



HAL
open science

Les Machines pour le Big Data : Vers une Informatique Quantique et Cognitive.

Bruno Teboul, Taoufik Amri

► **To cite this version:**

Bruno Teboul, Taoufik Amri. Les Machines pour le Big Data : Vers une Informatique Quantique et Cognitive.. 2014. hal-01096689v1

HAL Id: hal-01096689

<https://hal.science/hal-01096689v1>

Preprint submitted on 18 Dec 2014 (v1), last revised 21 Dec 2014 (v2)

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

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

Les Machines pour le Big Data :

Vers une Informatique Quantique et Cognitive

Auteurs :

Bruno Teboul

Directeur Scientifique, R&D et Innovation du Groupe Keyrus.
Membre de la Gouvernance de la Chaire Data Scientist de l'Ecole Polytechnique.
Doctorant et Enseignant à l'Université Paris-Dauphine.
DEA de Sciences Cognitives de l'Ecole Polytechnique.

Et

TaoufikAmri

Research Quant et Lead Data Scientist,
Consultant et Conférencier,
Normalien, Docteur en Physique Quantique du Laboratoire Kastler Brossel (ENS Paris).

Introduction

Avec la digitalisation grandissante et le déluge informationnel qui en résulte, des pans entiers de l'économie sont bouleversés par des innovations disruptives rendues possibles par un internet prolifique et le traitement des *Big Data*. Les *Big Data* désignent en effet des ensembles massifs de données *multi-variées* et accumulées à des vitesses sans précédent sur les individus et même les organisations via le web, les réseaux sociaux, et maintenant des capteurs avec l'avènement prochain de ce que l'on appelle déjà *l'internet des objets*. Ces *Big Data* sont en quelque sorte « *le pétrole de notre ère digitale* », et elles nourrissent les espoirs d'un eldorado pour des économies en quête désespérée de croissance.

Une nouvelle science pluridisciplinaire - *la Data Science*¹ - est en train de naître pour traiter et valoriser ces *Big Data*, depuis leur collecte, en passant par leur traitement jusqu'à leur structuration en bases de données de nouvelles formes, qui sont bien loin des tables habituelles dans lesquelles les lignes et les colonnes représentaient respectivement les clients et leurs données. Cette *Data Science* est quelque sorte *la pétrochimie du digital*, dont le but est de *raffiner* les *Big Data* « brutes » en *Smart Data*, c'est à dire en données pertinentes pour la problématique dont on cherche à prédire les événements clés, comme l'achat d'un produit par un prospect ou son appétence à choisir un autre produit. Cette *Data Science* ne confond plus corrélations et causalité, car les événements qu'elle cherche à prédire sont souvent des événements très rares. Tellement rare que cela s'apparente à rechercher une aiguille dans des bottes de foin ! Pour rendre ces prédictions possibles, la *Data Science* a recours à des algorithmes d'apprentissage automatique, également appelé *Machine Learning*, qui ont la faculté de s'auto-organiser pour améliorer par eux-mêmes leur pouvoir prédictif.

Mais ces algorithmes sont gourmands en puissance de calcul, si bien que des géants comme Google ont mis au point - il y a des années déjà - des architectures de calculs parallèles et distribués. Si l'on revient à notre analogie de l'aiguille dans des bottes de foin, ces protocoles permettent de rechercher l'aiguille simultanément sur les différentes bottes de foin au lieu de toutes les mélanger et de rechercher ensuite l'aiguille dans un gros amas de foin. Ces protocoles au nom de *MapReduce*, *Hadoop*, *Spark*... constituent de véritables sésames prêts à l'emploi pour le *Data Scientist* que l'on considère d'ores et déjà comme « *le job le plus sexy du 21ème siècle* »². En effet, les formations en *Data Science* se développent en France au sein des institutions scientifiques les plus prestigieuses, telle que l'Ecole Polytechnique³ pour former cette nouvelle génération d'ingénieurs qui seront de plus en plus recherchés avec la prolifération des start-ups, elles-mêmes souvent incubées au sein de grands groupes en quête d'innovations disruptives. Cependant, cet engouement et cet enthousiasme - parfois euphoriques - occultent de manière assez surprenante un aspect *bassement* matériel, celui du *Hardware*, des machines qui auront à traiter ces *Big Data*, afin d'en extraire de la valeur et en faire des modèles prédictifs. Les machines actuelles seront-elles assez puissantes pour relever les défis de plus en plus ambitieux de la *Data Science*?

Cet article est une analyse prospective sur les mutations technologiques qui affecteront l'informatique et ses machines dans un avenir proche afin de répondre aux grands défis soulevés par notre société du tout digital. Nous pensons que ces mutations seront à la fois « quantique » et « cognitive ». Nous étayerons notre analyse en revenant sur ce qui fonde encore aujourd'hui nos ordinateurs, à savoir une architecture vieille de plus d'un demi-siècle, qui est responsable des espoirs déçus de l'intelligence artificielle. Nous décrirons deux solutions prometteuses et complémentaires que l'on appelle aujourd'hui le *Calcul Quantique Adiabatique*⁴ et l'*Informatique Cognitive*⁵ qui vont bouleverser les capacités de traitement des *Big Data*.

Une architecture mal adaptée à l'intelligence artificielle

La plupart des articles consacrés aux *BigData* qu'ils soient grand public ou scientifiques, s'intéressent rarement aux problèmes liés aux machines, le *Hardware*, qui sera - nous le pensons - l'incarnation matérielle de la *Data Science*. Cette informatique n'a cessé d'évoluer dans le bon sens depuis des décennies, puisque nos ordinateurs sont de plus en plus puissants et de plus en plus compacts. Nous sommes tellement habitués à cette amélioration sans fin des machines que nous parlons même de *dématérialisation* lorsqu'un service devient digital. Ce concept de

¹ Le terme de *Data Science* Le terme *Data Science* a été inventé par William Cleveland dans un article paru en 2001 intitulé

« *Data Science: An Action Plan for Expanding the Technical Areas of the Field of Statistics* ».

² « *Data Scientist: The Sexiest Job of the 21st Century* » by Thomas H. Davenport & D.J. Patil, in Harvard Business Review, October 2012.

³ Le 15 octobre 2014, les groupe Keyrus, Thales et Orange ont inauguré une nouvelle Chaire « *Data Scientist* » à l'Ecole Polytechnique.

⁴ Calculateur quantique dit « adiabatique » développé et commercialisé par D-Wave Systems Inc. en couverture du Time Magazine : « *The Infinite Machine* », Time Magazine, February 17th, 2014.

⁵ Puce électronique inspirée du cerveau (brain-inspired chip) développée par IBM qui se compose comme le cerveau de deux hémisphères : un hémisphère dédié aux tâches analytiques et logiques, et un autre hémisphère où des neurones électroniques sont capables de nouer des connexions synaptiques avec d'autres neurones, et introduire ainsi la nuance et la reconnaissance de forme qui manque cruellement aux architectures habituelles. Voir par exemple : « *Neuromorphic computing : The machine of a new soul* » The Economist, August 3rd, 2013.

dématérialisation est même révélateur du peu d'intérêt que l'on accorde aux machines qui devront pourtant réaliser les desseins de la Data Science.

Pour comprendre les tenants et les aboutissants de notre analyse, une petite rétrospective s'impose. En effet, la manière dont les ordinateurs sont encore très majoritairement conçus aujourd'hui repose sur une architecture vieille de plus d'un demi-siècle. Il s'agit de l'architecture proposée par John Von Neumann en 1945, célèbre mathématicien et physicien, qui a dirigé un projet de calculateurs à tubes électroniques⁶ (i.e. l'ancêtre du transistor, cf. infra), financé par l'armée américaine, afin de réaliser des calculs balistiques. Même si des variations ont été faites autour de cette architecture, elle demeure l'ossature autour de laquelle nos ordinateurs s'articulent encore aujourd'hui. Cette conception est fondamentalement *séquentielle* : les opérations effectuées par l'ordinateur sont effectuées les unes après les autres, selon un programme d'instructions écrit par l'homme. Le micro-processeur exécute alors les opérations de façon quasi-séquentielle et absolument pas en parallèle. Et c'est ici l'une des premières faiblesses de cette architecture et de ses variantes, qui est parfaitement représentée par une métaphore portant le nom de « *goulot de Von Neumann* » : lorsque la fréquence de cadence du micro-processeur n'est pas assez grande au regard des quantités de données et d'opérations qu'il a à exécuter, le microprocesseur devient limitant et constitue une sorte d'étranglement du flux d'information traitée. De nos jours, les effets de ce manque de parallélisme se font moins sentir, car les microprocesseurs sont cadencés à des fréquences dépassant le Giga-Hertz, à savoir plus d'un milliard d'opérations par seconde. Et si l'on souhaite aller encore plus vite, il faut doubler voir quadrupler le nombre de micro-processeurs, cette fois en parallèle, obtenant des ordinateurs multi-coeurs qui sont aujourd'hui accessibles à un large public.

Cette architecture qui a fait le succès de l'informatique classique, a également eu une contrepartie négative. Son faible degré de parallélisme a freiné le développement de l'intelligence artificielle qui souhaitait reproduire l'architecture du cerveau humain, qui lui est par essence hautement parallèle. En effet, dès que les ordinateurs sont devenus assez puissants pour effectuer des calculs scientifiques avancés, les spécialistes de l'intelligence artificielle, ont eu l'idée de reproduire sur ordinateurs des réseaux de neurones artificiels et virtuels. Ces tentatives ont vite été confrontées aux limites des machines qui étaient incapables de gérer simultanément et en parallèle quelques milliers de neurones alors que le cerveau d'un simple vertébré en contient des millions voir des milliards. Pour le cerveau humain, on estime ce nombre à près de 100 milliards de neurones, avec pour chaque neurone, un nombre moyen de synapses (connexion) de l'ordre de 10 000. Ces ordres de grandeur suffisent à se rendre compte qu'il est tout simplement impossible de reproduire le fonctionnement réel d'un cerveau humain sur un ordinateur. En aéronautique par exemple, quand on souhaite simuler le comportement de plusieurs parties d'un avion, on effectue les calculs sur des machines différentes et en simultanées. Le fonctionnement du cerveau humain est à ce titre bien plus complexe que celui d'un avion, et nécessiterait à lui seul des ressources incommensurables.

A l'aube d'une seconde révolution quantique.

Depuis l'invention du transistor au sein des Bell Labs en 1947 et qui a valu à ses inventeurs le prix Nobel de physique en 1956, cet interrupteur électronique n'a cessé d'être miniaturisé afin de peupler par millions, et maintenant par milliards, les puces électroniques de nos ordinateurs et autres dispositifs, comme les smartphones. Le transistor est un sandwich de trois semi-conducteurs, comme le silicium qui a donné par ailleurs son nom à la *Silicon Valley*. Sans la physique quantique, il serait impossible d'expliquer la conduction électronique dans de tels matériaux, et donc de concevoir ce transistor qui incarne l'unité élémentaire de notre monde digital, à savoir *le bit* qui ne vaut que 0 ou 1. Cette *première révolution quantique* a fait notre monde digital actuel. C'est elle qui a donné naissance aux LED et à nos écrans plats, et c'est encore elle qui explique le fonctionnement des lasers à la base entre autres des communications par fibres optiques de l'internet à ultra-haut débit. Les applications sont si nombreuses qu'il serait peine perdue d'être exhaustif ici. Pour décrire la miniaturisation soutenue de l'électronique, une loi empirique a même été établie dès les années 70. Il s'agit de *la loi de Moore*⁷ et de ses variantes qui décrivent l'évolution du nombre de transistors sur des intervalles de temps réguliers. Une des manifestations de cette loi est que nos appareils digitaux sont fréquemment dépassés, et remplacés par des appareils plus puissants et plus fins. Cependant, cette miniaturisation va bientôt se heurter à un mur physique, celui des *effets quantiques*.

En effet, il ne sera plus possible de faire des transistors avec seulement quelques atomes et une pincée d'électrons. A de telles échelles, ce sont les lois de la physique quantique qui gouvernent. Cette physique est si étrange qu'elle a défié les esprits les plus brillants, comme Albert Einstein, qui pensait même que la physique quantique était incomplète. On sait depuis grâce aux expériences d'Alain Aspect en 1982 que Einstein avait tort sur ce point et que la physique quantique - bien qu'étrange - constitue l'une des théories scientifiques les mieux vérifiées. Ainsi, dans ce monde quantique, un système peut être dans *une superposition de deux états classiquement incompatibles* : une particule peut être à deux endroits simultanément. Cette étrangeté quantique, les physiciens ont eu l'idée de l'exploiter pour en faire une nouvelle manière de traiter l'information : *l'informatique quantique*. C'est ce que l'on appellera *la seconde révolution quantique*, celle qui exploitera véritablement *l'étrangeté du monde quantique* pour traiter plus efficacement l'information.

⁶ L'architecture de Von Neumann fut formulée dans le premier draft concernant le EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer) qui fut le premier ordinateur programmable et fonctionnant sur une base binaire.

⁷ La loi de Moore originale prédisait un doublement du nombre de transistors par unité de surface tous les 18 mois.

En informatique quantique, l'unité élémentaire d'information est *le bit quantique*, le Q-bit, qui peut être dans une superposition quantique des deux états classiques et incompatibles du bit classique 0 et 1. En quoi cela peut être utile ? En encodant l'information sur de telles superpositions, on dote la machine d'une faculté plus qu'appréciable : *leparallélisme*. Cette faculté permet à la machine d'effectuer en parallèle un grand nombre d'opérations, contrairement aux architectures habituelles qui les effectuent de manière séquentielle, les unes après les autres. En outre, une machine quantique utilisera rarement un seul Q-bit pour effectuer des calculs. Elle aura recours à ce que l'on appelle un registre de plusieurs Q-bits. C'est là qu'une autre spécificité du monde quantique intervient : *l'intrication*. C'est elle qui a perturbé Einstein de part les très fortes corrélations qu'elle induit même à distance. En effet, un registre de plusieurs Q-bits peut être dans un état quantique dit *intriqué*, dans lequel les états des différents Q-bits du registre sont *enchevêtrés*, si bien que si l'on effectue une opération *localement* sur un des Q-bits, les effets se répercutent sur les autres Q-bits *instantanément*, sans agir directement sur eux.

L'intrication quantique, allié aux superpositions quantiques, constituent donc les ressources de base de ce qui rendrait *un ordinateur quantique universel* extrêmement puissant et intéressant. En effet, en 1976 chez IBM, Peter Shor proposa un algorithme (qui portera son nom) qui rend possible la factorisation de nombres entiers en facteurs de nombres premiers, et cela beaucoup plus vite qu'avec n'importe quelle autre machine classique. Or, les protocoles de cryptage sur lesquels reposent entre autres la sécurité des transactions financières et autres transmissions d'informations secrètes sont en majorité fondés sur le protocole dit RSA. Ce dernier a pour recette le produit de deux grands nombres entiers premiers pour générer la clé de cryptage. La sécurité de ce protocole repose uniquement sur le fait qu'il faudrait plusieurs fois l'âge de l'univers⁸ pour un ordinateur classique pour casser le code par la force brute, c'est à dire en réalisant une factorisation en facteurs premiers. Cet algorithme a motivé lui seul le financement des recherches en information quantique, et continue toujours à faire partie des arguments clés.

Néanmoins, dans l'état actuel des recherches, seuls quelques embryons d'ordinateurs quantiques universels existent dans le monde, confinés encore à des laboratoires académiques parmi les institutions les plus prestigieuses. La France n'est pas en reste, avec notamment le Laboratoire Kastler Brossel⁹ qui a reçu récemment un troisième Prix Nobel en 2012 pour des travaux allant dans ce sens. Toutes ces tentatives expérimentales se heurtent à un ennemi de taille : *la décohérence*. En effet, un Q-bit est un état fortement non-classique et fragile, dont la moindre interaction avec l'environnement le transforme irrémédiablement en un vulgaire jeu de « pile ou face » classique. L'un des enjeux de ces expériences est justement de contrôler son interaction avec l'environnement afin de limiter les effets de cette décohérence durant les phases de calcul.

Du Calculateur Quantique Adiabatique au Machine Learning

L'actualité des calculateurs quantiques a connu récemment une petite révolution¹⁰. Une société canadienne, *D-Wave Systems Inc*¹¹, a annoncé avoir vendu à Google et à la NASA un calculateur quantique sur lequel cependant beaucoup de doutes planaient au sein de la communauté scientifique. Ces doutes sont compréhensibles étant donnés les efforts continus et colossaux que les chercheurs déploient depuis des décennies pour mettre au point un tel ordinateur quantique.

Cependant, il existe une nuance de taille. Le calculateur que propose D-Wave n'est pas un ordinateur quantique universel, mais un *calculateur quantique adiabatique*. Quelle est la différence ? Un ordinateur quantique universel est une machine programmable à base de portes logiques elles-mêmes quantiques agissant sur des registres de Q-bits. Il est aujourd'hui communément admis que la réalisation d'une telle machine prendra encore quelques décennies avant d'aboutir à une solution viable et robuste à l'égard de la décohérence induite par l'environnement ambiant.

Par contre, *un calculateur quantique adiabatique* n'est pas un ordinateur quantique universel. Il s'agit d'un calculateur dédié à résoudre une classe particulière de problèmes d'optimisation combinatoire pour lesquels il existe une correspondance directe entre la physique quantique au coeur du microprocesseur d'un tel calculateur et les graphes du problème d'optimisation que l'on cherche à résoudre. Ces graphes interviennent dans énormément de problèmes d'optimisation combinatoire, dont le plus célèbre d'entre eux est sans nul doute *le problème du voyage de commerce*. Imaginez un voyageur de commerce qui doit effectuer la visite d'un certain nombre de ville au moins une fois tout en minimisant la distance globalement parcourue. Ce problème est un problème plus complexe qu'il le semble. Chercher la solution exacte exige de générer toutes les configurations, ce qui implique *une explosion combinatoire*. Autrement dit, le temps de calcul croît de manière exponentielle avec le nombre de ville à visiter. Par contre, le problème de décision associé, c'est à dire savoir si un trajet donné est inférieur ou supérieur à une distance donnée est un problème qui ne requiert qu'un temps raisonnable pour être fait. Dit autrement, il est plus facile de vérifier qu'une solution est acceptable que de rechercher une solution optimale.

⁸ On estime actuellement l'âge de l'univers à 14 milliards d'années.

⁹ Le Laboratoire Kastler Brossel est une UMR de l'ENS de Paris, de l'UPMC et du CNRS qui a eu tout au long de son histoire une lignée de trois prix Nobel en physique : Alfred Kastler (1966), Claude Cohen-Tannoudji (1997) et Serge Haroche (2012).

¹⁰ D-Wave Systems Inc. en couverture du Time Magazine : « The Infinite Machine », Time Magazine, February 17th, 2014.

¹¹ Site Web : <http://www.dwavesys.com/>

Le calculateur quantique adiabatique proposé par D-Wave est exactement une machine utile en ce sens. Nul besoin de la détenir. On peut lui soumettre une requête à distance et la machine quantique nous fournira une suggestion de réponse qu'il suffit alors de tester sur la machine classique, compte tenu du critère que l'on aura retenu. Si la solution nous convient, le problème est résolu, sinon on refait une requête pour obtenir une meilleure suggestion. On montre alors que cette approche est la plus judicieuse à plusieurs titres : le calculateur quantique joue le rôle d'un « oracle » suggérant des solutions - beaucoup plus rapidement qu'avec n'importe quel ordinateur classique - et nos machines classiques se contentent simplement de vérifier que ces solutions vérifient bien un certain nombre de conditions que l'on exige d'elles.

Ce calculateur quantique adiabatique peut alors s'articuler en symbiose avec un algorithme de Machine Learning classique. C'est ce qui semble avoir motivé l'achat de cette machine par Google, notamment dans son projet de Google Car, où les algorithmes de reconnaissance de formes sont réputés faire intervenir des problèmes d'optimisation combinatoire très complexes.

Le Cognitive Computing aura également son Hardware: Des puces inspirées du cerveau.

Sur certains aspects, le cerveau des vertébrés réalise ce que l'on appelle en mathématique une quantification vectorielle, en réduisant l'espace des données qui est généralement de très hautes dimensions à des espaces de 2 ou 3 dimensions. En ce sens-là, les neurones constituent des classificateurs de signaux qui sont susceptibles d'être activés lorsque le stimulus qui se présente remplit un certain nombre de conditions. Mais à l'échelle du cerveau, lorsque deux stimuli se présentent, ces derniers stimulent des zones qui sont d'autant plus proches que les stimuli sont différents. C'est ce que l'imagerie médicale nous enseigne. C'est de cette façon que le cerveau est capable de reconnaître différentes nuances d'une même couleur, alors qu'un ordinateur se bornerait à retenir et à ne reconnaître que certaines combinaisons des trois couleurs primaires RVB.

Cette faculté de nuance et d'auto-organisation dont est capable le cerveau est une richesse indispensable lorsque l'on a à traiter et visualiser des données variées, comme c'est le cas avec les Big Data. En effet, les ensembles de données réels sont loin d'être parfaits : ils comportent souvent des données manquantes. On montre alors que les méthodes neuronales peuvent être plus robustes face à des matrices creuses, des données manquantes¹², bien plus efficaces que les méthodes d'apprentissages classiques.

En pratique, les spécialistes ont recours à des réseaux neuronaux à deux dimensions grâce auxquels ils peuvent ainsi visualiser la structure de données issues de bases à très hautes dimensions. C'est le cas des *cartes auto-organisatrices*, ou *Self-Organizing-Map* (SOM). Ces réseaux de neurones ont été proposés par le physicien Finlandais Teuvo Kohonen dans les années 70, et avec déjà des propositions d'implémentation électronique, et pas seulement algorithmique.

Depuis 2011, IBM se lance dans le développement de « brain-inspired chips » dédiées à combiner intimement la puissance de calculs des microprocesseurs usuels et la faculté d'adaptation - aussi appelée *plasticité* - du cerveau au sein d'une seule et même puce électronique. L'ambition est claire : ces puces habiteront nos appareils qu'ils soient portables ou non, afin de les doter de plus d'intelligence et de nuance dans leur interaction avec les data qu'elles traitent mais aussi avec leurs utilisateurs. Nous venons d'atteindre le stade « neuromorphique » de la machine, du « hardware ».

Vers un Cloud Quantum Computing

Ainsi, nous avons abordé les deux mutations technologiques qui changeront radicalement la manière avec laquelle la Data Science s'accomplira dans un avenir proche.

Les puces neuronales proposées par IBM en sont au stade du développement bien que prometteur, si l'on en croit les projections phénoménales en termes de neurones et de connexions synaptiques. Ces puces permettront à terme de rendre intelligent n'importe quel appareil sans avoir recours à des services par Cloud, comme c'est le cas actuellement avec la reconnaissance vocale sur iPhone ou Android. En effet, les algorithmes de reconnaissance vocale ne sont pas logés dans le device lui-même, mais accessibles en cloud, avec les inconvénients que cela comporte, y compris en terme de propriétés de données.

En revanche, pour des applications bien plus ambitieuses, comme la voiture sans conducteur de Google, *le calcul quantique adiabatique* devient un allié bienveillant, car il est amené à jouer son rôle d'oracle en étant accessible via ce que nous appellerons *le Cloud Quantum Computing*.

¹² Voir par exemple : Smaillbou, « *Classification, Analyse de Correspondances et Méthodes Neuronales* », Thèse de doctorat de l'Université Paris 1 - Panthéon-Sorbonne (Janvier 1998).

Un tel service aura de multiples applications tant la complexité des data et des algorithmes utiles pour les traiter ne cessera de croître dans tous les domaines. C'est par exemple le cas pour le développement de traitement contre certaines maladies. On montre en effet qu'un simple polymère de 5 acides aminés peut se replier en près de 100 milliards de configurations. Ces aspects d'optimisation combinatoire complexe sous-tendent énormément de sujets à forts enjeux et potentiels : séquençage de l'ADN, oncologie préventive et prédictive...

Le Cloud Quantum Computing est pour nous le prochain modèle SaaS : il constitue ce que nous appellerons *The Third Age Machine*¹³ : ce 3^{ème} âge des Machines (3^{ème} âge de l'informatisation) que nous avons défini et qui succède parfaitement à la mécanisation industrielle (1^{er} âge de l'informatisation) et à l'intelligence artificielle et la robotisation (2^{ème} âge de l'informatisation).

Cette informatique quantique et cognitive est une nouvelle étape dans le développement des machines et de l'informatisation : cette informatique est au service du traitement des données massives et multi-structurées (Big Data) et sera bientôt accessible en mode hébergé (cloud) et consommé à la demande (pas d'achat de logiciel ni de hardware) à des prix de plus en plus faibles...

¹³En référence à Erik Brynjofsson et Andrew McAfee, *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*, W. W. Norton & Company (18 février 2014).