

Clément Vidal

Master 2 de Sciences Cognitives.

ENS Ulm / EHESS / Paris V / Paris VI / ENS Cachan.

Sous la direction de Gloria Origgi et Jean-Gabriel Ganascia.

Année 2004/2005.

clement.vidal@philosophons.com

Le cerveau et Internet.

Etude critique d'une analogie.

Le prix de la métaphore est une éternelle vigilance.
Lewontin (1981, p245).

TABLE DES MATIERES.

Introduction	3
Les métaphores de l'esprit.....	3
Historique du « cerveau planétaire ».....	4
1.Comparaison des réseaux.....	8
1.1.Présentation des réseaux.....	8
1.1.1.Le web.....	8
1.1.2.Internet physique.....	10
1.1.3.Le cerveau.....	11
1.2. Comparaison quantitative et structurelle.....	13
1.3.Discussion.....	14
2.Etude de l'analogie.....	16
2.1.Qu'est-ce qu'une bonne analogie ?	16
2.2. Du cerveau vers Internet.....	18
2.2.1.Analogie fonctionnelle	18
2.3. D'Internet vers le cerveau.....	20
2.3.1.Simuler un cerveau.....	20
2.3.2.Le cerveau comme un graphe orienté.....	21
3.L'utopie du cerveau planétaire.....	24
3.1.Une métaphore pour aborder le futur de la société.....	24
3.2.Bénéfices.....	25
3.3.Dangers.....	27
3.4.Une transition vers un métasystème ?	29
3.5.Une nouvelle forme de conscience ?.....	30
Conclusion.....	32
Glossaire.....	33
Annexe - Théorie des graphes et topologie.....	36
Bibliographie.....	40

Introduction

De par sa nature même, l'analogie est un outil permettant de dépasser les frontières traditionnelles entre les domaines. Elle est utile, non seulement pour le raisonnement de tous les jours, mais aussi pour le raisonnement scientifique¹. De nombreuses découvertes scientifiques ont fait un usage de l'analogie. Par exemple dès la Grèce Antique, Chrysippe tenta de comprendre les ondes sonores par analogie avec les ondulations de l'eau ; Carnot en 1824 qui compara la production de chaleur à une cascade d'eau ; Morgan en 1915 compara le chromosome à un fil contenant des perles correspondants aux différents facteurs d'hérédité ; Charles Darwin arriva à l'idée de sélection naturelle en 1838 aussi par une analogie. En lisant le texte de Malthus sur la croissance de la population humaine, il réalisa qu'une croissance rapide de la population couplée à des ressources en nourriture et en espace limitée, pouvait conduire à une lutte pour l'existence. L'analogie se situe entre les conflits humains, et la compétition pour survivre des animaux et des plantes ; etc...² Cependant, il faut aussi nuancer ces succès, car si l'analogie est une forme de raisonnement très puissante, elle peut aussi créer des confusions et des blocages. Par exemple, Gentner et Jeziorski (1993) comparent l'utilisation de l'analogie chez les alchimistes et dans la science dite moderne. Ils concluent que les alchimistes font des *métaphores* peu rigoureuses, tandis que les comparaisons rigoureuses des scientifiques modernes, méritent le nom d'*analogie*. Il est donc très important d'avoir conscience lorsque l'on fait des analogies, et de les expliciter, non seulement pour les exploiter au maximum, mais aussi pour reconnaître leurs limites³.

Les métaphores de l'esprit.

En quelle mesure est-ce pertinent de faire l'analogie entre le cerveau et Internet⁴ ? En 1976, Jaynes (1976, p2-3) avait déjà remarqué que les objets les plus complexes de l'environnement de l'homme sont utilisés comme métaphores de l'esprit ou de la conscience. Par exemple Héraclite parle de la conscience comme un espace immense, sans frontières. C'était dans un contexte où les hommes libres (opposés aux esclaves) pouvaient voyager. La première moitié du 19^e siècle fut accompagnée de grandes découvertes géologiques, avec notamment les différentes couches de la croûte terrestre. On pense alors que la mémoire se trouve dans des couches qui enregistrent le passé d'un individu. Ces couches étant de plus en plus profondes, jusqu'à ce que la conscience ne puisse plus atteindre les souvenirs. Dans un contexte où les automates étaient très à la mode, un autre exemple nous vient du philosophe mécaniste La Mettrie (1709-1751) pour qui « l'âme n'est qu'un principe de mouvement, ou une partie matérielle sensible du cerveau, qu'on peut, sans craindre l'erreur, regarder comme un ressort

¹ Leary (1990, p2) va même jusqu'à dire que « toute connaissance est finalement enracinée dans des modes de perception et de pensée métaphoriques (ou analogiques) ». Dunbar (1995, 7.2, p10) soutient que les analogies constituent le quotidien du raisonnement scientifique. Il distingue, premièrement, les analogies locales qui utilisent le même domaine pour la source et la cible –par exemple un sous-domaine précis d'une discipline–; deuxièmement, les analogies régionales dont la source provient d'un domaine similaire à la cible (par exemple lorsque les deux domaines font partie de la même discipline); et enfin, plus rares, les analogies de longue distance, dont la source et la destination sont d'un domaine très différent. Ces dernières sont plus utilisées pour les grandes découvertes scientifiques. Voir aussi [2.1, p16] pour une définition plus précise de l'analogie.

² Pour d'autres grandes analogies scientifiques voir Holyoak et Thagard (1995, chap. 8).

³ A ce titre, reconnaître une « disanalogie » peut constituer aussi une avancée scientifique importante.

⁴ Nous employons le mot « Internet » au sens large, i.e. le réseau physique et tous ses réseaux virtuels. Par « cerveau » nous pensons généralement à celui de l'homme, ou à celui de mammifères supérieurs. Voir le Glossaire, p33.

principal de toute la machine »⁵. Puis, vers la moitié du 19^e siècle, ce fut la chimie qui fut à l'honneur, avec notamment Titchener (1876-1927) un étudiant de Wundt (1832-1920), le fondateur de la psychologie expérimentale. Pour Titchener, de même que l'oxygène et l'hydrogène sont des structures chimiques, les sensations et les pensées sont les structures de l'esprit. Gentner & Grudin (1985, p188b) notent aussi des métaphores spatiales de l'esprit en même temps que l'apparition de la photographie ; ainsi qu'en 1975 l'analogie entre un organigramme d'ordinateur⁶ et les processus mentaux. L'analogie plus générale entre l'ordinateur et le cerveau a bien sûr été largement exploitée, déjà par John von Neumann (1955) qui en a étudié les aspects quantitatifs.

De la même manière que les penseurs cités ci-dessus, notre propos n'est-il *que* victime d'un effet de mode ? Gentner & Grudin (1985, 188b) précisent qu'une nouvelle technologie n'est une raison ni nécessaire, ni suffisante pour changer les métaphores mentales⁷. Plus plausiblement, ils suggèrent que ce sont des changements d'écoles de pensées qui induisent les changements de métaphores. Dans notre analogie, ce serait donc l'essor de la science des réseaux qui stimulerait le changement de métaphore (et non pas seulement un effet de mode dû à la technologie).

Pourquoi étudier cette analogie en détails ? On peut voir au moins trois raisons à cela.

Une raison fondamentale est d'ordre historique, car l'analogie du web et du cerveau est profonde. En effet, Tim Berners-Lee, alors étudiant en physique à l'université d'Oxford, raconte qu'après une discussion avec son père sur les connexions du cerveau, il garda l'idée que « les ordinateurs pourraient devenir bien plus puissants s'ils pouvaient être programmés pour lier des informations par ailleurs déconnectées »⁸. Cette idée resta présente à son esprit, et le conduira finalement en 1990 à créer le World Wide Web, au CERN à Genève. Il y a donc dès la création du web, une analogie directe avec le cerveau.

En deuxième lieu, Internet (et surtout le web) ainsi que les réseaux neuronaux des mammifères supérieurs, sont tous de très grands réseaux d'interaction, et même les plus grands que l'on connaisse. Cette similarité structurelle suggère qu'ils puissent partager des propriétés communes. Qu'en est-il plus précisément ? Nous étudierons en détails cette question dans notre première partie.

Enfin, on peut voir l'analogie entre Internet et le cerveau comme une réactualisation d'une certaine vision de la société ; celle de la société comme un (super)organisme.

Historique du « cerveau planétaire »

D'où vient plus précisément cette vision de la société comme un organisme, dans laquelle le système nerveux serait un « cerveau planétaire » ? Nous nous proposons ici de faire un rapide historique de ce concept⁹. Heylighen (2004) distingue historiquement trois approches majeures au concept de cerveau planétaire. L'approche « *organisme* » qui considère la planète ou la société comme un système vivant ; l'*encyclopédique* qui tente de développer un réseau

⁵ La Mettrie (1747).

⁶ Les organigrammes sont utilisés pour représenter des algorithmes. Par exemple UML (Unified Modeling Language).

⁷ Une nouvelle technologie (ou science) n'est pas une raison *nécessaire* pour changer de métaphore. Par exemple, dans le terme de « coefficient d'apprentissage » qui apparaît en 1935 on a le mot « coefficient » qui vient des mathématiques, et qui existait bien sûr bien avant 1935. Une nouvelle technologie n'est pas non plus une raison *suffisante* pour changer de métaphore. Par exemple, l'aviation ou la télévision n'ont pas donné lieu à des métaphores mentales.

⁸ Berners-Lee (1999, p4). Voir aussi p41 où Berners-Lee évoque les possibilités de libres associations du cerveau, et du web.

⁹ Pour un historique plus détaillé, voir Heylighen (2004), dont nous nous inspirons largement ici.

de connaissance universel ; et l'approche « *émergence* » qui anticipe l'évolution d'un niveau de conscience supérieur.

On peut faire remonter l'approche « *organisme* » avec Platon, qui dans *La République* soutient qu'une cité bien administrée est comme un corps¹⁰. Il compare la réaction à la douleur et au plaisir dans la cité et dans le corps. John de Salisbury (1130-1180) en 1159, dans son traité de science politique médiévale le *Policraticus*¹¹ –peut être inspiré par la *Politique* d'Aristote¹²– a comparé la société à une créature. Chaque classe y joue son rôle attribué par Dieu : le Roi est la tête, l'église est l'âme, les juges et les gouverneurs sont les yeux et les oreilles, les soldats les mains, et les paysans les pieds. Thomas Hobbes en 1651 dans son célèbre ouvrage philosophique et politique *Le Léviathan*, compare la société au Léviathan, le monstre marin (figure mythique du livre de Job de l'Ancien Testament). Il développe une analogie semblable à celle de Salisbury pour analyser la société¹³. Herbert Spencer (1820-1903) dans son œuvre monumentale *Principles of Sociology* de (1896) a étudié bien plus en détails cette analogie. Il décrit la société comme un « organisme social ». Cependant, l'analogie ne s'étend pas pour lui aux fonctions mentales, car la conscience (ou la sensation) se trouve localisée dans l'organisme social (dans chacun des hommes), tandis qu'au sein d'un même organisme biologique, elle est diffuse. On peut noter que l'apparition du réseau des réseaux tend à rompre cette limitation.

Cette vision de la société comme un organisme peut cependant être un instrument de pouvoir politique, qui justifie un *status quo*. Par exemple, le consul Menenius Agrippa apaisa les plébéiens en disant que les mains ne devraient pas se rebeller contre les autres organes, au risque de détruire tout le corps¹⁴. Cependant, si cette vision organique était populaire au début du XX^e siècle, elle l'est aujourd'hui beaucoup moins. En effet, il existe des conséquences politiques :

Depuis Marx, les sociologues et les politiciens théoriciens se sont plus intéressés à comment une société peut être changée, et comment les opprimés peuvent être libérés. Cela entraîne une concentration sur les inévitables conflits et la compétition dans la société, à contraster avec l'approche « organisme » qui insiste sur la synergie et la coopération. La vision « organisme » n'est pas seulement rejetée par la gauche par les Marxistes, mais par la droite chez les défenseur de l'économie du « laissez-faire », qui abhorrent l'idée d'individus comme simplement des petites cellules subordonnées à un collectif, ce qu'ils voient comme une justification des systèmes totalitaires comme ceux créés par Mao, Hitler ou Staline.¹⁵

Joël de Rosnay (1979) proposa d'adopter une vision globale de la société, à l'aide d'un outil conceptuel : le « microscope ». Il permet de mieux voir les échanges d'énergie, de matière, et d'information à un niveau global. Gregory Stock (1993) a proposé une vision moderne d'un superorganisme formé d'hommes et de machines, qu'il appelle « Metaman ». Disons aussi un mot de l'hypothèse Gaïa, avancée par Lovelock (1986) et selon laquelle la Terre est un être vivant. Cet être serait capable de réguler sa température, la composition de son atmosphère, etc... Bien entendu, cet hypothèse est très critiquable, car l'humanité y joue un rôle anodin, voire même gênant, puisque comparable à un cancer qui se répand et utilise les ressources de Gaïa¹⁶.

¹⁰ 462c-d, 464b.

¹¹ Salisbury (1159, Livre V, particulièrement chapitre XXI).

¹² Par exemple au Livre I, Chapitre II, §10-13 où Aristote rapproche les pouvoirs de l'âme sur le corps, et les pouvoirs entre les hommes.

¹³ Voir l'introduction de Hobbes (1651, p64).

¹⁴ Voir Bukharin (1925), cité dans Heylighen (2004, p2).

¹⁵ Heylighen (2004, p3). Heylighen note aussi que ce prétendu danger de l'approche organisme est faux, et qu'une certaine forme de cet organisme augmenterait au contraire la liberté et la diversité. Nous en discuterons en [3.3, p27].

L'approche *encyclopédique* est bien sûr représentée par Diderot et d'Alembert et leur encyclopédie publiée entre 1751 et 1772. Cependant, à la fin du XIX^e siècle, l'ensemble des connaissances était trop important pour être publié dans un ouvrage de synthèse. C'est pour faire face à ce problème que Paul Otlet (1868-1944) fonda la science bibliographique, maintenant devenue les sciences de l'information. Il créa un système de documents connectés par des liens, ce qui fait de lui un précurseur du web. « L'homme n'aurait plus besoin de documentation s'il était assimilé dans un être qui est devenu omniscient, à la manière de Dieu lui-même. »¹⁷ H. G. Wells a aussi émis l'idée d'un cerveau mondial, ou encyclopédie mondiale (*World Brain*, Wells (1938)). Levy (1997, p202) avec Michel Authier ont proposé aussi un tel projet qu'ils nomment la « cosmopédie ». Ce terme signifie la somme organisée des connaissances par le cosmos (et non plus par le cercle, comme pour l'encyclopédie). L'américain Vannevar Bush est connu pour avoir créé la notion d'hypermédia en 1945¹⁸. Il a proposé un système, appelé « Memex » dans lequel un individu peut stocker des documents de toutes sortes (livres, notes personnelles, etc...) de façon à les retrouver facilement. Il est possible d'associer ces documents librement en fonction des besoins de l'individu. Cela dit, en raison du faible développement (voire de l'inexistence) de l'informatique à cette époque, le projet n'était pas pratiquement réalisable. Cette idée influença cependant fortement deux penseurs de l'hypertexte : Douglas Englebart et Theodore Nelson. Englebart commença à développer le système NLS (oNLine System) en 1962, qui marque le début de l'informatique moderne, avec en plus d'un système hypertexte, l'invention de la souris, et d'autres concepts d'informatique moderne¹⁹. Ce fut Theodore Nelson qui inventa en 1965 les termes « hypertexte » et « hypermedia » (voir le glossaire). Il créa un système d'hypertexte avec Andries van Dam appelé HES (Hypertext Editing System). Cependant, aussi bien Bush que Englebart voyaient avec leurs systèmes un moyen pour augmenter la mémoire individuelle, tandis que Nelson tenta de l'exploiter à un niveau plus global dans les années 1970, avec son système Xanadu²⁰. Ce système est un système hypertexte plus sophistiqué que celui que l'on connaît avec le web²¹. Enfin, en 1990 ce fut l'arrivée du web par Tim Berners-Lee, qui est un mariage fécond d'un système très simple d'hypertexte avec Internet physique. Le résultat aujourd'hui familier est la toile d'information distribuée et décentralisée sur toute la planète.

L'approche « *émergence* » se concentre quant à elle sur des aspects plus spirituels, et plus spéculatifs. Pierre Teilhard de Chardin est sans doute le penseur le plus populaire de ce qui deviendra la cerveau planétaire avec son ouvrage de (1955) qui a connu un grand succès. Etant à la fois paléontologue et dans l'ordre des Jésuites, il a opéré une synthèse remarquable entre science et religion, avec une vision de l'évolution selon laquelle l'évolution va vers plus de complexité et de conscience. Il a anticipé un niveau de conscience supérieur, un réseau de pensées, qu'il a appelé la *noosphère*. Peter Russell (1982) fut le premier à utiliser l'expression

¹⁶ Plus précisément Russell (1985, p34) envisage deux possibilités pour interpréter la civilisation. Soit c'est un cancer ... ou bien un cerveau planétaire. Voir aussi Heylighen (2004, p3) qui souligne que ce superorganisme ne serait pas plus intelligent qu'une bactérie ; ou Stock (1993, p15) qui pense que cette hypothèse n'apporte pas grand-chose pour comprendre notre futur, car la civilisation n'y a pas une place particulièrement importante dans l'évolution. Sans même mentionner le problème de la définition d'un être vivant ... est-ce que Gaïa a des progénitures ?

¹⁷ Cité dans Heylighen (2004, p4).

¹⁸ Bush (1945).

¹⁹ Voir http://en.wikipedia.org/wiki/NLS_%28computer_system%29 pour l'historique de NLS, qui n'est pas très heureux.

²⁰ Le nom Xanadu vient du palais de rêve qu'évoque Coleridge dans son poème Kubla Khan (voir <http://www.online-literature.com/coleridge/640/> pour le poème). Voir aussi Ganascia (2001) pour un historique et une réflexion sur l'hypertextualité.

²¹ Voir <http://xanadu.com/xuTheModel/> pour une description détaillée du projet.

« cerveau planétaire » [global brain] et insista sur la dimension spirituelle que chacun doit atteindre au sein du superorganisme, notamment pour aboutir à une plus grande synergie. Le cerveau planétaire est alors pour lui constitué simplement du réseau des hommes reliés entre eux par les télécommunications. Mayer-Kress et Barczys (1995) (dans le premier article sur le cerveau planétaire paru dans une revue revue par les pairs) définissent explicitement le cerveau planétaire comme étant un réseau d'hommes *et de machines* interconnectés.

Aujourd'hui, plus précisément, le cerveau planétaire peut être défini comme « *une métaphore pour le réseau d'intelligence collective émergeant des liens de communication formés par les hommes, les ordinateurs et les bases de données* »²². Inutile de préciser qu'il n'en est encore qu'à un stade embryonnaire. Aucun individu, organisation ou ordinateur ne le contrôle, car sa connaissance et son intelligence sont distribuées parmi ses composants.

On peut objecter à cette vision qu'il n'y a pas de nécessité de parler d'Internet pour parler de cerveau planétaire²³. En effet, il est possible d'imaginer des idées²⁴ qui sont communiqués de personnes à personnes (ou d'écrits à personnes) et qui évoluent, à mesure que différents penseurs les assimilent et les modifient. Cependant, les mêmes dans une telle infrastructure évoluent très lentement (tout de même beaucoup moins avec l'écrit). L'avancée des technologies de l'information et de communication (et d'Internet) se situe dans la rapidité de l'accès (de plus en plus immédiat), et sans contrainte spatiale, à l'information.

Jusqu'où Internet et le cerveau peuvent-ils être considérés comme analogues ? Peut-on examiner rigoureusement cette analogie ? Quelles perspectives peut apporter une telle analogie pour l'étude du cerveau ; et pour le développement d'Internet et de la société ? Peut-on dire, comme certains auteurs cités plus haut, qu'un cerveau planétaire est en émergence ? Voire même qu'une nouvelle forme de conscience va apparaître ? Du point de vue de l'évolution de la vie, que peut signifier cette interconnexion massive des êtres humains avec leur technologie ? Est-ce qu'Internet est une transition vers un métasystème²⁵ comparable à l'émergence de la vie ? ou du passage de l'unicellulaire au multicellulaire ?

Dans un premier temps, nous verrons les analogies quantitatives et structurelles entre Internet et le cerveau, à la lumière des outils de la science des réseaux, développée récemment.²⁶ Cette étude occupera notre première partie [1, p8]. Après une discussion critique sur cette approche, nous verrons d'un point de vue plus général ce que l'on peut attendre de telles analogies [2, p16]. Enfin, nous analyserons plus en détails, sans doute l'aspect le plus fascinant de cette analogie, la métaphore du cerveau planétaire [3, p24].

²² Heylighen (2004, p2).

²³ Howard Bloom (2000, p179), dans son ouvrage intitulé « Global Brain » a en effet une vision très (trop?) large du cerveau planétaire et fait cette objection.

²⁴ Ou plus largement, des mêmes. Voir le glossaire.

²⁵ Le concept de transition vers un métasystème [metasystem transition] vient de Turchin (1977) et signifie l'évolution d'un niveau de contrôle et de cognition plus élevé. Voir le glossaire.

²⁶ Ces outils sont depuis peu utilisés dans des disciplines très différentes. Citons quelques exemples : l'informatique (réseaux Internet, web, pair-à-pair), les sciences du vivant (réseaux génétiques, protéiques, chaînes alimentaires, neuronaux), les sciences sociales (réseaux de collaboration scientifique, économiques, amitié), les infrastructures (réseaux de transports, électriques), ou encore la linguistique (réseaux de synonymie, de co-occurrence). Voir Barabási (2001) pour une introduction non technique à la science des réseaux ; ou Newman (2003) pour un article de revue.

[...] les réseaux vont dominer le nouveau siècle à un degré bien plus grand que la majorité des gens sont prêts à l'accepter aujourd'hui. Ils vont guider les questions fondamentales qui forment notre vision du monde dans l'époque à venir.

Barabási (2001, p7).

1. Comparaison des réseaux

Etudier les aspects globaux de l'organisation des réseaux est essentiel pour comprendre leur fonctionnement, et les simuler. Par exemple, comprendre la topologie à grande échelle d'Internet physique permet de simuler le réseau, de tester sa robustesse à des attaques, ou encore de tester des protocoles et applications avant de les initier réellement. Etudier le graphe du web peut nous renseigner sur les communautés sociales, les sites de référence, etc... Enfin, connaître les structures des connexions neuronales est fondamental pour comprendre le fonctionnement et la dynamique du cerveau.

Y a-t-il des points communs entre ces réseaux ? Si oui, quels sont-ils ? Commençons par présenter les réseaux [1.1, p8]; puis faire une comparaison quantitative et structurelle [1.2, p13] avant d'opérer à une discussion critique [1.3, p14].

1.1. Présentation des réseaux

Internet physique et le web ne sont pas synonymes, et nous les étudions donc séparément.

1.1.1. Le web

L'étude du web a suscité beaucoup de travaux, et a contribué à stimuler et renouveler la science des réseaux.

Le World Wide Web, ou web, est une invention qui a tout juste 15 ans d'âge qui a déjà des retombées considérables pour la société. Le web n'est pas un objet physique comme Internet physique. C'est un réseau virtuel d'Internet physique. C'est-à-dire qu'il utilise les infrastructures physiques d'Internet, mais c'est pourtant un réseau très différent, puisque ce sont les créateurs de sites qui forment sa structure en créant librement des hyperliens -orientés- entre des pages. Plus simplement, on peut dire que c'est un espace dans lequel l'information peut exister.

Le but de départ de Tim Berners-Lee était de créer un système dans lequel « partager ce que l'on sait ou pense devrait être aussi facile que d'apprendre ce que quelqu'un sait »²⁷. Malheureusement, cet aspect ne s'est pas beaucoup développé. La majorité des utilisateurs restent passifs face à l'information, et n'ont pas beaucoup d'occasions d'interagir.

²⁷ Berners-Lee (1999, p36).

Récemment, des efforts importants ont cependant été faits dans ce sens, notamment avec les « wiki » qui sont des sites web dynamiques, permettant à tout visiteur de modifier les pages à volonté. Un exemple de ce succès est l'encyclopédie Wikipédia²⁸.

Plus précisément, quel est le graphe du web ? C'est ici très clair; les sommets sont des pages web, et les arêtes des liens hypertexte. Cartographier *tout* le web est une tâche difficile en raison de sa grande taille, de son aspect dynamique, et de sa structure (voir plus bas). C'est pour cela que la première étude du web faite par Albert *et al.* (1999) s'est concentrée sur un domaine du web (nd.ed). La surprise de Albert Jeong et Barabási été de constater que le web n'est pas semblable à un graphe aléatoire. Il y existe des pages beaucoup plus connectées que d'autres, appelées hubs. L'existence de ces sommets très connectés se traduit par une distribution des degrés du graphe en loi puissance (voir l'annexe). Pour rendre compte de ce phénomène inattendu, Barabási et Albert (1999) ont développé un modèle minimal de croissance, appelé modèle d'« attachement préférentiel »²⁹.

Quelles sont les données disponibles sur le web ? Deux études fournissent les données ci-dessous.

Réseau	Nombre de sommets	Nombre d'arêtes	C	C_r	$\langle l \rangle$	$\langle l_r \rangle$	Références
Web (nd.edu)	325 729	1 469 680			11.2	8.32	Albert <i>et al.</i> (1999)
Web (Altavista, oct. 1999)	$2,71 \times 10^8$	$2,13 \times 10^9$			16 (dirigé) 6.8 (non dirigé)	6.8 (non dirigé)	Broder <i>et al.</i> (2000) et Kumar <i>et al.</i> (2000)

Les valeurs C et $\langle l \rangle$ correspondent respectivement au clustering et à la distance moyenne (voir l'annexe). Les valeurs C_r et $\langle l_r \rangle$ sont les valeurs de clustering et de distance moyenne pour un graphe aléatoire de même taille.

En novembre 2005, le moteur de recherche Google indexait 8 milliards de pages³⁰. Si ce grand nombre dépasse même la population mondiale, on doit cependant rester attentif aux nombres de pages web indexées par les moteurs de recherche, qui ne représentent qu'une petite fraction de l'ensemble du web. Ainsi, en 1999, *tous* les moteurs de recherche réunis ne pouvaient atteindre que 40% du web³¹. Et ce ne sont pas des nouvelles technologies de moteurs de recherche qui pourront y changer quelque chose. Pourquoi cela ? La réponse vient de la structure générale du web.

Une étude importante faite par Broder *et al.* (2000) montre que le web est fragmenté. En effet, le fait que les arêtes soient dirigées fait qu'il y a beaucoup moins de chemins possibles dans ce réseau, que dans le même réseau non dirigé³². On se reportera à l'annexe pour plus de détails sur cette fragmentation. De ce fait, la propriété « petit monde » du web que l'on peut lire sur le tableau ci-dessus est trompeuse, car d'une page quelconque on ne peut atteindre en fait environ que 24% de tous les documents³³.

²⁸ Cette encyclopédie libre et ouverte rappelle bien sûr l'esprit de l'approche encyclopédique du cerveau planétaire. Voir <http://www.wikipedia.org>.

²⁹ Les deux mécanismes fondamentaux du modèle sont 1) que le réseau grandit continuellement par l'addition de nouveaux sommets et 2) que les nouveaux sommets s'attachent préférentiellement aux sommets déjà bien connectés.

³⁰ Les informations topologiques du web que détient Google pourraient être intéressantes à étudier, mais ces informations sont capitales, car ce sont elles qui permettent de repérer les sites les plus pertinents, qui sont les plus connectés (connexions sortantes et surtout entrantes). Voir par exemple Mela (2004) pour une explication du fonctionnement du système de classement des pages de Google.

³¹ Barabási (2001, p164), estimé à partir de Lawrence *et al.* (1998).

³² Par exemple, il peut exister un chemin c de la page A vers la page B. Pour faire le retour de B à A, il peut exister un chemin c' , en général différent de c ... ou il peut ne pas exister de chemin du tout.

³³ Broder *et al.* (2000).

1.1.2. Internet physique

Dans cette sous-section, nous emploierons exceptionnellement « Internet » dans le sens d'Internet physique, c'est-à-dire des ordinateurs reliés entre eux par des câbles. Plus précisément, Internet est un système physique constitué du rassemblement de réseaux informatiques administrés de façon indépendante, chacun ayant sa propre administration. Du fait que ce soit une création technologique humaine, il est relativement plus facile d'étudier ce réseau que d'autres réseaux naturels.

L'évolution d'Internet s'est toujours faite sans le contrôle d'une autorité générale, sans conception générale prédéfinie³⁴. En effet, son évolution est dictée par au moins les deux principes suivants : la coopération (pour que le réseau fonctionne efficacement) et la compétition (les fournisseurs d'accès sont des entreprises comme les autres). C'est pour cela qu'on peut dire qu'il est un système auto-organisé, conciliant les besoins humains et les capacités technologiques (Vespignani *et al.* (2005, p13-18)). Combien y a-t-il d'ordinateurs connectés à Internet ? Le nombre d'hôtes en 2004 était de 285 millions³⁵. Cependant, ce n'est pas le réseau des hôtes qui a été le plus étudié, car il est relativement difficile à cartographier³⁶. De plus, il n'est pas forcément le niveau du réseau le plus pertinent à étudier pour comprendre la structure générale d'Internet. Plus précisément, les sommets du graphe d'Internet peuvent être (voir aussi la figure ci-dessous) :

- 1) Des hôtes³⁷ [hosts] qui sont les ordinateurs des utilisateurs
- 2) Des serveurs (des ordinateurs qui fournissent des services pour le réseau)
- 3) Des routeurs qui organisent le trafic sur Internet.
- 4) Des domaines (ou AS, qui peuvent correspondre à des fournisseurs d'accès, ou des infrastructures plus larges)

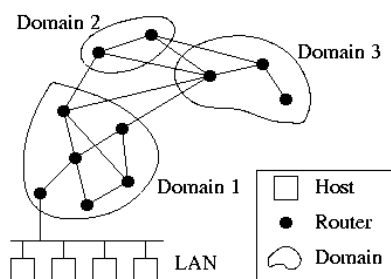


Schéma de la structure d'Internet. La structure globale d'Internet est déterminée par les routeurs et les domaines.

Les routeurs sont regroupés en domaines, appelés aussi Systèmes Autonomes [Autonomous Systems] ou AS. Seuls les niveaux AS et routeurs ont été étudiés en détails, car ils forment l'ossature d'Internet³⁸.

Quelles sont les propriétés topologiques de ces réseaux ? Aussi bien le réseau des AS que celui des routeurs sont des réseaux sans échelle typique (Dorogovtsev *et al.* (2003, p80) ;

³⁴ Même si des programmes politiques peuvent influencer son développement général.

³⁵ Source : Hobbes' Internet Timeline : <http://www.zakon.org/robert/internet/timeline/>.

³⁶ Signalons tout de même le projet ambitieux <http://tracerouteathome.net/> qui a pour but d'obtenir une topologie au niveau IP (hôte).

³⁷ Un hôte est un ordinateur permettant aux utilisateurs individuels de communiquer avec d'autres ordinateurs sur Internet.

³⁸ Voir Vespignani *et al.* (2005, chapitre 4) pour plus de détails sur ces études de la topologie d'Internet.

Albert *et al.* (2002, p51)). Plus précisément, on peut résumer les données topologiques de deux études dans le tableau suivant. (Les cases vides indiquent des données non disponibles).

Réseau	Nombre de sommets	Nombre d'arêtes	C	C_r	$\langle \ell \rangle$	$\langle \ell_r \rangle$	Références
AS, 1999	6374	13641	0.24	0.0007	3.7	6.38	Pastor-Satorras <i>et al.</i> (2001)
Routeurs, 2000	~150 000	~200 000			10	12.5	Govidan <i>et al.</i> (2000)

Les valeurs C et $\langle \ell \rangle$ correspondent respectivement au clustering et à la distance moyenne (voir l'annexe). Les valeurs C_r et $\langle \ell_r \rangle$ sont les valeurs de clustering et de distance moyenne pour un graphe aléatoire de même taille.

Pour le réseau des AS, on peut constater que le clustering est très élevé par rapport au clustering d'un graphe aléatoire de même taille. Les deux réseaux sont des « petits mondes », c'est-à-dire qu'entre deux routeurs ou AS quelconques, il n'y a en moyenne respectivement que 4 ou 10 degrés de séparation. La distance moyenne est donc un peu plus courte qu'un graphe aléatoire, mais ce n'est pas très significatif.

1.1.3. Le cerveau

La topologie des connexions neuronales est très importante pour comprendre la diffusion des signaux neuronaux, et de l'information neuronale. Cependant, les données que nous avons aujourd'hui sur la topologie des réseaux neuronaux (c'est-à-dire les matrices de connexion des neurones) sont malheureusement très éparses (Crick et Jones (1993)). Il existe cependant des informations plus complètes sur les connexions cortico-corticales à grande échelle, chez le singe et le chat.³⁹

Le seul organisme dont on ait cartographié entièrement le réseau neuronal est le vers *Caenorhabditis elegans*, dont voici les caractéristiques :

Réseau	Nombre de sommets	Nombre d'arêtes	C	C_r	$\langle \ell \rangle$	$\langle \ell_r \rangle$	Références
<i>C. Elegans</i>	282	1970	0.28	0.05	2.65	2.25	Watts et Strogatz (1998)

Les sommets sont des neurones, les arêtes des jonctions synaptiques.

Bien entendu, même pour un organisme aussi simple, établir un tel réseau suppose de faire des simplifications. Dans le réseau réel, les connexions synaptiques *sont* dirigées (!); il en existe plusieurs types; il y a des contacts directs entre neurones; des multiples connexions (etc...). Cependant, on peut tout de même voir que le réseau neuronal est un petit monde, et qu'il y a une forte différence de clustering entre le réseau réel et le réseau aléatoire correspondant. Malheureusement, étant donné la petite taille du réseau, cette différence ne peut pas être considérée comme significative (Dorogovtsev *et al.* (2003, p55)).

³⁹ Voir Sporns et Zwi (2004, p146b) pour toutes les références de ces travaux.

En ce qui concerne les autres réseaux neuronaux, et leurs topologies, malgré le peu de données, il est possible de commencer à se prononcer sur quelques principes généraux⁴⁰. Des analyses structurelles de réseaux neuronaux ont été effectuées chez le rat, le chat et le singe. Au niveau des connexions à grande échelle (entre différentes aires corticales), on retrouve, d'une part, l'effet petit monde (que les graphes aléatoires ont aussi), couplé à un fort clustering (que les graphes aléatoires n'ont pas). En ce qui concerne les réseaux obtenus à partir d'activations fonctionnelles, le coefficient de clustering d'une aire permet de mesurer à quel point cette aire fait partie d'un certain groupe fonctionnel. Quant à la longueur du chemin entre deux régions données du cerveau, elle permet de reconnaître leur proximité fonctionnelle. S'il n'y a pas de chemin entre deux aires, il ne peut y avoir d'interaction fonctionnelle. (Sporns *et al.* (2004, p420b)).

En mesurant les degrés entrants et sortants d'une certaine région du cerveau, on peut donner une caractérisation fonctionnelle de ces régions. Celles qui ont un fort degré entrant intègrent les signaux; celles qui ont un fort degré sortant ont un rôle « d'annonceur » [broadcaster]. Cela dit, le rapport entrant/sortant est, par exemple dans le cortex visuel du macaque proche de 1 (avec une erreur standard de 0,4) ce qui indique une situation intermédiaire, avec un mode de traitement de l'information coopératif⁴¹.

Un grand nombre de réseaux complexes naturels et artificiels (dont Internet physique et le web) sont sans échelle typique (i.e. ont une distribution de degrés en loi puissance). En est-il de même pour le cerveau ? Le cerveau est-il un réseau sans échelle typique ? La réponse est négative en ce qui concerne le vers *C. Elegans* ... mais cette question n'a de sens que pour des réseaux beaucoup plus grands. Les résultats pour les mammifères (cités ci-dessus) tendent ici encore à faire pencher pour une réponse négative, bien que cela soit moins clair, car plus de données sur les connexions manquantes pourraient faire apparaître une architecture sans échelle typique⁴². Un autre obstacle à une telle architecture vient d'un effet de saturation du nombre de connexions synaptiques, qui empêche l'apparition de hubs très connectés⁴³. On peut alors se poser la question à un autre niveau; existe-t-il des clusters de neurones, qui joueraient le rôle des hubs ? La réponse semble cette fois-ci être positive. Par exemple, chez le macaque il existe des régions corticales particulièrement plus connectées⁴⁴. Les réseaux du chat et du macaque sont beaucoup plus vulnérables à des dommages sur ces quelques noeuds⁴⁵, de même que les réseaux sans échelle typique sont vulnérables aux attaques de leurs hubs.⁴⁶

En ce qui concerne la croissance des réseaux neuronaux, le modèle d'attachement préférentiel qui fonctionne relativement bien pour expliquer Internet physique et le web n'est pas très crédible pour le cerveau. En effet, les connexions de longue distance sont rares dans le cerveau (car les facteurs de croissance déclinent avec la distance)⁴⁷. Un modèle de croissance tenant compte des distances a été proposé, et permet de capturer les propriétés de multiples clusters, et de longueur des chemins. (Kaiser *et al.* 2004).

⁴⁰ Nous suivons dans ce qui suit l'analyse de l'article de revue de Sporns *et al.* (2004).

⁴¹ Sporns *et al.* (2004, p420a).

⁴² Amaral (2000) et Sporns et Zwi (2004, p160).

⁴³ Sporns *et al.* (2004, p419).

⁴⁴ Sporns et Zwi (2004, p154).

⁴⁵ Martin *et al.* (2001).

⁴⁶ Albert *et al.* (2000). Pour se faire une idée intuitive de ce phénomène on peut considérer le réseau du transport aérien, et imaginer ce qui se passerait si quelques uns des plus grands aéroports fermaient. (Voir l'annexe pour un schéma d'un tel réseau aérien).

⁴⁷ Sporns (2004, 422).

1.2. Comparaison quantitative et structurelle

Un moyen plaisant pour essayer de se rendre compte de la grandeur et de la complexité des réseaux que nous étudions, est de se demander « quel animal est Internet ? ». On peut le faire en utilisant les estimations faites avec les quelques données éparses disponibles sur les nombres de neurones.

<i>Animal</i>	<i>Nombre de neurones</i>	<i>Référence</i>
<i>C. Elegans</i>	282	Watts et Strogatz (1998)
<i>Souris</i>	10 millions	Braitenberg (2001, p74b)
<i>Rat</i>	100 millions	Braitenberg (2001, p74b)
<i>Chat, Singe</i>	1 milliard	Braitenberg (2001, p74b)
<i>Homme</i>	10 à 1000 milliards	Pakkenberg (1997, p318a)

Le graphe du web a ainsi le même nombre de sommet qu'environ une dizaine de cerveaux de chats. Les estimations du nombre de neurones du cerveau humain ne sont pas unanimes, et le chiffre de 1000 milliards est sans doute excessif. Cependant, la largeur de la fourchette donnée montre bien l'insuffisance des connaissances. Dans la suite, nous supposons qu'il a 100 milliards de neurones, comme c'est le plus souvent supposé. Sous cette hypothèse, le nombre de neurones d'un cerveau humain reste un ordre de grandeur au dessus du plus grand réseau créé par l'homme (le web, environ 10 milliards de pages).

Qu'y a-t-il de commun entre les réseaux d'Internet physique, du web et du cerveau ? Encore une fois, les données sur le cerveau étant trop insuffisantes, il est difficile de faire une comparaison purement quantitative.

Une propriété intéressante concerne l'adaptativité d'Internet physique et du cerveau. Cela signifie que si l'on détruit une de leur partie, les systèmes restent fonctionnels (et peuvent éventuellement se reconstruire). Le mode de fonctionnement de la mémoire dans le cerveau est distribué, et permet ainsi une certaine résistance aux suppressions. C'est-à-dire que si certains neurones impliqués dans le stockage de la mémoire meurent, toute la mémoire n'est pas pour autant effacée⁴⁸. Internet physique a une robustesse comparable, si les pannes sont aléatoires. Par contre, du fait de sa structure sans échelle typique, les hubs qui connectent beaucoup d'ordinateurs constituent le talon d'Achille d'Internet. Si quelques-uns d'entre eux tombaient en panne, tout le réseau serait détruit⁴⁹.

A part cette propriété, nous avons vu trois propriétés qui sont communes à nos réseaux; l'effet petit monde, le fort clustering, et la distribution des degrés en loi puissance (réseaux sans échelle typique).

L'effet petit monde permet théoriquement d'aller d'un sommet à un autre très facilement. Pour Internet physique, cela permet une transmission des paquets efficace. Cela dit, pour le web, dont les arêtes sont orientées, nous avons vu que cette propriété est quelque peu trompeuse. Comme les connexions synaptiques sont elles aussi orientées, l'effet petit monde pour le cerveau doit aussi être nuancé.

⁴⁸ Voir Bears *et. al* (2004, p791-792) pour le détail du fonctionnement de cette résistance.

⁴⁹ Voir Vespignani (2005, chap 6) pour un résumé de la robustesse d'Internet physique.

La propriété de fort clustering est plus intéressante. En effet, sur le web, le repérage des clusters peut révéler des communautés⁵⁰. De même dans le cerveau, il existe différents modules plus connectés qui ont une intra-connexion forte, et qui exercent des fonctions particulières. La structure et fonction sont donc ici bien liées (des communautés sociales dans le cas du web ; ou des fonctions cognitives différenciées par l'évolution (ou modules) pour le cerveau).

Enfin, la distribution en loi puissance permet d'attirer notre attention sur les hubs, fondamentaux pour comprendre les réseaux.

1.3. Discussion

Beaucoup de questions peuvent se poser sur notre comparaison. Est-ce que les trois propriétés communes aux trois réseaux sont spécifiques à ces réseaux ? La réponse est très clairement négative. L'effet petit monde est présent même dans les graphes aléatoires; quant au fort clustering et à l'architecture sans échelle typique, elles se retrouvent dans la majorité des réseaux réels⁵¹. Un aspect intéressant dans la comparaison d'Internet et du cerveau, est que les deux ont un réseau physique (Internet physique et les réseaux neuronaux) qui peuvent héberger d'autres réseaux virtuels. Internet physique héberge les réseaux du web, des emails, etc...; et le cerveau peut aussi héberger des réseaux « virtuels », comme des réseaux linguistiques, des réseaux de connaissances reliées entre-elles, etc... La technologie pour passer d'Internet physique au web est bien sûr connue, mais on peut poser la même question pour le cerveau. Comment est-ce que les réseaux neuronaux codent-ils d'autres réseaux, comme les réseaux linguistiques ? Voir ainsi les réseaux neuronaux suggère que des mêmes réseaux physiques puissent stocker des informations différentes. Est-ce que des mêmes réseaux de neurones peuvent servir à des tâches complètement différentes ? Si oui, est-ce que des réseaux virtuels peuvent s'influencer les uns les autres ? Ces questions étant bien sûr difficiles, nous ne pouvons ici malheureusement que nous contenter de les souligner.

Un aspect qui différencie fondamentalement ces trois réseaux concerne leur développement. En effet, les contraintes de croissance des différents réseaux n'ont rien à voir. La croissance d'Internet physique est déterminée par des facteurs économiques et géographiques; celle du web est sociale et créée par des communautés de personnes; enfin celle du cerveau se fait -à différentes échelles de temps- par l'évolution, le développement ontogénétique, et l'expérience.

Russell (1982, p59) affirme que le changement quantitatif amène au changement qualitatif. Par exemple, il dit que les systèmes complexes ont tendance à subir une transition de phase lorsqu'un certain nombre de composants est atteint. Il prend comme exemple 10 milliards de neurones pour le cerveau humain (sic !), et 10 milliards d'individus sur Terre.

Mais, comment et pourquoi un nouveau niveau d'organisation émergerait ? Cette analogie quantitative, en plus d'être peu crédible à la lumière des estimations d'aujourd'hui, ne permet pas de répondre à une telle question. Idéalement, il faudrait une compréhension de l'évolution des niveaux émergents, sur le modèle des transitions de phases étudiées en physique. L'étude quantitative reste donc limitée, et elle ne fournira jamais que du descriptif, et pas du prédictif.

Pour résumer, on a essayé de répondre à la question suivante. Quelles sont les propriétés émergentes de tout réseau complexe, et celles plus spécifiques d'Internet et du cerveau ? A

⁵⁰ On pourra se reporter à Vespignani *et al.* (2005, p155) pour des références sur des travaux tentants de trouver des signatures topologiques des différentes communautés sur le web.

⁵¹ Voir par exemple le tableau récapitulatif de Dorogovtsev *et al.* (2003, p80-81).

cette question, nous devons reconnaître que nous n'avons pas trouvé –au niveau des réseaux eux-mêmes– de propriété structurelle qui soit partagée uniquement par Internet physique et le cerveau, ou par le web et le cerveau⁵². Les propriétés communes trouvées sont certes intéressantes, mais commune à beaucoup de réseaux réels (les réseaux de connaissance des acteurs d'Hollywood; métaboliques; protéiques, etc...)⁵³.

Si cette comparaison quantitative reste donc limitée pour les différentes raisons ci-dessus, quelle sorte d'analogies pouvons-nous faire entre Internet et le cerveau ? A quoi peuvent-elles servir ? C'est ce que nous allons maintenant explorer dans notre deuxième partie.

⁵² Peut-être qu'avec plus de données sur le cerveau, il sera possible de tirer plus de conclusions ...

⁵³ Voir Newman (2003, p10) et toujours Dorogovtsev *et al.* (2003, p80-81).

[...] l'analogie est vraiment un outil indispensable et inévitable pour le progrès scientifique.

Oppenheimer (1956, 129b).

2. Etude de l'analogie

Après la leçon de notre discussion ci-dessus [1.3, p14] nous pouvons supposer qu'il serait plus intéressant de comparer nos réseaux sous un angle autre que purement quantitatif et structurel. Avant de faire cela, nous allons voir plus en détails ce qu'est une bonne analogie [2.1, p16], ce qui nous permettra d'examiner les deux sens possibles de l'analogie ([2.2, p18] et [2.3, p20]).

2.1. Qu'est-ce qu'une bonne analogie ?

Nous suivrons ici principalement l'analyse de Gentner et Jeziorski (1993) qui permet de poser un cadre assez précis pour le raisonnement analogique.

On peut concevoir l'analogie comme un genre de similarité très sélective. C'est une similarité de relations (ou de structure), et non de surface⁵⁴. Par exemple, si l'on se demande en quoi un nuage et une éponge se ressemblent, on peut répondre des deux manières suivantes. La première est qu'ils sont tous deux ronds et pelucheux (similarité de surface) ; la seconde est qu'ils peuvent tous deux retenir de l'eau et la rejeter (similarité de structure)⁵⁵. Dans la similarité de structure, ce sont les similarités de relations qui importent, et non les ressemblances des objets eux-mêmes. Nous pouvons maintenant donner une définition plus précise.

Une analogie est une application de connaissances d'un domaine (la *base* ou la *source*) vers un autre domaine (la *cible* ou la *destination*) de telle sorte que le système de relations qui tient dans les objets de la base tient aussi dans les objets cibles.

Pour reprendre notre exemple, ce qui fait qu'il y a une analogie entre l'éponge et le nuage, c'est que tous deux partagent un même système de relations : pouvoir retenir et rejeter de l'eau.

Une question très importante et qui vient logiquement juste après la définition de l'analogie est, *qu'est-ce qu'une bonne analogie ?* Gentner et Jeziorski proposent six principes pour constituer une bonne analogie, qui sont les suivants⁵⁶.

1. La cohérence structurelle.

Les objets sont en correspondance biunivoque (ou bijection) et les relations sont préservées dans les prédicats.

⁵⁴ La distinction surface/structure est discutable, car elle dépend du niveau d'expertise. En effet, une personne experte dans un domaine verra immédiatement des relations qui lui apparaîtront comme étant de surface, alors qu'elles peuvent être de profondes relations structurelles. Voir par exemple Dunbar (1995, 7.4, p13) pour plus de détails.

⁵⁵ Cet exemple vient de Gentner et Jeziorski (1993, p477) et les deux réponses correspondent respectivement aux réponses d'enfants d'âge préscolaire d'une part, et un peu plus âgés d'autre part. Nous ne traiterons pas ici cet aspect de l'utilisation différente de l'analogie en fonction de l'âge, mais plus de détails sont donnés dans la référence ci-dessus.

⁵⁶ Gentner et Jeziorski (1993, p450).

2. *Concentration sur les relations.*

Le système relationnel est préservé, et la description des objets négligée. (Sur notre exemple, le fait que l'éponge et le nuage soient tous deux pelucheux n'est pas en soi pertinent.)

3. *Systématicité.*

Parmi plusieurs interprétations relationnelles, celle qui a la plus grande profondeur est préférée.

4. *Pas d'associations extérieures.*

Seuls les composants communs renforcent une analogie. D'autres associations (par exemple thématiques) ne contribuent pas à l'analogie.

5. *Pas d'analogies mixées.*

Il ne faut utiliser qu'une base. Si deux bases sont utilisées, elles doivent être cohérentes entre elles ; ou alors il faut étudier les analogies une à une.

6. *Une analogie n'est pas une causation.*

Que deux phénomènes soient analogues n'implique pas que l'un cause l'autre.

On peut illustrer l'utilisation de quelques-uns de ces principes avec les domaines qui nous concernent.

1. On ne peut pas espérer obtenir une cohérence structurelle parfaite, car les réseaux en considération sont trop grands (il n'y a donc pas de bijection). Même si l'on supposait que l'on pouvait avoir des mesures parfaites, il y aurait toujours des neurones et des pages web qui disparaissent et apparaissent. Selon cette définition d'une bonne analogie, on ne devrait donc pas parler d'analogie, mais seulement de métaphore. C'est pour cela que les propriétés à grande échelle (distance moyenne, clustering, etc...) sont les seules que nous puissions comparer facilement.

2. Dire par exemple qu'il existe une dimension fractale dans la distribution des connaissances (8 milliards de pages web utilisées -potentiellement- par 6 milliards de personnes à 100 milliards de neurones) n'apporte rien dans l'analogie du web et du cerveau.

5. Le problème de l'analogie mixée est plus délicat. On peut citer par exemple Tim Berners-Lee (1999, p222) qui dit :

L'analogie d'un cerveau planétaire est tentante, parce que le web et le cerveau impliquent tous deux un énorme nombre d'éléments - des neurones et des pages web- et une mixture de structure et d'aléatoire apparent. Cependant, un cerveau a une intelligence qui émerge à un niveau bien différent de ce dont peut être conscient un neurone⁵⁷. D'Arthur C. Clarke à Douglas Hofstadter, des écrivains ont contemplés une « propriété émergente » provenant de la masse de l'humanité et des ordinateurs. Mais rappelons-nous qu'un tel phénomène aurait son propre programme. Nous ne serions pas, en tant qu'individus, conscients de cela, encore moins capables de le contrôler, pas plus qu'un neurone contrôle le cerveau.

Outre le fond des questions soulevées par l'inventeur du web (sur lesquelles nous reviendrons dans notre troisième partie [3.3, p27]), une lecture attentive nous montre un glissement et une confusion entre deux analogies distinctes. Celle d'une page web avec un neurone (première phrase); et celle de [l'humanité et des ordinateurs] avec le cerveau.

En ce qui concerne les différentes bases de l'analogie, nous avons déjà évoqué un moyen pour rendre cohérentes les deux bases d'Internet que nous utilisons (Internet physique et le web) avec le cerveau, en considérant leurs réseaux physiques et virtuels [1.3, p14]. De plus, tout au long de ce travail, nous avons toujours essayé de préciser quelle analogie nous utilisons.

⁵⁷ Nous traduisons « be aware of » par « être conscient de ».

Pour revenir à la « bonne » analogie, la première question à se poser est donc, dans quel sens pouvons-nous exploiter l'analogie ? Quelle base et quelle destination faut-il choisir ? Nous allons explorer les deux sens, même si le premier [2.2, p18] a plus souvent été envisagé.

2.2. Du cerveau vers Internet

Si on utilise comme base le cerveau, et comme destination Internet, l'objectif est alors d'utiliser et de s'inspirer de nos connaissances sur le cerveau pour construire Internet de demain, ou un « cerveau planétaire ». L'objectif est alors technologique et peut aussi servir pour penser le développement de la société. Nous étudierons cet aspect plus en détails dans notre troisième partie.

Sous cet angle, laquelle des analogies entre web/cerveau et Internet physique/cerveau est la plus utile ? On peut imaginer que la compréhension de la distribution des informations dans le cerveau puisse nous inspirer pour faire des systèmes de communication plus efficaces sur Internet physique. Cependant, il nous semble que l'analogie web/connaissances stockées par le cerveau est peut-être plus intéressante que celle Internet physique/cerveau, car les règles de création de liens sont beaucoup proches pour le web et les connaissances du cerveau⁵⁸. Le web n'est pas soumis à des contraintes physiques. Lorsqu'un lien est créé, c'est parce qu'il est considéré comme pertinent ; de même notre cerveau nous permet de lier des connaissances de nature différentes, sans contraintes particulières (dont nous soyons conscients).

2.2.1. Analogie fonctionnelle

Nous avons vu dans notre première partie que la *structure* des réseaux que nous étudions ont quelques propriétés fondamentales en commun. Qu'en est-il des *fonctions* d'Internet et du cerveau ? Pour répondre à cette question, nous devons anticiper un peu sur notre troisième partie, et détailler un peu plus la vision de la société comme un organisme, dans laquelle Internet fait partie du système nerveux⁵⁹. Dans un organisme vivant, on peut distinguer deux sous-systèmes fondamentaux. D'une part, le système métabolique, responsable des traitements de matière et d'énergie; et d'autre part le système nerveux, responsable du traitement de l'information. Nous nous concentrons ici sur le système nerveux⁶⁰. Quelles sont les différentes fonctions d'un système nerveux, et quel est leur analogue dans la société ? James Miller (1978) a fait une analyse détaillée des systèmes vivants. Il a noté qu'ils sont tous composés de sous-systèmes qui transforment, absorbent et rejettent de la matière, de l'énergie ou de l'information. A partir de cette analyse, Heylighen (2000, p11) propose le tableau suivant, qui donne des exemples de fonctions du système nerveux chez l'animal et dans la société⁶¹ :

⁵⁸ Il ne faudrait cependant pas naïvement s'étonner de ce phénomène. Rappelons-nous pour cela que la création du web a été motivée par une analogie avec le cerveau. Voir notre Introduction.

⁵⁹ Pour cette section, nous nous appuyerons principalement sur Heylighen (2000). Cet article utilise les concepts et méthodes des systèmes adaptatifs complexes, de la cybernétique et de la théorie des systèmes pour tenter de modéliser la société. Précisons que l'approche n'est pas tant de savoir « si la société humaine est un superorganisme au sens strict, mais [de voir] jusqu'où il est utile de modéliser la société *comme si elle était* un organisme ». Heylighen (2000, p3). Nous pensons qu'une telle vision permet de mieux comprendre et anticiper les changements de la société (plus par exemple qu'en considérant l'hypothèse souvent faite en sciences sociales d'individualisme méthodologique).

⁶⁰ Voir Heylighen (2000, section 3, p6-9) pour une description du système métabolique.

⁶¹ Russell (1982, p29-30) propose un tableau comparable, mais ne distingue pas explicitement les fonctions du système métabolique et du système nerveux.

<i>Fonction</i>	<i>Animal</i>	<i>Société</i>
<i>Détecteur</i>	Organes sensoriels	Reporters, chercheurs, télescopes...
<i>Décodeur</i>	Perception	Experts, politiciens, opinion publique,...
<i>Canal et réseau</i>	Nerfs, neurones	Médias de communication
<i>Associateur</i>	Apprentissage synaptique	Découverte scientifique, apprentissage social, ...
<i>Mémoire</i>	Mémoire neuronale	Bibliothèques, écoles, connaissances collectives, ...
<i>Décideur</i>	Fonctions cognitives élevées	Gouvernements, marché, voteurs, ...
<i>Effecteur</i>	Nerfs activant des muscles	Organes exécutifs

Fonctions du système nerveux (traitement de l'information) chez les animaux et dans la société.
D'après Heylighen (2000, p11).

Le *détecteur* permet de signaler des dangers, des problèmes (par rapport à un but); ou encore des ressources ou outils permettant d'accomplir un but. Notons que ces informations peuvent être internes (provenant de l'intérieur du système) ou externes (provenant de l'extérieur). Chez l'animal, cette fonction est accomplie par les organes sensoriels (yeux, oreilles, nez, langue, cellules sensibles au toucher; ainsi que les récepteurs internes comme les chimiorécepteurs des hormones, etc...). Dans la société, la liste des détecteurs est aussi importante : reporters, chercheurs, et aussi des détecteurs comme les instruments que sont les télescopes, sismographes, thermomètres, etc...

Le *décodeur* permet de transformer des stimuli reçus par les détecteurs en information compréhensible et utile. Le *décideur* utilise ensuite cette information décodée pour sélectionner une action par rapport à l'état de l'environnement perçu. Chez les animaux, les fonctions de décodeur et de décideur sont accomplies par le cerveau. Il n'y a pas de centralisation claire dans le cas de la société (même si les institutions politiques, commerciales ou scientifiques jouent un rôle primordial), où par exemple le marché peut décider quelles matières premières vont être produites.

Il faut ensuite implémenter la décision, et la rendre effective. C'est le rôle de l'*effecteur*, qui doit mettre en oeuvre et exécuter l'information du décideur. Chez l'animal, ce sont les neurones moteurs qui activent les muscles; dans la société, ce sont les organes exécutifs⁶² (comme les gouvernements, ingénieurs, conducteurs, ou des machines) qui remplissent ce rôle.

La fonction « *canal et réseau* » [channel and net] est responsable de la communication des informations entre les différents sous-systèmes (par exemple entre le détecteur, le décodeur et l'effecteur). Dans le corps, cette fonction est assurée par les nerfs; et dans la société par le téléphone, la poste ou Internet.

La *mémoire* permet de stocker de l'information d'interactions précédentes pour des décisions futures. Cette fonction de mémoire est sélective (i.e. tout n'est pas stocké) pour améliorer les nouvelles prises de décisions. La fonction qui permet cette sélection d'informations est l'*associateur*. Chez les animaux, la mémoire et l'associateur sont répartis dans les neurones; dans la société, la mémoire se trouve dans les documents écrits (bibliothèques et bases de données), et la fonction d'association se fait par les universitaires, les scientifiques, les archivistes...

⁶² Il est amusant de noter que l'expression « organe exécutif » contient le mot organe, et fait donc référence à l'analogie organique de la société.

Remarquons que seules les fonctions de mémoire et de « canal et réseau » sont véritablement implantées sur Internet. Heylighen et Bollen (1996) et Goertzel (2001) sont les premiers travaux qui ont essayé d'étendre ces fonctions, pour rendre le réseau Internet comme un réseau neuronal, notamment en développement des algorithmes d'apprentissage sur le web (i.e. la fonction associeur)⁶³. Aussi, remarquons que pour rendre cette analogie fonctionnelle cohérente, nous avons dû sortir du cadre de l'analogie du cerveau et d'Internet, pour passer à l'analogie plus large du système nerveux et de la société.

2.3. D'Internet vers le cerveau

Si on prend comme base Internet, et comme destination le cerveau, l'objectif est alors différent, puisque scientifique (comprendre le cerveau). Insistons ici sur le fait que ce qui est présenté dans cette section est différent du cerveau planétaire, tel que nous l'avons défini en introduction. L'approche est guidée par la question suivante. Comment l'étude d'Internet physique et du web peut-elle nous aider à comprendre le cerveau ?

2.3.1. Simuler un cerveau

Une idée simple consiste à utiliser toute la puissance de calcul offerte par ce grand réseau d'ordinateurs, pour simuler un cerveau. Est-ce que la puissance de calcul disponible par les ordinateurs connectés entre eux est comparable à celle d'un cerveau humain ? Avant de pouvoir répondre à cette question, un premier problème est de trouver un moyen de comparer les processus de calcul d'un ordinateur et du cerveau. Une proposition est d'utiliser le nombre d'opérations de synapses par seconde. Comme il y a environ 10^{15} synapses qui opèrent à 10 impulsions par seconde, cela fait environ 10^{16} opérations de synapses par seconde⁶⁴. Selon Delahaye (2003, p24) la puissance cumulée de tous les ordinateurs en 2003 était de 10^{18} instructions par seconde⁶⁵. Nous atteignons donc aujourd'hui, en cumulant une très grande partie de notre technologie, la puissance de calcul d'un seul cerveau humain.

Peut-on utiliser cette puissance de calcul brute pour simuler un cerveau humain ? Le défi est d'envergure, mais ne semble pas inatteignable. Le plus bel exemple de réussite de calcul distribué est le projet SETI@Home (Search for Extra Terrestrial Intelligence). Ce projet a pour but de pouvoir faire participer n'importe quel utilisateur muni d'un ordinateur et d'une connexion Internet, pour décoder les signaux -intelligents ?- captés par des radiotélescopes. En 2004, il y avait 4,7 millions d'utilisateurs, atteignant la puissance de calcul de 10^{14} opérations par seconde (60 Teraflops)⁶⁶.

Cependant, deux limitations -constituant des défis technique et scientifique- se posent tout de même.

D'une part, il faut souligner que des calculs comme ceux effectués pour SETI (i.e. des problèmes d'analyse de données), sont tolérants à une certaine latence. L'utilisation d'hôtes

⁶³ Nous y reviendrons dans notre troisième partie [3.2, p25].

⁶⁴ Merkle (1989). Kurzweil (1999, chap6) arrive au même ordre de grandeur. En considérant une complexité interne des neurones plus grande, on peut cependant élever ce nombre à 10^{19} instructions par seconde (Delahaye (2003, p27)).

⁶⁵ Elle est du même ordre de grandeur pour Internet physique aujourd'hui (ou très bientôt), en faisant le calcul suivant. On considère que les ordinateurs connectés ont des processeurs cadencés en moyenne à 1Ghz, soit 4×10^9 instructions par seconde. Nous avons vu qu'il y a environ 280 millions d'ordinateurs connectés [1.1.2, p10], ce qui fait donc une puissance cumulée de $(4 \times 10^9) \times (2,8 \times 10^8) \approx 1,12 \times 10^{18}$ instructions par seconde.

⁶⁶ Durkin (2004).

distribués qui peuvent se déconnecter à tout moment pour faire ces calculs ne pose donc pas de problème particulier. Ce qui est moins le cas pour une simulation d'un cerveau, où les calculs nécessitent une synchronisation qui est essentielle. Etant donné le développement des technologies de grille [grid technologies] (voir glossaire), et l'accélération de la vitesse des connexions sur Internet physique, on peut raisonnablement espérer que cette limitation est surmontable. Cependant, si cette coordination de la puissance de calcul devait échouer pour une raison ou une autre, notons que selon les estimations de Kurzweil (1999, chap6) et Moravec (1998), en 2020 environ la puissance d'un ordinateur personnel sera équivalente à celle d'un cerveau.

D'autre part, il serait très naïf de croire que la puissance de calcul suffise pour commencer des simulations du cerveau. Le défi le plus important se situe dans la partie *logiciel*, pour exploiter ce potentiel de calcul. C'est-à-dire d'essayer de décoder les algorithmes utilisés par le cerveau, et de les implémenter sur nos ordinateurs.

2.3.2. Le cerveau comme un graphe orienté

L'étude du web a permis de constater que les très grands graphes orientés se scindent en différentes composantes (Broder *et al.* (1999)). Nous avons détaillé cette structure des composantes –qui ressemble un peu à un nœud de papillon– dans l'annexe. Une idée originale proposée ici est d'essayer d'interpréter les fonctions des réseaux neuronaux en tenant compte de cette division. Bien sûr, cela implique de faire beaucoup d'hypothèses, à commencer par la modélisation du cerveau comme un graphe orienté⁶⁷. Ce qui suit n'est donc qu'un essai d'interprétation, à prendre avec toutes les précautions nécessaires. Nous nous concentrerons sur un début d'analyse de la mémoire déclarative⁶⁸. Nous devons faire une seconde hypothèse, d'un cœur dynamique [dynamical core], substrat neuronal contribuant à la conscience (Tononi et Edelman (1998)). Qu'est-ce que ce cœur dynamique ?

Le cœur dynamique est un cluster fonctionnel : ses groupes neuronaux participants sont beaucoup plus fortement interactifs entre eux qu'avec le reste du cerveau.⁶⁹

Ce qui nous amène à notre troisième hypothèse, qui consiste à identifier la CFCG à ce cœur dynamique. Cette identification est simplement motivée par le fait que le CFCG est fortement connexe (par définition) et que le cœur dynamique semble aussi l'être. Par conséquent, *aucune* autre zone n'est impliquée dans la conscience, à un instant t donné. Nous interprétons $G+$ comme la mémoire potentiellement accessible à la conscience à l'instant t ; et $G-$ comme un prétraitement de ce qui arrive à la conscience. Considérons à présent les différentes activations possibles des différentes zones, avec leurs interprétations.

Tout d'abord, depuis la composante $G-$, il y a cinq possibilités d'activations de réseaux de neurones.

- 1) *Une activation dans $G-$* pourrait correspondre à une perception inconsciente, éventuellement aussi avec une action opérée inconsciemment. Notons que cela pourrait aussi correspondre à une forme de mémoire non déclarative.
- 2) *Une activation dans $G-$ qui se prolonge dans CFCG* correspondrait à une perception consciente, filtrée au préalable –inconsciemment– par des réseaux de $G-$.
- 3) *Une activation dans $G-$ qui se prolonge dans CFCG, puis dans $G+$* correspondrait à une perception consciente, filtrée au préalable –inconsciemment– par des réseaux de $G-$, puis

⁶⁷ Sporns *et al.* (2002) -entre autres- font aussi cette hypothèse. Un modèle un peu plus réaliste pourrait être constitué en considérant un graphe orienté et valué, pour tenir compte des poids synaptiques.

⁶⁸ La mémoire déclarative, ou mémoire explicite, nécessite des efforts conscients et correspond au stockage de faits et d'événements. Elle s'oppose à la mémoire procédurale ou implicite, qui elle, résulte de l'expérience.

⁶⁹ Tononi et Edelman (1998, p1849c).

stocké en mémoire (à court ou à long terme), ou bien faisant ensuite appel à un élément de mémoire.

4) *Une activation dans G- qui se prolonge directement dans G+*. Cette activation passerait par le « tube » et pourrait correspondre à l'enregistrement inconscient d'une perception. Ou encore, cela pourrait affecter ce qui va être appelé en mémoire consciemment, en activant à l'avance certaines assemblées de neurones dans G+, et les rendant ainsi plus facilement accessibles à la conscience.

5) Nous ne proposons pas d'interprétation pour un réseau qui se terminerait dans une vrille de G- (hors tube).

Ensuite, depuis la CFCG, il y a trois possibilités.

1) *Une activation dans CFCG*. Nous suggérons simplement que c'est un état conscient.

2) *Une activation dans CFCG qui se prolonge dans G+*. Comme nous l'avons déjà suggéré, cela pourrait être un appel ou un stockage en mémoire.

3) *Une activation dans CFCG qui se prolonge dans G+ et se termine dans une vrille*. Pas d'interprétation.

Enfin, depuis la G+, il n'y a que deux possibilités.

1) *Une activation dans G+*. La mémoire s'organise (?).

2) *Depuis une vrille, vers G+*. Pas d'interprétation.

Il nous reste les îles que l'on peut interpréter comme des souvenirs non accessibles⁷⁰. Ils pourraient le devenir si un lien arrive jusqu'à eux, depuis CFCG, ou indirectement depuis G+.

Quelle est la proportion de neurones impliqués dans l'inconscient ? Le web (le plus grand réseau dirigé connu), a environ la moitié de ses pages dans les composantes CFCG (28%) et G+ (21%). Les composantes G- (21%), vrilles (21%) et îles (9%) forment l'autre moitié⁷¹. Si nous faisons l'analogie du web avec le cerveau, environ 50% de nos neurones contribueraient à du traitement inconscient. Inutile de préciser que cette conclusion n'en n'est pas une, mais peut-être que cela peut donner un ordre de grandeur⁷².

Quelles critiques peut-on faire à cette approche ? Tout d'abord, on sait que le cerveau est organisé en modules, et peut-être faudrait-il considérer plusieurs structures de graphes orientés, et non pas une seule. Notons en passant que cela remettrait en question la plausibilité d'un cœur dynamique unique.

Ensuite, cette structure théorique est fixe, ce qui n'est pas le cas des réseaux neuronaux. Il faudrait donc comprendre la dynamique de cette structure. Par exemple, le cœur dynamique, est –comme son nom l'indique– pas stable dans le temps. Ainsi, « le même groupe de neurones pourrait à certains moments faire partie du cœur dynamique et être à la base de l'expérience consciente, tandis qu'à d'autres moments il n'y ferait pas partie et serait donc impliqué dans des processus inconscients. »⁷³

Enfin, une critique plus sérieuse est la suivante⁷⁴. Dans notre interprétation, peut-on distinguer le CFCG du G+ dans le cerveau ? Probablement non, car un appel en mémoire nécessite aussi un retour à la conscience (et donc au CFCG, ce qui est pourtant impossible

⁷⁰ Ce qui est différent de ne pas pouvoir rendre la mémoire consciente (par exemple dans l'amnésie posthypnotique). Dans notre interprétation cela voudrait dire que le sujet ne trouve pas de chemin de CFCG au souvenir cherché dans G+.

⁷¹ Broder *et al.* (2000).

⁷² Le lecteur attentif se souviendra du principe 6 d'une bonne analogie. Voir plus haut [2.1, p16].

⁷³ Tonioni et Edelman (1998, p1850a).

⁷⁴ Merci à Adrien Peyrache de me l'avoir signalée.

d'après la structure). On peut tout de même essayer de garder les idées de notre première interprétation, en faisant l'hypothèse que G+ est inexistant. Il faut alors se concentrer davantage sur les *structures d'activation* de la CFCG.

Soit C le sous ensemble de neurones de la CFCG qui est activé pendant un état conscient (qui peut donc changer au cours du temps). L'ensemble complémentaire $M=CFCG-C$ est donc l'ensemble des neurones pouvant donner lieu à un état conscient. Cette nouvelle interprétation permet de rendre compte du changement d'état de la conscience, en fonction des appels en mémoire. Si je me rappelle un événement A (inclu dans M) C s'étend pour englober A. On peut aussi retrouver « l'effet tube » que nous avons dans la première interprétation. Imaginons pour cela une activation allant de G- à un événement A inclu dans M. Cette activation ne passe pas par la conscience (c'est-à-dire pas par C) mais peut influencer une future extension de C pour englober A. Nous rendons ainsi justice de manière plus souple à l'aspect dynamique du coeur dynamique.

Cette seconde interprétation peut paraître un peu *ad hoc*. Toutefois, ce qu'il y a d'intéressant dans ces interprétations, c'est que différents types de processus inconscients apparaissent naturellement, de par la structure même des réseaux neuronaux (ou de leur structure d'activation)⁷⁵. Ces interprétations restent bien entendu assez spéculatives, mais nous pensons qu'explorer dans cette direction pourrait aider à construire des modèles intéressants, notamment si plus de données sur les neurones et leurs connexions venaient à être disponibles. Voir les réseaux de neurones du cerveau sous cet angle permet de poser des questions nouvelles. Nous avons vu par exemple que de notre première interprétation à la deuxième, nous avons supprimé l'existence de la composante G+. Plus généralement, quelle est la proportion des différentes composantes du graphe du cerveau ? Ces différentes composantes jouent-elles vraiment un rôle, comme je l'ai suggéré ? Si oui, lequel ?

Cependant, nous nous proposons maintenant d'aller plus loin dans l'interprétation générale de notre analogie, en reconsidérant plus en détails le sens du « cerveau vers Internet » qui conduit au concept de cerveau planétaire. Pour cela, nous relâcherons notre exigence d'analogie entre Internet et le cerveau, pour passer à un stade plus métaphorique.

⁷⁵ Comme par exemple une action effectuée inconsciemment, correspondant à une activation dans G-; un accès à la mémoire influencé au préalable par une perception inconsciente, correspondant à l'utilisation d'un « tube ».

[...] j'ai opté pour la métaphore du « cerveau planétaire » comme la vision la plus satisfaisante d'un futur positif, toutefois réaliste pour l'humanité.

Heylighen (2002, p2)

3.L'utopie du cerveau planétaire

Dans cette partie, nous dépassons le stade de l'analogie rigoureuse pour nous laisser guider vers la métaphore du cerveau planétaire⁷⁶. Nous verrons tout d'abord en quoi elle permet d'aborder le futur de la société [3.1, p24]. Ensuite nous passerons en revue les bénéfices que l'on peut attendre du cerveau planétaire [3.2, p25], ainsi que les dangers à craindre ou non [3.3, p27]. Enfin, nous examinerons les questions plus spéculatives de la place générale d'un tel cerveau planétaire dans l'histoire de l'évolution [3.4, p29] et si une nouvelle forme de conscience va ou peut apparaître [3.5, p30].

3.1.Une métaphore pour aborder le futur de la société.

Dans les pays développés, une transformation est train d'opérer vers ce que l'on nomme la société de l'information. Comme beaucoup de phénomènes humains, celui-ci est complexe et a de nombreuses facettes. Fleissner et Hofkirchner (1998) distinguent trois méthodes d'analyse pour aborder la diffusion des technologies. Premièrement, l'analyse basée sur la technologie; ensuite l'angle politico-économique (l'influence économique); et enfin l'analyse socio-psychologique (l'influence des communautés). La première approche permet d'analyser l'impact des nouvelles technologies sur la vie sociale, les styles de vie, l'éducation, le droit, etc... La seconde approche tente de repérer les acteurs principaux de cette nouvelle configuration de la société, en anticipant les nouveaux marchés. La troisième approche se situe à un niveau plus « micro », et pose la question du pouvoir. Est-ce que les changements vont changer les processus de décisions (plus d'égalité et de démocratie ?), donner plus de pouvoir aux hommes, permettre plus d'intégration ?

La métaphore du cerveau planétaire n'est pas la seule existante pour qualifier la société de l'information. En effet, « des termes comme 'Village Global', 'Télétravail', 'Autoroutes de l'Information', 'Cerveau Planétaire' ne sont que quelques exemples (postmodernes) de la rhétorique (voulue ou non) des principaux groupes sociaux pour influencer le public aussi bien que le discours scientifique et de contrôler son résultat »⁷⁷. Derrière ces termes se cachent donc des utopies, des visions, qui orientent la pensée et l'action vers certains buts. Le cerveau planétaire est donc aussi une représentation sociale. Ces métaphores ont un rôle de guide (ou 'Leitbilder' en allemand). Peut-on, et surtout faut-il démonter ces mythes ? La possibilité de les démonter est certaine, il « suffit » d'opérer une analyse critique⁷⁸. Quant à savoir s'il faut garder ou non ces représentations, nous pensons qu'il est important de les garder, précisément

⁷⁶ Voir le glossaire pour sa définition.

⁷⁷ Fleissner et Hofkirchner (1998, 204a).

⁷⁸ Par exemple, d'une manière assez originale, Fleissner et Hofkirchner (1998, 204-205) voient dans de telles métaphores des liens avec des croyances judéo-chrétiennes.

parce qu'elles sont des 'Leitbilder'. A condition bien sûr de rester vigilant, comme l'exergue de notre étude nous y invite.

D'une manière plus concrète, le rôle d'une utopie est d'apporter des valeurs et des buts communs, pour motiver les gens à travailler à un projet commun, et ainsi donner un sens à leur vie⁷⁹. Soutenir une utopie n'est cependant pas facile, car cela implique de satisfaire deux contraintes assez antinomiques. Il s'agit, d'une part, de rendre compte d'une complexité réaliste; et d'autre part d'offrir un aspect attrayant. Heylighen (2002) soutient que la métaphore du cerveau planétaire permet effectivement de satisfaire ces deux contraintes.

Quels sont les bénéfices mais aussi les dangers relatifs à une telle utopie ? C'est ce que nous nous proposons d'examiner maintenant⁸⁰.

3.2. Bénéfices

Quels bénéfices peut-on attendre d'un cerveau planétaire ? Qu'est-ce qu'il pourra faire ?

On peut espérer que le cerveau planétaire pourra aider à éliminer les conflits et les crises. Mayer-Kress (1995, section 3, p17-21) suggère un modèle de traitement de l'information analogue à celui du cerveau pour la modélisation des conflits et des crises. C'est-à-dire un modèle capable de s'adapter rapidement à un environnement complexe et changeant continuellement. Le cerveau planétaire permettant d'obtenir et de mettre à jour des données facilement pour alimenter le modèle.

Le fait que tous les pays puissent se connecter et communiquer permettra de réduire l'ignorance, et de discuter les différences d'opinions. L'interdépendance des différents pays stimule aussi la collaboration, et complique les guerres⁸¹. Bien sûr, l'aspect technologique du cerveau planétaire n'est qu'une plateforme pour résoudre les problèmes, et en dernière instance, il revient toujours aux hommes de se mettre d'accord⁸².

Le cerveau planétaire peut aussi faciliter l'économie. Une « nouvelle économie » s'est en effet développée avec Internet, et les sites commerciaux représentent une partie importante du web. Au niveau des marchés, Internet permet aux transactions d'être opérées plus facilement, avec moins de coût et d'effort humain. La demande peut donc être satisfaite plus rapidement. En optimisant les processus de décision du côté de l'acheteur et du côté du vendeur, la croissance devrait augmenter, et l'inflation et l'instabilité économique diminuer⁸³.

Est-ce que le cerveau planétaire peut aider à aborder le problème de la surcharge d'information ? Non seulement il le peut, mais il le doit. Souvenons nous que la science bibliographique a été inventée pour aborder ce problème⁸⁴. Aujourd'hui ce sont les sciences de l'information qui s'y attaquent. Sur le web, le développement du web sémantique⁸⁵ va permettre de plus en plus de traitement automatique des données. Cette approche très en vogue actuellement est fondée sur un parallèle entre un web sémantique, où des agents

⁷⁹ Heylighen (2002, p1).

⁸⁰ Nous parlerons parfois du cerveau planétaire comme s'il existait déjà, sans beaucoup de précaution. Nous supposons donc que le développement d'Internet aujourd'hui est une forme primitive de ce qui pourra porter le nom de cerveau planétaire.

⁸¹ Heylighen (2002, p8).

⁸² Même si, encore une fois, la technologie peut aider à anticiper des problèmes. Par exemple dans le cas d'une épidémie, des informations fiable et rapide à son sujet sont un élément clé pour y faire face.

⁸³ Heylighen (2002, p8).

⁸⁴ Voir l'approche encyclopédique de notre historique du cerveau planétaire dans notre introduction.

⁸⁵ Voir le glossaire.

-artificiels- peuvent retrouver de l'information sur le web, et la sémantique des connaissances dans le cerveau, qui permet d'organiser les connaissances.

Un défi assez proche consiste à essayer de créer une intelligence collective. En quoi le cerveau planétaire diffère d'autres systèmes d'intelligence collective ? Pour répondre à cette question, rappelons tout d'abord ce qu'est l'intelligence collective. On parle d'intelligence collective lorsqu'un groupe d'individus (des hommes, des robots, ou des insectes) peut être intelligent d'une manière dont aucun de ses membres ne l'est⁸⁶. L'exemple paradigmatique de cette forme d'intelligence se trouve chez les insectes sociaux (principalement les fourmis, les abeilles et les termites). Chaque individu est très limité, mais pourtant on sait que leurs nids sont d'une complexité parfois à peine croyable. Un autre exemple d'intelligence collective -cette fois artificiel, mais basé sur le fonctionnement des insectes sociaux- se situe dans la fonctionnalité « Les internautes ayant acheté ce livre ont également acheté : ... » de la librairie virtuelle amazon.com⁸⁷. L'intelligence collective est donc possible lorsque des individus déposent des informations directement utiles pour le groupe. Ce n'est bien sûr généralement pas le cas pour les interactions entre être humains, où chacun a des idées complexes. Faire émerger de l'intelligence collective à partir d'éléments intelligents n'a en fait rien d'évident. Il n'y a qu'à penser par exemple aux difficultés de tenir une assemblée générale « intelligente » ...⁸⁸

Heylighen et Bollen (1996) ont proposé de faire un web capable d'apprentissage⁸⁹. Cette approche est bien sûr fortement motivée par l'analogie avec le cerveau et plus précisément le développement de la fonction associateur que nous avons vu plus haut⁹⁰. Tous deux sont capables d'apprentissage en fonction de la force de leur activation. On peut cependant discuter cette approche à un niveau plus global, pour tout le web. Est-ce la bonne méthode pour créer un web intelligent ? Même si la réponse est oui, il faudrait une analyse fine de la façon dont les gens naviguent. Naviguent-ils avec des signets ? Pourquoi vont-ils taper un mot clé à tel moment ? Poursuivent-ils plusieurs objectifs de recherche d'information en même temps ? Peut-être que d'autres idées plus simples, inspirée du « collaborative filtering »⁹¹ (comme le partage de signets) pourraient être une solution alternative pour créer un début d'intelligence collective. La difficulté étant de trouver la bonne ressource à partager.

Une autre approche pour rendre Internet « intelligent » est le projet de « World-Wide-Mind » proposé par Mark Humphrys (2001). Inspiré par le très bel ouvrage de Minsky (1988) il soutient que pour faire une véritable société de l'esprit, il faut essayer de construire un réseau de programmes d'intelligence artificielle, plutôt qu'un simple réseau de pages et de liens. Ce projet serait donc indépendant du web, et aboutirait dans la création d'un nouveau réseau virtuel d'Internet, servant à résoudre des problèmes.

Enfin, un autre bénéfice très attendu est l'accès universel aux connaissances. Achever cet objectif est techniquement tout à fait faisable, et fait partie de la vision encyclopédique du cerveau planétaire. Par exemple, de grands efforts sont en cours pour rendre la littérature scientifique libre d'accès, avec le mouvement « open access »⁹².

⁸⁶ Heylighen (1999, p1).

⁸⁷ Voir par exemple Clark (2003, chapitre 6) pour plus de détails sur le fonctionnement de l'intelligence collective (ou en essaim) sur amazon.

⁸⁸ Voir aussi Heylighen (1999, p2-3).

⁸⁹ Ils ne se sont pas contentés de la théorie, et ont implanté leur système dans le site <http://pespmc1.vub.ac.be/> qui est capable de créer des nouveaux liens en fonction de la navigation des visiteurs.

⁹⁰ Voir [2.2.1, p18].

⁹¹ Voir le glossaire.

⁹² Rendre disponible un article en ligne gratuitement avantage bien évidemment le lecteur, mais aussi l'auteur, qui est alors beaucoup plus lu et donc cité. Voir l'analyse (et preuve) de Harnad et Brody (2004).

D'une manière générale, la globalisation des échanges permet moins de friction, car la technologie lubrifie les mécanismes de la société. Mais, pour reprendre la métaphore entre la glace et l'asphalte de Heylighen (2002, section 5.5, p18) « on peut atteindre des vitesses élevées et les maintenir pendant un temps plus long lorsqu'on patine que lorsqu'on court. Cependant, marcher sur la glace est bien plus dur et potentiellement dangereux que de marcher sur de l'asphalte: une fois qu'on commence à glisser il n'y a presque rien pour arrêter le mouvement qui ne peut plus être maîtrisé ». Sommes nous comme sur de la glace, avec tous ces changements dans la société ? Quels sont les dangers d'un cerveau planétaire ? Est-ce que cette utopie peut tourner en une contre-utopie, qui échapperait à notre contrôle ?

3.3.Dangers

Nous avons déjà vu⁹³ que la vision métaphorique de la société comme un organisme pouvait servir d'instrument politique, en permettant de soutenir un *status quo*. A cela nous pouvons répondre que c'est toujours à nous, citoyens et politiciens de fixer nos objectifs, et que le cerveau planétaire n'implique pas une quelconque fatalité. Une autre crainte de nature politique se traduit par les questions suivantes. Est-ce que le cerveau planétaire peut réduire notre liberté ? Ou promouvoir un contrôle totalitaire ? Pour répondre à ces questions, nous devons rappeler deux mécanismes agissant dans les systèmes complexes (et donc aussi dans la société). Ce sont la *différentiation* et l'*intégration*⁹⁴. La différenciation d'un système crée des sous-unités toujours plus spécialisées. Dans la société, elle est engendrée par toujours plus de spécialisation des hommes et des entreprises. Mais ces sous-unités ont alors perdu des capacités en se spécialisant, qu'elles peuvent compenser par plus de cohésion et d'intégration. Pour illustrer l'intégration dans la société, pensons au fait qu'il est de plus en plus difficile pour des groupes ou des pays de ne pas participer à l'économie ou la politique globale⁹⁵. Cette intégration globale crée une dépendance mutuelle des organisations, et diminue donc les chances que l'une domine les autres. Un contrôle totalitaire paraît donc difficile à mettre en place. Selon Heylighen (2000, p27), la différenciation « ouvre toujours plus de possibilités pour un individu de choisir un rôle, une éducation ou une occupation ». Le cerveau planétaire ouvrirait donc aussi nos libertés.

Une crainte assez proche vient de l'analogie avec l'intelligence collective des insectes, qui pensent et agissent tous de la même manière. Est-ce que notre intégration dans le cerveau planétaire ferait de nous l'analogue d'insectes sociaux ? La réponse est bien sûr négative, car il n'existe pas de contact direct entre les cerveaux des insectes; et ils ne créent pas de nouveaux modèles de la réalité⁹⁶. Notre richesse vient de nos différences cognitives qui nous permettent d'aborder des problèmes plus complexes⁹⁷.

Un danger sans doute plus réaliste concerne l'intimité [privacy]. Pour reprendre la contre-utopie du roman *1984* de Orwell (1948), le cerveau planétaire serait-il en train de devenir notre « Big Brother » ? Il est évident que la numérisation croissante de nos informations les plus confidentielles doit nous encourager à adopter des politiques d'intimité, de diffusion et de divulgation de l'information strictes⁹⁸.

⁹³ Voir l'introduction, historique du cerveau planétaire, approche organisme.

⁹⁴ La combinaison des deux produit la *complexification*.

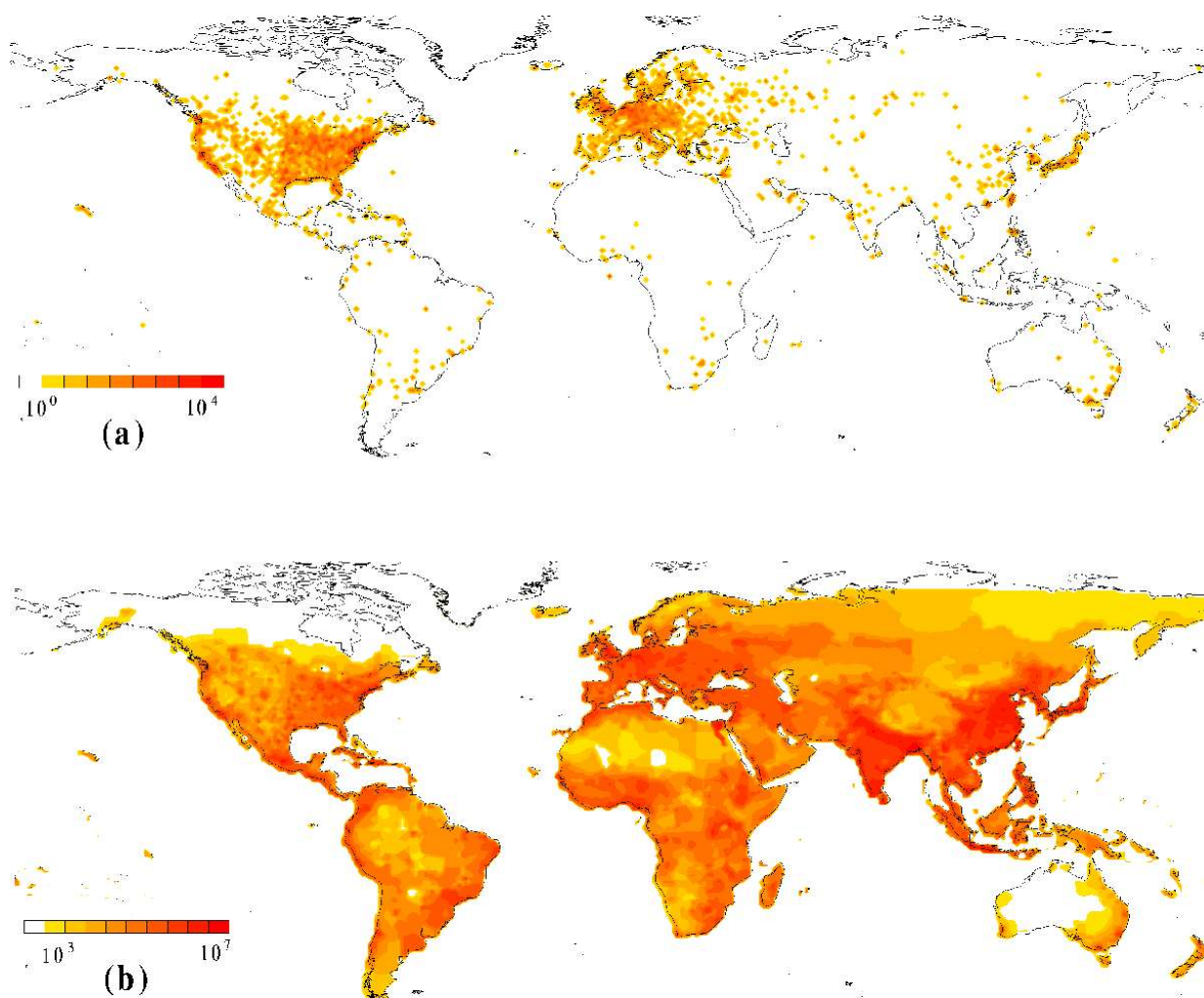
⁹⁵ Heylighen (2000, section 5.3, p15).

⁹⁶ Turchin (1977, p82).

⁹⁷ Heylighen (2002, p9). Voir aussi Dunbar (1995) qui remarque que les laboratoires de scientifiques dont les chercheurs ont un parcours peu semblables entre eux sont plus productifs.

⁹⁸ Même si « l'autonomie croissante réduit le besoin de contrôle rigoureux ou d'observation des activités des individus. » Heylighen (2000, p27).

Une autre inquiétude concerne l'étendue du cerveau planétaire. Est-ce que tout le monde pourra faire partie du cerveau planétaire ? Est-ce que toute la planète sera connectée ? Dès aujourd'hui, on peut sérieusement s'interroger sur ces questions, par exemple en regardant l'inquiétante comparaison de la densité des routeurs, et la densité de la population, dans la figure ci-dessous.



(a) Densité des routeurs (b) Densité de la population. D'après Yook *et al.* (2002).⁹⁹

En regardant ces deux cartes, on constate que seuls les pays développés profitent d'Internet. Cependant, les technologies relatives à Internet sont très peu chères, comparées à d'autres infrastructures plus lourdes (routes, électricité, ...) et les bénéfices qu'elles peuvent apporter. Par exemple, il suffit de penser à la possibilité d'une bibliothèque numérique, dans la perspective de la réalisation totale de l'« open-access », pour les revues et pour les livres. Le

⁹⁹ La légende de l'article original est la suivante : (a) Worldwide router density map obtained using NetGeo tool (<http://www.caida.org/tools/utilities/netgeo>) to identify the geographical location of 228,265 routers mapped out by the extensive router level mapping effort of Govindan and Tangmunarunkit20. (b) Population density map based on the CIESIN's population data (<http://sedac.ciesin.org/plue/gpw>). Both maps are shown using a box resolution of $1^\circ \times 1^\circ$. The bar next to each map gives the range of values encoded by the color code, indicating that the highest population density within this resolution is of the order 10^7 people/box, while the highest router density is of the order of 10^4 routers/box. Note that while in economically developed nations there are visibly strong correlations between population and router density, in the rest of the world Internet access is sparse, limited to urban areas characterized by population density peaks.

coût d'une telle bibliothèque deviendrait dérisoire en comparaison avec une bibliothèque classique.

On peut aussi se poser la question de l'apparition de plusieurs « cerveaux planétaires ». Heylighen (2000, p30-31) distingue trois raisons pour lesquelles ce phénomène a peu de chance d'apparaître. La première raison tient au fait que s'isoler engendre la perte de beaucoup d'avantages (ressources, produits, services, informations ...). Au niveau d'un pays, cela ralentirait considérablement son développement. La seconde raison vient de l'uniformisation des standards qui se fait rapidement dans le cadre d'une communication globale. La dernière raison est qu'il existe au travers des différentes cultures un socle de valeurs politiques et éthiques. Par exemple, dans toutes les cultures on accorde de l'importance aux valeurs que sont la santé, la richesse, l'amitié, la connaissance, l'honnêteté, etc...; et on condamne le meurtre, le vol, le viol, etc...

Enfin, une dernière crainte concerne le contrôle du cerveau planétaire. La technologie du cerveau planétaire peut-elle être détournée pour des buts égoïstes ? Cette éventualité n'est pas exclue. Par exemple, Barabási (2001, p 157) montre qu'il est possible de faire calculer des ordinateurs connectés à Internet à leur insu (sans virus !). Est-ce que le cerveau planétaire peut échapper à notre contrôle ? Ou même nous dépasser en puissance ? Rappelons-nous de la citation de Tim Berners-Lee qui disait qu'on ne pourrait pas contrôler une propriété émergente du cerveau planétaire « pas plus qu'un neurone contrôle le cerveau »¹⁰⁰. On peut facilement remettre en cause cette affirmation, car ce sont nous, êtres humains qui créons ces réseaux; et en les comprenant nous pouvons agir intelligemment sur eux, et donc les contrôler. On peut donc raisonnablement supposer que cette crainte vient de la littérature, et de la peur plus générale qu'une créature artificielle dépasse l'homme. Cette crainte n'est pas nouvelle, si l'on pense par exemple à la créature du savant Frankenstein, du roman de Mary Shelley de 1818. Cependant, si le cerveau planétaire nous dépasse, faut-il se battre, ou bien faut-il laisser l'esprit évoluer vers des formes toujours plus hautes –à notre propre perte ? Cette question est en fait déplacée, car le cerveau planétaire est là pour servir l'humanité (pas la remplacer). Ce sont les gens qui y participent qui le contrôlent. Son intelligence émerge donc des actions conjointes des hommes. « Si les gens qui y participent décidaient de ne plus utiliser le réseau, alors le cerveau planétaire n'existerait tout simplement plus. »¹⁰¹

Nous avons vu que des bénéfices comme des dangers sont possibles. Nous ne devons ni nous concentrer exclusivement sur les bénéfices, ni sur les dangers, mais bien sur les deux. Cependant, étant donné que nous parlons d'une utopie, où sa réalisation dépend de sa perception, si on veut qu'elle se réalise, il est important de mettre les bénéfices en avant. En effet, en concentrant abusivement les discours sur les dangers, on leur donne plus de chance d'arriver.

3.4. Une transition vers un métasystème ?

Est-ce que le cerveau planétaire est un niveau d'évolution supérieur ? Sommes-nous en train de vivre une transition de l'évolution comparable au passage des organismes unicellulaires aux multicellulaires ? Pour essayer de répondre à ces questions, commençons par examiner un concept clé développé par Turchin (1977) pour étudier de tels changements; celui de *transition vers un métasystème* (TMS). Une TMS se définit par l'émergence par l'évolution d'un système d'ordre supérieur, qui *contrôle* les sous-systèmes du niveau d'en dessous. Faisons tout de suite un point sur le terme « contrôle ». Dans la cybernétique, une relation de

¹⁰⁰ Voir ci-dessus [2.1, p 16]

¹⁰¹ Heylighen (2002, p10).

contrôle est fonctionnelle, et n'a pas besoin de prendre la forme d'une entité structurelle indépendante. Le contrôle n'est donc généralement pas un contrôle central, effectué par un agent qui contrôle le système.¹⁰²

Prenons comme exemples de TMS les transitions des organismes unicellulaires aux organismes multicellulaires, et des insectes solitaires aux insectes sociaux¹⁰³. Après la TMS, les sous-systèmes peuvent se différencier. Par exemple, les différents types de cellules (sanguines, nerveuses, etc...) dans les organismes multicellulaires; ou encore les fourmis ouvrières et couveuses. Cependant, les exemples que nous avons choisis sont en fait des exemples de TMS sociales, car elles se forment par l'intégration de systèmes de contrôle initialement *indépendants*, et similaires¹⁰⁴. Cette indépendance des individus de départ rend l'intégration (et donc la TMS) plus difficile. Deux forces s'exercent en effet sur les individus. D'une part, leur maximisation « égoïste » des ressources de leur environnement; et d'autre part l'intérêt du groupe. La sélection au niveau du groupe¹⁰⁵ est alors cruciale pour opérer à une TMS. Le développement d'un mécanisme de contrôle (génétique ou appris) qui est partagé par tous les membres du groupe devient alors essentiel. Un tel mécanisme de contrôle partagé existe dans nos deux exemples. C'est le contrôle génétique des différentes cellules des organismes multicellulaires, mais aussi des fourmis d'une même colonie qui ont le même patrimoine génétique.

Qu'en est-il alors de la société, et du cerveau planétaire ? Dans la société, le contrôle du système se fait par la culture¹⁰⁶. Mais, en plus des deux forces (citées ci-dessus) qui s'exercent sur les hommes, il existe aussi de la compétition dans la socialité humaine, ce qui rend la TMS encore plus difficile. Pour conclure, on peut dire que le phénomène de la société (des hommes qui se regroupent) est une TMS¹⁰⁷, dont le cerveau planétaire est une continuation, et un facilitateur. Cependant, une intégration sociale forte ne semble pas être un objectif facile à atteindre.

3.5. Une nouvelle forme de conscience ?

Est-ce qu'une forme de conscience va apparaître avec le cerveau planétaire ? La réponse la plus honnête serait de dire ... qu'on n'en sait rien pour l'instant. Mais avant même d'essayer tout de même de répondre à cette question, on peut se poser la question suivante. *Voulons-nous seulement faire émerger une conscience ?* Si nous ne faisons rien pour, on peut difficilement imaginer qu'elle émergera. Autrement, quelle utilité pourrait avoir cette conscience planétaire ? Peut-être une entité intelligente capable de raisonner à un niveau planétaire et par exemple de dire : « Je ne peux plus respirer, car ma forêt amazonienne est en train d'être détruite »; ou des choses moins évidentes, à une échelle globale.

Nous avons déjà vu indirectement la plausibilité de voir l'apparition d'une conscience artificielle. En effet, bien que cela ressemble beaucoup à de la science fiction, si une

¹⁰² C'est ce que laisse entendre l'usage courant du mot contrôle. Voir Heylighen (2000, p10), avec l'exemple du marché économique, qui est un exemple de contrôle distribué. Voir aussi Heylighen et Campbell (1995, p2).

¹⁰³ Voir Heylighen et Campbell (1995, 3.1 et 3.2) pour plus de détails sur des scénarios possibles de ces transitions.

¹⁰⁴ Qu'est-ce qu'une TMS non sociale ? Par exemple l'émergence du mouvement, de l'apprentissage, ou de la pensée rationnelle. Voir Turchin (1977).

¹⁰⁵ La notion de sélection de groupe est controversée, mais il faut pourtant l'expliquer. Voir par exemple Bloom (2000) ou Heylighen et Campbell (1995, p8-9) pour des tentatives de rendre cohérente cette notion.

¹⁰⁶ Heylighen et Campbell (1995, p1).

¹⁰⁷ Heylighen (2000, p15).

simulation du cerveau venait à fonctionner¹⁰⁸, alors il devrait logiquement s'en suivre une conscience artificielle¹⁰⁹. Cependant, cette conscience artificielle ne serait pas spécifique à Internet. Elle serait juste une exploitation de sa capacité de calcul, qu'un supercalculateur pourrait aussi simuler. Une autre forme de conscience artificielle pourrait être une sorte de « superconscience » qui puisse répondre à toutes nos questions, en puisant des informations sur le web¹¹⁰. Heylighen et Bollen (1996) vont même jusqu'à imaginer que nous puissions avoir des implants neuronaux, en connexion directe avec le web, de telle sorte qu'il soit possible de poser des questions et d'obtenir des réponses par la simple pensée¹¹¹.

Proposons cependant une autre vision, plus large, de ce que pourrait être cette nouvelle forme de conscience. Mayer-Kress (1995, p7) imagine ce que pourrait être l'analogie du rêve dans le cerveau planétaire. Il souligne la théorie selon laquelle le rêve permet de désapprendre de faux motifs. Les simulations informatiques (scientifiques) de notre monde pourraient être l'analogie de cette fonction. En effet, les simulation permettent d'identifier les modèles dont les résultats sont faux, et ainsi de les rejeter. A cela, ajoutons avec Peter Russell la remarque suivante. Une caractéristique fondamentale des êtres conscients est « leur capacité à former des modèles du monde dont ils font l'expérience; plus large est la conscience, plus complexe sera le modèle. »¹¹² Quel est le modèle le plus complexe de notre monde, et par quoi nous est-il donné ? La réponse est -bien entendu- la science. En effet, on peut voir l'ensemble de l'information scientifique comme un modèle de l'Univers à un moment donné¹¹³. L'intelligence sur Terre, et plus précisément l'activité scientifique, en explorant la nature et l'Univers serait ainsi en train de construire un modèle de plus en plus complexe et juste de l'Univers. La cybernétique propose de voir un modèle comme une construction intermédiaire entre notre intelligence et le monde; cet intermédiaire serait donc peu à peu en train de rétrécir. Jusqu'où ? Pourquoi pas jusqu'à leur superposition. Selon la théorie assez spéculative de James N. Gardner (2003), l'intelligence dans l'Univers a pour fonction de reproduire l'Univers. Dans cette nouvelle analogie de l'Univers avec un organisme vivant¹¹⁴, *si cette idée est juste et acceptée*, l'Univers serait donc en train d'arriver à maturité sexuelle : il prend conscience -par l'intermédiaire de l'intelligence terrestre- qu'il peut créer un nouvel Univers. Mais c'est une autre très belle analogie qui mériterait une étude bien plus sérieuse et détaillée...

¹⁰⁸ Et nous avons vu que la puissance de calcul d'aujourd'hui permettrait une telle simulation; voir [2.3.1, p20].

¹⁰⁹ Sauf si l'on soutient qu'il faut nécessairement un support biologique pour qu'il y ait de la conscience. Autrement dit, cela suppose la thèse de l'intelligence artificielle forte (voir glossaire). Voir aussi Harnad (2003) pour une discussion de la possibilité d'une machine consciente.

¹¹⁰ Notons cependant que les deux visions ne sont pas incompatibles. Cette « superconscience » pourrait utiliser la puissance de calcul d'Internet physique.

¹¹¹ Notons que chez Heylighen et Bollen (1996), les questions et réponses sont effectuées par des individus. Mais on peut très bien imaginer (notamment avec le développement du web sémantique) que des machines puissent de plus en plus et de mieux en mieux nous répondre.

¹¹² Russell (1982, p51).

¹¹³ Certes, cet ensemble est souvent contradictoire -et c'est essentiel pour le bon développement de la science, voir par exemple Harnad (1979)-, mais nous pouvons alors considérer un sous-ensemble qui fait consensus.

¹¹⁴ Notons que dans cette analogie, contrairement à la société comme un organisme où la fonction de reproduction était inexistante, cette fois-ci, elle est bien présente.

Conclusion

Dans notre étude de l'analogie, nous sommes allés vers de plus en plus d'interprétation. Nous avons commencé par une étude quantitative et structurelle assez brute; continué en essayant de voir comment il était possible de tirer parti du raisonnement analogique; et enfin nous ne sommes arrivés pas très loin de la futurologie, avec certains aspects de la métaphore du cerveau planétaire. On peut considérer que l'analogie entre Internet et le cerveau constitue un bel exemple de co-évolution entre la science et la technologie. En effet, le web a été créé à partir d'une analogie avec le cerveau; l'étude du web a contribué au développement de la science des réseaux, qui elle-même permet(tra) d'étudier le cerveau en détails. Les nouvelles connaissances acquises pourront peut-être à leur tour nous aider à résoudre des problèmes relatifs au développement d'Internet.

Rappelons pour conclure quelques perspectives que nous avons soulignées au cours de ce travail, d'un côté pour la société, et d'un autre pour les sciences cognitives.

D'une part, nous avons vu qu'analyser la société comme un superorganisme pouvait être efficace pour le développement de la société (pour résoudre des conflits, pour la communication scientifique, une vision de l'avenir, etc...) par l'intermédiaire de la métaphore du cerveau planétaire [3.2, p25].

D'autre part, pour les sciences cognitives, notre analyse quantitative et structurelle était limitée, car il manque des données sur le cerveau, et en particulier sur le cerveau humain [1.1.3, p11]. Cela nous encourage à suggérer qu'un programme de recherche (sans doute comparable au séquençage du génome humain -et sûrement plus difficile-) qui serait de cartographier le cerveau au niveau neuronal serait très utile. Ensuite, nous avons aussi souligné qu'Internet pourrait bien s'avérer être un outil indispensable pour simuler un cerveau, grâce à sa grande capacité de calcul potentielle [2.3.1, p20]. Enfin, l'analogie du web et du cerveau nous a permis de susciter un rapprochement original entre la théorie des graphes et le fonctionnement de la conscience [2.3.2, p21].

Glossaire

1. Général

AS : Autonomous System. Voir [1.1.2, p10].

Analogie : voir [2.1, p16] pour la définition d'une analogie.

CERN : Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire.

Cerveau planétaire : L'expression a été introduite par Russell (1982). C'est une métaphore pour le réseau d'intelligence collective émergeant des liens de communication formés par les hommes, les ordinateurs et les bases de données. Heylighen (2004, p2).

Collaborative filtering : Resnick le définit ainsi : « guider les choix des personnes à propos de quoi lire, quoi examiner, quoi surveiller, quoi écouter (la partie filtering); et faire cette guidance en se basant sur l'information rassemblée depuis d'autres personnes (la partie collaborative). »¹¹⁵

Connexions cortico-corticales : Ce sont des connexions entre des aires corticales dans le même hémisphère, ou dans les deux hémisphères via le corps calleux ou la commissure antérieure.

Cybernétique : Science des systèmes, un système étant lui-même défini comme un ensemble d'éléments en interaction, dont le tout comporte des propriétés dont sont dénuées ses parties prises séparément. Les interactions entre les éléments peuvent consister en des échanges de matière, d'énergie, ou d'information.¹¹⁶

Grille [grid] : Les technologies de grille [grid technologies] proposent des protocoles, services, et des kits de développements de logiciels pour partager des ressources à grande échelle.

Hypertexte et hypermédia : Système interactif qui permet de construire et de gérer des liens sémantiques dans un ensemble de documents polysémiques. On parle d'hypertexte quand les documents sont du texte, et plus généralement d'hypermédia lorsque les documents sont des objets quelconques.

Intelligence artificielle forte : Le concept d'intelligence artificielle forte désigne le projet de créer une machine capable non seulement de simuler un comportement intelligent, mais d'éprouver une réelle conscience de soi, de « vrais sentiments » (quoi qu'on puisse mettre derrière ces mots), et *une compréhension de ses propres raisonnements*.¹¹⁷

¹¹⁵ <http://www.cni.org/Hforums/cni-announce/1996/0031.html>

¹¹⁶ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Cybern%C3%A9tique>

¹¹⁷ http://fr.wikipedia.org/wiki/IA#D.C3.A9finition_de_l.E2.80.99intelligence_artificielle_forte

Internet : Le réseau physique des ordinateurs connectés entre eux, y compris tous les réseaux virtuels qu'il héberge (email, web, irc, news, réseaux pairs à pairs, etc...). On l'appelle parfois aussi le «réseau des réseaux», car il connecte en fait différents réseaux administrés indépendamment les uns des autres.

Internet physique : Le réseau physique des ordinateurs connectés entre eux.

LAN : Local Area Network.

Mème : Défini par Richard Dawkins (1976) avec son analogue biologique, le gène, le mème est un élément de culture (par exemple un concept, une information, une attitude, une ritournelle, une recette, etc...).

Routeur : appareil spécial qui transfère les paquets de données au travers des différents sous-réseaux d'Internet. Vespignani *et al.* (2005, p17).

Superorganisme : Système « vivant » d'ordre élevé dont les composants (pour la société, les humains) sont eux-même des organismes. Heylighen (2000, p3).

Teraflop : Unité de mesure qui indique le nombre de calculs par seconde. Un teraflop par seconde signifie 5×10^{12} instructions par seconde. Delahaye (2003, p21).

Transition vers un métasystème (TMS) [metasystem transition] : Concept introduit par Turchin (1977) et qui signifie l'évolution d'un niveau de contrôle et de cognition plus élevé. On peut le définir par l'émergence par l'évolution d'un système d'ordre supérieur, qui *contrôle* les sous-systèmes du niveau d'en dessous. Par exemple, dans le passage de l'unicellulaire au multicellulaire, l'organisme multicellulaire contrôle les cellules individuelles.

Web sémantique : Les documents traités par le web sémantique contiennent des informations formalisées pour être traitées automatiquement. Ces documents sont générés, traités, échangés par des logiciels. Ces logiciels permettent d'être utilisés (même sans connaissance informatique) pour :

- générer des données sémantiques à partir de la saisie d'information par les utilisateurs
- agréger des données sémantiques afin d'être publiées ou traitées
- publier des données sémantiques avec une mise en forme personnalisée ou spécialisée
- échanger automatiquement des données en fonction de leurs relations sémantiques
- générer des données sémantiques automatiquement, sans saisie humaine, à partir de règles d'inférences.¹¹⁸

¹¹⁸ http://fr.wikipedia.org/wiki/Web_s%C3%A9mantique

2. Théorie des graphes.¹¹⁹

Sommet [vertex]: L'unité fondamentale d'un réseau, appelé aussi nœud en informatique.

Arête [edge]: Ligne qui connecte deux sommets, appelé aussi lien en informatique.

Dirigé / non dirigé : Une arête est dirigée si elle ne passe que dans une direction (par exemple une route à sens unique), et non dirigée si elle passe dans les deux directions. Un graphe est dirigé si toutes ses arêtes sont dirigées. Notons qu'un graphe non dirigé peut être représenté par un graphe dirigé.

Arc : arête orientée.

Degré : nombre d'arêtes connectées à un sommet. Un graphe dirigé a un degré entrant et un degré sortant pour chaque sommet, correspondants aux nombres d'arêtes entrantes et sortantes respectivement.

Sans échelle typique [scale free] : Nom d'un réseau dont la distribution des degrés suit une loi puissance. « Sans échelle typique » signifie que les degrés ne sont pas groupés autour d'un degré moyen, mais peuvent s'étendre sur une large étendue de valeurs, traversant souvent plusieurs échelles, ou ordres de grandeurs.

Hub : sommet qui a un très grand nombre d'arêtes.

Composante : La composante à laquelle un sommet i appartient est l'ensemble des sommets qui peuvent être atteints à partir de ce sommet i , par des chemins allant le long des arêtes du graphe. Dans un graphe dirigé, un sommet i a une composante-entrante [in-component] et une composante-sortante [out-component] qui sont les ensembles de sommets à partir desquels le sommet x peut être atteint, et qui peuvent être atteint à partir du sommet i .

Chemin géodésique : Un chemin géodésique est le plus court chemin à travers le réseau d'un sommet à un autre.

Diamètre : Le diamètre d'un réseau est la longueur (en nombre d'arêtes) du plus long chemin géodésique entre deux sommets quelconques.

¹¹⁹ L'ordre est logique plutôt qu'alphabétique. Ces définitions sont complémentaires avec l'annexe.

Annexe - Théorie des graphes et topologie.

Nous reprenons pour cette annexe quelques définitions fondamentales de théorie des graphes. La source principale est de cette annexe est le résumé de Vespignani *et al.* (2005, p232-239). D'une manière générale -et d'un point de vue méthodologique- on compare les propriétés d'un graphe réel à celles d'un graphe aléatoire de même taille.

1. Les graphes

Un graphe non orienté G est défini par une paire d'ensembles $G=(\mathcal{V},\mathcal{E})$ où \mathcal{V} est un ensemble de sommets, et \mathcal{E} un ensemble de paires *non ordonnées* de sommets différents, appelées arêtes.

Dans un graphe orienté D , $G=(\mathcal{V},\mathcal{E})$ \mathcal{E} est un ensemble de paires *ordonnées* de sommets différents.

Le nombre total de sommets (le cardinal de \mathcal{V}) est noté N .

Le nombre total d'arêtes (le cardinal de \mathcal{E}) est noté E .

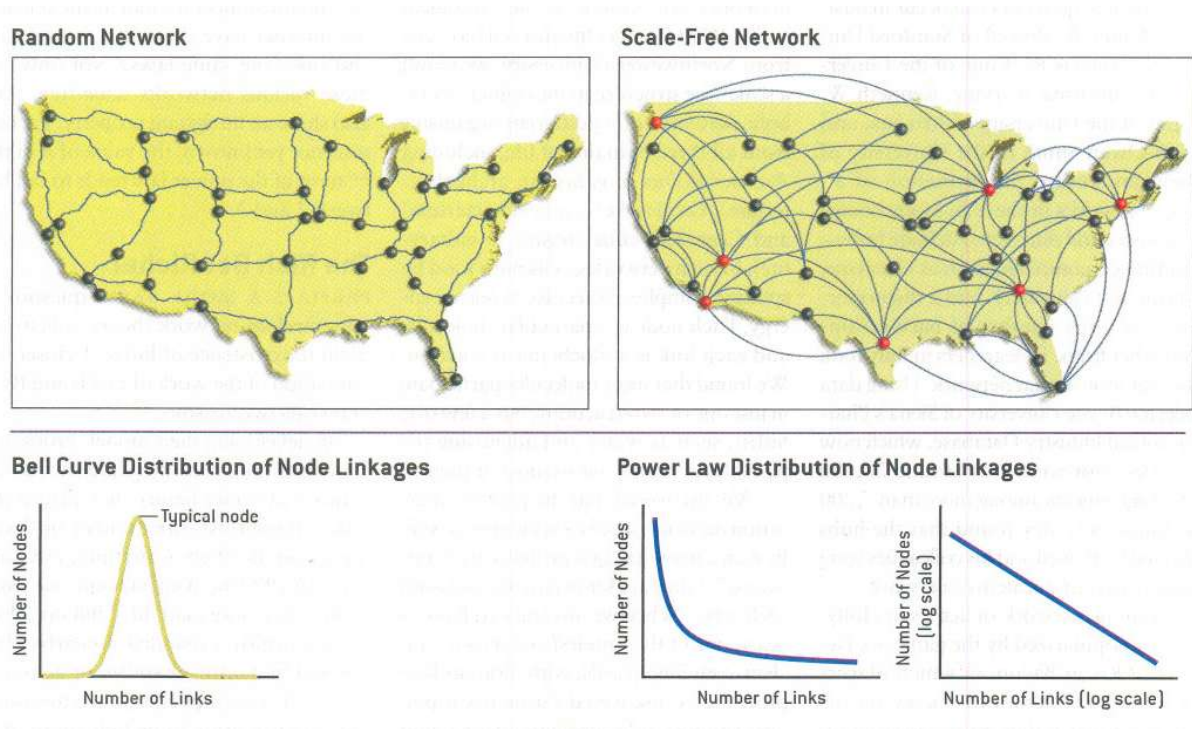
Les arêtes des graphes non orientés et orientés sont représentées respectivement par des lignes, et par des flèches.

2. Distribution des degrés

Le degré est le nombre d'arêtes connectées à un sommet. La distribution des degrés est la distribution associée aux degrés des sommets du graphe. C'est une caractérisation topologique essentielle d'un graphe.

La distribution des degrés $P(k)$ d'un graphe non orienté est définie comme la probabilité qu'un sommet choisi aléatoirement ait un degré k .

Deux distributions différentes fondamentales sont à noter, la première qui ressemble à un réseau routier, la seconde à un réseau aérien. La première est une distribution en courbe en cloche et correspond (généralement) aux réseaux aléatoires; la seconde est une distribution en loi puissance et correspond aux réseaux sans échelle typique.



Réseaux aléatoires et sans échelle typique.
(Barabasi et Bonabeau 2003).

Dans un réseau aléatoire, la majorité des sommets ont le même nombre de liens (à gauche). En revanche, dans un réseau sans échelle typique (à droite) certains sommets ont un très grand nombre d'arêtes; ce sont les hubs (en rouge). Dans un tel réseau, la majorité des sommets ont très peu d'arêtes. Une telle distribution est dite sans échelle typique, car elle a la même allure à toutes les échelles.

Dans le cas d'un graphe orienté, on considère deux distributions. $P(k_-)$ est celle des degrés entrants ; $P(k_+)$ celle des degrés sortants.

Le degré moyen d'un graphe non orienté est défini comme la valeur moyenne de k sur tous les sommets du réseau.

$$\langle k \rangle = \sum_k k P(k) = 2E / N$$

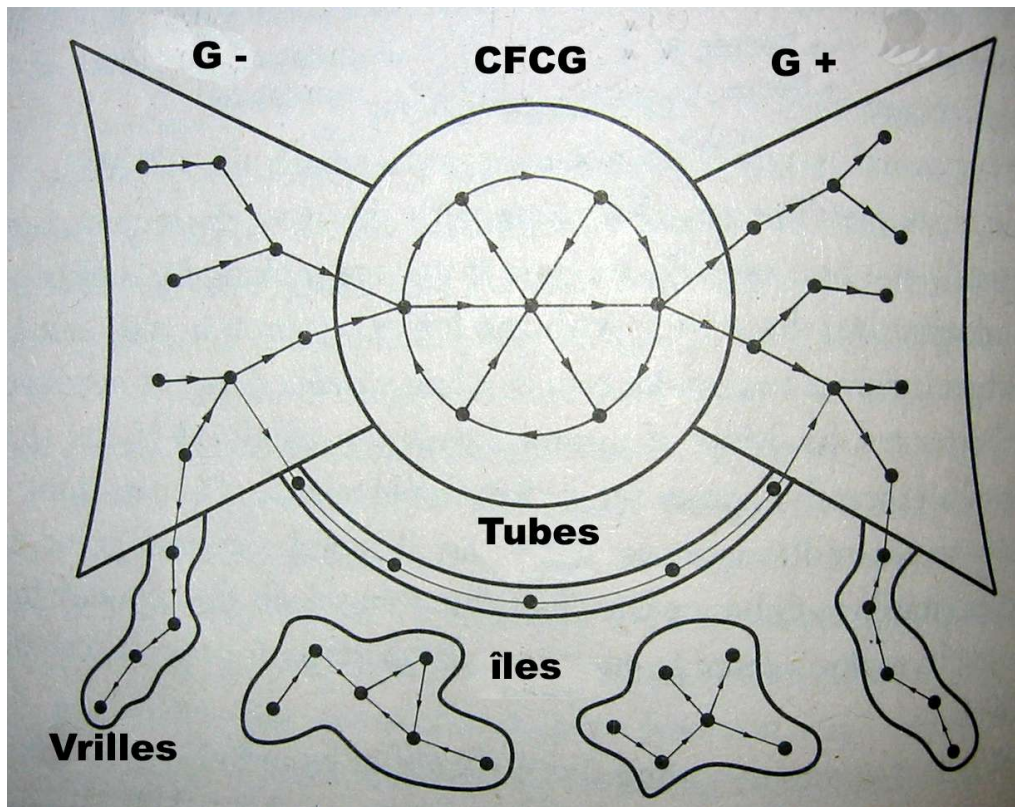
3. Coefficient de clustering

Le clustering désigne la propriété suivante : si le sommet i est relié au sommet j , et que j est relié à l , alors i et l auront une forte probabilité d'être reliés. Watts et Strogatz (1998) ont introduit plus précisément la notion de coefficient de clustering.

Soit le sommet i de degré k_i et e_i le nombre d'arêtes existant entre les k_i voisins de i . On définit le coefficient de clustering c_i de i , comme le rapport entre le nombre d'arêtes entre ses voisins e_i , et sa plus grande valeur possible $k_i(k_i - 1)/2$, c'est-à-dire

$$c_i = \frac{2e_i}{k_i(k_i - 1)}$$

4. Structure des composantes dans les graphes orientés.



Structure des composantes d'un graphe orienté.
Adapté de Barabasi (2001, p166).

La structure des composantes d'un graphe orienté est composée de:

- 1) La Composante Fortement Connexe Géante (**CFCG**), où il existe un chemin orienté reliant n'importe quelle paire de sommets.
- 2) La composante **G-**, constituée des sommets à partir desquels on peut atteindre la CFCG par un chemin orienté.
- 3) La composante **G+**, constituée des sommets qu'on peut atteindre à partir de la CFCG par un chemin orienté.
- 4) Les **vrilles** qui contiennent des sommets à partir desquels on ne peut pas atteindre la CFCG, ou que l'on ne peut pas atteindre à partir de la CFCG. Parmi eux, des tubes reliant G- et G+.
- 5) Un ensemble de composantes déconnectées (ou **îles**).

5. Distance et diamètre.

Une distance entre deux sommets i et j , peut être définie comme le nombre d'arêtes que traverse un plus court chemin reliant i et j (on parle aussi de chemin géodésique). Cette distance est notée ℓ_{ij} . Notons que cette quantité n'est pas symétrique pour les graphes orientés (en général $\ell_{ij} \neq \ell_{ji}$).

Lorsque la distance moyenne croît logarithmiquement en fonction de la taille N (comme dans les graphes aléatoires), c'est-à-dire que $\langle \ell \rangle \sim \log N$, on parle d'effet *petit monde*.¹²⁰

Le diamètre d'un réseau est la longueur (en nombre d'arêtes) du plus long chemin géodésique entre deux sommets quelconques.

¹²⁰ Le symbole « \sim » signifie « de l'ordre de ».

Bibliographie

Dans l'esprit de la vision encyclopédique du cerveau planétaire, nous avons indiqué tant que possible les adresses des sites web où les ressources sont disponibles. Voir aussi <http://internet-cerveau.philosophons.com/> pour télécharger le fichier PDF, et d'éventuelles futures corrections.

ALBERT, R., JEONG, H., BARABÁSI, A.-L.

1999 - Diameter of the World Wide Web. *Nature* **401**, 130-131 (1999).

<http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/9907038>

AMARAL, L. A. N., SCALA, A., BARTHELEMY, M., STANLEY, H. E.

2000 - Classes of small-world networks. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **97**, 11149–11152.

<http://polymer.bu.edu/~amaral/Papers/pnas00a.pdf>

ARISTOTE

Vers 330 av. J.-C. – *La politique*. Trad. Fr J. Aubonnet. Tel Gallimard 1993.

http://wikisource.org/wiki/La_Politique/Livre_I#CHAPITRE_II (Trad. de J.

Barthélémy-Saint-Hilaire).

BARABÁSI, A.-L.

2001 - *Linked, The New Science of Networks*, Perseus Publishing, Cambridge, Massachusetts.

BARABÁSI A.-L., ALBERT, R.

1999 - Emergence of scaling in random networks. *Science* **286**, 509-512 (1999).

<http://arxiv.org/abs/cond-mat/+9910332>

BARABÁSI, A.-L., BONABEAU, E.

2003 – Scale-Free Networks. *Scientific American* **288**, p60-69.

[http://www.nd.edu/~networks/Publication%20Categories/01%20Review%20Articles/ScaleFree_Scientific%20Ameri%20288,%2060-69%20\(2003\).pdf](http://www.nd.edu/~networks/Publication%20Categories/01%20Review%20Articles/ScaleFree_Scientific%20Ameri%20288,%2060-69%20(2003).pdf)

BEAR, M. F., CONNORS, B. W., PARADISIO, M. A.,

2002 – *Neurosciences : à la découverte du cerveau*. Trad. A. Nieoullon, Ed. Pradel.

BERNERS-LEE, T.

1999 – *Weaving the Web*. Texere, London.

BLOOM, H.

2000 – *Global Brain. The Evolution of Mass Mind from the Big Bang to the 21st Century*. Wiley.

BRAITENBERG, V.

2001 – Brain size and the number of neurons: an exercise in synthetic neuroanatomy. *Journal of computational neuroscience* **10**, 71-77.

- BRODER, A., KUMAR, R., MAGHOUL, F., RAGHAVAN P., RAJAGOPALAN, S. STATA. R., TOMKINS, A., WIENER, J.
 2000 – Graph structure in the web. Ninth International world wide web conference, Amsterdam. *Computer Networks*, **33**(1-6):309-320.
<http://www9.org/w9cdrom/160/160.html>
- BUKHARIN, N.I.
 1925 – *Historical Materialism - a System of Sociology*, International Publishers.
- BUSH, V.,
 1945 – As we may think, *The Atlantic Monthly*, Juillet 1945.
<http://www.theatlantic.com/doc/194507/bush>
- CRICK F., JONES, E.
 1993 – The backwardness of human neuroanatomy. *Nature* 361, 109-110.
- DAWKINS, R.
 1976 – *Le gène égoïste*. Odile Jacob, deuxième édition, 1989.
- DELAHAYE, J.-P.
 2002 – *L'intelligence et le calcul. De Gödel aux ordinateurs quantiques*. Belin Pour la Science. Chapitre 10, "La loi de Moore", p78-86.
 2003 - *La mémoire, le calcul, l'intelligence*. Conférence invitée du jeudi 3 juillet 2003 à Laval, à l'ESIEA.
<http://afia.lri.fr/plateforme-2003/Articles/Divers/Laval-JP-Delayahe.pdf>
- DOROGOVTSEV, S.N., MENDES, J. F. F.
 2003 – *Evolution of Networks. From Biological Nets to the Internet and WWW.*, Oxford University Press.
- DUNBAR, K.
 1995 – How scientists really reason: Scientific reasoning in real-world laboratories. In R.J. Sternberg, & J. Davidson (Eds.). *Mechanisms of insight*. Cambridge MA: MIT press. pp 365-395.
<http://www.dartmouth.edu/~kndunbar/pubs.html>
- DURKIN, T.
 2004 - SETI Researchers Sift Interstellar Static for Signs of Life. *Xcell Journal*, Spring 2004.
http://www.xilinx.com/publications/xcellonline/xcell_48/xcell_48/xcell_48/xcell_48/xc_seti48.pdf
- FLEISSNER P., HOFKIRCHNER W.
 1998 – The making of the information society: driving forces, 'Leitbilder' and the imperative for survival. *BioSystems* **46**, 201-207.
http://igw.tuwien.ac.at/igw/menschen/hofkirchner/papers/InfoSociety/Making_InfoSociety/1998ig.pdf

FOSTER, I.

2000 – Internet computing and the emerging grid. *Nature Web Matters*.

[Http://www.nature.com/nature/webmatters/grid/grid.html](http://www.nature.com/nature/webmatters/grid/grid.html)

GANASCIA, J.-G.

2001 – Du néo-structuralisme supposé de l’hypertextualité. Extrait de *Diogène*, n°196. *Retour vers le futur. Supports anciens et modernes de la connaissance*. Octobre-décembre 2001.

GARDNER, J. N.,

2003 – *Biocosm. The new scientific theory of evolution: intelligent life is the architect of the universe*. Inner Ocean Publishing.

Voir www.biocosm.org où l’introduction est disponible.

GENTNER, D., GRUDIN, J.

1985 - The evolution of mental metaphors in psychology: a 90-year retrospective. *American psychologist* 40(2): 181-192.

<http://www.psych.northwestern.edu/psych/people/faculty/gentner/newpdfpapers/GentnerGrudin85.pdf>

GENTNER, D., JEZIORSKI, M.

1993 – The shift from metaphor to analogy in western science. In A. Ortony (Ed.), *Metaphor and thought* (2nd ed., pp. 447-480). England: Cambridge University Press.

<http://www.psych.northwestern.edu/psych/people/faculty/gentner/newpdfpapers/GentnerJeziorski93.pdf>

GOERTZEL, B.

2001 - *Creating Internet Intelligence: Wild Computing, Distributed Digital Consciousness, and the Emerging Global Brain*. Ed. Plenum.

GOVINDAN, R., TANGMUNARUNKIT, H.

2000 - Heuristics for Internet Map Discovery. *Proceedings de la conférence IEEE INFOCOM 2000*, Tel Aviv, Israël, mars, p1371-1380.

<http://www.soe.ucsc.edu/classes/cmpe252/Spring01/govindan00heuristics.pdf>

HARNAD, S., BRODY, T.

2004 - Comparing the Impact of Open Access (OA) vs. Non-OA Articles in the Same Journals, *D-Lib Magazine* 10 (6) June

<http://www.dlib.org/dlib/june04/harnad/06harnad.html>

HARNAD, S.

1979 - Creative disagreement. *The Sciences* 19 p18-20.

<http://www.ecs.soton.ac.uk/~harnad/Temp/Kata/creative.disagreement.htm>

2003 - Can a Machine Be Conscious? How? *Journal of Consciousness Studies* 10(4-5): 69-75.

<http://www.ecs.soton.ac.uk/~harnad/Temp/machine.htm>

HEYLIGHEN F., BOLLEN J.

1996 - The World-Wide Web as a Super-Brain: from metaphor to model, in: *Cybernetics and Systems '96* R. Trappl (ed.), (Austrian Society for Cybernetics).p. 917-922.

<http://pespmc1.vub.ac.be/Papers/WWW-Super-Brain.pdf>

HEYLIGHEN F. & CAMPBELL D.T.

1995 - Selection of Organization at the Social Level: obstacles and facilitators of metasystem transitions, *World Futures: the Journal of General Evolution* 45, p. 181-212.

<http://pespmc1.vub.ac.be/Papers/SocialMST.pdf>

HEYLIGHEN, F.

1999 - Collective Intelligence and its Implementation on the Web: algorithms to develop a collective mental map. *Computational and Mathematical Theory of Organizations* 5(3): 253-280.

<http://pespmc1.vub.ac.be/Papers/CollectiveWebIntelligence.pdf>

2000 - The Global Superorganism: an evolutionary-cybernetic model of the emerging network society. *Journal of Social and Evolutionary Systems [soumis]*.

<http://pespmc1.vub.ac.be/Papers/Superorganism.pdf>

2002 - The global brain as a new utopia. *Zukunftsfiguren*. Suhrkamp. Frankfurt.

<http://pespmc1.vub.ac.be/Papers/GB-Utopia.pdf>

2004 – Conceptions of a Global Brain: an historical review, *Technological Forecasting and Social Change [soumis]*.

<http://pespmc1.vub.ac.be/Papers/GBconceptions.pdf>

HOBBS, T.

1651 - *Léviathan*, Folio essais.

HOLYOAK, K. J., THAGARD, P.

1995 – *Mental leaps: Analogy in creative thought*. Chapter 8, The Analogical Scientist. Cambridge, MA: The MIT press.

HUMPHRYS, M.

2001 - Distributing a Mind on the Internet: The World-Wide-Mind, in Jozef Kelemen and Petr Sosik, eds., *Advances in Artificial Life: Proceedings of the 6th European Conference on Artificial Life (ECAL-01)*, Prague, Czech Republic, published by Springer-Verlag, LNAI 2159, pp.669-80.

<http://computing.dcu.ie/~humphrys/Publications/01.ecal.conf.a4.ps>

JAYNES, J.

1976 – *The Origin of Consciousness in the Breakdown of the Bicameral Mind*. Houghton Mifflin Books, 2000.

KAISER, M., HILGETAG, C.C.

2004 - Modelling the development of cortical networks. *Neurocomp*. 58-60, 297–302.

<http://www.biological-networks.org/pubs/Kaiser2004c.pdf>

KUMAR, R., RAGHAVAN P., RAJAGOPALAN S., SIVAKUMAR D., TOMKINS A. UPFAL E,

2000 – The web as a graph. *Proceedings of the 19th ACM Symposium on Principles of Database Systems*, p1-10.

<http://www.almaden.ibm.com/webfountain/resources/TheWebasaGraph.pdf>

KURZWEIL, R.

1999 - *The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence*. Ed. Penguin.

Des extraits (dont le chapitre 6) sont disponibles sur :

<http://www.penguinputnam.com/static/packages/us/kurzweil/excerpts/exmain.htm>

LAWRENCE, S., GILES, S.,

1998 – Searching the World Wide Web. *Science* 280, p88-100.

<http://clgiles.ist.psu.edu/papers/Science-98.pdf>

LA METTRIE, J. O. de

1747 – *L'homme machine*. Folio essais, 1999.

<http://perso.wanadoo.fr/destin/textes/metttrie.rtf>

LEARY, D.E *et al.*

1990 – *Metaphors in the history of psychology*. New York: Cambridge University Press.

LEVY, P.

1997 - *L'intelligence collective. Pour une anthropologie du cyberspace*. La découverte.

LEWONTIN, R.

1981 – On constraints and adaptation. *Behavioral and Brain Sciences*, 4, 245.

LOVELOCK, E.,

1986 – *La Terre est un être vivant : l'hypothèse Gaïa*. Champs Flammarion 1999.

MARTIN, R., KAISER M., ANDRAS, P. YOUNG M.P.

2001 - Is the Brain a Scale-free Network? In Abstracts of the 2001 *Annual Conference of the Society for Neuroscience*, San Diego, US, paper 816.14

MAYER-KRESS, G., BARCZYS, C.

1995 - The global brain as an emergent structure from the worldwide computing network. *The information society* **11**(1): 1-28.

<http://www.santafe.edu/~gmk/Pubs/InfoSoc/>

MELLA, J.-F.,

2004 – La hierarchie selon Google. *La Recherche* n°381, décembre 2004.

<http://www.larecherche.fr/data/381/038108001.html>

MERKLE, R. C.,

1989 - Energy limits to the computational power of the human brain. *Forsight update* n°6, août 1989.

<http://www.merkle.com/brainLimits.html>

- MILLER, J. G.
1978 - *Living Systems*. McGraw Hill, New York.
- MINSKY, M.,
1988 – *The Society of Mind*. Simon & Schuster.
- MORAVEC, H.
1998 - When will hardware match the human brain ? *Journal of Evolution and Technology*, Vol 1.
<http://www.transhumanist.com/volume1/moravec.htm>
- NEUMANN, J.
1955 – *L'ordinateur et le cerveau*. Paris, La découverte.
- NEWMAN, M. E. J.,
2003 – The structure and function of complex networks. *SIAM Review* 45, 167-256.
<http://fr.arxiv.org/abs/cond-mat/0303516>
- OPPENHEIMER, J.R.
1956 – Analogy in science. *American Psychologist*, 11, 127-135.
- ORWELL, G.
1948 – *1984*. Ed folio 1972.
- PAKKENBERG, B., GUNDERSEN H. J. G.,
1997 – Neocortical Neuron Number in Humans: Effect of Sex and Age, *The Journal of comparative neurology* 384, p312-320.
- PASTOR-SATORRAS, R., VAZQUEZ, A., VESPIGNANI, A.,
2001 - Dynamical and correlation properties of the Internet. *Phys. Rev. Lett.* 87, 3200
<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0105161>
- PLATON
~387 *La République*. Ed. Folio, Trad. P. Pachet.
- ROSNAY, J. de,
1979 – *Le macroscopie*. Points Seuil Essais.
- RUSSELL, P.
1982 – *The awakening earth. The global brain*. ARK. Trad. en 1989 sous le titre *La terre s'éveille : les sauts évolutifs de Gaïa*. Puis, une version mise à jour est parue en 1996, *The global brain Awakens: our next evolutionary leap*. (Nous citons les paginations de la version française).
- SALISBURY, J. de.
1159 – *Le policratique*. PU de Nancy. Trad. D. Foulechat, 1985.

SPENCER, H.

1896 - *The principles of sociology*. University Press of the Pacific, 4 volumes, 2004.

Extraits du volume 1 sur :

<http://www2.pfeiffer.edu/~Iridener/courses/SPENCER.HTML>

SPORNS, O., CHIALVO, D., KAISER, M., HILGETAG, C.C.

2004 - Organization, development and function of complex brain networks. *Trends in Cognitive Sciences* **8**, 418-425.

<http://www.indiana.edu/%7Ecortex/TICS2004.pdf>

SPORNS, O., ZWI, J.

2004 - The small world of the cerebral cortex. *Neuroinformatics* **2**, 145-162.

<http://www.indiana.edu/%7Ecortex/NI2004.pdf>

SPORNS, O., TONONI, G., EDELMAN G.

2002 - Theoretical neuroanatomy and the connectivity of the cerebral cortex. *Behavioural Brain Research* 135(1-2): 69-74.

http://www.indiana.edu/~cortex/behav_br_res.pdf

STOCK, G.

1993 - *Metaman: the merging of humans and machines into a global superorganism*. NY, Simon&Schuster.

TEILHARD DE CHARDIN, P.

1955 - *Le phénomène humain*. Paris, Seuil.

De 1955 à 1976, son œuvre est publiée à titre posthume par Jeanne Mortier dont il a fait son héritière éditoriale quant à son œuvre dit non scientifique.

TONONI, G., EDELMAN G.,

1998 - Consciousness and complexity. *Science* vol. 282, 4 déc. 1998, p1846-1851.

<http://www.its.caltech.edu/~theory/tononiedelman.pdf>

TURCHIN, V.

1977 - *The phenomenon of science. A cybernetic approach to human evolution*. New York, Columbia University Press.

<http://pespmc1.vub.ac.be/POS/TurPOS.pdf>

VESPIGNANI, A., PASTOR-SATORRAS, R.

2005 - *Internet. Structure et évolution*. Belin. Trad. Clémence Magnien.

WATTS D. J., STROGATZ, S. H.,

1998 - Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature* 393, 440.

http://tam.cornell.edu/SS_nature_smallworld.pdf

WELLS, H. G.

1938 - *World brain*. Ed. Adamantine 1993.

YOOK S.-H., JEONG H., BARABÁSI A.-L.
2002 – Modeling the Internet's large-scale topology. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* **99**,
13382-13386
<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0107417>