été trouvée. La cause est profonde. L’objectif d’Aristote était d’identifier les règles qui garantissent un raisonnement *totale*ment juste, c’est-à-dire, selon la définition qui était la sienne, un raisonnement qui produit distinctement, complètement, et strictement, ce qui est vrai et ce qui n’est pas vrai à partir d’un ensemble de connaissances dont on fait l’hypothèse qu’elles sont vraies. Le rejet de l’incohérence est inscrit dans les gènes des trois principes fondateurs, avant même toute réflexion sur ce que recouvre la notion de « vrai » (cf. par exemple Dominicy M., 2005).

L’IA symbolique, qui utilise les langages formels, est donc une impasse : les logiques formelles, classiques ou non classiques, ne sont pas capables de modéliser le raisonnement humain. On pourrait faire de longs développements autour de cette affirmation. L’article de Andler D. (2004) nous semble une bonne synthèse.

Il convient de chercher ailleurs. Peut-on obtenir mieux avec l’IA numérique, qui utilise la théorie des probabilités ? Elles permettent d’exprimer probablement *f* et probablement *non f*, en les associant à deux pourcentages de validité possiblement différents. La règle mathématique est que la somme des deux fasse 100%. Par rapport à l’IA symbolique, la capacité d’expression semble plus riche. Mais l’IA numérique ne dit toujours pas *f* et *non f*. Pour cela, il faudrait que chaque pourcentage soit égal à 100%, ce qui n’est pas autorisé. L’adjonction d’une troisième valeur (Lukaszewicz J., 1967, et Bikova M., 2022, par exemple) ne change rien à l’affaire. La cohérence est une exigence mathématique, et la somme des probabilités associées à chacune des valeurs doit être de 100%. Ce n’est donc pas là non plus que nous trouverons la clef du raisonnement humain.

Une révolution conceptuelle mathématique est-elle devant nous ?

Depuis quelques dizaines d'années, des espoirs émergent dans le sillage du développement de la physique quantique. Illustrons-les par l'exemple de l'expérience de pensée imaginée par Schrödinger E. (1992). Elle consiste à considérer un chat enfermé dans une boîte. A ses côtés, on place un dispositif qui le tue si la désintégration d'un atome d'un corps radioactif est détectée. Les formules de la mécanique quantique disent que l'atome est dans un état de superposition, c'est-à-dire à la fois intact et désintégré, tant qu'il n'est pas observé. Pour cela, il faut ouvrir la boîte. L'idée de l'expérience de pensée est d'assimiler l'état du chat à celui des particules radioactives : tant que la boîte est fermée, il est lui aussi dans un état de superposition, c'est-à-dire à la fois mort et vivant. Au moment de l'observation, l'application d'une formule aléatoire le fera quitter cet état.

Cet exemple contredit le déterminisme. C'est la thèse défendue par Broglie L. et Heisenberg W. par exemple. Mais on peut aussi, rejoignant Einstein A., considérer que « *Dieu ne joue pas aux dés* », et que cette expérience de pensée ne fait que nous renvoyer à notre ignorance. Les tests réalisés en physique quantique confirment chaque jour un peu plus les attendus théoriques, mais, pour l'instant, aucun n'a permis de confirmer l'état de superposition pour une masse de particules (et donc encore moins pour un chat). Les ordinateurs quantiques, en cours de conception, démultiplieront les puissances calculatoires actuelles en exploitant ce troisième état (au niveau microscopique) et l'intrication (selon les formules quantiques, deux particules espacées peuvent être reliées par « quelque chose » non expliqué à date). Nous trouverons donc peut-être la clef du raisonnement humain (*versus* celui du raisonnement aristotélicien) dans une logique nouvelle formalisant les propriétés de la physique quantique (cf. par exemple Delmas-Rigoutsos Y., 1993).

Soit. Mais, en attendant, nous nous sommes égarés ! Le point d'entrée que nous avons choisi pour notre réflexion n'est pas la formalisation du raisonnement humain, mais la modélisation de la relation entre le langage et la pensée. Ce n'est, *a priori*, pas la même chose. Revenons donc à notre sujet. Comme indiqué en préambule, nous allons emprunter un chemin peu fréquenté. A notre connaissance, le seul essai réalisé à date en la matière est celui que nous avons présenté en 1995 (Kohler A., 1995). Nous allons poursuivre cette voie, et y cheminer le plus loin possible. Il sera toujours temps de revenir en arrière s'il s'avère qu'elle ne mène nulle part. Nous avons utilisé la logique propositionnelle pour définir une relation formelle entre le

langage et la pensée, obtenant un nouveau formalisme : la logique contextuelle, notée L_c . Ses propriétés mathématiques ont été étudiées (Kohler A., 2022), mais les aspects conceptuels n'ont été que survolés. Nous allons approfondir cette dimension.

Le postulat contextuel formalise la relation entre le langage et la pensée

Adoptons, pour le terme « pensée », la définition de Descartes R. (1641).

« Par le nom de pensée, je comprends tout ce qui est tellement en nous que nous en sommes immédiatement connaissant ; ainsi toutes les opérations de la volonté, de l'entendement, de l'imagination et des sens sont des pensées »

Pour l'illustrer, considérons un tableau peint, par exemple *La Joconde*, de Léonard de Vinci. Nous le pensons comme un tout. Nous le désignons par un nom (*La Joconde*) – mais ce nom n'est pas le tableau auquel nous pensons. Nous sommes immédiatement connaissant de cela. Nous le décrivons par un ensemble de phrases, par exemple : « *La Joconde est le portrait d'une jeune femme, sur fond d'un paysage montagneux aux horizons lointains...* » (*La Joconde*, Wikipedia). Mais quand bien même cette description serait idéalement complète et parfaite, elle n'est pas le tableau qu'elle décrit. Nous sommes immédiatement connaissant de cela aussi. Nous établissons donc instantanément, et sans doute possible, une distinction tranchée entre la pensée que nous avons du tableau et les mots ou les phrases que nous utilisons *via* le langage pour le désigner ou le décrire.

Ce constat n'est pas nouveau. Il croise par exemple les travaux de Frege G. Pour y répondre, il a distingué ce qu'il a appelé le sens et la dénotation (Frege G., 1892). Adoptant une posture antipsychologiste (« la logique n'a rien à voir avec les processus mentaux »), il a poussé sa réflexion à la recherche d'un langage permettant de formaliser une théorie générale de la connaissance, inventant la logique des prédicats, et construisant les fondations de ce qui deviendra la philosophie analytique.

Nous allons emprunter un chemin différent, en supposant que la logique décrit les processus mentaux. Constatant que nous intériorisons, de manière immédiate, une relation entre une pensée et la phrase qui l'exprime, nous proposons de formaliser ce processus cognitif en nous appuyant sur l'affirmation de Wittgenstein L. (1921).

« Nous ne devons pas dire : Le signe complexe aRb dit que a se trouve dans la relation R avec b , mais : Que a se trouve dans une certaine relation R avec b dit que aRb ».

Nous en faisons, très librement, l'interprétation suivante : la pensée « a se trouve dans une certaine relation R avec b » a une réalité en soit, hors du langage, et « aRb », qui l'exprime, est un ensemble de signes qui ne dit rien en lui-même. C'est dans sa relation avec la pensée qu'il trouve un sens. Nous modélisons cela par le postulat contextuel (Kohler A., 1995).

« Soit L un langage formel muni de la fonction d'interprétation syntaxique \models_L . Soit c une pensée, et f la formule qui exprime c dans L . Alors c est une proposition atomique silencieuse de L , et la relation dans L entre c et f est donnée par : $c \models_L f$ ».

La fonction d'interprétation syntaxique \models_L définit les règles de L qui gèrent les relations de véracités entre les propositions. Selon le postulat contextuel, nous ne mémorisons ni la pensée c ni son expression f . Par $c \models_L f$, nous formalisons la conscience que nous avons que si nous pensons c , nous disons f . Par « conscience », nous traduisons le fait que cette relation est un processus cognitif : « c » est une proposition silencieuse, et « \models_L » indique une relation logique, donc qui ne se dit pas. « $c \models_L$ » symbolise ce dont nous sommes *immédiatement connaissant* au sens de Descartes R. f modélise ce que nous en disons.

La logique contextuelle

La logique contextuelle L_c est obtenue par l'application du postulat contextuel à la logique propositionnelle. Elle respecte strictement les règles syntaxiques de L_p . La présentation et l'analyse mathématique du formalisme sont présentées dans Kohler A. (2022). Nous invitons le lecteur, s'il n'a pas eu l'occasion de prendre connaissance de ce document, à imaginer une théorie contextuelle (c'est-à-dire un ensemble de formules $c_i \models_{L_p} f_i$) comme un dictionnaire, qui décrit des pensées c_i par des formules f_i . Cette interprétation est suffisante pour la compréhension de ce qui va suivre.

Par exemple, l'ensemble $\{f, \text{non } f\}$, qui appartient à L_p , est explosif. Sa forme contextuelle est $\{(si\ c_1, \text{ alors } f), (si\ c_2, \text{ alors } \text{non } f)\}$. Pour échapper au principe d'explosion, il suffit de faire l'hypothèse que nous ne pensons pas c_1 ou que nous ne pensons pas c_2 . Nous rencontrons là une

propriété intéressante. Un dictionnaire ne dit rien de ce qui est vrai et de ce qui est faux. Il ne fait que présenter des définitions, qui sont utilisées ou pas. Cela permet à L_c de modéliser des informations contradictoires, en se maintenant dans le cadre syntaxique de la logique propositionnelle classique tout en échappant au principe d'explosion (Kohler A., 1995).

Mais cela a un prix : un dictionnaire peut proposer des définitions pour tout et n'importe quoi. L_c gagne la cohérence syntaxique en tombant dans une forme d'incertitude sémantique. Pour en sortir, il nous faut découvrir le processus cognitif qui fait que nous pensons c_1 ou que nous pensons c_2 .

Le raisonnement est intrinsèquement associé à une stimulation

Comme cas d'école, prenons cinq pensées potentielles modélisées par l'ensemble de connaissances suivant :

Si c_1 , alors « *Si "C'est un oiseau", alors "Il vole" ».*

Si c_2 , alors « *Si "C'est un oiseau", alors "Il a des plumes" ».*

Si c_3 , alors « *Si "C'est une hirondelle", alors "C'est un oiseau" ».*

Si c_4 , alors « *Si "C'est une autruche", alors "C'est un oiseau" ».*

Si c_5 , alors « *Si "C'est une autruche", alors "Il ne vole pas" ».*

Il me permettrait de déduire des choses si je savais quelles sont les pensées c_i pertinentes. Par exemple, considérant l'information (*C'est une hirondelle*), $\{c_1, c_2, c_3\}$ est l'ensemble des pensées pertinentes qui me feraient dire (*C'est un oiseau, il a des plumes et il vole*). Et pour (*C'est une autruche*), retenir $\{c_2, c_4, c_5\}$ me permettrait de conclure (*C'est un oiseau, il a des plumes et il ne vole pas*). C'est un besoin de décidabilité. Pour y répondre, nous proposons la notion de stimulus, comme « éveilleurs » des pensées (Kohler A., 2022).

Un stimulus est un fait, ou une pensée, une question, un ressenti, une émotion, une volonté, etc., c'est-à-dire, très généralement, un événement qui actionne le processus de raisonnement en dirigeant la sélection des pensées « pertinentes ». Comme règle de sélection, nous retenons *le sous-ensemble des pensées qui ne contredisent pas le stimulus*. Elles forment le « contexte épistémique », qui produit l'interprétation sémantique. Le raisonnement contextuel ne se construit donc pas selon une logique de preuve. Il est adossé à un principe de non

réfutabilité : l'ensemble des pensées pertinentes (le contexte épistémique) est retenu parce qu'il est justifiable à cet instant compte tenu des connaissances (modélisées par les formules $c_i \models_{Lp} f_i$) dont je dispose et des stimulus que je perçois.

Le raisonnement contextuel est faillibiliste (Popper K., 1934) : l'enrichissement des connaissances ou le changement des stimulus peut, à tout moment, remettre en question l'interprétation sémantique en modifiant le contexte épistémique (Kohler A., 2022). Par exemple, les conclusions au stimulus (*C'est une autruche*) ne seraient pas les mêmes si la pensée c_5 n'était pas présente. Le faillibilisme n'est pas une nouveauté. Le début des réflexions remonte au courant sceptique apparu dans l'antiquité. Son principe est admis, sous une forme plus ou moins forte, par un grand nombre de logiciens. L'apport de notre travail est de proposer un cadre formel qui conforte les intuitions : nous arrivons à la conclusion que c'est une propriété intrinsèque du processus cognitif du raisonnement humain.

Le perspectivisme (Kaulbach W., 1990) lui est une conséquence immédiate et obligée. A un instant donné, une croyance se construit en identifiant le contexte épistémique par rapport aux connaissances et au stimulus. Or il peut y avoir plusieurs sous-ensembles de pensées distincts également pertinents – donc plusieurs contextes épistémiques distincts. Pour illustrer ce propos, considérons une théorie contextuelle réduite à $\{(si\ c_1, \text{ alors } f), (si\ c_2, \text{ alors } non\ f)\}$. Si le stimulus est (*Que dire de f?*), les pensées c_1 et c_2 ont le même niveau de pertinence. Aucune information ne permet de les départager. Chacune forme, distinctement, une perspective cohérente et justifiable, mais produit une interprétation sémantique incohérente par rapport à l'autre. Les pensées sont silencieuses, et nous nous retrouvons à dire, simultanément et en toute bonne foi, f et $non\ f$.

Pour traiter le stimulus (*C'est une autruche*), nous avons besoin d'un moyen d'identifier que la pensée c_1 n'est pas pertinente dans ce cas, mais l'est pour (*C'est une hirondelle*). Pour cela, L_c utilise la capacité introspective du raisonnement que lui apporte la forme $c_i \models_{Lp} f_i$. Considérons par exemple un ensemble $\{f, g, h\}$. Il ne permet de produire que des expressions qui respectent les trois connaissances comme un tout. Mais sous sa forme contextuelle $\{(si\ c_1, \text{ alors } f), (si\ c_2, \text{ alors } g), (si\ c_3, \text{ alors } h)\}$, les pensées sont identifiées. Il est, dès lors, possible de raisonner sur des sous-ensembles de $\{c_1, c_2, c_3\}$, et d'exploiter les liens générés entre eux par les conditions exprimées par f, g et h . Ainsi, la pensée (modélisée par les c_i) exploite les relations logiques portées par le langage (modélisée par les f_i) pour se croiser, s'analyser et se projeter.

Il est aussi possible d'utiliser des formules qui modélisent des relations logiques entre les pensées, comme $c_1 R c_2$ pour R un connecteur binaire quelconque de la logique propositionnelle. L_p est ainsi utilisée comme logique de la pensée (Fodor J., 1975), pour modéliser ce que nous avons appelé des méta-pensées. Elles permettent d'indiquer qu'*une pensée est pertinente tant qu'elle n'est pas impertinente*, sans avoir à préciser une condition particulière à l'impertinence – pour formaliser, par exemple, qu'un oiseau vole tant que rien ne précise qu'il ne vole pas.

Nous venons de présenter les concepts de L_c . Son formalisme mathématique est développé dans Kohler A. (2022). Sa capacité d'expression est confirmée par son application sur un cas pratique. Il est adossé à un outil informatique pour contrôler la validité des promesses théoriques – sur la pertinence de la définition du contexte épistémique, et sur le caractère *silencieux* des pensées notamment.

Les principes d'Aristote formalisent un raisonnement strict, qui rejette l'idée même de l'incohérence. Ils sont relativement éloignés des propriétés faillibilistes et perspectivistes que nous venons d'établir. Le processus de raisonnement de L_c n'est donc pas celui de L_p .

Le raisonnement humain n'est pas syntaxique. Il est sémantique

En analysant le contenu du paragraphe précédent, nous constatons que la fonction d'interprétation sémantique de L_c se construit au-dessus de \neq_{Lp} . Elle est définie comme un processus qui traverse, et s'alimente, de cinq processus, qu'on peut schématiser de la manière suivante : « *Stimulus* $|_{Ev}$ *Pensée* \neq_L *Langage* », pour « $|_{Ev}$ » formalisant le mécanisme d'éveil des pensées par les stimulus (c.a.d. la sélection des pensées qui ne contredisent pas le stimulus).

Le raisonnement humain ne suit donc pas la fonction d'interprétation \neq_L du langage formel. Et, en effet, « *Un langage formel est, par définition, un langage ne possédant qu'une syntaxe et pas de sémantique* » (J. Hebreustreit, *Encyclopaedia Universalis*). \neq_L est une fonction d'interprétation « syntaxique ». Elle décrit les propriétés des connecteurs logiques, comme la théorie de la physique décrit la force de gravité. Elle décrit un comportement. Elle ne porte pas un sens. Dans L_c , la sémantique est définie au travers des pensées, qui portent la relation entre les stimulus et le langage (Kohler A., 2022).

Le raisonnement humain utilise les règles logiques \neq_L du raisonnement formel, mais ne lui est pas assimilé. Il applique une logique « d'inférence non démonstrative » (cf. par exemple Andler D., 2004), qui porte l'interprétation sémantique. Nous allons montrer que ce résultat simplifie radicalement le processus d'apprentissage.

La révision des croyances n'est pas un sujet syntaxique, mais de raisonnement

La non-monotonie désigne, en IA, l'opération consistant à intégrer une nouvelle connaissance qui contredit les connaissances précédentes (Gärdenfors P. & Makinson D., 1991). L'énoncé du sujet est simple : face à deux connaissances incohérentes, laquelle retenir ? Il couvre une typologie de problèmes variés (révision des croyances, des faits, des états, temporelle, etc.). Il se confronte aux propriétés d'adéquation (ce qui est produit syntaxiquement et vrai sémantiquement) et de complétude (ce qui est vrai sémantiquement et produit syntaxiquement) des logiques classiques.

Dans L_c , une nouvelle connaissance est inscrite comme elle arrive dans le dictionnaire des pensées. Elle est ensuite interprétée sémantiquement ou pas, en fonction des stimulus qui « éveillent » les pensées pertinentes. La syntaxe du langage formel, qui porte l'écriture dans le dictionnaire, est complètement décorrélée de la révision des croyances. Celle-ci est déportée sur la fonction d'interprétation sémantique, c'est-à-dire sur ce que nous avons précédemment identifié comme les cinq processus qui font le raisonnement humain. L_c a donc la particularité d'être à la fois syntaxiquement monotone (ce qui est syntaxiquement produit reste syntaxiquement produit) et sémantiquement non monotone (pour un même stimulus, ce qui est crédible selon un ensemble de connaissances peut ne plus l'être si cet ensemble est enrichi d'une nouvelle information) (Kohler A., 2022).

En exemple pratique, reprenons le cas d'école proposé précédemment. Si nous voyons un oiseau, nous concluons qu'il a des plumes et qu'il vole. Si nous apprenons que c'est une autruche, nous déduisons, par un raisonnement sémantique (qui débute par la sélection des pensées « pertinentes »), et tout en conservant une mécanique syntaxique complètement respectueuse des principes aristotéliens, qu'il ne vole pas. Dans L_c , l'adéquation et la complétude ne sont pas un sujet. Il y a la syntaxe (la production de formules, qui obéit à des règles mécaniques auxquelles il ne faut prêter aucun sens) et, complètement distinctement, la sémantique (l'interprétation, qui est portée par les pensées éveillées par les stimulus).

Cette distinction nous permet de résoudre la question de l'apprentissage. Elle est liée, très immédiatement, au sujet de l'imagination. Quel est le processus qui nous permet d'associer une nouvelle information aux connaissances antérieures ?

En autorisant à penser « n'importe quoi », L_c accueille l'imagination

Les langages formels classiques n'utilisent qu'une règle de production, qui est le *modus ponens*. C'est la règle de déduction : « si f et "Si f , alors g ", alors g ». La déduction g est strictement incluse dans les deux prémisses f et « Si f , alors g ». Dit autrement, l'inférence classique n'est pas imaginative : elle ne produit que ce qui est déjà su.

La théorie identifie deux autres règles de production. L'induction, établie par Aristote, généralise une observation à partir de cas particuliers – par exemple : « *L'âne, le mulet, le cheval vivent longtemps ; or, ce sont tous là des animaux sans fiel ; donc, tous les animaux sans fiel vivent longtemps* ». L'abduction, formalisée par Peirce C., porte le raisonnement par hypothèse – par exemple : « *Lorsqu'il pleut le ciel est gris. Le ciel est gris. J'en conclus qu'il pleut* ». Nous constatons que leur application peut conduire à des résultats faux. Le principe d'explosion l'interdit dans le cadre d'un formalisme classique.

L_c supporte la capacité d'imagination. Théoriquement, n'importe quelle règle de production de pensée est acceptable – par exemple « si je pense "Si f alors g " et " g ", alors je pense " f " » (forme d'abduction) et « si je pense "Si f alors g " et "Si f alors h ", alors je pense "Si g alors h " » (forme d'induction). La nouvelle formule s'inscrira dans le dictionnaire. Comme vu aux paragraphes précédents, cette production relève de l'application d'une règle syntaxique. Sur le moment, elle est dénuée de sens. C'est le raisonnement qui déterminera, en fonction des autres définitions déjà existantes et du stimulus, si la nouvelle pensée est crédible ou pas.

LANGAGE FORMEL VERSUS LANGAGE NATUREL

Il est nécessaire de préciser, à ce moment de notre réflexion, ce que nous entendons par langage. Par souci de simplification, nous avons adopté jusqu'ici la posture héritée des travaux de Frege G., en supposant que le langage formel est en lui-même une forme de langage (Van Heijenoort J., 1967). En fait, nous pensons, avec Boole G., que la syntaxe ne définit que des règles

comportementales. Elle est donc, par nature, non porteuse de sens et silencieuse. Pour exprimer les symboles logiques, et sans entrer dans le débat entre Piaget J. et Chomsky N. (1975) sur le caractère acquis ou inné du langage, L_c suppose l'existence d'un processus cognitif dédié à la gestion grammaticale.

Par exemple, pour R le connecteur d'implication, « Oiseau R Voler » peut être dit de plusieurs façons : sous une forme primitive comme « Oiseau Voler », ou, de manière plus évoluée, « Les oiseaux volent », « Tous les oiseaux volent », « Si c'est un oiseau alors il vole », « Ce qui ne vole pas n'est pas un oiseau », etc. Chacune de ces expressions prête un sens et permet de communiquer la forme « Oiseau R Voler » – qui, elle, formalise une propriété comportementale entre les propositions, n'a pas de sens, et ne se dit pas. D'autre part, les symboles universels (quantificateurs et modaux) modélisent une forme de permanence. Nous avons montré (Kohler A., 2022) que L_c permet de modéliser les modalités épistémiques et les prédicats en restant dans la syntaxe de L_p . L'application du postulat contextuel nous a amené à conclure que la pensée n'est qu'immédiateté, et le raisonnement faillibiliste. Rien n'est, strictement, perpétuel. Les quantificateurs et les connecteurs modaux n'ont donc pas de place dans la syntaxe de la logique de la pensée. La notion de permanence appartient à la sémantique, comme conclusion d'un raisonnement.

Le schéma cognitif devient : « $Stimulus |_{Ev} Pensée \neq_L Langage |_{Ex} Stimulus$ ». *Langage* désigne ici une proposition du langage formel, et « $|_{Ex} Stimulus$ » le processus conduisant à son expression en langage naturel. Nous nommons le résultant un stimulus, dans le sens où l'objectif de « $|_{Ex}$ » est d'obtenir une forme communicable et consommable par un être pensant. Nous expliquerons plus loin pourquoi nous la substituons à la notion de langage nature.

Mais, dans l'immédiat, ce schéma n'est pas acceptable. Il se confronte à un problème, qui le condamne immédiatement : la complexité des algorithmes. Les langages formels consomment une énergie calculatoire exponentielle, et il faut dans L_p (et dans L_c , qui utilise la syntaxe de L_p) plusieurs secondes pour exploiter quelques centaines de formules. L'être humain, avec son cerveau biologique, semble capable de faire mieux. Comme nous l'avons évoqué précédemment, la solution sera peut-être dans la puissance de l'informatique quantique. Toutefois, à date, nous n'en sommes pas certains. En attendant, les sciences cognitives nous proposent une autre solution.

Les seuils cognitifs résolvent le problème de la complexité algorithmique

Les études sur les modèles de mémoire ont conduit au développement d'une théorie d'une grande richesse. Nous n'allons retenir que quelques grands principes, nécessaires à la compréhension de notre réflexion. Les sciences cognitives distinguent Mémoire à Long Terme (MLT, contenant l'ensemble des connaissances), Mémoire à Court Terme (MCT, contenant les connaissances utilisées à un instant t pour réagir à un stimulus) et Mémoire de Travail (MT, lieu qui porte les mécanismes calculatoires de consommation de la MCT) (cf. par exemple Norman D., 1970).

Avec un langage formel classique, à l'intégration de chaque nouvelle pensée, il est nécessaire de contrôler la cohérence syntaxique de la MLT pour échapper au principe d'explosion. Ce n'est pas possible dans L_p compte tenu de la complexité des algorithmes en jeu. Les temps de calcul nécessaires pour réaliser l'opération seraient prohibitifs.

La logique contextuelle, en séparant syntaxe et sémantique, contourne le principe d'explosion. Pour maîtriser la complexité algorithmique, il suffit dès lors d'appliquer les seuils cognitifs qui régissent le contenu de la MCT. La théorie en identifie quatre :

- le changement minimal : le contenu de la MCT évolue a minima entre deux instants,
- le critère d'évolution, parfois assimilé à l'enracinement épistémique (Gärdenfors P. & Makinson D., 1991) : la MCT privilégie la convocation de connaissances dites primitives, ou les plus récentes,
- les seuils d'incapacités techniques : la MCT ne peut exploiter simultanément qu'un nombre limité (et apparemment faible, de l'ordre d'une vingtaine) de connaissances,
- les seuils sémantiques : les travaux de Pitrat J. (1990) montrent qu'un humain n'est pas capable de raisonner sur plus de quatre niveaux de méta-connaissances (à rapprocher de la notion de méta pensée définie dans L_c , cf. Kohler A., 1995).

Ces seuils gèrent le contenu de la MCT, limitant les besoins calculatoires. Nous ajoutons deux autres seuils, qui précisent les algorithmes en œuvre dans la MT :

- le seuil du raisonnement proportionné : confronté à un stimulus, l'objectif n'est pas de réaliser la meilleure analyse théorique, mais d'atteindre un niveau d'analyse suffisant pour entraîner une réaction,
- le langage formel de la pensée (Fodor J., 1975) : nous avons choisi L_p pour appliquer le postulat contextuel, mais il est applicable avec n'importe quel langage formel – la logique intuitionniste de Brouwer L. par exemple, ou, pourquoi pas, le formalisme des probabilités.

Les sciences cognitives invitent à adosser au processus de raisonnement une segmentation des pensées comme réponse au problème, très pragmatique, de la complexité algorithmique. Le schéma cognitif devient : « $Stimulus |_{Ev} ((Pensée)) \vDash_L Langage |_{Ex} Stimulus$ ». Les parenthèses symbolisent le compartimentage issu du modèle de mémoire.

Ce que dit le schéma « $Stimulus |_{Ev} ((Pensée)) \vDash_L Langage |_{Ex} Stimulus$ »

L'objectif des travaux de Frege G. et Russell B. était d'établir une théorie de la connaissance, en identifiant et en modélisant les principes du raisonnement « parfait » par une analyse fine du langage. L'application du postulat contextuelle conduit au schéma « $Stimulus |_{Ev} ((Pensée)) \vDash_L Langage |_{Ex} Stimulus$ », modélisant une logique des croyances, faillibiliste et perspectiviste. Nous allons comparer les deux approches.

L'écart principal entre la logique contextuelle et la philosophie analytique porte sur leurs cibles de modélisation, et donc, très immédiatement, sur les fonctions sémantiques associées. L'objectif de L_c n'est pas d'établir une théorie de la connaissance, et la syntaxe du langage formel n'est pas utilisée pour capturer les lois de la vérité (Osta Velez M., 2015). L_c postule que ceux sont celles de L_p . Le problème ne porte pas sur les lois de la vérité, mais sur l'identification des vérités socles, à partir desquelles l'ensemble des vérités est inféré. \vDash_L ne modélise donc pas « ce qui est vrai », mais « ce qui est pensé », au sens de « ce que je considère, à cet instant immédiat, comme étant la vérité ». Cela nous a conduit à distinguer deux niveaux de raisonnements.

D'une part, il y a un raisonnement modélisé $c \vDash_L f$. Il s'applique sur le sous-ensemble des pensées qui est « éveillé » par les stimulus. C'est la logique générale pure (au sens kantien, cf. Macfarlane J. 2002). Elle capture la forme générale de l'entendement. Le fait qu'elle soit

aristotélicienne n'est pas étonnant : c'est le processus mental le plus immédiatement perceptible et exprimable dans son entièreté.

D'autre part, le schéma « *Stimulus* |_{Ev} ((*Pensée*)) \neq *Langage* |_{Ex} *Stimulus* » formalise une logique de la sémantique, au résultat protéiforme. Il nous dit que par-delà les pensées éveillées, qui relèvent d'une immédiateté éphémère, le langage est directement associé, et n'a de sens, que par les pensées et les stimulus de celui qui ressent, pense et dit. Le raisonnement sémantique est donc *bruité* par l'éveil, les couches de mémoire, l'imagination et l'expression du langage naturel qu'il traverse. Nous retrouvons ici la notion de la sensibilité kantienne.

Selon Frege G., « *Tout n'est pas représentation. Sinon, la psychologie contiendrait en elle toutes les sciences, ou du moins aurait juridiction suprême sur toutes les sciences* ». En effet, tout n'est probablement pas représentation. Il existe une vérité. Mais elle n'est définitivement accessible que par la représentation – qui génère une déformation. Frege G. conçoit la logique comme la science de l'inférence valide et des lois de production de la vérité. La logique contextuelle priorise l'identification des éléments qui vont être consommés par l'inférence, c'est-à-dire le socle sur lequel ces lois sont appliquées. Nous rejoignons ici, au moins partiellement, Harman G. (2002) : la logique a un rôle pertinent dans le raisonnement, mais elle ne couvre pas la totalité des raisonnements qui font l'intelligence humaine. Le schéma « *Stimulus* |_{Ev} ((*Pensée*)) \neq *Langage* |_{Ex} *Stimulus* » rejoint et formalise les théories du raisonnement cognitif de Hanna R. et de Shapiro S.

Au sens d'Aristote et de Frege G., une proposition atomique exprime une « connaissance » en soit, qui est vraie ou fautive en elle-même. Cette conception a été fortement critiquée par quelques auteurs, par exemple Quine W. (cf. Audureau E., 2000). Le sens d'une proposition est évidemment immédiatement associé à la sémantique qui est adossée au langage formel (cf. par exemple Roussarie L., 2017). Selon le postulat contextuel, une proposition est un ensemble de signe qui ne porte pas de signification. Il n'est ni vrai ni faux. « Oiseau » est donc une proposition possible de *L_c*. « Les oiseaux volent » en est une autre. L'injonction « Marchons ! » est aussi une proposition, de même que « Trucmuche ». Le sens est hérité des pensées que la proposition éveille en tant que stimulus.

Prenons le mot « Oiseau » : il éveille en chacun de nous un ensemble de pensées similaires. Elles nous permettent de nous comprendre et de communiquer sur une base commune.

Toutefois, en fonction de l'instant, de l'histoire et de la culture de chacun, ce mot éveille parallèlement en chacun d'entre nous quelques pensées spécifiques. Nous voyons ici apparaître la formalisation du jeu de langage établi par Wittgenstein L. : il n'y a pas un langage, mais un ensemble de concepts. Chaque concept se définit, ou plutôt prend un sens, en traversant un ensemble de pensées. Il y a donc, probablement, autant de « langages naturels » qu'il y a d'être pensant. C'est au travers des stimulus et des pensées qu'ils éveillent que se fait la communication.

Une utilité des travaux sur les logiques non classiques est qu'elles facilitent la conceptualisation de sujets complexes (cf. par exemple Leturc C., 2022). Mais le postulat contextuel assume une posture psychologiste, qui suppose la réalité d'une logique de la pensée. Dans le cadre de l'IA symbolique, elle n'a de sens que s'il existe un formalisme unique capable de porter l'apprentissage de tout et n'importe quoi. La logique propositionnelle est un candidat intéressant. Nous avons établi (Kohler A., 1995 & 2022) des ponts entre L_c et d'autres logiques – les logiques para-cohérentes (Lukasiewicz J., 1967), la logique des défauts (Reiter R., 1980), la logique des circonscriptions (McCarthy J., 1980), la logique modale (Kripke A., 1971), la logique des prédicats (Frege G., 1903) et les logiques adaptatives (Batens D., 2001).

Nous terminons ce tour d'horizon par le sujet de l'inconscience. Selon le schéma « *Stimulus* |_{Ev} ((*Pensée*)) \neq *Langage* |_{Ex} *Stimulus* », une mécanique complètement aristotélicienne éveille un ensemble de pensées. Nous l'utilisons pour produire une interprétation sémantique. C'est la conscience. Ce qui n'est pas éveillé reste, à cet instant, endormi, en inertie. L'application du postulat contextuel nous conduit à la conclusion que le subconscient et la vie intérieure relève de l'imagination (cf. Chater N., 2018). Ce sont des mirages produits par la logique du raisonnement humain, au résultat protéiforme. Il est adossé à une cascade de processus cognitifs, qui génèrent un écart intrinsèque entre « ce qui entre » (la source) et « ce qui sort » (l'embouchure). Ce déséquilibre, dont nous sommes immédiatement conscients, crée une tension, la perception d'une réalité qui est autre, et, très immédiatement, une nécessité dynamique de libération. La loi d'équilibre est l'essence premier de la raison, et la raison de nos actions.

Conclusion

Pour formaliser la relation entre le langage et la pensée, nous avons exploité, en prenant quelques libertés, des concepts et résultats issus de la philosophie, des mathématiques, de l'informatique et des sciences cognitives. Notre objectif était d'arriver « quelque part » en évitant de nous arrêter devant chaque pavé mal disposé sur la route, pour prendre ensuite le temps d'étudier notre lieu d'arrivée dans sa globalité. Cela nous a conduit à la formalisation d'un processus de raisonnement humain qui suit une « inférence non démonstrative » (cf. Andler D., 2004 ou Roulin J.L., 2006 par exemple). Le point de départ de notre réflexion est un postulat. Il est donc, *a minima*, discutable. Face à cette évidence, nous invoquons Poincaré H. (1908) : la valeur d'une théorie est moins dans sa vérité que dans sa capacité à proposer des réponses et à ouvrir de nouveaux horizons.

Le schéma « $Stimulus |_{Ev} ((Pensée)) \neq_L Langage |_{Ex} Stimulus$ » apporte un éclairage aux nombreuses théories philosophiques du raisonnement. Il confirme la réalité d'une raison « pure », aristotélicienne, mais entièrement comportementale et dénuée de signification. Elle est composante d'une logique de la sémantique protéiforme, formée d'une cascade de miroirs déformants qui construit le jeu de langage de Wittgenstein L. La question fondamentale n'est pas l'identification des règles du raisonnement correct. Aristote les a établis il y a déjà quelques centaines d'années. Le sujet auquel le processus cognitif de notre raisonnement nous confronte porte sur l'identification du processus qui sélectionne le socle des pensées sur lesquelles nous les appliquons.

Le Big Data et la puissance calculatoire quantique nous permettront peut-être de construire un jour une forme d'intelligence. Elle sera très différente du raisonnement humain, qui n'a pas la pureté du raisonnement mathématique. Lorsque nous pensons qu'il n'est pas impossible que Dieu joue aux dés, ce n'est pas l'éventualité du troisième état (l'état de superposition, qui cumule mort et vivant) qui est à remarquer. Ce qu'il faut regarder, et qui est extraordinaire, c'est le fait que nous puissions imaginer cela. L'intelligence est la conséquence de notre non omniscience. Dès lors, nous n'avons pas d'autre solution que de croire ce qui n'est pas injustifiable. C'est le faillibilisme, qui induit le perspectivisme. Au prix de l'incertitude, nous gagnons une capacité de raisonnement introspectif. Elle nous apporte l'apprentissage et l'imagination.

Références bibliographiques

- ANDLER, Daniel (2004). *Introduction aux sciences cognitives*. Gallimard.
- AUDUREAU, Eric (2000). *Les objets de la logique classique peuvent-ils être des énoncés ?*. Société de philosophie du Québec, *Philosophiques*, 27(2), 263–285.
- BATENS, Diderick (2001). *Une caractérisation générale des logiques adaptatives*. *Logique & Analyse* 173–174–175.
- BIKOVA, Marta, FRITTELLA, Sabine, KOZHEMIACHENKO, Daniil, MAJER, Ondrej, NAZARI, Sajad (2022). *Fonctions de croyances interprétées sur la logique de Belnap–Dunn*. PFIA JIAF, Saint-Etienne, France.
- CHATER, Nick (2018). *Et si le cerveau était bête ?*. Edition Plon, collection Essais
- DAMASIO, Antonio Rosa (2006). *L'Erreur de Descartes : la raison des émotions*. Paris, Odile Jacob.
- DELMAS-RIGOUTSOS, Yannis (1993). *Logique Quantique*. Numdam, Séminaire de Philosophie et Mathématiques.
- DESCARTES, René (1641). *Méditations métaphysiques. Objections et Réponses (I à VI)*. Edition sous la direction de Jean-Marie Beyssade et de Denis Kambouchner, éd. Gallimard Tel (2018).
- DOMINICY, Marc (2005). *Langage, interprétation, théorie – Fondements d'une épistémologie moniste et faillibiliste*. Université Libre de Bruxelles, Laboratoire de Linguistique Textuelle et de Pragmatique Cognitive.
- DUCROT, Oswald (1971). *Langue et pensée formelle*. *Langue française*, n°12, Linguistique et mathématique, sous la direction de M.-C. Barbault et Oswald Ducrot.
- EZRATTI, Olivier (2021). *Les usages de l'intelligence artificielle*. Opinions libres (le blog d'Olivier Ezratti).
- FODOR, Jerry (1975). *The Language of Thought*. Harvard University Press.
- FREGE, Gottlob (1892). *Über Sinn und Bedeutung*. *Revue Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik*.
- FREGE, Gottlob (1903). *Grundgesetze der Arithmetik*.
- GÄRDENFORS, Peter, MAKINSON, David (1991). *Relations between the logic of theory change and nonmonotonic logic*. In André Fuhrmann and Michael Morreau, eds. *The Logic of Theory Change*, LNAI-465.
- HANNA, Robert (2006). *Rationality and Logic*. Cambridge, MA : MIT Press.

- HARMAN, Gilbert (2002). *Internal Critique : A Logic is not a Theory of Reasoning and a Theory of Reasoning is not a Logic*. Dans D. Gabbay, *Studies in Logic and Practical Reasoning*. London : Elsevier Science.
- JULIA, Luc (2019). *L'intelligence artificielle n'existe pas*. Broché.
- KAULBACH, Wilhem Von (1990). *Philosophie des Perspektivismus: Wahrheit und Perspektive bei Kant, Hegel und Nietzsche*. Mohr Siebeck, Tübingen.
- KOHLER, Arnaud (1995). *Proposition d'une structure de représentation de la connaissance pour les raisonnements non classiques*. Université d'Aix-Marseille I, France, thèse de doctorat en informatique.
- KOHLER, Arnaud (2022). *Modelling a fallibilistic and perspectivistic reasoning*. PFIA JIAF, Saint-Etienne, France.
- KRIPKE, Saul Aaron (1971). *Semantical considerations on modal logic, Reference and Modality*. L. Linsky (éditeur), Oxford University Press, London.
- LETURC, Christopher, BONNET, Grégory (2022). *Raisonnement sur l'éthique avec un cadre d'argumentation fondé sur une logique modale normale*. PFIA JIAF, Saint-Etienne, France.
- LIEBER, Jean, MAILLY, Jean-Guy, MARQUIS, Pierre, PRADE, Henri, ROLLIN, and François (2022). *Quelques réflexions autour de la notion de bêtise artificielle*. PFIA JIAF, Saint-Etienne, France.
- LUKASZEWICZ, Jan (1967). *Many-Valued Systems of Propositional Logic*. Eds. S. Mc Call, *Polish Logic*, Oxford University Press, Oxford.
- MACFARLANE, John (200). *Frege, Kant and the Logic in Logicism*. *Philosophical Review*.
- MC CARTHY, John (1980). *Circumscription – A Form of Non Monotonic Reasoning*. *Artificial Intelligence* 13.
- MILLER, George Armitage (2003). *The cognitive revolution: A historical perspective*. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3).
- NORMAN, Donald (1970). *Models of human memory*. Academic Press, New York.
- PITRAT, Jacques (1990). *Méta-connaissance, Futur de l'Intelligence Artificielle*. Hermes.
- POINCARÉ, Henri (1908). *Science et Méthode*. Ed. Flammarion, collection Bibliothèque de philosophie scientifique.
- OSTA VELEZ, Mathias (2015). *Logique, Raisonnement et Rationalité : Le problème de la normativité chez Kant, Frege et la philosophie de la logique contemporaine*,

- mémoire de Master 2 de Logique sous la direction de Monsieur Pierre Wagner, Université de Paris I Panthéon-Sorbonne, UFR 10 – Philosophie, hal-dumas-01101587.
- POPPER, Karl (1934). *The Logic of Scientific Discovery*. Routledge, coll. Routledge Classics.
 - QUINE, William (1980). *From a logical point of view*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts and London, England.
 - PERKINS, David (2002). *Standard Logic as a Model of Reasoning : the Empirical Critique*. Dans D. Gabbay, R. Johnson, H. OhlBach, & J. Woods, *Handbook of the Logic of Argument and Inference*, Amsterdam : Elsevier.
 - PIAGET, Jean, CHOMSKY, Yann (1975). *Théories du langage, Théories de l'apprentissage*. Débat au Centre Royaumont. Editeur Points, Collection Points Essais.
 - ROUSSARIE, Laurent (2017). *Sémantique formelle Volume 1 : Introduction à la grammaire de Montague*. Berlin, Language Science Press, référence ISSN : 2364-6209.
 - REITER, Raymond (1980). *A logic for default reasoning*. *Artificial Intelligence* 13.
 - ROUGIER, Nicolas (2019). *Pourquoi votre chat est nul aux échecs et pourtant plus intelligent qu'une IA*. Université de Bordeaux, référence hal-02322085.
 - ROULIN, Jean-Luc (2006). *Psychologie cognitive*. Rédaction sous la coordination de Jean-Luc Roulin, édition Bréal.
 - SCHRÖDINGER, Erwin Rudolf Josef Alexander (1992). *Physique quantique et représentation du monde*. Le Seuil, coll. Points-Sciences.
 - SIEGEL, Pierre (1987). *Représentation et utilisation de la connaissance en calcul propositionnel*. Université de Luminy, Thèse d'état.
 - STENNING, Keith, VAN LAMBALGEN, Michiel (2008). *Human Reasoning and Cognitive Science*. London: MIT Press.
 - THAYSE, André & co-auteurs (1993). *Approche logique de l'intelligence artificielle*. Dunod informatique.
 - TIERCELIN, Claudine (1993). *C.S. Peirce et le pragmatisme*. Paris, PUF.
 - VAN HAECHT, Louis (1947). *Le problème de l'origine du langage*. *Revue Philosophique de Louvain*.
 - VAN HEIJENOORT, Jean (1967). *La logique comme calcul et la logique comme langage*. *Synthese*, vol. 17, no 3, 1967, p. 324-30. *JSTOR*, <http://www.jstor.org/stable/20114564>.
 - WITTGENSTEIN, Ludwig (1921). *Tractatus logico-philosophicus*. Traduction Gilles Gaston Granger, éd. Gallimard Tel, 1993.