

# Humanités numériques et modélisation scientifique

Jean Guy Meunier  
*Université du Québec à Montréal*

*A paraître/ paru*  
 Questions de communication , n°31 2017 (juin/juillet).

## Résumé

Les projets dans les Humanités numériques sont-ils de nature scientifique ? Une vision dite pragmatique et cognitive de la science montre que les théories scientifiques sont avant un ensemble modèles de divers types qui, ensemble, contribuent à l'avancement du savoir. Implicitement ou explicitement, les humanités numériques utilisent des modèles formels, matériels, conceptuels qui leur permettent de se positionner comme une démarche scientifique, mais qui aussi limitent et contraignent leur méthode et leur champ d'application dans le domaine des humanités. En ce sens, les humanités numériques créent une passerelle originale entre les sciences et l'herméneutique.

Mots-clés : Humanités numériques, modélisation, philosophie des sciences, épistémologie.

## Abstract

Can digital humanities build scientific theories? The pragmatic and cognitive conception of science allows us to see scientific theories as sets of various types of models: be they formal, material, conceptual, etc. It is by working together that the models contribute to the advancement of knowledge. Implicitly or explicitly, digital humanities also use models that allow them to position themselves as a scientific inquiry. But this also limits and constrains their method and application in the field of the humanities. At the same time though, this gives place to hermeneutics. In this sense, digital Humanities create an original bridge between science and hermeneutics.

Key-words: Digital Humanities, models, philosophie of science, épistémologie.

## 1 Introduction

Dans les années 2000, lié à l'émergence des technologies informatiques, est apparu un programme original et novateur de recherche habilement appelé les Humanités numériques (ci-après HN) calquant l'anglais *Digital Humanities*. Ce programme reçoit plusieurs définitions. En voici deux :

*By digital humanities, we mean research that uses information technology as a central part of its methodology, for creating and/or processing data. . . The use of the term digital Humanities] reflects a growing sense of the importance that digital tools and resources now have for humanities subjects.*<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> <http://digital.humanities.ox.ac.uk/Support/whatarethedh.aspx>

*Les humanités numériques recouvrent un ensemble de pratiques de recherche à l'intersection des technologies numériques et des différentes disciplines des sciences humaines. (Dacos et Mounier, 2014)*

Ces deux termes *Humanities* et *humanités* ne désignent pas de mêmes objets de recherche. En anglais : *humanities* est un terme traditionnel qui désigne une partie de l'ensemble complémentaire des sciences dites naturelles, et plus particulièrement, les sciences liées à la culture telles la sociologie, l'anthropologie culturelle, les sciences du langage, le droit, les pratiques artistiques (musique, théâtre, peinture, danse), la littérature et même le journalisme. Lorsque la signification est un peu plus précise, les *humanities* incluront plusieurs disciplines des sciences humaines, par exemple de la sociologie, de la philosophie, les communications médiatiques. Dans le monde francophone, italien, espagnol, les *humanités* désignent généralement plus une tradition intellectuelle et une éthique *humaniste* d'inspiration érasmienne qu'un champ disciplinaire universitaire. Mais lorsque cette tradition s'exprime dans des formes sémiotiques, la recherche s'intéresse à des artefacts relevant des arts, des lettres et des médias et même de la science et du sociopolitique.

On accepte cependant de plus en plus le recouvrement des deux extensions de ces termes *Humanities* et *Humanités*, surtout si on accole les qualificatifs *digital* au premier et *numérique* au second. Et dans certains cas, on inclura en plus les « Digital Studies », les systèmes de l'information et de la communication (SIC) et même toute la question de l'instrumentation numérique de la connaissance. Pour les fins de notre analyse, nous utiliserons ce néologisme des *humanités numériques* pour désigner de manière très général un territoire de recherche qui malgré de multiples variantes, mettent en relation deux entités radicalement différentes.<sup>2</sup> D'un côté on trouve des disciplines des sciences humaines et sociales dites des *humanities* ou *humanités* qui s'intéressent à des objets complexes de types sémiotiques, par exemple, les lettres, les langues et les communications, la culture, les représentations sociales etc. De l'autre côté, on trouve des technologies dites numériques de traitement d'information.

Malgré la résistance qu'a soulevée la rencontre de ces deux qualificatifs, *humanités* et *numériques* et le haut de degré de généralités de ces définitions, il faut bien voir qu'il s'agit d'un programme de recherche en sémiotique computationnelle. (Meunier, 2017). En effet, les HN manipulent des symboles ou des représentations sémiotiques c'est-à-dire, pour reprendre le vocabulaire classique peircien, des signes ! mais où la manipulation est effectuée à l'aide de la technologie dite numérique. Ces symboles sont signifiants et seront de divers types : textes, sons, images, comportements, etc. Et le traitement sera réalisé par des ordinateurs.

Il s'avère que, dans un tout autre vocabulaire et paradigme, l'intelligence artificielle s'est elle aussi définie de manière très similaire : en effet, comme l'ont répété Newell et Marr, les ordinateurs sont des machines qui manipulent des symboles qui sont aussi porteurs de signification.

---

<sup>2</sup> Voir sur ces questions le numéro spécial de la Revue française des Sciences de l'information et de la communication : 8/ 2016 <https://rfsic.revues.org/1984>

On y présente des réflexions sur les nouveaux territoires disciplinaires que définit l'instrumentation de la connaissance par le numérique.

*Les scientifiques de l'IA voient les ordinateurs comme des machines qui manipulent des symboles. (Newell, 1976, p. 9621 — (NT)*

Mais rajoutent-ils, dans leur usage en intelligence artificielle, ces symboles ont aussi, une signification c'est-à-dire ils désignent quelque chose :

*« Le concept le plus fondamental pour un symbole est ce qui leur donne le caractère d'être symbolique : à savoir ce qui leur permet d'être à propos (stand for\_) une certaine entité. Nous appelons ces concepts la désignation [Newell, 1980 : 156.]*

D'un point de vue épistémologique, on peut ainsi voir les humanités numériques comme des types particuliers de projets d'intelligence artificielle, mais où les « symboles » sont ceux qui, eux aussi, désignent des entités et des propriétés de réalités qui intéressent diverses sciences humaines et sociales mais sur lesquels on veut aussi appliquer un traitement par ordinateur.

*An expression [composed of symbols] designates an object if, given the expression, the system can either affect the object itself or behave in ways dependent on the object. (Newell, Simon 1976)*

Une telle vision des HN rencontre cependant deux positions critiques : d'un côté, celle qui venant des sciences humaines ou sociales, voit l'ordinateur comme un simple outil-gadget qui ne peut effectuer que des traitements superficiels en raison de la complexité des objets sémiotiques étudiés. D'un autre côté, on trouve ceux qui, d'informatique, ne croient pas à la pertinence du traitement informatique d'objets flous et difficiles à saisir. En réponse à ces critiques, certains promoteurs des humanités numériques voient au contraire dans les HN l'ouverture d'un programme original de recherche renouvelant de manière radicale la pratique et les méthodes mêmes des sciences humaines et sociales et des humanités.

Notre objectif ici est de sortir de ces positions critiques ou prophétiques pour tenter de comprendre du point de vue d'un type particulier de philosophie de science, dite pragmatique, la nature de la relation entre les humanités et le « numérique ». Nous explorerons l'hypothèse que les humanités numériques sont des démarches de connaissances qui, à l'instar des pratiques scientifiques construisent aussi des théories qui, d'une part, visent à décrire, expliquer et comprendre la complexité de certains objets sémiotiques, mais qui, d'autre part, se font assister par des traitements dits « numériques » applicables à ces objets sémiotiques. Nous espérons montrer que les HN permettent de penser une rencontre originale entre une démarche de type scientifique d'influence pragmatique et une démarche scientifique d'influence herméneutique liée à l'interprétation requise par la sémiotité de ses objets de recherche.

## **2 La théorie scientifique**

À première vue, il semblerait difficile de placer les HN dans le cadre d'une recherche de type scientifique, car d'emblée, on les situerait intuitivement dans l'horizon des sciences herméneutiques. Mais cette difficulté est tributaire d'une vision spécifique de la science où elle est pensée comme un ensemble d'énoncés formels dont la vérité est validée par l'expérimentation ce qui constituait l'essentiel de sa valeur aléthique et explicative.

Cette vision restrictive de la science a été remise en question par plusieurs scientifiques et épistémologues, non pas qu'elle est fautive, mais parce qu'elle est avant tout une vision

normative plutôt que pragmatique. À ce titre, elle est souvent réductrice et elle privilégie la démonstration par l'expérimentation. Mais surtout, elle ne correspond pas aux pratiques réelles de plusieurs sciences contemporaines.

L'une des thèses importantes la philosophie classique des sciences est que, dans sa poursuite de connaissances, la science est un discours qui construit une *théorie* à propos de ses objets. Mais, ce n'est pas tant cette thèse de la science comme discours qui fait problème que la compréhension du concept même de *théorie* qu'elle contient. Et de fait, ce sera sur la nature d'une telle théorie qu'il y aura divergence de points de vue. Divergence qui entraînera une révision de la compréhension de la nature même de la science.

Rappelons brièvement ces différentes conceptions que la philosophie des sciences propose sur la nature d'une *théorie* dite scientifique. Une première, dite *syntactique*, vient du positivisme logique. Ici, une théorie est définie comme un ensemble d'énoncés formés par des règles strictes et dont certains sont soit des théorèmes soit des axiomes ou des postulats :

*Scientific theory is thus taken to be a syntactically formulated set of theoretical sentences (axioms, theorems, and laws) together with their interpretation via correspondence sentences. (Winther, R., 2016)*

Une seconde vision dite *sémantique* reprend cette position, mais précise la nature des énoncés. Pour Van Frassen (1970 : 327), une théorie doit être « une structure mathématique ». Autrement dit, une théorie n'est pas qu'un ensemble d'énoncés syntaxiquement bien formés, mais auxquels on ajoute une sémantique qui se rapporte avant tout à des structures mathématiques pertinentes pour un domaine de recherche.

Ces deux visions d'une théorie scientifique ont été abondamment critiquées. Bien que ces types de théories soient techniquement acceptables, elles demeurent rares et peu applicables dans la majorité des sciences. (Papineau, D., 2010 ; Leplin, 1981). Des études analytiques ont montré que de multiples pratiques scientifiques ne se réduisent pas à des théories scientifiques dont la forme essentielle est un ensemble d'énoncés formels et que le type d'explication qui est fournie ne se présente pas uniquement sous forme nomologique et déductive. Et c'est souvent celle-là que les humanités/ humanities ont en tête lorsqu'on les oppose à une démarche scientifique.

Aussi une troisième vision dite *pragmatique* est apparue. Elle fut influencée par la longue tradition du pragmatisme américain : James, Dewey, Sellars, Feyerabend, Kuhn, Hacking. etc. Et nous dirions qu'elle n'est pas sans lien avec des courants européens de sciences de la culture et de la sociologie des connaissances (Weber, Manheim, Foucault, Luckman, Rastier etc..) Et plus récemment, suite à des relectures entre autres de Duhem (1906) et Bachelard (1976), elle fut revisitée par Rheinberger (1997), Giere, (1999), Cartwright, (1983), Morgan and Morrison (1999). Cette vision pragmatique a été construite à partir d'études de plusieurs pratiques concrètes, tant en sciences de la nature qu'en sciences humaines et même en ingénierie. Dans cette vision, une théorie est vue comme un moment, un état de stabilisation d'un processus cognitif complexe souvent itératif et qui s'exprime sous diverses formes sémiotiques et discursives, formelles ou non-formelles, ou même iconiques (graphes, les plans, les simulations, etc.). Ce processus cognitif réunit en fait divers points de vue, perspectives, et stratégies d'enquête, démonstrations, langages, etc., portant sur les phénomènes étudiés. Chacun de ses points de vue, angles, perspectives,

intérêts et que l'on regroupe dans cette vision pragmatique sous le terme englobant de « modèle ».

### 3 La modélisation en science.

Cette notion de modèle n'est pas nouvelle. Dans ses premières utilisations, elle fut surtout associée aux sciences naturelles classiques et à la logique mathématique. Mais comme l'ont montré Armatte et Dahan (2004), elle s'est fortement adaptée aux multiples changements survenus dans les pratiques de toutes les sciences incluant les sciences humaines, les sciences de la gestion et même de l'ingénierie. De plus, l'introduction de l'ordinateur en a accéléré l'adoption. En effet, toutes les sciences ont été rapidement confrontées à traiter de nouveaux objets d'étude, des points de vue différents, des expertises hybrides, des langages formels diversifiés. Ces changements ont immédiatement rendu des plus heuristiques cette notion modèle. Le concept de modèle est devenu encore plus important pour unifier des pratiques scientifiques utilisant des approches hybrides et diversifiées. Ainsi, les modèles seront vus comme des pierres d'assise de l'explication scientifique.

Des philosophes de la science (Cartwright 1983, Lemoigne 1987), Frigg et Hartman 2012, Knuutila 2011) donnent à ce concept modèle un rôle épistémique essentiel dans toutes les sciences qu'elles soient naturelles sociales ou humaines :

*'to explain a phenomenon is to find a model that fits it into the basic framework of the theory and that thus allows us to derive analogues for the messy and complicated phenomenological laws which are true of it. Cartwright (1983: 22)*

Ainsi, une théorie scientifique n'est plus simplement un ensemble d'énoncés, mais une collection de plusieurs types de modèles contenant divers types d'énoncés et qui tous et collectivement participent à la connaissance d'une réalité étudiée. On rejoint ainsi l'intuition souvent citée de Valéry : « *Nous ne raisonnons que par modèles.* »

Le rôle cognitif que les modèles jouent dans une théorie scientifique est original. Ils assistent la théorie dans la multiplicité et la diversité de leurs tâches et leurs objets de recherche, par exemple : la conception de la problématique, la formulation des hypothèses, l'intégration aux recherches existantes, la définition de la méthode, l'introduction d'une formalisation, l'illustration par la simulation, la construction de prototypes, le design de l'expérimentation, l'interprétation et la dissémination des résultats, etc. Allègrement, Morgan et Morrison (1999 : 15) résument ce rôle par une formule lapidaire : un modèle sert à « *rabouter ensemble (fit together) ... des morceaux qui viennent de sources disparates* ». Mais, avec plus de sérieux, elles précisent que : « *les modèles sont des médiateurs entre les théories et le monde.* ». Bref, cette notion de modèle est ainsi devenue une thématique importante de la philosophie contemporaine des philosophies des sciences. (Burch, 1999 ; Frigg, R. and Hartmann, S., 2012).

Une définition technique de modèle demeure cependant difficile trouver : souvent on ne contentera de les définir de manière extensionnelle c'est-à-dire en donnant des exemples ou des cas particuliers. Mais on trouve aussi des définitions intensionnelles où apparaissent les sens divers qu'on lui donne.

*“There are many senses of the term “model” in science, and these different kinds of model serve distinct scientific ends (Giere, 1999:1).*

Pour Beatu les modèles sont des expressions des perspectives cognitives diverses que l'on peut avoir sur l'objet d'étude.

*Models anchor the diverse pieces of the mosaic of knowledge to a description of a phenomenon, on the one side, and to the methods and tools, experimental or theoretical, used to obtain each piece of the mosaic, on the other. (Baetu 2013 : 2)*

Les modèles ne sont pas comme des théories. Ce sont des outils pour construire des théories qui elles, exigeront un engagement ontologique et aléthique. Rheingurger (1997) dira que les modèles ne servent pas avant tout à *explorer ce que l'on sait, mais plutôt ce que l'on ignore.*

Autrement dit, les modèles sont des artefacts épistémiques qui participent à la description, l'explication et la compréhension des objets de recherche. Ils s'expriment par diverses formes sémiotiques qui tantôt sont des langues formelles (mathématiques, logique, etc. tantôt des langues naturelles, et tantôt des langages iconiques (graphes, plans, répliques, reproduction, simulation, etc.).

Quelques fois, ils relèvent d'une intuition ou d'une pratique disciplinaire très assimilée, mais peu thématisée. D'autres fois, ils participent d'une exploration heuristique prenant la forme de protocoles, d'expérimentations, de démonstrations rigoureuses, d'illustrations, de critiques, de révisions, de prototypes et même de technologies, etc.,

Une telle vision de la notion de modèle nous permet de voir, que, malgré des différences radicales, il y a quelque chose de similaire entre les sciences dites naturelles et les sciences herméneutiques ou interprétatives, en ce que les deux types de sciences créent multiples modèles dans la construction de leur théorie. Et ils sont des formes particulières ou des moments dans l'interprétation de la réalité.

Comme de nombreux épistémologues (Morgan et Morrison 1999, Leonelli 2007, Knuuttila 2011) qui ont étudié des pratiques scientifiques l'ont souligné à plusieurs reprises, cette multiplicité de modèles existe dans plusieurs types de sciences. Les sciences cognitives en sont un bel exemple. En effet, en raison de la multiplicité et de la diversité des tâches et même des objets de recherche, l'utilisation de modèles devient un support heuristique essentiel à la recherche. Par exemple, ces sciences étudient des opérations cognitives complexes et classiquement caractérisées par de la sémiotité ou de l'intentionnalité. Elles s'intéresseront ainsi à une multiplicité d'objets, tels : l'imagination, la catégorisation, le raisonnement, l'émotion, la décision, etc. En raison de la diversité, complexité et multiplicité des points de vue, des perspectives qu'on peut avoir sur ces objets, mais aussi en raison de l'utilisation de l'ordinateur dans la recherche, des auteurs, entre autres Dennett (1978), Pylyshyn (1984) et Marr (1982), proposèrent que l'on voie ces sciences comme un travail de reconstruction c'est-à-dire comme une sorte de rétroingénierie qui repose sur trois « stances » ou postures, angles, perspectives, points de vue, prises de position, etc. sur leurs objets. Ils ont qualifié ces postures *intentionnelles, fonctionnelles, et physiques.*

Inspiré par cette catégorisation, et en ajustant un peu leur proposition, nous comprendrons ces postures comme des types de *modèles* ou encore de classes de modèles. Dans notre taxonomie, comme nous le montrerons plus loin, ces *stances* ou postures sont

pour nous des sous-modèles de chacune de trois classes de modèles que nous reconnaissons être conceptuelles, formelles, matérielles.

McCarthy (2008), un des pionniers des HN reprend cette vision pragmatique et soutient qu'en raison de l'utilisation de l'ordinateur, ce concept de modèle joue un rôle essentiel dans la pratique des humanités numériques :

« Computers are essentially modeling machines, not knowledge jukeboxes » (McCarthy, 2008 : chap. 19, p.2).

Cette notion de modèle nous apparaît aussi des plus heuristiques pour comprendre les démarches effectuées dans les HN. Et dans cet article nous explorerons cette thèse épistémologique sur la théorie comme structure symbolique qui construit des modèles et nous tenterons de préciser davantage comment cette notion de modèle est pertinente pour comprendre HN dans une perspective de pratique scientifique. Évidemment, ce faisant, nous voyons les HN dans une perspective de philosophie pragmatique des sciences. Elles produisent à leur manière des théories et de modèles qui participent à l'explication et la compréhension de leurs objets propres.

Une telle vision nous semble heuristique en ce qu'elle se glisse entre des positions formalistes extrêmes qui, d'une part ne reconnaissent dans les humanités numériques qu'une démarche intuitive sans rigueur et d'autre part les positions herméneutiques aussi extrêmes qui ne voient dans ces humanités numériques que des démarches fondées sur des outils non-pertinents pour assister l'interprétation. Nous étudierons maintenant la nature et le fonctionnement de ces modèles, plus particulièrement les modèles formels, matériels et conceptuels et nous illustrerons leur usage dans certaines sciences et dans les humanités numériques.

#### 4 Le modèle formel

Dans une pratique scientifique, un modèle, avons-nous dit, est un artefact sémiotique qui sert à décrire, expliquer et comprendre des objets de recherche. Un modèle sera dit formel si les formes sémiotiques qu'il contient sont un ensemble de symboles strictement régis par des règles. Par commodité, on appellera souvent ces systèmes symboliques formels des *langues formelles*<sup>3</sup> où les symboles de départ constituent un *vocabulaire* et les règles définissent une *syntaxe*. Ce langage est sans sémantique. Cependant un modèle formel sera dit interprété si dans une application à un domaine spécifique, une sémantique lui est ajoutée.

On distinguera des modèles formels selon le type de systèmes symboliques qu'ils utilisent. Dans le cadre de notre analyse reliée aux Humanités numériques nous nous concentrerons sur trois types modèles formels dont deux se retrouvent souvent des Humanités numériques soit les modèles : axiomatiques, soit mathématiques et/ou computationnels.

---

<sup>3</sup> En anglais on utilisera le terme language pour langue. Mais en français, le terme langage couvre plus la langue. Et ce terme lui-même est problématique car il existe des systèmes symboliques qui ne sont pas des langues, au sens strict de ce terme par exemple, les systèmes symboliques mathématiques ou encore des systèmes symboliques contenant des formes graphiques comme  $\Rightarrow \supset + *$ , des lignes, des cercles, des figures (graphes, plans, etc.)

Les modèles formels de type axiomatiques utilisent des systèmes symboliques dont la syntaxe contient des règles particulières pour la génération et la transformation des formules (inférence, substitution, etc.). De plus certaines formules sont choisies comme postulats, axiomes, lemmes, corollaires, etc. Ces caractéristiques rendent les systèmes axiomatiques très utiles pour construire des séquences de formules servant de démonstration et de preuve. Les prototypes de systèmes axiomatiques sont les divers systèmes logiques : Logique propositionnelle, prédicative, combinatoire, etc. Les systèmes axiomatiques ne reçoivent que rarement une sémantique. On les utilise surtout pour modéliser des structures mathématiques. Peu de sciences les utiliseront de fait, pour la modélisation de leur objet de recherche.

Les modèles formels de type mathématique utilisent eux aussi des systèmes symboliques formels : ceux-ci se caractérisent, entre autres, par l'inclusion des classes de symboles (constantes, variables, opérations, etc.). Ils s'ajoutent aussi des types particuliers de règles pertinentes à des manipulations complexes de leurs symboles (substitution, élimination, récursion, transformation, etc.). Dans la majorité de leur utilisation effective, ils définiront qu'implicitement leurs axiomes ou postulats.<sup>4</sup> Cependant, certaines formules seront privilégiées, plus particulièrement celles qui expriment des relations fonctionnelles. Les prototypes de ces systèmes symboliques mathématiques sont l'arithmétique, les algèbres, les statistiques, la géométrie, le calcul lambda, les théories des ensembles, des groupes, des graphes, du chaos, les grammaires catégorielles, etc.

Ces systèmes symboliques sont aussi par définition sans sémantique. Cependant, dans leur utilisation concrète dans une science, ils recevront une sémantique spécifique, construisant ainsi un modèle formel mathématique. Ce modèle reliera le système symbolique à divers types d'entités et de relations du domaine étudié. Ces modèles formels mathématiques seront omniprésents tant dans les sciences naturelles que dans les sciences humaines et sociales.

Les modèles formels de type computationnel sont un sous-ensemble des modèles formels mathématiques. Comme ces derniers, ils utilisent des systèmes symboliques qui se caractérisent par un type particulier de manipulations de symboles et de formules. En effet, ces systèmes permettent d'effectuer un calcul sur les formules et de décider si elles appartiennent ou n'appartiennent pas au système dans lequel elles sont définies. Si telle est le cas, ces formules sont alors dites *calculables* et *décidables*<sup>5</sup>.

Une des grandes contributions de Turing (1936) fut, comme le soulignait Godel, que cette propriété de décidabilité et calculabilité est équivalente à des procédures effectives de manipulation de symboles réalisés par un type particulier de *machine physique* (appelée plus tard Machine de Turing). On dira alors que cette machine « comptait » cette formule.

Plus tard, la thèse Church-Turing affirmera que des formules calculables et computables par une machine de Turing sont équivalentes <sup>6</sup>à d'autres formulations de systèmes symboliques mathématiques (moins mécaniques) tels le lambda-calcul de Church (1936), la logique combinatoire (Curry et Fey, 1958) les algorithmes (Markov, 1960), les règles de production (Post, 1944,) les grammaires de Chomsky (1967) et bien d'autres. En bref, si une formule d'un système symbolique est décidable, elle peut être traduite par un

---

<sup>4</sup> Certains cependant le feront par (ex : axiomatisation de l'arithmétique de Peano)

<sup>5</sup> Si cette propriété peut être attribuée à toutes les formules du système, alors celui-ci est dit complet.

<sup>6</sup> Ce sera la thèse Church Turing.



algorithme dont une forme d'écriture est un langage de programmation. Il y a donc un lien serré entre les systèmes symboliques de type mathématique et ceux de type computationnel. Si un système mathématique assure la calculabilité et la décidabilité de ses formules alors il est aussi un système formel computable.

Tout comme dans les systèmes axiomatiques et les systèmes mathématiques, les systèmes formels computationnels peuvent recevoir une sémantique. Cette sémantique reliera les symboles et les formules aux divers types d'entités et de relations retenus du domaine étudié.

Cette propriété de la computationnalité est importante, car ce ne sont pas tous systèmes mathématiques qui ont cette propriété de computationnalité. Les systèmes mathématiques computationnels sont un ensemble éminemment restreint des systèmes mathématiques. La grande majorité des fonctions mathématiques sont non computables<sup>7</sup>. Cette notion de non-computabilité vient donc déstabiliser la construction d'un modèle formel mathématique. Car tous ne permettront pas la création de modèles computables.

Pour illustrer ces concepts de modèle mathématique, nous prendrons un exemple simple, mais que nous utiliserons plusieurs fois dans notre analyse :

Soit un modèle formel qui contient la formule algébrique suivante générée par une grammaire d'un type algébrique

$$F=Ma$$

Les règles de l'algèbre élémentaire permettent de manipuler ces symboles et de les transformer en formules suivantes :

$$A=M/F \text{ ou } M=F/a$$

Selon les règles mêmes de cette grammaire, il est possible de substituer des chiffres à ces formules. Par exemple  $F = 15$ ,  $M=5$ , et  $a=3$ .

Comme on le sait, par ailleurs, cette formule  $F=Ma$  est calculable. Ainsi, si on lui substitue ces valeurs alors les trois formules précédentes sont transformées en

$$F=Ma : 15 = 5 \times 3$$

$$A = M/F : 3 = 15/5$$

$$M=F/a : 5 = 15/3$$

Certes, l'exemple est simple, mais il met en évidence a) que le système algébrique ne manipule que des symboles  $A$ ,  $M$ ,  $F$ ,  $=$ ,  $/$  qui n'ont pas encore de signification et B) que pour effectuer des calculs, il faut des effectuer au moins deux actions de manipulation : 1-une substitution des lettres aux symboles numériques et 2) appliquer des opérations mathématiques sur des chiffres. On pourrait aussi décrire ces dernières actions dans un langage formel computationnel via des algorithmes et un programme.

Ainsi, la formulation algébrique  $F=Ma$  et sa traduction algorithmique sont des expressions générées par langage formel et elles sont sans sémantique. Cependant, leur utilisation en physique mécanique newtonienne leur attribue une sémantique ; ces termes renvoient à la masse, l'accélération et la force. Ce n'est qu'à ce moment de leur utilisation dans un modèle qu'ils contribuent à la compréhension d'un phénomène particulier.

## 4.2 Les modèles formels dans les sciences.

---

<sup>7</sup> Comme l'ont montré plusieurs mathématiciens et informaticiens, plus particulièrement Chaitin la non-décidabilité est partout dans ces systèmes formels

La philosophie des sciences d'influence positiviste, (Carnap Hempel, Suppes, etc), a proposé que les systèmes formels axiomatiques soient la forme idéale de l'explication scientifique. Mais cette proposition n'a pas vraiment résisté aux critiques épistémologiques. Et des études empiriques de pratiques scientifiques concrètes ont montré que peu de pratiques scientifiques utilisent effectivement des modèles formels de type axiomatique.

Les modèles mathématiques pour leur part ont mis en évidence les problèmes que pose la dissociation intrinsèque de la syntaxe et de la sémantique pour un langage formel. Lorsqu'ils sont appliqués à des phénomènes d'une grande complexité, d'une forte irrégularité, d'une puissante dynamicité, tels par exemple : le climat, les formes économiques, l'environnement, les mouvements sociaux, les grandes entreprises, le cerveau, la culture, les grands projets d'ingénierie civile, etc., ils utilisent des formes ou des structures mathématiques d'une grande complexité où domine souvent la non-linéarité par exemple les systèmes mathématiques probabilistes, stochastiques, dynamiques, chaotiques, évolutionnistes, morphodynamiques, etc.

Par exemple, on retrouve ces types de modèles formels en économie qui, pour expliquer des dynamiques de marché, en appellera à la théorie des jeux, aux systèmes d'équilibre, au calcul d'optimisation, aux probabilités bayésiennes, etc. Les neurosciences exploreront des modèles formels d'algèbre non linéaire de classification, de catégorisation et qu'ils nommeront métaphoriquement des réseaux de neurones. L'archéologie contemporaine utilisera simultanément ou séquentiellement des modèles statistiques, optiques, chimiques, physiques, linguistiques qui, interactivement, participeront à l'explication d'une fouille. Et les chercheurs qui utilisent ces modèles mathématiques et computationnels connaissent les contraintes et les limites qu'ils imposent à une description et une explication scientifique.

En effet, tant pour la construction que le calcul effectif ces systèmes formels présentent de nombreuses contraintes qui ne seront pas sans affecter la qualité de leur utilisation en sciences. Par exemple, ils devront souvent atomiser ou discrétiser des phénomènes (même si certains langages mathématiques permettent le traitement du continu) risquant de modifier les conditions initiales ; ils devront faire un choix dans les propriétés et les facteurs à retenir réduisant ainsi la qualité de la description et de l'explication ; ils peuvent réclamer un traitement informatique parallèle, augmentant ainsi les paramètres de contrôles et risquant ainsi de diminuer la traçabilité du traitement. Voilà autant de contraintes qui dans de nombreuses recherches scientifiques entraînent des problèmes de précision, de prédiction, de certitude, de validité, de complétude et donc de non-calculabilité, etc. :

*Undecidability and incompleteness are everywhere, from mathematics to computer science, to physics, to mathematically-formulated portions of chemistry, biology, ecology, and economics. (Chaitin et da Costa, 2012 : 2).*

Enfin, dans certains cas, cette complexité est telle qu'il devient même difficile de privilégier une forme mathématique particulière, parce qu'elle n'est pas encore connue et est l'objet même de la recherche. Aussi pr f rera-t-on prendre des stratégies inductives pour explorer des régularités, découvrir des invariants et les exprimer par des équations. Les modèles computationnels d'apprentissage machine et d'apprentissage profond appliqués à des données massives permettront des stratégies d'analyses inductives...

Ainsi même si ces modèles mathématiques et computationnels sont puissants, ils ne conviendront pas nécessairement toutes les démarches scientifiques. Qu'en est-il maintenant des phénomènes sémiotiques qui intéressent les humanités numériques ?

### 4.3 Les modèles formels dans les humanités numériques.

Dans une première vision, le domaine classique des humanités ne semble pas devoir se préoccuper de modélisation formelle si ce n'est peut-être, pour certains linguistes ou d'anthropologues structuralistes qui en ont fait une norme idéale de la démarche. Mais cette vision change lorsque le territoire des humanités fusionne avec celui des humanités et intègre l'ordinateur : les modèles formels prennent soudainement une grande importance.

Comment alors peut-on comprendre le rôle des modèles mathématiques et surtout les modèles computationnels au sein de cette discipline naissante ? Avant de répondre à cette question, il faut préciser que ce terme numérique n'est pas le terme adéquat pour comprendre la problématique de la computation dans les humanités « numériques. Au sens strict, cette propriété de numérique n'explique aucunement le rôle de l'informatique dans ce territoire. Ce n'est pas parce qu'une pratique utilise des symboles numériques de types binaires, plus particulièrement des 0 et des 1 (digital) que leur modélisation peut être dite computationnelle. Comme nous l'avons soutenu ailleurs (Meunier, 2015), une telle définition est problématique et masque leur nature véritable. En effet, on ne met pas en évidence que, derrière ces outils, se construit une modélisation formelle qui repose sur l'un ou l'autre des systèmes symboliques mathématiques et computationnels.

L'utilisation des ordinateurs dans les humanités numériques est autrement plus complexe. En effet l'ordinateur a permis aux chercheurs de s'approprier des modèles computationnels et ultimement les modèles mathématiques d'une grande puissance et fécondité pour les assister dans leurs tâches classiques d'interprétation.

Certains de ces logiciels reposent sur des modèles mathématiques et computationnels relativement simples (grammaires, règles, arithmétiques, statistiques élémentaires, etc.)

Voici un exemple simple : on trouve en lexicométrie des programmes qui permettent de calculer un rapport entre la fréquence des lexèmes et leur rang. Ce programme repose sur un modèle formel qui contient l'énoncé/équation suivante :

$$f(n) = \frac{K}{n}$$

Sur le plan mathématique, cette équation ne fait que représenter une relation fonctionnelle entre des nombres. Mais lorsque les symboles désignent des valeurs numériques associées à des ensembles de mots dans un texte, l'équation reçoit le nom de la loi de Zipf. Elle décrit la *fréquence* des mots  $F(n)$  en regard du *rang*  $n$  de leurs fréquences. ( $K$  est une constante). Ainsi, si le mot le plus fréquent (rang 1) est de 10 000 alors celui de rang 10 sera de 1000 et ainsi de suite.

On sait par ailleurs que cette équation mathématique est calculable et donc elle peut recevoir une traduction en algorithmique ou en un programme<sup>8</sup>. Cependant, si cette équation n'est pas computable, la traduction algorithmique est impossible à moins de l'assister d'heuristiques. Autrement dit, il n'y a pas d'humanités dites numériques s'il n'y a pas de modélisation formelle contenant des systèmes symboliques mathématiques

---

<sup>8</sup> Pour un tel programme, en java voir <http://diveintodata.org/2009/09/13/zipf-distribution-generator-in-java/>

calculables traduisibles en algorithmes. Bref, tout projet sérieux dans les HN, parce qu'utilisant l'ordinateur, met en place implicitement ou explicitement une modélisation formelle.

Il existe une multiplicité de tels exemples de logiciel dans les humanités numériques. Le concordancier en est un typique : à partir de quelques règles et quelques calculs simples, il permet de trouver les segments des contextes d'un terme pôle. À l'aide de calculs statistiques simples, un logiciel d'indexation associe des termes significatifs (mots clefs, indexats) à des documents pour des fins de fouille et de rappel. Un logiciel de numérisation encode des textes pour pouvoir les traiter sur un nouveau support. À l'aide d'une grammaire, un processeur syntaxique décrit des structures de phrases. Ces logiciels sont des plus utiles pour assister les chercheurs des humanités dans des opérations qui autrefois étaient faites « à la main ».

Mais de plus en plus on voit apparaître des modèles mathématiques et computationnels complexes comme ceux qu'on retrouve dans les sciences dont nous parlions plus haut. Des classifieurs non linéaires assistent l'analyse thématique (topic modelling), des probabilités bayésiennes font de la traduction, de l'analyse d'images ou de la musique, etc. Des statistiques inductives de type réseaux de neurones, apprentissage machine ou apprentissage profond détectent des régularités et des invariants dans les productions sémiotiques et qui sont très pertinents pour des parcours interprétatifs. Mais ces modèles ne sont pas sans rencontrer les mêmes limites descriptives et explicatives que celles qu'ils avaient, lorsqu'appliqués dans d'autres domaines.

Dans les HN, ces modèles formels simples ou complexes sont devenus si transparents et bien cachés dans les logiciels qu'on en vient à oublier leur présence et tous les problèmes qui leur sont intrinsèques. On les voit comme des « outils » commodes et qui assistent les parcours interprétatifs sans se préoccuper de leur véritable nature et donc de leurs limites. C'est peut-être pour cette raison que certains chercheurs des humanités ne sont pas convaincus de la pertinence de l'utilisation de l'ordinateur dans ce domaine. Pour eux, tous les objets sémiotiques qu'interprètent les humanités ne peuvent être facilement soumis à une modélisation mathématique et computationnelle précisément en raison de leur complexité intrinsèque et donc de leur possible non-calculabilité. Ce qui est un argument solide. Mais à notre avis, ce jugement doit être nuancé, car il repose sur une conception trop restreinte de la modélisation mathématique et computationnelle. On pourrait inverser la position et voir que la modélisation formelle est en soi une forme particulière d'interprétation et qu'avec d'autres formes de modélisation, elle peut contribuer à la compréhension de réalités sémiotiques, même les plus complexes. Mais pour ce faire, il faut bien comprendre la nature de la complexité de ce filtre interprétatif que sont ces modèles formels.

## **5-Les modèles matériels**

Bien que contribuant à l'explication d'une réalité, un modèle formel demeure limité pour la compréhension humaine. Une théorie scientifique ne pourrait s'arrêter qu'à la seule présentation d'une équation formelle pour décrire et expliquer un phénomène. Un physicien par exemple ne peut expliquer le phénomène de la force en ne présentant que l'équation formelle :  $F=Ma$ . Ainsi outre les modèles formels les théories scientifiques introduiront-elles d'autres modèles qui contribueront à une plus grande compréhension du phénomène étudié.

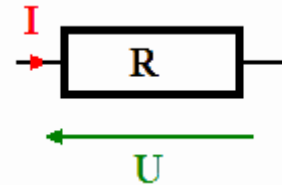
Un de ces modèles que nous qualifierons de matériel aura pour fonction d'identifier parmi toutes les propriétés possibles qu'une réalité peut posséder celles qui sont pertinentes pour une explication causale et que certains appellent une explication mécanique. *“Mechanists insist explanation is a matter of elucidating the causal structures that produce, underlie, or maintain the phenomenon of interest. (Craver, C., et al. 2016*

Ces modèles utiliseront diverses formes sémiotiques pour exprimer ce rôle. Certains reprendront des formules d'une langue formelle, mais qu'ils modifieront par l'utilisation de termes ou de formes iconiques techniques extraits de la langue naturelle, mais reconnus par la communauté de recherche. Ces termes et formes iconiques seront interprétés comme exprimant des relations de causalité ou des mécanismes.

Nous illustrerons ce rôle d'un modèle matériel en reprenant notre exemple de l'équation  $F=Ma$ . Malgré son apparence algébrique cette équation n'utilise pas des symboles issus du vocabulaire classique de l'algèbre comme le serait l'équation  $z=x \cdot y$  ou  $F[x, y] : x \cdot y$ . On y trouve des symboles  $F, M, a$ , qui sont en fait des abréviations de termes *Force, Masse, et accélération* qui appartiennent au langage de la physique. Cette substitution n'est pas innocente ; elle repose sur une convention qui existe entre les physiciens qui connaissent bien la sémantique de ces mots du langage naturel et qui sont reliés directement à des propriétés physiques pertinentes pour une explication causale et mécanique. C'est ce qui permet à  $F=Ma$  d'être interprétée comme décrivant une relation causale à partir de la masse et l'accélération. Ainsi, s'il n'est pas naturel de dire à propos de la formule  $z=x \cdot y$  que  $z$  est causé par la multiplication de  $x$  par  $z$ , et même que  $F$  est causé par  $M$  multiplié par  $a$ , il est tout à fait naturel pour un physicien de dire que *la force est causée par l'accélération, d'une masse. Ou encore qu'un le mécanisme, de la force se comprend par l'accélération et la masse.*

Dans certaines disciplines scientifiques, la modélisation matérielle traduira directement des formules du modèle formel en des formes sémiotiques iconiques

Par exemple, en électricité, la loi d'Ohm sera illustrée par un graphe orienté qui décrit la « mécanique » causale de la différence de potentiel  $I$  de tension  $U$  d'un courant électrique  $I$  passant dans une borne de résistance  $R$  :



Ce type de modèle matériel peut se voir illustré par des artefacts physiques qui lui serviront de prototypes ou d'instanciations. Ces artefacts permettent une compréhension des relations causales ou des mécanismes en jeu. Par exemple : des artefacts physiques de l'équation  $F=Ma$  seront deux boules qui se frappent, ou une boule de démolition suspendue à une grue. On peut voir le transistor comme une instanciation de la loi d'Ohm et de son modèle graphique précédent. Ainsi dans plusieurs démarches scientifiques, par exemple dans les sciences de l'ingénierie, de la gestion ou la présence de l'expérimentation ou de la construction d'artefacts est importante, ces types de modèles matériels « physiques » seront des plus importants.

Mais de plus en plus dans les sciences contemporaines la modélisation matérielle prend une forme tout à fait spéciale : elle traduit le modèle formel computationnel exprimé par des algorithmes en un programme informatique. Ce programme reprend certes les algorithmes, mais il ajoute quelque chose de plus : il contient des précisions sur conditions

par lesquelles une machine électronique, appelée un ordinateur, peut effectuer la computation de la fonction calculable derrière ces algorithmes. Autrement dit, ce modèle effectue la computation dans une « machina » c'est-à-dire dans des *mécanismes* physiques de type électronique. Ce qui pour les épistémologues mécanicistes est une manière d'expliquer tout à fait originale de décrire et d'expliquer les relations causales ou les mécanismes d'un phénomène. Ainsi un modèle matériel se transforme et devient un modèle mécanique, mais de type informatique.

Avec le développement de cette technologie informatique, il est devenu possible d'effectuer de manière extrêmement rapide la computation de modèles formels des plus complexes et de représenter sous forme de simulations virtuelles la structure ou même l'évolution de phénomènes étudiés. Par exemple, par des techniques informatiques sophistiquées on pourra présenter sous des formes iconiques — écran 2D ou 3D [colonnes, grappes, cartes, dessins animés, scènes statiques ou dynamiques] des configurations des résultats de la computation ou encore les moments de la computation. La modélisation informatique devient alors une simulation informatique.

Ces simulations sont devenues très populaires dans plusieurs disciplines, car elles ont un avantage cognitif indéniable. Parce qu'elles sont surtout analogiques, elles illustrent de manière parallèle certaine des relations causales et structures mécaniques qui deviennent ainsi facilement interprétables par un humain. L'imagerie du cerveau par résonance magnétique en est un bel exemple : elle ne présente pas une photo du cerveau, mais bien une simulation informatique iconique d'aires cérébrales que des spécialistes interpréteront causalement plus facilement que les modèles formels qui ont servi pour décrire la dynamique électrique d'un cerveau. Dans certains cas, des simulations seront aussi retraduites dans un langage naturel métaphorique, narratif, etc.. Ainsi on présentera des associations de mots dans un texte comme des « nuages » de mots, etc.

Dans cette perspective, on peut voir un robot comme un modèle physique c'est-à-dire une simulation informatique réalisée par des mini-ordinateurs. De fait un robot n'est qu'un assemblage hybride de mini-ordinateurs qui effectuent un calcul mécanique, c'est-à-dire qui comptent des fonctions calculables modélisant des comportements moteurs et cognitifs. Il n'est pas vrai qu'un robot « pense », « agi », « décide », « voit ». etc. Ce sont des termes anthropomorphiques utilisés pour nommer des formes de visualisations 3D 'instanciation de fonctions computables. Dans cette perspective un robot est une forme spectaculaire de modélisation informatique de processus cognitifs.

### **5.1 La modélisation matérielle dans les sciences.**

Des chercheurs (Beatu, 2013 ; Rheinburger 1997 ; Leonelli, 2007, Weinberg 2007, 2015 Dahan et Delmonaco 2004) ont montré que la modélisation matérielle surtout informatique était devenue omniprésente dans les sciences contemporaines où elle y joue un rôle cognitif important. Plusieurs sciences naturelles, par exemple, la climatologie, l'économie, l'ingénierie l'astrophysique, les sciences de l'environnement, la médecine, etc., sont confrontées à des phénomènes difficiles à observer dans un court temps et dont certaines propriétés sont bruitées, irrégulières, évolutives. Comme nous, l'avons souligné plus haut, ces sciences ont recours à des modèles formels d'une grande complexité mathématique. On peut penser aux modèles statistiques inductifs, aux modèles dynamiques, chaotiques, stochastiques probabilistes, neuronaux, etc. Or, malgré leur complexité, ces

modèles mathématiques ont pu être utilisés parce qu'ils pouvaient être calculés concrètement par un ordinateur. Ce qui autrefois était impossible.

En sciences cognitives, où l'objet d'étude n'est pas une réalité que l'on peut facilement observer et expérimenter, la modélisation informatique est devenue un outil cognitif des plus heuristiques. Elle a permis aux modèles formels connexionnistes d'être explorés sous leurs diverses facettes. Les neurosciences, ne seraient pas ce qu'elles sont aujourd'hui, n'eût été l'imagerie par résonance magnétique (IRM).

Malgré ce succès de la modélisation informatique, toutes les sciences ne l'intégreront pas dans leur démarche. Par exemple, certaines recherches en sociologie auront de la difficulté à modéliser les représentations sociales via, par exemple, des simulations informatiques. Ce ne sont pas tous les domaines de la psychologie qui accepteront facilement de décrire et expliquer les émotions, la conscience via ces types de modèles. Les sciences politiques n'expliqueront que très peu les relations politiques entre pays par des simulations informatiques. Enfin, tous les chercheurs ne seront pas d'accord pour interpréter ces types de modèles physiques- matériels comme des descriptions de relations causales ou de mécanisme.

Malgré ces difficultés, il est important pour nous de comprendre ce type de modèle matériel, car lorsque les sciences introduisent l'ordinateur dans leur démarche elles sont nécessairement confrontées à la question de la modélisation informatique c'est-à-dire de la présentation des conditions matérielles d'une computation effective. Même si une science possède des modèles formels des plus complexes et des traductions algorithmiques élégantes et complètes, il ne s'ensuit pas qu'elle possède du même coup un modèle de leur implémentation dans un ordinateur concret qui possède structure matérielle puissante pour réaliser le calcul effectif : disque dur, mémoire, horloge, etc.

## 5.2 Les modèles physiques dans les humanités numériques

Le modèle informatique est évidemment des plus importants dans les sciences contemporaines, mais dans les humanités dites numériques ils le sont davantage : ils en délimitent le territoire.

« *Humanities computing is precisely the automation of every possible analysis of human expression (therefore, it is exquisitely a 'humanistic' activity), in the widest sense of the word, from music to the theater, from design and painting to phonetics, but whose nucleus remains the discourse of written texts* ». Nous soulignons. Busa (2008) p. 8

Cette modélisation informatique joue en effet un rôle épistémique important dans les humanités numériques. Entre autres, il permet ainsi de traiter des données sémiotiques d'une ampleur inconnue auparavant, d'utiliser des modèles formels et computationnels originaux. Et placé aux bons endroits dans la démarche de recherche, il participe au processus interprétatif de manière originale. Et de ce fait, il en modifie les objets et la méthode et donc introduit des angles nouveaux de leur compréhension.

De fait, on retrouve dans les multiples projets des HN une multiplicité de programmes et de logiciels. Certains de ces programmes auront quelques fois été construits par des utilisateurs aguerris des techniques de programmation ou encore ils seront clef en main et disponibles sur des sites ou dans le marché spécialisé. Un exemple est la boîte à outils TAPOR (2016). Quelques fois ce sont des outils autonomes ou propriétaires et mêmes commerciaux (Alceste, Sato, Sphynx, Antconc, Rapid Miner, Provalis, etc.). D'autres sont des modules préprogrammés (applications) intégrables dans des langages de

programmation comme R, Python, etc. Enfin d'autres sont construits sur mesure par le chercheur. Mais il faut toujours rappeler que ces logiciels permettent de computer des algorithmes, qui expriment dans un langage de programmation, les fonctions computables des modèles formels.

Certains des modèles formels d'arrière-plan, telle par exemple la loi de Zipf, sont relativement simples à comprendre, parce qu'exprimés dans un langage algébrique bien connu par les chercheurs, mais d'autres, comme nous l'avons vu plus haut, tels les modèles linéaires et non linéaires de classification, d'optimisation, de distributions statistiques et même de grammaires formelles, etc., sont souvent très complexes et donc difficiles à comprendre par les chercheurs des humanités.

Un des grands dangers des humanités numériques est que les chercheurs soient séduits par une technologie informatique facilement accessible, mais dont ils ne comprennent que minimalement les modèles formels mathématiques et computationnels qui les fondent. Pensons ici aux logiciels d'analyse de textes comme Text Miner, Alceste, Antconc, etc. ou aux applications de « R » pour l'analyse thématique (topic modelling). Ceux-ci reposent sur les modèles formels complexes avec des choix de paramètres spécifiques. Leur utilisation aveugle dans certains cas peut être pertinents et heuristiques, mais dans bien d'autres cas, elle risque de produire des résultats dont l'interprétation est fautive parce que dissociée des algorithmes et de paramètres qui ont généré ces résultats. À l'inverse, on risque aussi de dénaturer le phénomène sémiotique étudié en le décrivant, l'expliquant et le comprenant que sous l'angle des algorithmes et paramètres du logiciel utilisé.

Un exemple de ceci est le nuage de mots. Des algorithmes traitent des mots et ils produisent des représentations graphiques qui iconisent des relations entre des mots. Ils sont des simulations des associations entre des occurrences de lexèmes dans un corpus. Mais l'interprétation qui peut être appliquée à ces nuages peut être radicalement différente de ce que les algorithmes permettraient comme interprétation possible. Aussi, il peut arriver que l'on utilise des outils informatiques et que les résultats effectivement produits reposent sur un modèle formel qui ultimement ne soit pas des plus pertinents pour décrire, expliquer et comprendre l'objet sémiotique que s'est donné un projet des humanités numériques.

Par exemple, on pourrait se demander si les résumés automatiques, très utiles dans certains cas, sont pertinents lorsqu'appliqués à des œuvres littéraires. De tels programmes pourraient résumer à 10 %, 40 % 75 % *À la recherche temps perdu*, de Proust. Mais que vaudrait ce résumé pour un critique littéraire ?

Les chercheurs des humanités numériques ne doivent utiliser des outils informatiques pour leur recherche que s'ils comprennent minimalement le modèle formel qui sous-tend ces outils. Sinon, leur recherche court le danger d'en arriver à des résultats qui sont superficiels et qui n'assistent que très peu la description, l'explication et la compréhension des artefacts sémiotiques étudiés. Mais une compréhension sérieuse des modèles formels computationnels et informatiques peut, lorsqu'ils sont placés adéquatement dans la démarche interprétative, devenir des outils importants et originaux d'exploration de domaines sémiotiques.

## 6 Le modèle conceptuel

Une théorie scientifique ne peut se contenter de présenter des modèles de formels et matériels. Car ceux-ci demeurent limités pour la compréhension humaine. Même si l'on



présentait à quelqu'un deux boules qui se frappent et qu'on expliquait la force qui les traverse uniquement par une équation formelle comme  $F = ma$ , et qu'on l'illustrait par une simulation informatique, la compréhension n'en demeurerait pas moins pauvre et limitée. Aussi, ajoutera-t-on, habituellement un troisième type de modèle, à savoir : un modèle qui permet aux humains une intelligibilité de la réalité, mais qui est plus intégrée à leur univers conceptuel général.

Tout comme les autres modèles, ce modèle que nous appellerons *conceptuel* est aussi constitué d'énoncés. Mais cette fois, ceux-ci sont exprimés dans une langue naturelle. Du point de vue d'une sémantique extensionnelle, les termes conceptuels utilisés réfèrent à des entités et des propriétés de la réalité. Au début de la recherche, ces énoncés viseront à exprimer des intuitions ou des croyances à propos des propriétés de la réalité étudiée. Ils seront considérés comme des hypothèses qui auront à être validées en regard des modèles formels et matériels. Et souvent, de multiples itérations et révisions seront nécessaires. Finalement, lorsque la démarche aura atteint une certaine maturité et que sa démarche et ses résultats auront été acceptés par une communauté épistémique, ces énoncés seront considérés comme des lois ou des croyances justifiées... jusqu'à un prochain ajustement, contre-exemple, etc.

Du point de vue d'une sémantique intensionnelle, la signification des énoncés du modèle conceptuel est cependant plus complexe. Elle est souvent de type holiste. La conceptualisation qui y est exprimée ne dépend pas uniquement du lexique, de l'énoncé ou de l'ensemble de la théorie prise isolément. Elle dépend aussi de diverses structures externes de compréhension implicitement ou explicitement associées à la théorie construite. Dans les théories cognitives contemporaines, certains appelleront ces structures : espace conceptuel (Gardenfors, 2000), système conceptuel (Brown, 2000), modèles mentaux (Johnson-Laird, 1986), connaissances conceptuelles tacites (Polanyi, 1967) ou même, lorsque partagé socialement : des paradigmes ([Kuhn, 1962) ou des représentations sociales (Jodelet, 2003). On peut interpréter ces univers comme des variantes, des précisions ou des dimensions conceptuelles de ce que la tradition herméneutique peut inclure dans des visions du monde ou des *Weltanschauung*. Enfin, sur le plan pragmatique ce type modèle conceptuel servira à la communication la discussion, la révision, l'ajustement et la négociation des concepts et il en viendra à construire des communautés épistémiques.

Dans une telle perspective, le modèle conceptuel, comme les deux autres modèles retenus, joue un rôle très important de médiation entre l'objet de recherche et la compréhension humaine. Il est le lieu de l'intelligibilité ultime. Sans lui, les modèles formels et informatiques sont assurément utiles pour la manipulation des symboles par des machines, mais leur compréhension exige ultimement une forte relation avec un modèle conceptuel.

Mais parce qu'intimement lié au langage naturel, le modèle conceptuel souffrira de toutes les lacunes et imperfections propres à ce langage tant au plan syntaxique et sémantique que au plan pragmatique (ambiguïté, instabilité aléthique, actes de langage, etc.), mais il profitera aussi de sa richesse et de sa créativité (narration fiction, métaphore, rhétorique, etc.). Malheureusement comme ce type de modèle est naturel et transparent, on en vient à oublier sa présence. Et les théories de la science n'en parleront pas.

## **6.1-Les modèles conceptuels dans les sciences.**

Ce type de modèle conceptuel est omniprésent en sciences. Une illustration classique est la théorie copernicienne. Dans ses origines, cette théorie était constituée de modèles formels mathématiques décrivant et prédisant le mouvement des planètes. Son modèle matériel prenait la forme de graphes circulaires. Le modèle conceptuel explicitait certains énoncés du modèle formel, mais les reliait à l'espace/cadre/système conceptuel de l'astronomie et de la religion de l'époque. Et les historiens et épistémologues nous ont montré que l'objet des débats importants sinon même virulents que la théorie copernicienne a provoqué relevait avant tout du modèle conceptuel par lequel on interprétait ces modèles formels et ces illustrations. En effet, il mettait à l'épreuve l'espace conceptuel concurrent lié à l'expérience phénoménologique du mouvement de la Terre par rapport au soleil. De plus, il était confronté à l'espace conceptuel religieux sur l'origine divine de ce mouvement. Il brisait l'intelligibilité ultime que la société de l'époque avait de ce phénomène.

Une autre illustration est plus contemporaine. Elle nous vient des neurosciences. Nous la tirons du livre récent de M. Graziano « *The social consciousness and the brain.* ». Ce livre, de grande qualité contient un ensemble de modèles formels et matériels du fonctionnement conscient du cerveau. Voici l'introduction citée en anglais.

« *The brain is composed of neurons that pass information among each other. Information is more efficiently linked from one neuron to another, and more efficiently maintained over short periods of time, if the electrical signals of neurons oscillate in synchrony. Therefore consciousness might be caused by electrical activity of many neurons oscillating together.* Graziano [2013: 6]

Nous ne trouvons pas ici des équations ni un programme informatique. Nous lisons les énoncés en langue anglaise qui expriment des conceptualisations issues des sciences cognitives passées ou contemporaines : par exemple, neurosciences, psychologie de l'apprentissage, de la théorie de la communication et de l'information, de la philosophie de l'esprit, etc. Et on trouve des énoncés qui décrivent des neurones qui *communiquent, se parlent, échangent de l'information, etc.*, et que le cerveau *pense, mémorise, est conscient*, etc. Ces types d'énoncés occupent près de 80 % du livre ! Et ils sont essentiels à la compréhension des modèles formels, des programmes présentés dans la théorie défendue. Et ce sont par eux que l'auteur nous décrit et explique la « conscience » et qu'il en suggère une intelligibilité en la reliant à nos connaissances générales.

Quelle que soit la science que l'on pourra prendre comme exemple, aucune n'échappera à cette modélisation conceptuelle effectuée dans une langue naturelle. On peut espérer contraindre ce modèle en le réduisant à un métalangage formel (Tarski 1983), mais aucune science même mathématiques n'a réussi à éliminer complètement une forme ou l'autre de modélisation conceptuelle exprimée en langue naturelle. Même un programme informatique doit avoir sa « documentation », sinon il est incompréhensible pour un humain. Einstein a lui-même traduit ses modèles formels en termes de théorie de la « relativité ». Godel a présenté son théorème en termes « d'incomplétude ». Skinner a traduit des lois du « *behavior* » en termes de « *conditionnement opérant* ». Lorenz a parlé de son modèle chaotique en termes d'« attracteur ». Et Newell et Simon ont expliqué leurs programmes informatiques comme réalisant de l'« *intelligence artificielle* ». Mc Lelland et Rumelhart nous ont traduit leurs modèles vectoriels d'optimisation en « *réseau de neurones* » sinon même en « *mind* ». Les climatologues finissent toujours par nous dire que les états des stabilisations de multiples facteurs climatiques de leur modèle formel nous permettent de prévoir que « *demain il y aura des averses de pluie* ».

Bref, un modèle conceptuel présente, dans un langage naturel une conceptualisation du phénomène étudié, mais tel que le chercheur les conçoit, peut l'exprimer et la communiquer. Une science peut expliquer des réalités que si quelque part dans sa démarche, elle construit un modèle conceptuel de son objet de recherche, si limité, ambigu, peu rigoureux est-il. Certains de ces modèles conceptuels se diviseront en de multiples sous-modèles qui se concentreront sur l'une ou l'autre sous territoire de l'espace du problème étudié.

Certaines critiques venant surtout des positions épistémologiques positivistes et naturalistes affirmeront que ce type de modèle n'exprime que des observations superficielles et se résume à des descriptions superficielles dépendantes d'une culture ou d'attitudes psychologiques populaires. Il apparaît comme ambigu et intuitif, chargé d'intentions et d'affects, fondés sur des observations naïves et des analyses phénoménologiques immédiates et dont la valeur « empirique » est faible et discutable. Il pourrait être mieux structuré et contrôlé dans son expression et devrait en appeler à de meilleurs outils d'observation. Pour ces raisons, ils le rejeteront.

Certes, on peut rêver réduire toute l'explication à un modèle formel confirmé par des expérimentations ou des simulations, mais de ce fait, on élimine un intermédiaire c'est-à-dire un médiateur essentiel à la compréhension. Une théorie scientifique qui ne contient que des équations et des artefacts les implémentant sera difficile à comprendre... par un humain.

Reste qu'en raison de ces problèmes, il faut utiliser avec prudence la modélisation conceptuelle, car elle demeure cognitivement fragile. Ce n'est souvent qu'en relation aux autres modèles et aux nombreux autres espaces conceptuels que ses énoncés finissent par participer de manière constructive à une théorie.

Enfin, ce modèle conceptuel est souvent si transparent pour un chercheur qu'il en vient à être oublié. Ou si on l'accepte, on ne le voit pas comme *modèle*. La construction de ce modèle ne sera pas toujours des plus faciles. Le monde ne saute pas de manière spontanée dans des modèles ! Il dépendra d'une part des capacités cognitives humaines [observation, intuition, expérimentations directes ou assistées de technologies], mais d'autre part, il sera sensible aux négociations d'un consensus langagier entre les membres d'une communauté épistémique et des biais épistémiques qui le traverseront. On y trouvera des croyances dont les origines relèvent de l'expérience subjective, de la culture générale ou de la fonction sociale, etc. Autrement dit, c'est ici que l'herméneutique a son emprise. Une approche pragmatique de la science qui voit une théorie comme construction de modèles met en évidence que la science est un processus complexe d'interprétation. Dans ce processus, la modélisation conceptuelle met la théorie en relation avec et la culture propre au chercheur et à sa communauté épistémique n'y est pas étrangère. Mais malgré toutes ses limites, une théorie scientifique ne peut se passer d'un modèle conceptuel.

## **6.2 La modélisation conceptuelle dans les HN.**

Les HN en appelleront aussi à une modélisation conceptuelle. Et comme dans les autres modélisations, elle sera omniprésente. En effet, aucun projet des HN ne pourra l'éliminer, et ceci en raison de la sémiotité de leurs multiples objets. La modélisation conceptuelle qui les accompagne est inévitable malgré la force des modèles formels et la puissance des ordinateurs.

Prenons par exemple concret le projet de numérisation des écrits alchimiques de Newton.<sup>9</sup> Il en a pris presque 15 ans pour conceptualiser les diverses dimensions de cet objet sémiotique. Il a fallu construire des modèles conceptuels très complexes pour traiter (des critères d'authenticité des manuscrits, des divers types de symboles semi-iconiques utilisés dans les énoncés alchimiques, des transcriptions diplomatiques et standards, des formes de fouille adaptées à ce type d'objet sémiotique, du contenu du site web répondant à l'utilisateur débutant ou expert, etc. Toutes ces opérations impliquaient une multitude de modèles s'exprimant sous forme de textes, d'icônes, etc.. La modélisation formelle et les algorithmes de numérisation, d'indexation, d'annotation, de classification, etc. sont relativement simples par rapport au modèle conceptuel requis pour réaliser ce projet.

Prenons encore ici notre exemple des visualisations, dites : nuage de mots où certains mots sont mis en évidence par leur position, leur forme ou leur couleur. Or un nuage de mots n'est que l'expression iconique de traitements informatiques appliquant certaines fonctions mathématiques computationnelles et sur des mots. Ce sont des sacs ou des cohorte de mots dont a précisé certaines propriétés et qui sont devenus des nuages de mots. Une interprétation rigoureuse ne peut que relier la couleur, la grosseur des mots à ces fonctions. Mais une telle interprétation est peu intéressante. Presque inévitablement, on en arrivera à interpréter ces nuages en les situant dans des champs conceptuels périphériques, qui tous relèvent de l'un ou l'autre relèvent de théories sémantiques, psychologiques ou philosophiques du sens ou du concept. Ainsi, les mots seront vus tantôt comme des « thèmes dominants » (théorie littéraire), des « connaissances » (Intelligence artificielle), des thesaurus conceptuels ( science de l'informatique, des concepts importants (philosophie), des « noyaux » (sociologie des représentations sociales), des arguments (rhétorique), espaces mentaux ( philosophie de l'esprit ) etc. Imaginons une étude des discours de Trump dont le nuage de mots contiendrait en ordre de décroissance d'importance visuelle, les mots :

*Femmes, Mexique, immigration, mur.*

On peut deviner la conceptualisation de l'interprétation qui serait faite. Et pourra s'interroger sur le cadre théorique ou même culturelle qui la fonde.

Notre propre recherche sur l'analyse conceptuelle assistée par ordinateur (Meunier et Forest 2009, Chartrand, Meunier Polizzotto et coll. 2016) a exigé de nombreuses clarifications conceptuelles pour comprendre plus clairement les principes d'un tel type d'analyse. Ce n'est qu'après cette conceptualisation que des modèles formels et informatiques peuvent être choisis.

Cette modélisation conceptuelle fut une partie importante de notre démarche. Malgré des modèles formels sophistiqués issus des sciences cognitives et des algorithmes complexes qui les traduisaient, et un modèle informatique solide, le défi le plus profond fut de conceptualiser le rapport entre les multiples expressions linguistiques et le concept de « mind » chez Peirce. Le contenu conceptuel de ce mot se réduit-il au sens, à la signification du mot anglais Mind ? Comment ce mot opère-t-il dans l'ensemble des textes de Peirce pour révéler les propriétés de ce concept MIND ? Nous pourrions illustrer des types similaires des conceptualisations, les uns simples, les autres complexes, dans une multiplicité de projets HN ; que ceux-ci soient de la numérisation, de l'archivage, de l'annotation, de l'analyse, de l'indexation, de la diffusion, etc.

---

<sup>9</sup> ( le Newton Project : <http://www.newtonproject.sussex.ac.uk/prism.php?id=1> visité en 2017.

La modélisation conceptuelle n'est cependant pas une tâche facile, car les objets et domaines des humanités numériques sont complexes. Ce sont des objets sémiotiques sur lesquels, plusieurs points de vue, interprétations, explications peuvent être appliquées. Cette sémiotité pose des problèmes particuliers à la modélisation conceptuelle en lien avec une modélisation formelle et une modélisation informatique.

Bref, tout au long d'un projet de recherche dans les HN, la modélisation conceptuelle se retrouve partout, si bien qu'elle devient transparente. Et plusieurs chercheurs penseront qu'elle ne joue aucun rôle dans la recherche. Pourtant, elle soutient la théorie en ce qu'elle interagit avec le modèle formel et le modèle informatique. Elle devient essentielle à la compréhension.

## 7 Conclusion

Dans cette recherche, nous avons exploré une hypothèse épistémologique pour mieux comprendre la nature de la démarche de recherche des humanités numériques. Nous nous sommes inspirés de la vision pragmatique de la science pour qui les théories scientifiques sont essentiellement constituées de divers types de modèles dont le rôle est de décrire, expliquer et comprendre des réalités que celles-ci soient naturelles ou humaines. Cette vision de la science nous a permis de nous interroger sur la possibilité d'explorer la nature épistémique des recherches entreprises dans les humanités numériques.

Tout comme les autres sciences, les HN utilisent plusieurs types de modèles. Nous en avons distingué trois types. Un premier contient des modèles formels. Un de ses sous-modèles est de type mathématique. Il identifie des entités et des relations structurantes dans les objets d'étude et ils les expriment dans des langages mathématiques spécifiques. Un autre sous-modèle est computationnel. Celui-ci retient des modèles mathématiques les fonctions structurantes qui sont computables. Dans certains cas, si ces fonctions ne sont pas computables, on pourra les remplacer par des heuristiques. Une deuxième classe de modèle est de nature matérielle qui dans le HN, est surtout de nature informatique. Celui-ci renvoie à une machine électronique c'est-à-dire un ordinateur qui peut causalement, effectuer la computation des fonctions calculables ou des algorithmes retenus dans le modèle formel et exprimés par des algorithmes. Si cependant la computation concrète est opaque à la cognition, des *simulations* informatiques pourront rendre plus visibles certaines relations de causalité ou mécanismes, permettant ainsi une meilleure compréhension de la réalité étudiée. Enfin, une troisième classe de modèles est de type conceptuel. Ces derniers modèles, exprimés dans un langage naturel, permettront diverses formes de conceptualisation de l'objet de recherche et à leur tour, ils assisteront une compréhension plus limpide de la complexité de la recherche et de ses explications. C'est par ce langage naturel que le modèle conceptuel pourra être communiqué, échangé et discuté dans des communautés épistémiques.

Enfin, parce que les divers types de modèles opèrent ensemble et se complètent mutuellement, il arrivera que les chercheurs commencent leur recherche par l'une ou l'autre de ces modélisations. Aucun modèle n'est prioritaire comme point de départ d'une recherche. Ainsi dans certains cas, la recherche pourrait commencer par des modèles formels. Certaines expressions formelles auront été dérivées d'autres expressions formelles et serviront comme point de départ pour expliquer des régularités dans l'objet d'étude. Tel est par exemple, le cas de la loi de Zipf, dérivée des équations de la théorie de l'information.

Dans d'autres cas, la recherche partira de données générées par des cas sémiotiques. Elle tentera alors d'approximer soit par des extrapolations soit par des algorithmes d'apprentissage la fonction et son expression formelle : l'équation. Ce sera souvent le cas lorsque la recherche sera placée devant des données massives dont on cherche à extraire des régularités structurantes inconnues.

D'autres recherches partiront plutôt de modèle informatique c'est-à-dire d'outils existants. Elles l'appliqueront à des données produites dans les humanités par exemple, dans l'étude de grands corpus textuels. Enfin, d'autres recherches partiront par des modèles conceptuels. Souvent confrontées à des objets sémiotiques d'une grande complexité, avant de passer à des modèles formels ou informatiques, ces recherches viseront dès le point de départ à préciser les concepts et les opérations présentes dans l'objet d'étude. Ce n'est que lorsqu'une conceptualisation est stabilisée et acceptée que la recherche explorera des modèles formels ou un traitement informatique. Notre propre recherche sur l'analyse conceptuelle assistée par ordinateur (Meunier et Forest, 2009, Chartrand, Meunier Polizzotto, et coll. 2016) a exigé de nombreuses clarifications conceptuelles pour comprendre plus clairement les principes d'un tel type d'analyse. Ce n'est qu'après cette conceptualisation que des modèles formels et informatiques peuvent être choisis.

Dans une telle perspective, les projets en HN en appelleront à plusieurs modèles qui dans leur application s'influenceront les uns les autres. Et souvent, leur utilisation sera itérative. Les modèles formels, matériels et conceptuels s'influenceront mutuellement et imposeront des révisions. Dans cette perspective, les HN doivent appliquer des principes de génie logiciel où les constantes reprises, itérations, ajustements des modèles sont inhérents à la démarche. Pas plus que les projets typiquement informatiques, les projets HN ne se terminent au premier tour de piste. Et l'ordinateur dans cette démarche n'est pas une solution miracle. Il n'est qu'un outil dans la dynamique interprétative qu'est la pratique cognitive scientifique.

Enfin, il faut voir que si les HN incluent dans leur recherche de la modélisation formelle matérielle et conceptuelle, cela les contraint radicalement et délimite les méthodes. Et si le domaine des humanités présentait des relations et des fonctions non computables, l'appel à l'ordinateur serait inutile à moins de lui donner des « oracles ». Dans ce cas, l'ordinateur ne deviendrait qu'un assistant dans l'exploration heuristique des humanités. Et les oracles devront alors laisser leur place à Hermès.

## Références

- Bachelard, R., 1979, Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles. In P. Delattre & M. Thellier, (Éd.), *Élaboration et justification des modèles*. Paris: Maloine.
- Baetu, Tudor M., 2013, When Is a Mechanistic Explanation Satisfactory? Reductionism and Antireductionism in the Context of Mechanistic Explanations. *Romanian Studies in Philosophy of Science*. Volume, 3, 13 of the *series Boston Studies in the Philosophy and History of Science*, 255–268.
- Betchtel, 2008, *Mental Mechanisms: Philosophical Perspectives on Cognitive Neuroscience*, London: Routledge.

- Brown, H. L., 2007, *Conceptual Systems*, Routledge Studies in the Philosophy of Science, Routledge.
- Burch, T., K., (1999), *Computer Modelling of Theory: Explanation for the 21st century PSC Discussion Papers Series 3-1- 1999*) Cambridge.
- Cartwright, N., 1983, *How the Laws of Physics Lie.*: Oxford University Press.
- Chaitin, G. J. 1998, *The Limits of Mathematics*, Springer.
- Chartier, J. -F., & Meunier, J. -G. 2011, Text Mining Methods for Social Representation Analysis in large corpora. *Papers on Social Representations*, 20, 37. 1 - 37. 47.
- Chartrand, L., Meunier, J. -G., Pulizzotto, D., López González, J., Chartier, J. -F., Ngoc Le, T., Trujillo Amaya, J., 2016, «CoFiH: A heuristic for concept discovery in computer—assisted conceptual analysis », Damon Mayaffre, Céline Poudat, Laurent Vanni, Véronique Magri, Peter Follette ( dir.), 2016 „JADT 2016 „Proceedings of the 13th International Conference on Statistical Analysis of Textual Data, Volume I, 2016
- Church, A. 1936,. “An unsolvable problem of elementary number theory, ” *Amer. J. Math* 58, 345–363
- Craver, Carl and Tabery, James 2015. Mechanisms in Science, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Edward N. Zalta, Fall 2016
- Curry, H. B. Feys, R., 1958, *Combinatory logic*, Vol. I, Amsterdam, North-Holland,
- Dacos, M et Pierre Mounier, 2014, *.Les Humanités numériques : état des lieux et positionnement de la recherche française dans le contexte*, International Inst. Français. Paris .
- De Busa, R. 2008, Foreword : Perspectives on the Digital Humanities in Schreibman Susan, Ray Siemens et John Unsworth, *A Companion to Digital Humanities*, Wiley-Blackwell, 2008.
- Dennett, D., 1978 *Brains Storms*. Cambridge : MIT Press.
- Duhem, P., 1906, *La théorie physique : Son objet et sa structure*, Paris : Chevalier et Rivière ;
- Frigg, R. and Hartmann, S., 2012, “Models in Science”, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, (Fall 2012 Edition), Edward N. Zalta, (ed. ),
- G. Bateson 1972) : *Vers une Ecologie de l'Esprit* , Ed. du Seuil Paris, deux Tomes T. 1, 1977 ; Tome II, 1980 Traduit de l'anglais 1972.
- Gardenfors, P., 2000, *Conceptual Spaces*. Cambridge, (Mass. ) : MIT Press.
- Giere, R., (1999), Using Models to Represent Reality, in: *L. Magnani, N. Nersessian and P. Thagard, (eds. ), Model-Based Reasoning in Scientific Discoverey. Plenum Publishers: New York, pp. 41–57.*
- Graziano, M. S. A., (2013) *Consciousness and the social brain* Oxford University Press.
- Green, S., 2013, When one model is not enough: Combining epistemic tools in systems biology *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*.
- Hesse, M., (1963), *Models and Analogies in Science*. London: Sheed and Ward.
- Jodelet, D. (dir.), *Les représentations sociales*, Presses universitaires de France, 2003.
- Johnson Laird, P. N., 1986, *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness*, Harvard University Press.
- Knuuttila, T., (2011) Modelling and representing: An artefactual approach to model-based representation. *Studies in History and Philosophy of Science*, 42, 262–271.

- Kuhn, Thomas S. 1962. *The Structure of Scientific Revolutions* (1st ed. ). University of Chicago Press.
- Lemoigne. J. L. 1987 ,Qu'est ce qu'un modèle? « Les modèles expérimentaux et la clinique » [in *Confrontation psychiatriques*, 1987, numéro spécial consacré aux modèles.
- Leonelli, Sabina, [2007 What is in a Model ? Combining Theoretical and Material Models to Develop Intelligible, Modeling Biology: Structures, Behaviors, Evolution, in Manfred Dietrich Laubichler, Gerd B. Müller (eds ) *Modeling Biology*, MIT Press,
- Leplin, J.,ed. ,1980, *Scientific Realism*. Berkeley: University of California Press.
- Markov, A., 1960, The Theory of Algorithms, *American Mathematical Society Translations*, series 2, n ° 15, p. 1–14,
- Marr, D., 1982, *Computer vision*, P. Winston, [Ed. , McGraw Hill, 1975.
- McCarty, Willard 2008 Modeling: A Study in Words and Meanings in *A Companion to Digital Humanities* in Schreibman, S. Siemens R. Unsworth Jh, Blackwell Pub
- Meunier, J.G., 2017, Vers une sémiotique computationnelle in *Applied Semiotics/Sémiotique appliquée* A paraître 2017.
- Meunier. J. G 2014 Humanités Numériques ou computationnelles. Enjeux *herméneutiques Sens Public 2014/12* revue en ligne <http://sens-public.org/spip.php?article1121>
- Meunier. J. G., Forest, D. 2009 Anntation, lecture et analyse conceptuelle assistée par ordinateur : premières expériences. In Desclées, J. P. Le Priol, F. L'annotation, et, Hermes .
- Morgan & M. Morrison, Eds., 1999, *Models as mediators. Perspectives on natural and social science* Cambridge: Cambridge University Press.
- Neumann J. V, 1945. *First Draft of a Report on the EDVAC* [TheFirstDraft.pdf](#)
- Newell A., Simon H., 1976, Symbol Manipulation. In Ralston A., Meek C. L., eds. , 1976, pp. 1384–1389.
- Newell Allen, Simon, A. 1976 “Computer Science as Empirical Inquiry: Symbols and Search,” *Communications of the ACM*. vol. 19, No. 3, pp. 113–126, March, 1976
- Newell, A., 1986. “The symbol level and the knowledge level”. In & P. Z. W. In Demopoulos W. Ed. , *Meaning and cognitive structure. Issues in the Computational Theory of Mind*. pp. 169–175. Norwood: Ablex Pub.
- Newell, Allen 1980 “Physical Symbol systems ’ *Cognitive science*. 4:2 135-183
- Newton project, <http://www.newtonproject.sussex.ac.uk/prism.php?id=1> visité en 2016.
- Papineau, D., 2010, “Realism, Ramsey Sentences and the Pessimistic Meta-Induction”, *Studies in History and Philosophy of Science*, 41: 375–385.
- Polanyi, Michael , 1967 *The Tacit Dimension*, New York: Anchor Books.
- Post, E. L., (1936), *Finite combinatory processe formulation*, *J. Symbolic Logic* 1, (1936) 103–105.
- Pylyshyn Z. W., 1984, *Computation and Cognition: Toward a Foundation for Cognitive Science* Cambridge, MA, MIT Press.
- Pylyshyn, Z. W., 1984. *Computation and Cognition. Towards a Foundation for Cognitive Science*. MIT Press, 1984.
- Rheinberger, H., 1997, *Towards a history of epistemic things. Synthesizing proteins in the test tube*, Stanford: Stanford University Press.



Soare R. I. 2009. Turing Oracle Machines, Online Computing, and Three Displacements in Computability Theory, *Annals of Pure and Applied Logic*, 160 3, pp. 368–399.

Tapor:2–16 *Discover research tools for studying texts*. <http://tapor.ca/home> visité 2016

Tarski, A. 1983. "The concept of truth in formalized languages," trans J. H. Princeton University Press. Woodger, in *Logic, Semantics, Metamathematics*, 2nd edn., J. Corcoran, ed. Sides, A., Osherson, D., Bonini, N., and Viale, R. 2002. "On the reality of the Indianapolis: Hackett.

Turing A. M., 1936, On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem, *Proceedings of the London Mathematical Society*, 42, 2, pp. 230–265..

Turing, A. 1939, "Systems of Logic Based on Ordinals", *Proceedings of the London Mathematical Society Series 2* 45, pp. 161–228

Valery Paul 1977: *Cahiers Collection Pleïade Deux Volumes*

VanFrassen, 1970, "On the Extension of Beth's Semantics of Physical Theories." *Philosophy of Science*, 37, 3: 325–339.

Weinberg, M. 2007, Who is a modeler? *British Journal for Philosophy of Science*, 58, 207–233.

Weinberg, M. 2015, *Simulation and Similarity: Using Models to Understand the World* Oxford: Oxford University Press.

Winter, R. G., 2016,, "The Structure of Scientific Theories", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Spring 2016 Edition, Edward N. Zalta, [ed. ], URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/spr2016/entries/structure-scientific-theories/>>.