

# UNE ÉPISTÉMOLOGIE DES MODÈLES INFORMATIQUES DE L'ESPACE AMBIANT

## Les verrous de l'intelligence ambiante

Michel Riguidel

**Résumé :** L'article présente le règne numérique comme un écosystème dynamique, darwinien, puis analyse l'émergence du concept d'intelligence ambiante, et dresse enfin un tableau des technologies de l'information et de la communication (TIC), avec leurs évolutions possibles sous la forme d'une feuille de route. L'article analyse ensuite les verrous et les moteurs de l'évolution des TIC en examinant les représentations sous-jacentes qui figurent l'état de l'art en matière informatique de l'intelligence ambiante, et les principes et les conditions pour qu'un modèle conceptuel puisse apparaître et prospérer. L'article conclut par la proposition de nouvelles représentations des communications à venir et par l'exploration de nouveaux modèles de l'Internet de demain.

**Mots clés :** Intelligence ambiante, modèle informatique, épistémologie, réseau, Internet du futur.

## 1. VERS UNE INGÉNIERIE PLUS SUBTILE DES LIAISONS ENTRE OBJETS COMMUNICANTS

Au début du film *Pierrot le Fou* [1] de JL. Godard, JP. Belmondo (Pierrot et Ferdinand) commence à lire un extrait de l'histoire de l'art emprunté à Élie Faure [2] devant la Librairie « Le meilleur des mondes » pour le terminer allongé dans sa baignoire, lisant à sa fille un passage à propos du peintre Diego Velasquez, lequel préférait peindre les rapports entre les êtres plutôt que les êtres eux-mêmes : « Velasquez, après cinquante ans, ne peignait plus jamais une chose définie. Il errait autour des objets avec l'air et le crépuscule, il surprenait dans l'ombre et la transparence des fonds les palpitations colorées dont il faisait le centre invisible de sa symphonie silencieuse. Il ne saisissait plus dans le monde que les échanges mystérieux, qui font pénétrer les uns dans les autres les formes et les tons, par un progrès secret et continu dont aucun heurt, aucun sursaut ne dénonce ou n'interrompt la marche. L'espace règne [...] C'est comme une onde aérienne qui glisse sur les surfaces, s'imprègne de leurs émanations visibles pour les définir et les modeler, et emporter partout ailleurs comme un parfum, comme un écho d'elles qu'elle disperse sur toute l'étendue environnante en poussière impondérable... ».

Par analogie, en informatique, cet article propose d'explorer une nouvelle approche de l'espace ambiant par une vision de l'espace, des objets et des sujets et d'opérer un changement de point de vue en se focalisant davantage sur les relations entre les entités plutôt que de considérer les objets communicants eux-mêmes. On entrevoit dans toute l'innovation du secteur des TIC, une déstabilisation des architectures et des styles, une pénurie de modèles, une incertitude sur les objets en termes de *design*, une perte d'identité des objets conceptuels. Si Internet s'est renouvelé dans les années 2000 avec la circulation des contenus multimédia, l'intelligence ambiante, une notion encore balbutiante, devrait se révéler par un enrichissement des modèles de communication.

## 2. L'UBIQUITÉ DU RÈGNE NUMÉRIQUE

### 2.1 Le règne numérique

Le règne numérique naquit il y a 60 ans et occupe maintenant pleinement le milieu, aux côtés des règnes, animal, végétal et minéral. C'est un règne plus ou moins domestiqué, qui n'a pas encore revendiqué son indépendance. Les verrous technologiques et l'inquiétude éthique de l'évolution de cette création envahissante et fragile « à la Frankenstein » sont les thèmes de cet article.

Ce règne numérique se concrétise par des espèces dynamiques souvent mobiles, qui obéissent aux lois d'une évolution rapide, d'une sélection naturelle d'usage, à l'échelle de temps de l'informatique. Il fournit des services adaptés aux ordinateurs, mais aussi à l'environnement, à la personne et aux autres objets physiques, tout ceci en fonction du contexte. L'ordinateur n'est plus un dispositif autonome pour réaliser une tâche de calcul ou un processus automatisé d'ordonnement. Les réseaux ne sont plus des maillages d'ordinateurs pour acheminer des bits d'information et les relier entre eux. L'urbanisation digitale est devenue une entité nouvelle, fournissant l'intégralité de services *in situ*, tirant sa richesse du monde numérique et de sa relation avec le monde physique et vivant. L'interaction toujours plus performante et riche (par une éclosion d'une variété de nouveaux capteurs, de nouveaux déclencheurs), avec le monde physique et vivant est un des enjeux des prochaines années pour les nouveaux services et usages et l'économie de ce secteur.

## 2.2 La morphogenèse du monde numérique

Dans le secteur des TIC, coexistent des forces et des vitesses de transformation radicalement différentes.

- Le matériel suit la loi de Moore avec un doublement de la puissance tous les 18 mois, avec pour effet un réajustement des équilibres structurels entre matériel et logiciel, environ tous les 3 ans : renouvellement du parc informatique des entreprises ou des appareils électroniques portables des particuliers, versionnage de logiciels.
- Les infrastructures (2G, 3G) réseaux ont des cycles de 10 ans et les usages dans les réseaux évoluent tous les 5 ans environ : modification dans les équipements des réseaux, amélioration des débits de bout en bout, apparition des nouveaux services et de nouveaux contenus multimédia, changement dans la typologie des attaques des pirates.
- Le logiciel poursuit une progression beaucoup plus lente : une nouvelle génération de services différents, de langages informatiques, d'environnements de développement, d'outils de gestion des logiciels, tous les 10 ans environ. Le génie logiciel est en peine d'industrialisation, pour ne pas dire en panne, depuis les années 1980.
- Les infrastructures physiques et les logiciels de base évoluent peu : les protocoles TCP/IP ont 40 ans, les langages de requêtes SQL datent de 1980, Unix d'AT&T aux Bell Labs, puis le noyau Linux ont peu changé.
- La législation évolue à des rythmes de l'ordre de 10 ans : directives européennes sur la signature électronique, sur le respect des données privées, sur l'obligation de stocker les données personnelles de traçabilité.

Ce sont ces hiatus permanents entre les rythmes de transformation qui provoquent des chocs techniques frontaux, des contraintes nouvelles, lesquelles se résolvent par l'apparition de nouvelles lignes de force dans le paysage informatique. Ces vitesses de transformation différentes désarticulent l'assemblage des diverses technologies, bousculent les architectures, défient les normes en place et favorisent l'apparition de nouvelles formes stables. En outre, l'usage dévie parfois fortement de l'idée que les concepteurs se faisaient d'une technologie et de nouveaux marchés se créent, là où on ne les avait pas prévus.

Par-delà ces réajustements structurels, il existe des mouvements profonds, d'ordre économique, comme la convergence numérique, pour opérer un remembrement permanent du paysage numérique, pour l'optimiser, pour uniformiser les protocoles, les formats et les architectures, harmoniser les ressources matérielles et logicielles, et pouvoir s'étendre davantage à de nouveaux services et à de nouveaux usagers. Les normes et les standards ont eu un rôle déterminant dans la convergence numérique entre l'informatique, les télécommunications et l'audiovisuel. Par exemple, les normes du multimédia (JPEG, MPEG), les standards de la compression de l'image et du son, ont dû passer sous ce joug pour pouvoir être distribué indifféremment sur les trois médias et devenir ainsi des biens numériques de consommation courante.

Enfin, les appropriations par les usagers et plus généralement l'acceptation sociétale revêtent divers aspects : conquête fulgurante (téléphone portable, Facebook), accommodation lente (PC dans les foyers), adaptation longue aux TIC pour certains secteurs (santé, enseignement par les TIC).

## 2.3 Un écosystème darwinien

La théorie de l'évolution darwinienne, grâce au processus de sélection, est à interpréter avec une grille de lecture informatique. Toutes les populations d'entités informatiques (modèles, langages, architectures, protocoles, produits, équipements, logiciels, modules, fonctions, propriétés non fonctionnelles), qu'elles soient au contact de l'utilisateur final ou enfouies dans le corps d'une autre entité, s'exposent à des sollicitations individuelles vis-à-vis de l'environnement : technologiques avec d'autres équipements ou composants, économiques avec la concurrence des autres produits similaires et sociétaux. Il s'en induit l'existence d'une capacité intrinsèque indéfinie de variation potentielle des entités (flexibilité, évolutivité). Les entités évoluent (en général sous forme de versions) et s'adaptent en permanence à l'environnement qui comprend notamment les choix subjectifs des utilisateurs, le marché (le prix, la disponibilité, la publicité) et même le piratage facile (de nombreux produits copiables simplement au départ ont créé une dépendance chez les utilisateurs). La sélection des candidats les mieux adaptés désigne le fait que les propriétés qui favorisent la pérennité et le déploiement d'une entité, voient leur résilience et leur « valeur » s'accroître d'une génération à l'autre. L'évolution numérique darwinienne des entités, qui favorise une certaine diversité, par déstandardisation ou différenciation, repose sur trois principes [3] :

- le principe de variation qui explique que les « copies » d'une entité diffèrent les unes des autres (les clones dupliqués finissent par être modifiés) ou que les entités en compétition se différencient ;
- le principe d'adaptation (les produits ou les copies les plus adaptées au milieu survivent et se déploient davantage) et
- le principe d'hérédité (ou de filiation) enfin qui pose que les caractéristiques avantageuses dans une ligne de produits, une famille architecturale ou une philosophie conceptuelle doivent être transmises comme un caractère héréditaire (compatibilité ascendante).

Alors que Darwin ne distinguait pas l'intérieur et l'extérieur des êtres, il faut nettement distinguer en informatique la partie interne et privée des produits (les entrailles invisibles et indépendantes qui sont souvent en chantier permanent) et la partie publique, les interfaces fondamentales pour l'usage, le confort et l'arrimage au milieu existant. La partie interne qui met en jeu les heuristiques intervient comme une question de survie dans la qualité de la construction, dans sa confidentialité pour les entités couvertes par le secret de fabrication et dans le passage à l'échelle. L'interface publique doit être simple, efficace, pérenne.

## 2.4 L'urbanisation hétérogène d'entités abstraites à différentes granularités

Le règne numérique fut autrefois composé de grandes espèces transversales, à la fois conceptuelles et concrètes : les dichotomies entre le matériel et le logiciel, entre l'ordinateur et le réseau, entre la cybersphère privée et la sphère publique, entre l'intérieur et l'extérieur d'un système d'information, entre les sept couches de communication. Mais une impulsion évolutionniste brutale (vers les années 1997-2003) les a fait évoluer récemment pour rendre caduques toutes les césures tranchées de ces découpages manichéens. Une vague conceptuelle a submergé ces espèces naturelles et envahi un territoire numérique défriché par la mobilité des entités, la massivité des contenus, le haut débit continu de bout en bout, balayé par le vent de la mondialisation, pour muter vers des abstractions plus primitives et plus structurantes.

La première abstraction de haut niveau est l'écosystème. Il est de nos jours difficile de discriminer un programme et une donnée : les documents comportent des macro-fonctions, les pages HTML encapsulent des programmes, les programmes deviennent des données dans une sauvegarde. C'est un écheveau inextricable à démêler entre les fils exécutables sur les machines et les contenus massifs, sous forme du déploiement amalgamé et du déroulement intriqué de deux espèces de rubans monodimensionnels, tels des manuscrits rédigés à la plume :

1. les rubans exécutables, les machines informatiques actives qui accomplissent quelque chose qui a une signification, c'est-à-dire des machines abstraites de Turing qui sont les applications automatiques qui s'exécutent en fonction du temps et
2. les rubans statiques, les informations passives qui sont prises en charge par les services exécutables, c'est-à-dire les données des utilisateurs (séquences de 0 et de 1 qui obéissent aux lois de la théorie de l'information) : ce sont des fichiers, des documents statiques, des flux vidéos, des textes, des images, des paroles (Voix sur IP).

Dans la pratique, la masse connectée des objets manufacturés aux ressources informatiques rares qui nous entourent, provoque la démesure et renforce le gigantisme des métasystèmes numériques ouverts. Ces deux versants opposés sont appréhendés par deux notions informatiques fécondes, mais contraires : la virtualisation et l'incarnation.

La virtualisation est une notion ancienne. Elle consiste à jongler avec des entités informatiques d'ordre différent pour créer d'autres entités informatiques, plus efficaces, en réduisant la complexité du système transformé du point de vue de son maniement par les applications et les services. De même que l'approche objet a rénové la manière de fabriquer les logiciels, l'approche par virtualisation a métamorphosé le traitement des architectures informatiques. La mémoire virtuelle a modifié l'écriture des applications friandes en mémoire. La machine virtuelle Java a permis d'encapsuler et de filtrer des programmes informatiques distants dans les pages HTML du Web, ce qui a déterminé son succès initial. Les réseaux virtuels privés ont engendré des tranchées numériques dans les réseaux publics, ce qui a créé une certaine intimité dans un *no man's land* global et permis aux entreprises de déployer leurs échanges sur Internet. La technologie VLAN a permis de dissocier l'infrastructure de réseau local logique du réseau d'entreprise et l'infrastructure physique, ce qui a grandement contribué au succès de ces réseaux. La virtualisation permet d'abolir les frontières entre deux matériels, ou bien un matériel et un logiciel, de gommer les formes et les standards entre deux bases de données, de franchir des domaines différents en termes de politique de gestion, de router différemment des paquets, de jouer les passe-muraille à travers des technologies, à travers des réseaux hétérogènes. Au-dessus du découpage matériel et logiciel de J von Neumann, un plan virtuel est en train de s'installer pour longtemps encore dans toutes les architectures informatiques. Toutes les structures de recouvrement, tous les réseaux de superpositions sont aussi des paradigmes dérivés de cette opération de virtualisation.

L'incarnation (« *embodiment* ») est une notion contraire à la virtualisation, encore peu répandue. Alors que la virtualisation voudrait annihiler les figures rebelles à la transparence et à un monde sans couture, l'incarnation permet de concevoir et de révéler des formes dynamiques et du même coup de créer de l'intelligence localement, là où il n'y en avait pas. L'intelligence artificielle et la robotique sont en train de se renouveler alors qu'elles avaient proclamé un peu trop tôt leur réussite dans les années 1980. Une nouvelle école efficace et pragmatique pointe à l'horizon avec l'idée fondamentale que la connaissance n'est pas un résultat de l'information et d'un calcul [4]. L'intelligence n'est pas que du calcul, mais elle exige un corps au sens physique du terme. Les premières réussites sont dans le domaine des robots reconnaissant leur entourage, comprenant la situation, assistant les personnes dans des besoins domestiques. Il va de soi que ce concept puissant aura des applications considérables dans le monde réparti des réseaux de capteurs, des intergiciels, dans la sécurité pour surveiller des situations éparées, dans l'informatique en général quand on cultivera à fond ce concept.

Alors qu'il existe de nos jours des systèmes répartis et des systèmes embarqués, on complétera dans le futur cette panoplie, avec les systèmes superposés (les « *overlays* »), correspondant à la virtualisation, et les systèmes confinés indépendants relatifs à l'incarnation. La virtualisation et l'incarnation sont les deux moteurs les plus puissants en 2010 pour encapsuler, démêler et abstraire les représentations informatiques primitives. Le concept de virtualisation fut très fécond ces dernières années, sans doute parce que les concepts de virtualisation du stockage, des réseaux, des matériels, des fichiers étaient finalement beaucoup plus matures et implantables que les structures auto-organisées.

La deuxième abstraction de haut niveau pour raccommoier ce *patchwork* est donc la virtualisation. Les technologies numériques « sans couture » s'insinuent autour des individus, tissent un maillage serré et créent une urbanisation numérique qui modifie les usages et bouleverse les valeurs de notre civilisation. C'est la réalisation et l'interfonctionnement de trois ubiquités complémentaires, celle des calculs (à partir des programmes exécutés ici et maintenant), celle de la communication (l'accès n'importe où, n'importe quand, en utilisant le ou les meilleurs tuyaux) et celle du stockage (l'information et la connaissance collectée, emmagasinée, représentée et visualisée, disponible partout et à tout moment). La valeur des biens numériques risque de dépasser bientôt la valeur des biens matériels, que ce soit pour

les individus, les entreprises ou les institutions gouvernementales. La virtualisation est un paradigme robuste de relations, en présence d'hétérogénéité. Elle représente un monde sans couture visible, mais est en fait cousue de fils blancs virtuels invisibles : les structures de recouvrement (« *overlay* »), les mécanismes de couches croisées (« *cross-layer* ») des piles protocolaires, les structures de balises (« *underlay, landmark* ») sont en fait des liens informatiques logiques ou virtuels pour nouer ensemble, de manière masquée, plusieurs entités et réduire la complexité vis-à-vis des services.

La troisième abstraction est la prise de pouvoir de nouvelles entités qui vivent leur cycle de vie, en toute autonomie, avec une auto-organisation. L'incarnation est adaptée à l'interaction avec l'environnement physique ou informatique. Les systèmes embarqués sont des entités indépendantes en relation directe avec l'environnement. Ces systèmes émancipés et miniaturisés communiquent à travers un réseau sous des contraintes de ressources, temporelles et d'énergie, en particulier.

## 2.5 L'intelligence ambiante

L'intelligence ambiante [5] a pour support l'informatique ubiquitaire. C'est un concept qui désigne un « espace intelligent », c'est-à-dire une urbanisation numérique, un milieu spatio-temporel (3D+1D) dans lequel baignent et évoluent désormais de manière interdépendante un écosystème numérique ainsi que les individus, les organisations, les États, mais aussi la nature qui les entoure. On assiste donc à la création d'un milieu en 3D de communication, à la naissance d'un écosystème numérique, à de multiples granularités, à l'échelle planétaire, à l'émergence d'une intelligence ambiante.

Un système ambiant est constitué d'infrastructures équipées d'entités spécifiques qui font partie intégrante du réseau et qui assurent des services d'intermédiation pour aider la communication (courtier de bande passante, gestionnaire de la localisation, mémorisation de la topologie des nœuds) ou pour faciliter le fonctionnement des terminaux (configuration, découverte de services).

Un réseau ambiant peut aussi utiliser les services externes donnés par une autre infrastructure présente (gestion du temps, de l'espace, de la ressource radio). L'ambiance qui est une intelligence accrochée aux murs des bâtiments physiques, lesquels supportent l'infrastructure de calcul et/ou de communication, va coopérer avec les fonctions de communication pour faciliter l'acheminement. Elle va aussi être utilisée pour configurer les applications en fonction de leurs usages géo-localisés.

Les intelligences ambiantes pour l'individu dans un appartement et dans le campus sont distinctes. Elles s'adaptent à l'environnement, aux services et aux usages revendiqués. La sémantique s'étend et varie selon la granularité de la niche de l'écosystème numérique. La substitution d'un langage commun par des dialectes variés et adaptés, si elle stimule l'adéquation de la situation, ne va pas sans dresser d'autres obstacles infranchissables à ce jour.

L'informatique diffuse, ce sont des réseaux de capteurs, des nuées de puces informatiques sans énergie comme des étiquettes intelligentes, pour la mutualisation informatique des objets communicants mobiles aux ressources de calcul et de communication rares. Cette « poussière intelligente » qui se répand dans le paysage urbain suscite de réelles interrogations de sécurité.

L'intelligence ambiante n'est pas un monde homogène de robots libres, proches de nous pour nous assister, nous aider dans nos tâches difficiles et pénibles. L'intelligence ambiante, c'est de « l'informatique située », c'est-à-dire une informatique qui dépend de la fonction, de l'environnement proche, du contexte, de la taille de la cybersphère en question. Ce peut être une intelligence à l'échelle :

- de la planète pour observer, analyser, détecter, identifier, alerter, décider, agir ;
- des communautés humaines pour collecter des données en temps réel ;
- d'une ville ou d'un quartier pour aider les citoyens ;
- d'une infrastructure de transport pour faciliter le trajet des voyageurs ;
- d'une maison pour l'éducation, l'information, le contrôle domotique, la vie quotidienne ;
- d'une personne pour surveiller sa santé via les mécanismes de contrôle des prothèses numériques dans le corps humain avec des interactions avec l'extérieur, que ce soit le patient soi-même, un aide-soignant à domicile ou un médecin connecté par télécommunication.

L'intelligence ambiante est une recherche pluridisciplinaire avec un socle informatique, qui est transversal à la microélectronique, au logiciel, mais aussi aux sciences humaines, à la législation puisque le comportement des acteurs joue un rôle capital dans l'évolution de ce règne numérique qui enrobe nos objets manufacturés, qui revêt nos murs, qui garnit nos agoras (les gares, les aéroports) et nos objets mobiles (trains, voitures).

Pourtant, il semble qu'au-delà des slogans et du jargon mercantile, on n'ait pas osé percer et aller jusqu'au bout des conséquences que ces expressions embrassent en réalité, en particulier au niveau des modèles informatiques de communication, de calcul et de stockage et d'interaction avec la réalité physique (les robots), la réalité vivante (l'informatique de la cellule, la bioinformatique), et la réalité invisible (les nanotechnologies).

L'intelligence ambiante n'a pas eu le succès escompté en regard des investissements réalisés depuis les divers programmes de recherche (Eurêka, PCRD) financés par l'Europe et par des industriels. C'était une « commande industrielle » au départ, poussée notamment par Philips Research, pour faire fluctuer l'éclairage dans le salon, informatiser la maison, le réfrigérateur, les objets quotidiens, voire le rasoir électrique. Alors que les programmes de recherche européens successifs mettaient en avant l'intelligence ambiante, c'est-à-dire plutôt une informatique sans fil à petite

échelle, se développait, au niveau des usages, une informatique à l'opposé, c'est-à-dire les applications pair à pair, une informatique distante pour rapprocher le graphe des internautes éloignés et isolés par virtualisation des ressources.

Les verrous de l'intelligence ambiante sont :

- la mobilité (avec la persistance et la continuité de la communication), le déplacement (avec la connexion par intermittence) des entités communicantes, la contextualisation et l'apprentissage du milieu (les services de découvertes, l'adaptation) de l'informatique ubiquitaire, la téléprésence des personnes physiques ou la présence éclatée du corps ;
- l'identité et la gestion de l'identité des divers objets, compte tenu de la massivité, sachant qu'à partir d'un certain cardinal des ensembles, l'identité d'un objet perd de son efficacité ;
- les propriétés primordiales des objets communicants : innocuité, transparence des fonctions, non-intrusion, non-addiction vis-à-vis de l'utilisateur ;
- les interfaces multimodales, les interactions hétérogènes dans l'assemblage de l'urbanisation de l'ensemble et la composition des différents agrégats dans les architectures des divers systèmes, les négociations ;
- l'intégration, la coopération (spontanée ou opportuniste) voire la collusion et la capacité d'apprentissage, à toutes les granularités, des niches qui s'entrecroisent et la gestion de cette complexité ;
- les aspects transversaux des usages prenant en compte la pluridisciplinarité.

Le volet non technique couvre un large spectre :

- convivial : l'interaction intuitive, plus générale que l'ergonomie ;
- psychologique : les phénomènes de rejet des dispositifs pour l'aide aux personnes âgées ;
- juridique : l'innocuité des robots, la propriété intellectuelle, le droit d'accès à une entité numérique, le droit à l'oubli dans toutes les traces enregistrées par ces objets, la réglementation sur les objets physiques ;
- éthique : le respect de la sphère privée des individus, la dignité numérique dans les infrastructures à des fins de surveillance ;
- politique : la liberté d'expression des citoyens dans des espaces semi-privés.

### 3. LA FEUILLE DE ROUTE DU MONDE NUMÉRIQUE

Dans une perspective numérique jusqu'à 2050, on peut découper la feuille de route technologique en trois phases. Les trois périodes distinctes ne se succèdent pas de manière tranchée, elles apparaissent, coexistent et disparaissent en biseaux, elles sont enchevêtrées les unes dans les autres. Les nanotechnologies existent déjà ; la communication quantique (qui n'est jamais qu'un ordinateur quantique avec un seul bit quantique) déjà opérationnelle en 2008 va côtoyer bientôt les infrastructures actuelles.

#### 3.1 Le repli des concepts, la convergence numérique : 1995-2015

La convergence numérique, grâce au succès des interconnexions et des interfaces ouvertes, aux progrès de l'optique, à la maîtrise des équations de Maxwell en champ proche, continue inéluctablement son œuvre pour abolir les démarcations entre l'informatique, les télécommunications et l'audiovisuel, dans le but de créer et d'harmoniser de bout en bout une chaîne de la valeur avec des infrastructures interopérables, des architectures configurables, des services adaptables et des terminaux compatibles. Elle se matérialise par l'émergence d'un réseau virtuel universel sur lequel on vient se brancher pour obtenir des services, mais elle se concrétise aussi par un affrontement brutal des standards, un combat féroce sur les marchés, un bouleversement dans les comportements et les usages et une modification profonde des acteurs et des règles économiques.

La convergence numérique actuelle, lutte frontale de trois industries pour dominer les standards et les paradigmes de la science numérique des bits d'information, s'exprime essentiellement par la promotion forcée d'Internet, un joug devenu incontournable pour l'éducation, les entreprises et les familles. Les trois appareils (le Téléviseur, l'Ordinateur, le Téléphone) ne vont pas se dissoudre en un unique objet communiquant, mais vont être compatibles les uns avec les autres, au prix d'une uniformisation préoccupante, source de fragilité, d'une banalisation, source de vulnérabilité. Les trois infrastructures vont cohabiter avec une quasi-compatibilité. Les protocoles, les formats et les standards vont se rapprocher, se chevaucher et s'uniformiser.

La technologie numérique se caractérise dans cette décennie comme marquée par une période de repli. Elle consiste à faire le ménage, à retoucher les ordinateurs, les téléviseurs, les téléphones afin qu'ils soient interconnectables et interopérables entre eux. L'interface avec les humains s'opère avec des claviers, des souris, des écrans, avec des microphones, des haut-parleurs, et de plus en plus avec la voix et les doigts, mais aussi des gestes, des clins d'œil, des mouvements, et même les pensées (il existe des produits qui différencient des patrons électromagnétiques du cerveau). Dans les télécoms on a établi que la masse de données envoyée par un équipement dépend directement de la richesse de son interface. Cette technologie numérique est peu connectée à la réalité physique : peu de réseaux de capteurs-actuateurs, peu de robots (quelques millions seulement en 2009). L'informatique tourne encore en vase clos.

#### 3.2 L'effervescence à venir : 2010-2030

La loi de Moore, qui heurte déjà l'échelle de l'atome, a infléchi son procédé de miniaturisation des transistors, et va poursuivre sa progression avec une parallélisation croissante des composants : Intel renonce au 4GHz en 2009 mais multiplie les cœurs de processeurs. La situation de repli technologique devrait changer avec la mue vers la période suivante qui devrait être chaotique, effervescente, une phase de réconciliation du virtuel avec la physique, de l'informatique avec la réalité. C'est l'émergence des étiquettes intelligentes avec identification radio (logistique sur colis en transit, animaux taggués et tracés), des réseaux de capteurs dans la ville (caméras de surveillance de tous ordres), dans la nature (détection de feu de forêt, de séisme), et dans les entreprises (inventaire en temps réel dans les hangars, maintenance et pièces détachées tagguées, flotte mobile de capteurs dans les véhicules), des réseaux à la maison, dans les voitures, des robots d'assistance à la personne, du télédiagnostic. Si l'Internet actuel a connecté 1,5 milliard d'ordinateurs entre eux, si le téléphone portable a branché 4 milliards de personnes entre elles, l'Internet des Choses devrait brancher des milliards d'objets. Les dysfonctionnements et les attaques dans ces configurations provoqueront des catastrophes réparties.

Les architectures sont bousculées et renouvelées en permanence pour rétablir un équilibre toujours instable entre, d'une part la complexité de l'urbanisation numérique, son hétérogénéité, son caractère informatique fortement distribué et, d'autre part la mobilité des entités ainsi que l'évolution continue de cette cible technologique mouvante, tant au niveau de sa technologie que de ses usages.

L'apparition de nouvelles infrastructures (des RFID pour étiqueter les objets réels aux constellations de satellites Galileo pour offrir l'heure et la position de ces entités étiquetées), la massivité et le rétrécissement de la taille des nœuds dans les réseaux, la diversité des interactions exigent une redistribution de l'intelligence dans ces urbanisations. Tous ces nœuds qui vont posséder des capacités de calcul, de communication et de stockage, seront conscients du lieu, du temps, du contexte, et capable de réagir avec l'environnement, après introspection.

Les futurs services innovants seront à cheval sur ces poly-infrastructures et l'économie numérique nouvelle prendra un essor décisif avec la richesse de ces services virtuels, spontanés et hybrides, qui auront puisé leurs ressources, là où elles étaient disponibles, dans l'intelligence ambiante. L'Internet et les réseaux cellulaires ne seront plus les deux seuls piliers du monde numérique. On abordera un monde *post-Google*, *post-3G* et *post-IP*, avec des services et des architectures multiples, qui se seront greffés sur ce réseau universel, avec des protocoles plus spartiates qu'IP pour irriguer les réseaux aux ressources rares, des systèmes d'exploitation moins gloutons que ceux que nous connaissons et des infrastructures mobiles moins fermées que celle des opérateurs de télécoms d'aujourd'hui.

La pénétration domotique (au sens large) est la prochaine voie royale, dans la droite ligne de l'intelligence ambiante. Mais ce monde appartient encore aux électriciens, pas encore au monde des télécoms. Il n'existe pas d'accord sur la passerelle pour entrer dans la maison ou rendre la maison communicante avec d'autres appareils (téléphone, puce sans contact, carte bancaire, RFID, télévision). Il faudrait convier ensemble électriciens, télécoms fixes et mobiles, câblo-opérateurs et constructeurs d'électronique grand-public afin de résoudre le manque d'intégration entre tous ces acteurs.

La taille des réseaux exige une capacité à s'auto-organiser, à s'adapter en fonction de ce contexte, d'analyser, de diagnostiquer, de se cicatrifier. Enfin la confiance, la sécurité, l'intimité numérique, la sûreté de fonctionnement doivent être assurées pour empêcher ces pannes gigantesques qui risquent d'apparaître dans les infrastructures satellites, dans l'Internet, dans les réseaux cellulaires, dans les réseaux d'accès périphériques ou dans les réseaux de capteurs ou d'actuateurs, qui handicaperaient l'activité économique, voire déstabiliseraient la société.

### 3.3 La technologie des NBIC et la science attoscopique : 2025-2050

On va franchir dans les 20 ans le « Rubicon atomique » pour atteindre le monde nanoscopique. Une nouvelle ère se dessinera : la réunification et la métamorphose des disciplines scientifiques, celle des nanotechnologies, celle qui fait que l'atome est devenu la véritable échelle de travail et qui fait que la table périodique des éléments naturels de Mendeleïev (surtout les éléments du milieu supérieur de la table, H, O, C, Si, mais aussi Ga, Ge, In, As) est devenue le nouvel horizon des concepteurs. L'informatique et les réseaux devraient alors radicalement changer de nature, puisqu'il faudra se connecter avec le monde massif de l'invisible.

Quand la convergence numérique sera accomplie (vers les années 2015), un autre affrontement inexorable risque de naître vers 2025, pour conquérir la suprématie du pilotage de l'avancée de la civilisation. Ce sera, ou bien les nanotechnologies pour faire du mécano à l'échelle des atomes et créer de nouveaux produits "manufacturés" (ou plutôt nanofacturés), ou bien les bio-géno-technologies pour "manipuler" (ou plutôt nanofaçonner) des cellules et pratiquer de l'ingénierie des cellules vivantes, qui vont l'emporter. On s'engouffrera dans un crépuscule numérique, puisque l'informatique traditionnelle deviendra une technologie au repos. L'informatique classique volera en éclats et donnera tout le champ libre aux recherches sur l'informatique quantique. L'ordinateur quantique industriel pourrait se profiler vers 2020, pour exécuter certains calculs seulement (pas tous) avec une rapidité 1 milliard de fois plus grande que celle des ordinateurs actuels. Pour les « spécialistes », cette date 2020 est la dernière prévision pour réaliser un ordinateur quantique avec une cinquantaine de quantum-bits, ce qui pourrait casser toute la cryptographie asymétrique actuelle (toutes les signatures électroniques deviendraient obsolètes).

La période de croisement avec la réalité vivante devrait durer 10 ou 15 ans, lorsqu'apparaîtra alors une nouvelle ère numérique, celle des Nano, Bio, Info, Cogno (NBIC), celle de l'homme qui parvient enfin à travailler à l'échelle de l'atome (les nanotechnologies), de la cellule vivante (les bio-géno-technologies), des photons (les ordinateurs quantiques). Ce sera un bouleversement radical de la civilisation. Les Uns et les Zéros de l'informatique devront se glisser entre les atomes et les cellules du vivant. Des vulnérabilités et des menaces d'un tout autre ordre devraient surgir de ce nanomonde :

guerre des Nanos, marché des cellules vivantes, guerre quantique pour casser les codes secrets des États, bref un nouvel affrontement à l'échelle de l'atome. Les pays qui veulent conserver une prééminence devront maîtriser la science de l'attomètre ( $10^{-18}$  m) à l'échelle des quarks, et la technologie de l'angström ( $10^{-10}$  m) à l'échelle des atomes. L'humanité, ayant assimilé les théories de l'espace-temps d'Einstein-Minkowski, devra dépasser notre vision à 4 dimensions, et se résoudre à admettre les théories d'un univers à plus de 4 dimensions (certaines d'entre elles étant nanoscopiques) et à plus de 4 forces. Les premières théories de Theodor Kaluza [6] datent de 1921 ! Elles furent occultées pendant plus de 50 ans. La théorie des cordes, de jauge, des branes et des supersymétries devraient s'affermir dans les 20 ans à venir. Le monde des quarks nécessite des espaces non hilbertiens avec des dimensions hétérogènes. Ce sont les mathématiques qui nous font défaut de nos jours, alors que les physiciens du siècle dernier avaient tous les instruments mathématiques à leur disposition pour leurs modèles (théorie de la relativité généralisée en 1916, mécanique quantique en 1925).

L'informatique se sera alors immiscée à toutes les échelles, dans toutes les nervures de la réalité, de la nature en créant ce nouveau règne. La nouvelle informatique du XXI<sup>e</sup> siècle devra ordonnancer ce monde artificiel invisible, ce monde massif ubiquitaire.

## 4. LES PRINCIPES ET LES MÉCANISMES DE L'ÉVOLUTION

### 4.1 Le socle théorique stable

Les technologies numériques (l'ordinateur, les réseaux) évoluent peu dans leur fondement. Elles obéissent à un progrès ininterrompu de la fabrication toujours plus efficace et de la miniaturisation inexorable des transistors. Mais c'est avant tout grâce à l'appropriation large, par tous les individus et les entreprises de l'automatisation des tâches et de la pratique informatique, que notre vie quotidienne s'est transformée. Ce succès place l'informatique en tête des moteurs de la civilisation occidentale depuis 50 ans. Cela ne saurait durer.

Les modèles perçants, qui font partie de la connaissance pure et abstraite, des pionniers de l'informatique sont finalement toujours présents dans les équipements : la machine de Turing (1936-38), l'architecture matérielle de l'ordinateur de von Neumann (1944-46), l'information de Shannon (1948-49), le logiciel de von Neumann (1949), les langages et le compilateur de Backus (1953-57). On a ici un bon exemple d'une utilisation vertueuse de la connaissance fondamentale :

- Il faut se souvenir qu'Alan Turing [7] a « inventé » l'ordinateur en 1936-38, en démontrant au départ une conjecture mathématique de David Hilbert.
- Claude Shannon [8,9] a transposé les théories (développées 50 ans plus tôt par L. Boltzmann) de la cinétique des gaz composés de molécules enfermées dans un volume, à un ruban linéaire de 1 et de 0. Les publications de 1948-49 sont déjà pressenties dans son mémoire de Master de 1936.
- John von Neumann [10] a conçu l'ordinateur actuel en inventant, d'abord l'espace de travail indispensable à une machine qui exécute automatiquement des algorithmes et ensuite la notion de logiciel, c'est-à-dire un « circuit électronique volatil » pour le modifier plus aisément, et éviter ainsi de passer son temps à « *patcher* » des circuits matériels.
- En 1954-55, John Backus [11] invente le FORTRAN et le compilateur. En 1959, il invente la notation qui décrit la syntaxe d'un langage de programmation de haut-niveau. Elle s'appela Backus-Naur Form (BNF) après que Peter Naur y eut apporté ses modifications.

Toutes ces théories datent de plus de 50 ans et rien vraiment d'essentiel n'est venu ensuite ébranler ces fondations.

### 4.2 La respiration de l'univers des TIC

#### 4.2.1 Le curseur architectural variable entre répartition et confinement

Il semble exister une scansion, sur un horizon temporel de quinze ans environ, d'expansions et de concentrations successives des infrastructures numériques, comme un mouvement d'accordéon entre d'une part les architectures plates, réticulaires, interconnectées, pendant les périodes de distribution, et d'autre part, les formes hiérarchiques, centralisées, compactes, lors des périodes de repliements.

Les réussites fulgurantes d'applications autonomes (eBay, BitTorrent, YouTube, Facebook) semblent contrarier la nécessité de l'émergence d'un consensus sur des normes en informatique, depuis quelques années. En outre, à la faveur de l'implémentation du concept de virtualisation des ressources informatiques, la naissance récente du *Cloud Computing* va à contrecourant de la période moderne d'une informatique en réseau (réseaux pair à pair, architectures largement distribuées, Skype). Il privilégie le retour à l'informatique en temps partagé, propriétaire, où les utilisateurs se connectent (via internet mais ce pourrait être des lignes spécialisées, comme autrefois), à leur compte informatique hébergé chez un fournisseur de ressources et de services, sur un seul ordinateur (ou une ferme de serveurs). Ce paradigme du *Cloud Computing*, et dans le futur les concepts de virtualisation des protocoles de l'Internet de demain, font-ils partie d'une scansion inédite pour un repli, ou une pause dans le déploiement d'une informatique répartie dont on aurait trop abusé ? Les conséquences sur le travail des normes s'en trouvera-t-il profondément modifié ?

#### 4.2.2 Les exigences versatiles des propriétés d'ouverture et d'interopérabilité

Les propriétés des systèmes numériques sont très dépendantes de leur morphologie. Selon que le système soit distribué ou centralisé, ses propriétés non fonctionnelles de sécurité, d'interopérabilité, d'administrabilité, d'évolutivité seront différentes. L'ouverture, la transparence, l'interopérabilité sont essentielles pour les applications réparties et pour les morphologies en réseau. Selon que la fonctionnalité du système ou du service soit intégrée, autonome ou bien au contraire dépendant d'autres applications ou associée à d'autres services (en *workflow* par exemple), l'obligation de composabilité ou d'interconnexion n'est pas la même.

Alors qu'on a connu, depuis 1995, une période numérique en réseau, il semble que l'on soit rentré dans une période de recentrage, de concentration à la recherche de puissance de calcul confinée, une période d'anti-internet, en producteur-consommateur, suite à l'éparpillement trop large de la toile. Ainsi, toute cette nouvelle informatique qui doit séduire des usagers, feint en fait d'ignorer l'ouverture (des interfaces publiques aux applications pour pouvoir s'y connecter), la transparence (l'originalité du service ou le secret de fabrication incite à une opacité des algorithmes), l'interopérabilité (les applications sont indépendantes et ne peuvent pas être composées les unes avec les autres). Elles réclament la neutralité, ce qui signifie en réalité pour ces applications, le droit de s'étendre sur n'importe quel réseau et de les traverser gratuitement. Cette dénégation pourra-t-elle résister longtemps, suite au déséquilibre économique qu'elle encourage, entre fournisseurs d'infrastructures de réseau (optique et radio) et fournisseurs de services ou de contenus ? La volatilité des internautes fanatiques du modèle de gratuité, va-t-elle finalement enrayer la spirale vertueuse engendrée par l'extension d'internet et par la diversité des services innovants ?

#### 4.2.3 Le débat entre les normes et les standards *de facto*

Si l'on doit opter pour des normes officielles ou des standards *de facto*, le monde des TIC est marqué moins par des normes, que par les standards. Le standard PC (matériel et logiciel) est une réussite de l'industrie, conduite par le couple Intel-Microsoft qui a réussi à faire vaciller le géant de l'informatique que fut IBM. Il existe donc deux approches différentes : celle de la normalisation résulte d'une approche stratégique des besoins. Elle fixe des objectifs, définit des programmes de travail, recherche et mobilise des experts. À l'opposé, l'approche de standards *de facto* consiste à consigner ou à orienter les solutions techniques que l'expérience a permis de dégager. C'est plutôt ce que cherchent à faire les différents forums ou groupements industriels. Les deux attitudes antinomiques, l'une animée par la production de normes et l'autre par l'émergence de standards, subsistent de nos jours, dans l'évolution des canons de l'informatique :

- Une vision rationnelle où les normes réfléchies sont décidées après un long travail consensuel d'experts indépendants. La maturation « objective » prescrit une conception robuste et laïque, une description agnostique des formes (protocoles, architecture de réseau, algorithmes de compression, de cryptographie, services de base, styles d'interfaces homme-machine) ou une ingénierie de lignes de produits stables (routeur, pare-feu, serveur de clés, identité biométrique). Ce sont par exemple les normes de compression d'images vidéo MPEG2, les normes de l'intimité numérique P3P sur le Web, l'interface interopérable XML de base de données, la suite protocolaire TCP/IP et le DNS sur Internet, la nouvelle 3G LTE (*Long Term Evolution*).
- Une vision spontanée, dynamique, volontariste, voire brouillonne, où les standards s'imposent, à l'initiative d'un groupe d'entreprises (Bluetooth essentiellement créé par Ericsson et Nokia), de quelques personnes appartenant à une seule entreprise (le protocole MPLS chez Cisco, le langage Java chez Sun, les architectures pair-à-pair de Napster), au gré des forces du marché et des usages (applications Web2 comme SecondLife, applications de téléchargement comme BitTorrent). L'opportunité d'un service innovant mais propriétaire (système d'exploitation Windows, base de données Oracle, collecticiel SAP), l'adéquation aux besoins d'un nouveau produit (les architectures de micro-ordinateur d'Intel), l'adhérence aux souhaits des utilisateurs (téléphone portable comme l'iPhone), finissent par l'emporter et décider d'un standard *de facto*, s'affranchissant de longues délibérations d'experts.

Les normes façonnent le paysage informatique en dessinant, au fil du temps, une généalogie de formes canoniques, qui l'organise et préside à sa mutation. Si ces normes s'avèrent pertinentes, elles résisteront à l'érosion du temps, à la transformation des usages, et elles absorberont les conflits technologiques, amorcés par l'émergence d'innovations. Si ces normes sont lourdes, complexes, elles auront du mal à s'adapter au paysage changeant de l'informatique et disparaîtront en désuétude. Ces normes sont plus que jamais d'actualité lorsqu'il s'agit de spécifier des infrastructures de réseau où la perspective à long terme, la justesse des fondations, la compatibilité passée et à venir et l'interopérabilité avec les concepts adjacents demeurent des propriétés essentielles pour les diverses implémentations qui se concrétiseront suite à des investissements lourds. Ce sont par exemple GMPLS, IMS, la 3G+, les grilles. Ces normes ont aussi toute leur justification, lorsque ce sont des algorithmes de base qui transcendent de nombreuses applications et lorsque la concurrence des produits intervient de façon résiduelle : turbo-codes, heuristique de compression, algorithme de chiffrement AES, certificat X.509.

Les standards *de facto* surgissent souvent dans un champ de contraintes (de technologie ou d'usage) très fortes. Ils introduisent alors des ruptures, des réductions de la complexité, des simplifications dans les architectures qui court-circuitent les assemblages peu performants et trop alambiqués. La compétition dans les usages est généralement à l'origine de bonds en avant dans le progrès informatique. Java grâce à ses bibliothèques normalisées s'opposa à la pesanteur de C++, HTML naquit de la simplification de SGML, le format de texte figé Acrobat PDF d'Adobe, entièrement propriétaire, s'est imposé pour échanger des documents en lecture, en face du maquis incompatible des formats d'éditeurs de texte.

### 4.3 Les freins de l'évolution

#### 4.3.1 Vers de nouveaux paradigmes pour régir la complexité

Le chaos scientifique et technologique actuel et à venir des TIC provient de l'impasse conceptuelle dans l'appréhension du couplage des modèles et la gestion difficile de la complexité (les plis, les entrelacs, le tissu des sémantiques des différentes disciplines) et de la continuité à assurer à certaines échelles (temps, espace), dans certains contextes (physiques, économiques). Les mécanismes, les contraintes, les verrous sont fonctions de la granularité. C'est l'articulation entre les différentes échelles qui est problématique. On ne parvient pas à tisser les différentes sémantiques des modules des différents systèmes complexes. On a du mal à progresser dans les sciences physiques, dans les mathématiques, en informatique, dans la science des systèmes et des symboles, à cause de la complexité des questions multidisciplinaires que l'on n'arrive pas à dénouer et des archétypes hétéroclites que l'on ne parvient pas à réunir.

#### 4.3.2 Vers de nouveaux modèles d'interfaces informatiques

Le verrou fondamental de l'informatique et des réseaux reste le goulet d'étranglement permanent qui se situe à la jonction entre l'ordinateur et le réseau qui est le syndrome du dernier centimètre en informatique, en regard du syndrome du dernier kilomètre en télécoms. Avec l'émergence des paradigmes récents (structures de recouvrement, services Web, réseaux actifs, intergiciels, P2P, grilles), des protocoles encore jeunes (SIP...), la sacro-sainte séparation entre les applications et les communications a fini par voler en éclats. Une des causes en est évidemment le succès des réseaux de paquets, lesquels ne garantissent pas en standard une qualité de service suffisante pour des services classiques rudimentaires comme la transmission de la voix par téléphone. La raison plus fondamentale du goulet est qu'il faut bouger des bits d'information d'un point à un autre. Ce processus est efficace sur une fibre optique, environ 1000 fois moins efficaces en radio, et ce transport est pilotée dans une manufacture spécifique (l'usine à protocoles) propre aux appareils électroniques, qui met en jeu un paquetage et une logistique pesante. C'est tout le domaine de l'ingénierie des protocoles qui veut tout prendre en compte dans une unique pile protocolaire trop rigide, non configurable, ensevelie sous la tutelle d'un système d'exploitation « protecteur », quitte à hypertrophier cette pile par des préoccupations inexistantes pour la communication présente.

#### 4.3.3 Vers de nouveaux modèles d'interrelations hybrides

L'interaction entre la réalité physique et l'informatique répartie est un verrou majeur de l'intelligence ambiante. Cette question a été sans cesse sous-estimée. Le frein à la mise en place de l'intelligence ambiante est la communication radio. Les évolutions de la gestion du spectre sont toujours des questions négligées, voire ignorées. L'architecture de l'accès, les protocoles de la couche de transmission, la sécurité, les flux radio ont été réglés de manière centralisée et hiérarchique, avec une culture d'abonnés à un opérateur, par les réseaux d'origine des télécommunications, dans la filiation de la famille des réseaux cellulaires (GSM, GPRS, UMTS, HSDPA, LTE), et de manière spécifique et délocalisée, avec une culture de système d'information, par les réseaux d'origine informatique, dans la famille IEEE 802.11 et 802.16. Il faudra lever ce verrou par des abstractions (cellules virtuelles attachées aux entités) pour réconcilier ou surmonter les architectures trop rigides des réseaux cellulaires ou trop simplistes des réseaux IEEE. L'intelligence ambiante ne fonctionnera pas tant que les communications radios numériques ne seront pas incarnées, instanciées, améliorées pour leurs réelles fonctions auxquelles elles sont dédiées. Des recherches doivent se concentrer sur l'infrastructure de communication sous-jacente des réseaux de périphérie en femto-cellules, des réseaux auto-organisés, des réseaux d'objets communicants, des réseaux de capteurs, des réseaux de *tags* (NFC, RFID) ainsi que sur leur gestion et leur interconnexion avec les grandes infrastructures (3G, Internet, Galileo). En outre, si la radio devient le support physique du transport de demain, l'État devra ouvrir la brèche de ce mur spectral découpé en tranches sous-utilisées, et concevoir une communication globale avec une gestion audacieuse et dynamique du spectre. Il faut renoncer à attribuer statiquement des plages de fréquences à des opérateurs ou à des applications militaires ou civiles, de diffusion ou de communication, puisque le spectre électromagnétique alloué à présent est loin d'être saturé lorsqu'on examine de manière spatio-temporelle le spectre réellement exploité. La recherche sur la radio cognitive tarde à donner des résultats. La recherche sur les réseaux cognitifs est encore modeste : capteurs de découverte de l'environnement radio, problèmes des interférences et de la colocation intra-systèmes et inter-systèmes.

#### 4.3.4 Vers de nouveaux modèles de représentations logicielles

Le dernier verrou, et non le moindre, est le verrou de l'ingénierie logicielle : les langages objets, les composants logiciels par contrat sont encore trop pauvres et pourtant trop lourds pour maîtriser l'articulation des styles architecturaux et la configuration. Cette difficulté essentielle se situe au niveau de la modélisation des architectures. Les systèmes à logiciels prépondérants ont, à différents niveaux de granularité, des styles architecturaux. Ce sont par exemple des architectures orientées objets, client-serveur, P2P, à tiroirs, des systèmes à agents, des automates, des algorithmes de traitement, et ces idiomes s'entremêlent dans des entrelacs que l'architecte des systèmes doit maîtriser. Lorsqu'on scrute un système sur des plans différents, on découvre des architectures adaptées à des problèmes locaux. Ces architectures ne sont pas emboîtées de manière gigogne, comme des poupées russes, les unes dans les autres. Elles s'enchevêtrent au contraire et cet écheveau est à l'origine de la complexité des systèmes. L'ingénierie des systèmes n'est pas une science, c'est un savoir-faire pour mutualiser les différentes techniques des métiers distincts et rendre cohérentes et efficaces les diverses fonctions à toutes les granularités qui composent le système. Les méthodes et les outils dépendent de l'état de l'art de ces différentes disciplines. La difficulté provient de la manière de jongler avec ces différents métiers et niveaux.

#### **4.4 Les moteurs de l'évolution : les principes du progrès informatique**

En informatique, il existe de grands principes, facteurs de progrès, qui ne sont pas souvent énoncés. Ces principes tirent leur existence de l'évolution darwinienne des architectures et des entités. Ils encouragent la diversité et favorisent une certaine régulation dans les populations qui coexistent dans un écosystème. Ces principes sont l'enrichissement, l'imitation, la séparation, la fragmentation, le jeu (au sens de latitude), l'action et la réaction. Ces principes ont des corollaires : la séparation et le jeu permettent de produire de la diversité parmi un vivier de solutions nouvelles qui entrent alors en compétition.

##### **4.4.1 Le principe d'enrichissement**

Pour appréhender la complexité et poursuivre la construction de ces édifices, il faut créer de nouvelles abstractions pour inventer des paradigmes efficaces, il faut concevoir de nouveaux modèles, des outils de fabrication avec de nouveaux langages de programmation, des protocoles avec des techniques de modélisation, de simulation et de vérification dynamique. En informatique, dans un cycle de vie par enrichissement, un modèle se transforme, s'enrichit, se complexifie, vieillit et finit par muter afin de survivre aux boursofflures de la complexification avant de se fracasser, de se fragmenter en plusieurs morceaux distincts. Les transformations successives des systèmes, des logiciels, des produits les enrichissent et les complexifient par compatibilité ascendante tout au long de leur cycle de vie. C'est l'économie de versionnage et maintenant de correction en ligne (sous forme de *patch*) pour les améliorer en flux tendus.

##### **4.4.2 Le principe d'imitation**

Quand une procédure nouvelle ou une forme inédite est saine, elle est recopiée immédiatement, car le mimétisme, le copier-coller, fait partie de l'idéologie consubstantielle de l'informatique. On peut prendre pour exemple le phénomène naissant de la gémellité de l'informatique et des réseaux. On ne peut plus appréhender la recherche et le développement des communications sans aborder les aspects informatiques, de même que l'on ne peut pas analyser la recherche et les perspectives en informatique sans examiner la question des communications. Les deux disciplines de l'informatique et des réseaux sont indissolublement liées car l'informatique est maintenant essentiellement répartie et les communications sont diversifiées dans leur sémantique, leur nature et dans leur forme : programme, texte, voix, donnée, synchrone-asynchrone, point-multipoint, connecté-non connecté, diffusion.

L'informatique de la couche applicative ne peut pas se concevoir sans appréhender les communications des applications, à cause des entrées-sorties et des liens nécessaires pour les exécuter (architecture d'intermédiation, architecture pair-à-pair, grilles de calcul). Un système d'exploitation classique gère la mémoire locale et le déroulement du temps sur les périphériques locaux ; les entrées-sorties, et en particulier les liens filaires (xDSL, LAN, internet) ou sans fil (Wi-Fi, Bluetooth) des ordinateurs, prennent une importance inédite dans les nouvelles manières de travailler à l'usine, au bureau, à domicile ou en voyage. Il faudra tôt ou tard rénover les spécifications et les priorités des systèmes d'exploitation, et réviser leur sécurité pour qu'ils intègrent des concepts de nomadicité, de configurabilité, de virtualité et d'ouverture à la communication, et notamment la gestion sécurisée des attributions des applications aux liens, ce qu'aucun système d'exploitation n'est réellement capable de faire de nos jours.

Dans le cadre de la double convergence voix-donnée, fixe-mobile, qui prend plus de temps que prévu initialement à se concrétiser et à s'organiser, les communications et les réseaux prennent en compte la nouvelle dimension de multiservices. Les architectures et les protocoles des réseaux utilisent de plus en plus la sémantique des applications et des services pour améliorer la performance des communications.

##### **4.4.3 Le principe de séparation**

Quand une entité devient trop grande ou trop complexe, elle se brise en plusieurs morceaux et se réorganise. Ces morceaux ne sont pas forcément du même ordre et la métamorphose des fractions recomposées donne toujours du lest, provoque souvent des degrés de liberté et offre des ruptures intéressantes. L'informatique doit être simple et efficace. Elle a tendance à engendrer des entités pauvres, des outils simples pour pouvoir survivre et se multiplier. Mais les utilisateurs novices préfèrent les services intégrés, le tout en un. Il existe un perpétuel équilibre entre d'une part les concepts et les déploiements primaires et d'autre part la tendance à des vieillissements compliqués, alambiqués. Pour séparer en modules et en entités simples, la dichotomie est un principe fort. Ce principe est à l'origine des grands découpages de l'informatique : le matériel-logiciel, l'ordinateur-réseau, le modèle en couches. Dans le projet américain sur l'Internet du futur financé par la NSF, GENI (*Global Environment for Network Innovations*, [www.geni.net](http://www.geni.net)), le concept de tranches et la ségrégation des fonctions principales du réseau dans l'Internet du futur obéissent à ce principe.

##### **4.4.4 Le principe de fragmentation**

À mesure que les infrastructures se déploient spatialement et vieillissent dans le temps, elles ont tendance à se briser et s'effriter. Elles s'organisent alors en réseau ou en hiérarchie de structures plus petites. Les systèmes d'information des années 1980, organisés en réseaux locaux, étaient des fiefs fermés, inaccessibles. Ils se sont ouverts pour devenir interconnectés puis interopérables. Ils se sont dotés ensuite de périphéries sans fils avec le Wi-Fi, et ce processus va se poursuivre avec les essaims de RFID.

### ***La déchirure du grand tableau blanc : le Web***

On peut l'illustrer aussi avec l'histoire du Web. Contrairement à ce que l'on dit çà et là, le Web existait avant 1989. C'était à l'époque un grand tableau blanc unique (l'acronyme web signifiait « *wide electronic board* ») que les informaticiens utilisaient pour se donner rendez-vous et fournir des informations avec des messages courts, une sorte de poste restante universelle. C'est ensuite Tim Berners-Lee qui a déchiré ce tableau blanc en découpant des pages Web à afficher sur tous les serveurs du Web. Ces pages ont ensuite été elles-mêmes découpées en portions pour être rapatriées dans l'ordinateur des utilisateurs (syndication des flux du Web2), et nul doute que ces pages déchiquetées seront encore broyées en mille morceaux.

Les instruments pour recomposer un livre éphémère à partir de ces pages sont les moteurs de recherche, afin de se repérer dans cet autodafé de livres taillés. L'évolution va se poursuivre selon plusieurs axes : le *deep Web* des formulaires qui randomise XML, le *Web* scindé en zones géographiques autour de chaque utilisateur nomade, régionalisera les indexations et le *Web* de l'Internet des Choses fera que chaque objet communicant aura son *blog*.

### ***Le découpage d'Internet en écailles***

Internet qui était à l'origine un graphe homogène, fut rapidement agencé en systèmes autonomes qui dialoguent via BGP par des systèmes de contrats (« *peering, transit* »), si bien que l'internet est une interconnexion de réseaux, une sorte de peau rugueuse de serpent avec des écailles. Devant l'enjeu des systèmes autonomes trop nombreux, il faudra tôt ou tard fusionner ces systèmes ou bien virtualiser le concept de systèmes autonomes pour restreindre et sécuriser les relations et dialogues entre systèmes autonomes par un remembrement de ce paysage trop morcelé en terrains petits et dangereux.

#### **4.4.5 Le principe de plasticité**

Tout modèle créé ou toute entité nouvelle doit introduire du « mou » dans les interfaces pour l'assemblage de modules, du jeu dans les rouages, de l'incomplétude, afin d'offrir des degrés de liberté dans l'innovation et la création d'application. Un modèle trop rigide va empêcher la construction d'applications et le déploiement des interconnexions. Par exemple, John von Neumann a séparé en deux le matériel et le logiciel, en inventant l'architecture éponyme des ordinateurs qui possède la propriété essentielle de création d'un espace de liberté, mélangeant ainsi opérations et données, stockant des applications. C'est l'invention de cet espace de travail qui est à l'origine de l'essor de l'informatique.

#### **4.4.6 Le principe d'action et de réaction**

Quand un phénomène apparaît, il engendre un phénomène inverse qui provoque des effets contraires. Lorsqu'un déploiement se produit selon une certaine ligne de fuite, il existe un phénomène inverse de repliement. Ce principe s'applique aujourd'hui avec l'apparition, à côté de l'Internet, d'un Anti-Internet : le *Cloud Computing*. La possibilité de connecter des ordinateurs et des réseaux a permis un déploiement des ordinateurs et des données dans tout l'espace. Cette interconnexion produit simultanément un mouvement contraire de concentrations d'ordinateurs et provoque un affaiblissement du rôle du réseau ou du moins une utilisation radicalement différente, comme si, conceptuellement, les gens n'étaient connectés que sur un seul ordinateur. Alors que l'internet se déploie largement, on assiste à un étiolement de son squelette principal : toutes choses égales par ailleurs, les grandes artères du réseau se rétrécissent, et l'on assiste à une concentration des calculs dans des grands sites de fermes de serveurs.

Les réussites actuelles appartiennent plus à l'Anti-Internet : les abonnés de Facebook se connectent sur un gros ordinateur, où ils ont créé un compte informatique avec un nom et un mot de passe. De cet ordinateur, ils envoient des messages, ils discutent en direct avec des amis qui sont aussi connectés sur le même ordinateur. Cela rappelle l'informatique en temps partagé des années 1970, le client-serveur avec Ethernet, les VAX780 et les écrans alphanumériques VT100 !

### **4.5 Deux histoires parallèles**

Ce paragraphe décrit brièvement une histoire des modèles de l'informatique, les réinterprète à travers une grille de lecture de type réticulaire, et réanalyse l'histoire des modèles de réseaux. Par cette herméneutique, on découvre une homologie entre ces deux histoires décalées, un peu comme une partition à deux voix d'une fugue écrite en canon. Ce parallélisme asynchrone permet d'entrevoir ce que pourraient être les communications futures de l'écosystème numérique ambiant.

#### **4.5.1 L'histoire de la sémantique des langages informatiques : la complexification du typage abstrait des données**

##### ***L'invention du compilateur : le Fortran de J Backus***

Pour faciliter l'écriture de programmes scientifiques, il fallait un langage simple et un traducteur. Pionnier de l'informatique, John Backus inventa le langage FORTRAN en 1953-54 pour l'IBM 704. Il a créé le métier d'informaticien, en inventant le Fortran et le compilateur : il a séparé le métier d'architecture des ordinateurs et le métier de la fabrication des algorithmes et des formules par les ingénieurs non-électroniciens. Son langage de haut niveau a permis à l'ingénieur qui ne connaît pas les arcanes de la structure de la mémoire et des registres, de s'abstraire du matériel pour ne se concentrer que sur le problème scientifique à résoudre. L'ingénieur définit et identifie des variables de son problème, il conçoit le déroulement et les branchements de son exécution, le compilateur se charge d'acheminer les variables dans la mémoire et

de router les opérations dans les registres, en bonne séquence. Ce langage distingue la déclaration séquentielle de l'application scientifique et le réseau de traduction, de chargement et d'exécution, un graphe de nœuds de calculs et liens créés avec les branchements des algorithmes.

#### ***Une organisation de la mémoire : le Lisp de J McCarthy***

Lisp a été conçu et développé en 1956-58 essentiellement par John McCarthy au MIT [12]. Il a violé les règles de la séparation entre nommage et routage des variables en implémentant son langage Lisp sur l'ordinateur IBM 710 de l'époque. Dans les deux cases (la mantisse et l'exposant) des flottants de la mémoire de l'ordinateur, il a osé mettre un entier dans la première boîte qui se référait à une abstraction de son langage, et l'adresse mémoire du suivant de la liste dans la seconde boîte. Il a ainsi créé des listes homogènes, une gestion opérationnelle de ses listes et donné une sémantique sur ces listes avec des opérations (CAR, CONS, CDR) du langage pour traiter des listes. Il a aussi symétrisé le programme et les données en introduisant la métaprogrammation : le programme écrit en Lisp pouvait engendrer des données qui étaient éventuellement un nouveau programme Lisp, les programmes pouvaient s'auto-modifier pendant leur exécution. Bref, c'était le grand espoir de l'intelligence artificielle [13] qui fut décevant : un programme qui écrit automatiquement un autre programme et qui passe la main à cette nouvelle génération spontanée.

#### ***La manipulation des pointeurs et des structures : le C de D Ritchie***

Le langage C a été inventé en 1972 par Kenneth Thompson et Dennis Ritchie [14] en même temps qu'Unix, pour traiter, dans sa philosophie, une séquence de caractères (et créer des éditeurs de texte). Le génie du langage C a été de créer la notion de pointeur et de structure : une adresse de la mémoire de début de liste statique et une liste hétérogène d'entités informatiques (des entiers, des réels, des tableaux, voire d'autres structures). Sans lire et écrire des nombres, on peut donc faire des calculs, uniquement en réalisant des opérations sur des pointeurs ou même des pointeurs de pointeurs. C'est historiquement ces notions qui ont contribué au succès et à la performance du langage C : la possibilité de gérer sa mémoire de manière efficace et abstraite. Cette capacité de ruse d'écriture est bannie aujourd'hui des méthodologies de génie logiciel. Le programmeur C écrit un texte impératif et peut intervenir directement en traitant des groupes hétérogènes d'entités, et ce, récursivement.

#### ***L'abstraction des programmes locaux : le langage orienté objet à classes d'A Kay***

Les langages objets (Simula-67, Smalltalk71, Eiffel, C++, Java) sont ensuite apparus. Au lieu d'une structure statique, on pointe sur l'encapsulation d'un autre petit programme, un objet autonome qui s'exécute avec ses attributs et ses méthodes et qui modélise une entité du problème à résoudre. On traite alors un problème à deux étages, avec un degré de liberté singulier, le programme général, qui libère une encapsulation de milliers d'autres briques génériques qui ne prennent existence qu'en se réifiant par génération spontanée, après le déclenchement d'un événement ou la venue d'un message.

### **4.5.2 L'histoire parallèle de la pensée sur les réseaux : la complexification du typage des liens**

On va transposer la philosophie de ces langages à l'histoire décalée des réseaux pour construire une feuille de route de l'Internet du futur.

#### ***Le réseau fut avant l'an 2000 un graphe de nœuds et de liens***

Pour la quasi-totalité des formalisations, un réseau est un graphe de nœuds connecté par des liens : on utilise la théorie des graphes pour modéliser un réseau d'ordinateurs, que ce soit un LAN, Internet ou un réseau téléphonique. Les outils sous-jacents de la théorie des graphes sont les files d'attente avec la modélisation en loi de Poisson [15], et les chaînes de Markov [16] pour modéliser les modifications des séquences d'événements, et les automates à états finis. Les réseaux de circuits (virtuels ou non) et les réseaux de paquets sont traités de la même façon avec ces outils, et l'on obtient par exemple les lois d'Erlang pour dimensionner un réseau. Avec cette notion de graphe, pauvre mais efficace, le modèle de réseau simple et performant est un électroencéphalogramme plat, une jachère informatique composée de fils de cuivres, de fibres optiques et d'atmosphère où transitent des ondes électromagnétiques. Les nœuds ne sont pas des ordinateurs mais des commutateurs ou des routeurs qui stockent, aiguillent et transmettent, et les liens sont assimilés à des tuyaux qui se contentent de transporter des bits d'information, sans aucune signification. On remarque déjà la distorsion qui existe entre un tuyau et une onde radio qui module entre deux points.

Cette conception des réseaux est devenue obsolète. Toutes les tentatives de faire subsister ce modèle caduc seront vouées à l'échec, tant elles sont archaïques : le graphe nu surchargé en graphe valué, IPv4 prolongé de façon simpliste en IPv6, le Web étendu en Web sémantique en voulant rendre rigides des ontologies qui sont ambiguës par essence.

#### ***Le réseau s'organise pour créer des liens topologiques homogènes***

Depuis les années 2000, le modèle du réseau ne se réfère plus dans la pratique à un graphe. Le moteur de recherche, avec le succès de l'indexation des pages Web, est devenu le portail d'entrée, le joug sous lequel il faut courber l'échine pour pénétrer dans ce réseau, et celui-ci ne joue plus son rôle de maillage. Par ailleurs, les applications pair à pair construisent, au-dessus du réseau physique des fils de connexion et du réseau logique des algorithmes de routage, un nouveau réseau virtuel, une topologie d'ordinateurs, de disques ou de chemins, pour partager des calculs, des fichiers, des flux ou des trafics, en amarrant sur un plan virtuel des ressources de calcul, de stockage et de communication. Le lien est

souvent défini et assuré par une fonction de hachage qui raccorde l'allocation des ressources réparties. Cette table de hachage, qui identifie les entités et donne l'adresse de l'entité suivante dans la géométrie du P2P, ressemble étrangement à la philosophie de l'implémentation mémoire des listes homogènes de John Mc Carthy de son langage Lisp.

Par ailleurs, les moteurs de recherche qui retrouvent les ressources (pages Web, images ou vidéo) attachées à une collection de mots, fonctionnent souvent sur la popularité des liens associés aux ressources elles-mêmes. Une page Web est donc ici prise comme une structure qui pointe sur des structures similaires suivantes, et ces premiers liens à une page applicative permettent d'ordonner statistiquement et de sélectionner les pages en question.

On organise donc au-dessus de l'interconnexion physique du graphe des ressources physiques et de l'acheminement logique du protocole IP, une nouvelle organisation dynamique de connexions d'entités, un peu à la manière du langage Lisp. L'informatique actuelle, dite virtuelle, fonctionne comme si un Mc Carthy moderne avait implémenté des dialectes Lisp sur tout le réseau internet, considéré comme une mémoire unique, avec des applications (*Skype, Napster, BitTorrent, Chord, CAN, Freenet, eDonkey2000*) qui s'exécutent concurremment sur le réseau, avec des gestions de listes distinctives, un ramasse-miettes géant se chargeant de nettoyer les ressources allouées.

### ***Le réseau s'organisera pour créer des liens hétérogènes***

Dans le futur, pour atteindre des régions géographiques de l'espace à faible densité radio ou à faible débit, il faudra envoyer l'information en utilisant les capillarités de plusieurs chemins possibles (diversité radio, routage hiérarchique). Pour respecter la sphère privée d'une personne ou bien d'un domicile, il faudra sans doute s'adresser à une passerelle, un nœud public (avec une adresse IP connue de tous). Ensuite, le téléphone portable de la personne ou le boîtier ADSL du domicile qui servira de gué sécurisé, routera l'information de manière privée vers le dispositif privé (contrôle des prothèses ou bien appareil domotique) en utilisant des protocoles de routage et de sécurité appropriés, une virtualisation légère permettant de créer un lien continu de bout en bout de la communication.

Cette description en deux sauts rappelle curieusement les pointeurs et les structures statiques du langage C. C'est ce qui existe déjà sur des connexions filaires avec des passerelles et des pare-feu entre les intranets dans les entreprises et la traduction d'adresses (NAT) de l'adressage IP : un enrichissement plus fondamental de ces procédés utilisant les caractéristiques des radiocommunications semble inéluctable et très prometteur.

### ***L'architecture du réseau sera programmable***

Dans un futur plus lointain (2020), le réseau sera « programmable », un peu comme une application écrite sur le réseau dans un langage orienté objet. Les tables et les algorithmes de routage seront des classes d'objets logiciels qui seront instanciées en fonction du contexte, pour rendre plus optimal le routage de l'information et des flux à travers le passage de passerelles, qui serviront de pointeurs comme l'adresse de lancement d'une classe d'un objet logiciel. On aura donc oublié les tables de hachages statiques des applications pair à pair et l'on aura pénétré dans un monde dynamique où l'utilisateur (ou bien un agent à son service) pourra faire transiter les flux dans son territoire, et ce à toutes les échelles. L'utilisateur pourra être un opérateur de télécoms si son territoire est un système autonome. L'architecture topologique virtuelle des liens ne sera plus constituée de quadrillages, de cercles, de tores ou de formes géométriques simples et déterminées, elle sera un véritable programme privé, ce qui permettra de résoudre les questions redoutables de protection des données personnelles et d'intimité numérique.

## **5. VERS DES CONCEPTS TRANSVERSAUX DE LA REPRÉSENTATION**

### **5.1 Vers une récursivité complexe et des architectures non fractales**

Les progrès dans les technologies des microprocesseurs, les nouveaux paradigmes dans les TIC et l'émergence à toutes les échelles de groupes de capteurs-actuateurs en réseau permettent d'envisager un nouvel âge pour tous les traitements d'information de la vie quotidienne. Néanmoins, il existe des erreurs majeures dans l'exploitation informatique et des échecs fréquents dans les réalisations logicielles qui contrastent avec les succès de quelques sociétés informatiques d'avant-garde (Google, Skype).

L'informatique n'est pas une discipline régie par les équations de la nature. Elle est pure création de l'esprit, avec tous ses avantages (inventivité, originalité) et tous ses défauts (erreur de stratégie, de pronostic, de conception, de tarification, de mode d'emploi). L'orientation de la recherche en TIC se situe dans l'absorption de la complexité, l'articulation des diverses échelles, l'amélioration des modèles d'interactions et la prise en compte de la pluridisciplinarité.

Pour édifier les architectures de grands systèmes évolutifs, composés d'éléments affranchis, conscients du contexte, aux comportements adaptatifs, tenant compte de la mobilité et de la sécurité, la première exigence est la recherche de nouveaux modèles de calcul, de communication et d'information. La deuxième nécessité est d'injecter de la sémantique dans ces systèmes puisque dans un monde mobile et changeant, il faut valider localement les informations. Ces modèles doivent être tantôt discrets, tantôt continus, tantôt déterministes, tantôt probabilistes pour envisager le futur et explorer l'environnement. La troisième nécessité est de créer des modèles d'interaction, des modèles de connaissance pour que les dispositifs autonomes puissent durant leur cycle de vie apprendre comment interagir au mieux, ainsi que des modèles de création, d'acquisition, de distribution de partage de connaissance et des modèles de confiance. Tous ces modèles suivent

un processus d'arborescence confuse, de récursivité complexe pour être taillé à la bonne échelle, car l'informatique n'est pas fractale.

Ensuite, les exigences concernent les langages et les outils. Il s'agit de concevoir des langages de programmation, des langages d'interaction, des nouvelles structures de données pour les informations, les archives d'un volume immense afin de mieux saisir la relation entre les données et les applications informatiques, et de mieux appréhender la validité, la qualité, la confiance dans ces informations. Il faut aussi concevoir des protocoles dans les réseaux beaucoup plus flexibles et décentralisés, pour briser la monotonie et la symétrie des nœuds des réseaux, avec des algorithmes de coopération, de coordination et d'autonomie et régler ainsi les contraintes d'échelle.

Il faut enfin développer des techniques de vérification et de validation.

## 5.2 Les grandes strates de l'informatique

Dans son livre « Les mots et les choses, une archéologie des sciences humaines » [17], Michel Foucault analyse les grands courants qui traversent les sciences humaines. Foucault déconstruit les sciences humaines à travers son enquête archéologique. Il distingue ainsi trois strates : la Renaissance, avec son système de savoir selon les ressemblances, l'âge classique, avec une mise en ordre des représentations, et la modernité, autour de l'homme.

Il existe en informatique des strates similaires qui traversent les TIC. De manière analogique, on pourrait relire l'histoire de l'informatique, et faire une archéologie des modèles informatiques et y déceler des strates enfouies. L'informatique est la science de l'organisation des symboles : à des moments de l'histoire informatique, les symboles structurants et opérationnels ainsi que les outils pour les manipuler sont en harmonie et rentrent en résonance pour faire progresser rapidement le déploiement des technologies ; à d'autres moments, les modèles, les standards, les usages se frottent, se percutent et freinent l'évolution, et il faut attendre une rupture dans les modèles pour réformer l'architecture du système de pensée.

### 5.2.1 La distillation réductrice : le paradis perdu d'un modèle transparent

Il y eut, dans les années 1970-80, un foisonnement dans les recherches et les développements sur les langages (Pascal, ADA, etc.) et les architectures de machines (scalaires, vectorielles). Ce bouillonnement fut cassé par l'apparition d'Unix d'une part, le système d'exploitation ouvert entre la machine et les applications, qui réconciliait par son dépouillement et sa pédagogie, le matériel et le logiciel (tout est fichier, une imprimante est le fichier /dev/lpr), et l'arrivée du langage C, d'autre part, un langage simple pour manipuler les fichiers (un fichier est une séquence de caractères). Un âge d'or de la transparence a régné pendant quelques années chez les informaticiens, délivrés du dédale des machines propriétaires et du carcan des dialectes et des environnements de développements logiciels exotiques. Ce fut la prise de pouvoir des savants informatiques. Même encore de nos jours, les promoteurs du logiciel libre s'inspirent toujours avec nostalgie de ce monde révolu. La réconciliation du matériel et du logiciel sous le concept simple de fichier a cicatrisé la plaie ouverte par John von Neumann. Les moteurs logiciels ont pu se répandre et se banaliser dans les universités. Cette homogénéisation s'est opérée au moment de l'apparition du protocole élémentaire Ethernet, de l'architecture simplificatrice du processeur RISC, des interfaces personne-machine avec écran, clavier, souris qui approfondissaient et personnalisait la relation entre le programmeur et sa machine. Cette éclaircie dans la tourmente permanente de l'informatique n'est jamais réapparue.

### 5.2.2 La représentation pragmatique mais opaque : l'ère du soupçon d'un modèle de dissimulation

La période de transparence s'est obscurcie, dans le début des années 80, avec l'arrivée des mondes propriétaires (Apple, Microsoft) et de la notion de document. Ce fut une période de confrontation des modèles aux usages grand-public et la prise de pouvoir de l'utilisateur final. Un document est un fichier opaque dont on ne voit qu'une représentation à l'écran. Pour faire pénétrer l'informatique dans l'entreprise, il a fallu brouiller la transparence des fichiers et montrer des reproductions finalisées, pour la bureautique des entreprises : le tableur et l'éditeur de texte, la présentation sous forme de planches allaient influencer de manière irréversible le cours de l'informatique. Les dossiers, les documents sur le bureau avaient leur image sur le disque de l'ordinateur, rangés en dossiers bien ordonnés. Internet qui parvint ensuite dans les entreprises (dans les années 95) ne sut que prolonger le bureau en pulvérisant les dossiers (les serveurs Web) et les feuilles (les pages Web) sur le réseau. Pour réussir cette prouesse, il a fallu ouvrir et appauvrir la notion de document (via HTML). C'est aussi à cette époque que le protocole IP imposa lentement mais sûrement son hégémonie, cachant ainsi les hétérogénéités de la transmission physique sous-jacente, avec un principe supérieur d'interconnexion, ce qui favorisa la dissémination de la toile, juste au moment où la fibre optique commença à se déployer, permettant une transmission pure. La réussite de ces modèles d'opacité constitua une fermeture, voire un blocage sur les réseaux filaires, avec le triomphe de routeurs propriétaires et hermétiques. Le réseau qui était présumé ouvert et transparent, doté d'une suite protocolaire unique et simple (HTTP, TCP/IP, SNMP) devint au fil du temps, une chasse gardée de quelques équipementiers.

### 5.2.3 La représentation brisée : le modèle de l'apprenti sorcier, explosé sur le réseau

Il est apparu une nouvelle strate conceptuelle dans les années 2000, la conquête ubiquitaire avec la démocratisation des réseaux locaux sans fils et l'invasion massive des données avec les communications à haut débit de bout en bout. Les logiciels opaques, distribués sur le réseau, ont pris le pouvoir et fait exploser les données sur le réseau. D'une part les documents, enrichis par tout le contexte multimédia, se sont déchiquetés et dupliqués sur le réseau avec les applications pair à pair (BitTorrent). D'autre part certains documents sont devenus des logiciels : le concept Jini de Sun Microsystems

définit un réseau local d'équipements, comme une collection de programmes Java (une imprimante est ici une méthode Java qui sait imprimer un fichier), un document PostScript est un programme qui s'exécute sur un ordinateur particulier qui est une imprimante. Les réseaux actifs ont même transformé les paquets IP en programmes qui s'exécutent sur un ordinateur spécifique, le routeur du réseau.

Cet émiettement général menace la robustesse de tout le système. Les interdépendances incontrôlées de cet édifice fragile risquent de désorganiser la société tout entière. La légitimité de la circulation des données pose question ; la neutralité, la transparence du réseau, la gouvernance des infrastructures font l'objet de luttes entre acteurs économiques et politiques. La liberté réelle du citoyen ou du consommateur, et le respect de la sphère privée ne sont plus assurées, à cause de la marchandisation des données à caractère personnel et du profilage des comportements. Les prédateurs sont les grands bénéficiaires de ce régime chaotique. La maîtrise de l'écosystème échappe à tous les acteurs, tel le monstre de Frankenstein enfui dans le grand nord, et les questions éthiques deviennent de plus en plus ardues : fraude, piratage, espionnage, déstabilisation des modèles économiques.

### 5.3 Vers de nouveaux modèles pour des communications protéiformes

L'urbanisation des réseaux se densifie, se diversifie, au fil de l'irrigation des technologies numériques dans la vie quotidienne et dans la vie des entreprises et des institutions. Les réseaux de demain seront sans nul doute une interconnexion de confédérations d'écosystèmes numériques ayant leur propre modèle de calcul, de communication et de stockage de l'information, qui va opérer une réconciliation avec la réalité physique. L'hétérogénéité des technologies de communication, la massivité des objets communicants, les divers besoins exigent des propriétés d'infrastructures différentes, en termes d'architectures, de protocoles, d'énergie, de paramètres de configuration, de propriétés numériques, de sécurité, de gestion. À la périphérie des réseaux, il sera nécessaire d'injecter dans les couches de communications de la versatilité, de la configurabilité et de l'adaptabilité pour interagir avec cette réalité physique. Les futurs services seront fondés sur la notion de contexte et sur la connaissance. Ils devront faire face aux environnements fortement dynamiques et aux ressources changeantes, et devront évoluer vers une interaction plus implicite et plus proactive avec des humains. Les fournisseurs de contenus auront un rôle décisif dans ce contexte.

#### 5.3.1 La critique du modèle de Shannon

Évoquant la communication numérique avec en arrière-plan les théories de Claude Shannon, Jacques Lacan [18] déplorait déjà en 1955 : « Il s'agit de savoir quelles sont les conditions les plus économiques qui permettent de transmettre des mots que les gens reconnaissent. Le sens, personne ne s'en occupe. » Il aura été visionnaire, car les verrous technologiques de l'intelligence ambiante subsistent justement là où le sens des abstractions fait défaut. La restitution du sens dans le monde numérique est inéluctable. La clé du déploiement de l'intelligence ambiante gît certainement là. C'est dans le dépassement de la césure entre le biologique unique (le corps de l'utilisateur) et le numérique volatil, reproductible et vulnérable (les applications, les données, les prothèses de la personne responsable), et dans la synthèse entre le plan physique et le plan logique, le réel et le virtuel que l'informatique triomphera de la crise qu'elle traverse en ce moment, empêtrée qu'elle est dans un assortiment disparate de solutions et dans une construction compliquée, difficilement accessible à un utilisateur normal. La sécurité informatique devra surmonter par une dialectique profonde, son obligation d'omniprésence quasi transparente pour simplifier et faciliter son intégration dans les démarches informatiques, et son exigence de disparition quasi inévitable pour affranchir les transactions informatiques d'une intervention humaine toujours hasardeuse et suspecte.

Roland Barthes [19] avait présenté la communication en introduisant un émetteur avec une éthique (muni d'un ετηος), qui transmettait un message signifiant (le message a un sens, le λογος), à un récepteur qui le recevait avec émotion (récepteur sensible, doté d'un πατηος). On peut s'inspirer des réflexions de R. Barthes pour proposer de nouveaux modèles de communication, plus adéquats pour qualifier les communications actuelles, qu'un modèle dépourvu de sémantique. Ces nouveaux modèles, à la R Barthes ou à la J Lacan, ne viendront pas remplacer complètement le modèle de Shannon qui régnera toujours dans les couches de transmission, mais pourraient avoir leur intérêt dans la couche de communication quand les bits et les octets ne seront plus suffisants pour prendre des décisions, et qu'il faut injecter de la sémantique dans les tuyaux. La sémantique proviendra de l'environnement radio (radio cognitive, réseau cognitif) ou des flux qui transitent (flux bancaires fortement protégés, télécommandes chirurgicales hautement sûres, flux de contenus vidéos en temps réel).

L'échec actuel de l'intelligence ambiante est dû au manque d'audace dans l'évolution des modèles de communication et d'interaction avec le milieu environnant. Les objets informatiques sont finalement très isolés, et ne parviennent pas encore à se fondre dans l'environnement ambiant. Le collage et leur interaction avec le monde physique sont difficiles. Les robots ne sont pas émancipés, ils sont encore largement les esclaves d'une assistance humaine. Les communications entre objets sont encore confuses. L'intelligence ambiante doit redéfinir les modèles de communications entre les nœuds informatiques eux-mêmes. C'est essentiellement un monde sans fils, car ces objets sont souvent déplaçables (en se connectant par intermittence), parfois mobiles (tout en conservant la continuité de la communication). C'est donc une confédération hétérogène de cybersphères, de tailles radicalement différentes, qui cohabitent et coexistent tout en communiquant entre elles selon des protocoles à définir.

### 5.3.2 Des lois de H. Darcy pour des milieux numériques poreux

On peut concevoir l'édifice numérique ambiant, non pas comme des arborescences d'ordinateurs interconnectés par des fils invisibles, mais comme un milieu 3D poreux. Il faudrait modéliser les réseaux capillaires, non pas comme un graphe avec des nœuds et des liens mais comme un vide perméable, aux textures variées, aux formes géométriques tortueuses, un peu comme une roche hétérogène poreuse et perméable, et les flux qui y circuleraient non pas comme des séries temporelles ou des processus stochastiques, mais comme des fluides multiphasiques (les textes, la voix, la vidéo) qui emprunteraient de multiples artères et percoleraient dans toutes les capillarités possibles.

Pour modéliser un réseau, on abandonnerait alors les lois de D. Poisson sur l'apparition d'événements discrets et/ou les chaînes de A. Markov qui formalisent l'apparition de séquences de caractères afin de trouver des lois de perméabilité des flux textuels, audio et vidéos, selon une théorie informationnelle de la percolation [20], au lieu de banaliser les séquences de 0 et de 1 comme des paquets d'information et les mélanger sous le sceau d'une qualité de service variable.

Si l'on veut progresser, il faut opérer un saut conceptuel à partir d'une page blanche (« *clean slate design* »). Il semble plus rentable d'examiner l'informatique en creux et ne pas saisir les objets communicants mais plutôt leurs relations. Il paraît plus efficace de traiter non pas les paquets ou les circuits mais les flux au niveau du réseau et des routeurs. La loi de H. Darcy [21] donne l'écoulement des milieux poreux en définissant une porosité et une perméabilité comme une variable géométrique avec une tortuosité, une texture. La loi de Darcy s'écrit  $Grad p = \mu/k u + \rho g$  où  $u$  est la vitesse moyenne d'écoulement et  $Grad p$  est le gradient de pressions aux extrémités du système que l'on considère. Au lieu de la traditionnelle toile maillée, les réseaux ressembleront à un milieu poreux [22] où les lois de la perméabilité remplaceront les lois des files d'attente. Mais les lois physiques ont été obtenues en mesurant la réalité. Ce sont des modèles à partir d'observations empiriques, alors que les bits d'information n'ont pas de contraintes de gravité ou de résistance matérielle au mouvement. Pour obtenir une loi admissible, Darcy a mesuré les flux sur les roches dans les fontaines de Dijon, et a inféré une généralisation sur notre univers. L'informatique connaît des milliers d'instanciations, avec des lois différentes, car il existe des modèles, des contre-modèles, des alter-modèles selon les usages. Il faut donc rechercher les lois de perméabilité, régionales, selon les usages et les configurations, car il n'existe pas de loi fractale et providentielle.

### 5.3.3 L'immobilisme en France des acteurs concernés

Mais aujourd'hui, dans la perspective de l'Internet du futur, toucher à l'IP (*Internet Protocol*) reste un sujet tabou. Les industriels européens y sont opposés. Les chercheurs ayant fait toute leur carrière avec le paradigme d'internet, peinent à imaginer autre chose et ne veulent pas s'en extraire. La recherche est influencée, à cause de son financement, par les innovations à court terme. Il en résulte de petites avancées, une volonté de ne pas transgresser les orientations de l'industrie vers un Internet++. L'informatique, science pilotée par le marché, devrait préserver sa liberté dans une perspective à long terme. Penser l'après-IP est hélas hérétique. Il faudra pourtant redessiner l'architecture des communications en général, de façon plus radicale et audacieuse que ne le laissent entrevoir les projets actuels.

En France, l'idéologie vicieuse de la recherche dans les TIC pour une meilleure consommation des produits numériques, le conservatisme des chercheurs et le conformisme des institutions de recherche se sont coalisés afin de ne pas transgresser les représentations habituelles, ne pas secouer les disciplines existantes, ne pas perturber les organisations traditionnelles (les conférences, les revues, les guichets de financement). Il faudra néanmoins détruire les fortins de la Nomenklatura, balayer la poussière amoncelée dans les silos disciplinaires et laver les moisissures des compromissions, si l'on veut avancer au niveau conceptuel sur le chemin raide des chercheurs-créateurs des TIC et ne pas flâner dans les avenues des chercheurs-consommateurs. Les recherches informatiques exigent de l'audace, du courage et de l'intelligence de la part de quelques chercheurs illustres [23, 24, 25, 26, 27], mais réclament aussi la validation et le passage à l'application industrielle avec des investissements lourds. Il est impératif de réformer en France le financement public de la recherche dans le numérique. On doit éviter d'allouer cet argent à des industriels frileux, réfractaires à tout changement, et éviter d'affecter ces financements à des centres de recherche dociles, dotés d'experts dogmatiques, sclérosés, plus préoccupés par leur carrière que par la production de savoirs. Sans quoi ces fonds seront dépensés par les premiers pour asphyxier les PME innovantes et freiner l'innovation, par les seconds pour absorber bureaucratiquement les budgets publics et étouffer dans l'œuf tout débat, tout projet de validation concrète de produits innovants à partir d'idées dérangeantes lancées par leurs rivaux impertinents.

## 6. UNE GOUVERNANCE MULTIPOLAIRE, AVEC DES MODÈLES, DES CONTRE-MODÈLES ET DES ALTER-MODÈLES

Dans cet article, on a exploré les concepts et les conditions sous-jacentes pour modéliser l'espace ambiant, comme un espace-temps dans lequel graviteraient des objets communicants déplaçables ou mobiles, ou bien comme un jeu de relations plus riches entre les différents objets. Peut-être encore, faudrait-il réviser cette approche et envisager, dans une informatique verte, un espace gorgé d'une informatique qui fait table rase d'une pensée linéaire comme un ruban de symboles, et imaginer des machines symboliques à trois dimensions (« *morphological computations* ») et même une « pensée » analogique 3D, mais cela est une autre histoire.

Les enjeux géostratégiques de la couverture de géolocalisation, si importante pour l'intelligence ambiante, sont ici essentiels car l'infrastructure de géolocalisation permet de surveiller, de mettre les pendules à l'heure, de localiser et de

cartographe. Chaque continent tente de refonder son indépendance autour de ces constellations satellites de géonavigation. Dans une collaboration internationale, il faudra imaginer une pensée intercontinentale. Les pensées du monde sont localisées, et il faut donc penser la différence, les modèles de l'altérité. Avec la mondialisation, il faudra accepter les inventions, les innovations mais aussi les détournements et les reprises d'inventions. Il faut donc chercher d'autres références (des modèles, des contre-modèles et des alter-modèles) et trouver des passerelles entre ces modèles, suite à l'arrivée sur la scène informatique de la Chine et de l'Inde. De l'audace sera indispensable pour ne pas balkaniser les communications mais au contraire les faire coexister dans un immense agrégat de systèmes autonomes virtuels partageant des modèles contradictoires, sur des ressources elles-mêmes virtualisées (paquets, canaux, routes, sessions). L'Europe, sans champions industriels, est exclue du Yalta numérique partageant le village planétaire en deux quartiers, l'Asie pour la fabrication du matériel, et l'Inde-États-Unis d'Amérique pour la fabrication et la conception du logiciel. Mais l'avenir n'est pas déterminé. Au-delà d'une vision idyllique de l'Internet du futur, pré-écrite par le marketing, comptons sur nos propres forces intellectuelles pour inverser cette tendance et inventer, dans une vision multipolaire, un Internet de demain, polymorphe. Dans cet écosystème, cohabiteront des entités nées de modèles en continuité du passé, des entités issues de contre-modèles venus d'autres continents, mais aussi nos entités informatiques propres, originaires d'alter-modèles conceptuels, compatibles avec nos valeurs démocratiques, fruits de notre culture mathématique.

## RÉFÉRENCES

- [1] JL. Godard : *Pierrot le fou*. 29 août 1965 (Mostra de Venise), 5 novembre 1965 (France).
- [2] É. Faure : *Histoire de l'art*. L'art Moderne, Tome 1, Gallimard, 1921.
- [3] C. Darwin: *On the Origin of Species*, Londres, John Murray, 24-11-1859.
- [4] R. Pfeifer, JC. Bongard: *How the body shapes the way we think: a new view of intelligence*, MIT Press, 2006.
- [5] M. Weiser: *The Computer for the Twenty-First Century*. Scientific American 265, 3, (1991).
- [6] T. Kaluza: *On the problem of unity in physics*, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin. (Math. Phys.) (1921), 966-972.
- [7] A. M. Turing: *On computable numbers with an application to the Entscheidungsproblem*, Proc. London Math. Society, 2, 42, (1936) pp. 230-265.
- [8] C. E. Shannon: *A mathematical theory of communication*. Bell System Journal, Journal, Vol. 27 pp. 379-423 (Part I) and pp. 623-656 (Part II), 1948.
- [9] C. E. Shannon: *Communication Theory of Secrecy Systems*. Bell System Journal, Vol. 28, Nr.4, pp. 656-715, (1949).
- [10] J. von Neumann: *First Draft of a Report on the EDVAC*. (1944).
- [11] J. Backus: *Preliminary Report, Specifications for the IBM Mathematical FORMula TRANslating System, FORTRAN*. (1954).
- [12] J. McCarthy: *Recursive functions of symbolic expressions and their computation by machine*, Communications of the ACM (papier original sur Lisp, Avril 1960).
- [13] J. McCarthy: *Programs with common sense*, Symposium on the Mechanization of Thought Processes, National Physical Laboratory, Teddington, England, 1958.
- [14] Brian W. Kernighan, Dennis M. Ritchie: *The C Programming Language*, Second Edition, Prentice Hall Software Series, ISBN 0-13-110362-8. (1978).
- [15] D. Poisson : *Recherches sur la probabilité des jugements en matières criminelles et matière civile*. (1837).
- [16] A. Markov : *Un exemple de recherche statistique sur le texte d'Eugène Onéguine illustrant la liaison des épreuves en chaîne*, Bulletin de l'Académie impériale des sciences, 6ème série, t.7, p. 153-162. (1913).
- [17] M. Foucault : *Les mots et les choses*, Gallimard. (1966).
- [18] J. Lacan : *Le Séminaire*, Livre II, p 105. (19 Janvier 1955).
- [19] R. Barthes : *L'Ancienne rhétorique - aide-mémoire*, dans Recherches rhétoriques, Communications, n°16, Seuil, pp. 172-229. (1970).
- [20] S. Broadbent, J. Hammersley: *Percolation processes I. Crystals and mazes*, Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 629-641. (1957).
- [21] H. Darcy : *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. (1856).
- [22] G. Matheron : *Éléments pour une théorie des milieux poreux*, Masson. (1967).
- [23] S. Abiteboul: *Webdam, Foundations of Web data management*, [www.webdam.inria.fr/wordpress/](http://www.webdam.inria.fr/wordpress/) (2009).
- [24] G. Berry : *Penser, modéliser et maîtriser le calcul informatique*, Ed. Collège de France-Fayard, 2009.
- [25] F. Bourdoncle, Cofondateur et Directeur de la Stratégie d'Exalead S.A., Paris, [www.exalead.fr/search/](http://www.exalead.fr/search/) , (2000, 2009).
- [26] J. Sifakis : *Turing Lecture slides*, Embedded Systems Week, Atlanta, October 20th, 2008.
- [27] J. M. Wing : *Computational Thinking*, CACM vol. 49, no. 3, pp. 33-35. (2006).

## NOTES

Infrastructures de réseaux : Galileo (constellation de satellites de géolocalisation), Internet, Internet des Choses (réseaux de RFID), GSM, GPRS, UMTS, HSDPA, LTE, Wi-Fi, WiMAX, IEEE802.1x, Bluetooth.

Technologies de réseau : LAN, VLAN, xDSL (x Digital Subscriber Line), NFC (Near Field Communication), RFID (Radio Frequency Identification), NAT (Network Address Translation).

Architectures et protocoles : P2P, Grilles, Cloud Computing, IMS, HTTP, SIP, TCP, IP, BGP, DNS, MPLS, SNMP, eDonkey2000, BitTorrent, Napster

Langages : Fortran, Lisp, C, C++, Java, Ada, Pascal, Simula, Eiffel, Smalltalk, PostScript, SQL, SGML, HTML, XML.

Produits : systèmes d'exploitation (Unix, Linux, Windows), téléphone (iPhone), ordinateur (VAX780)

Algorithmes et formats : JPEG, MPEG, PDF, AES

Compagnies : IBM, Oracle, AT&T, Microsoft, Apple, Sun, Cisco, Philips Research, Ericsson, Nokia, Google, SAP, eBay, Facebook, YouTube, Skype

Forums, Organisations, Programmes de recherche : IEEE, IETF, W3C, PCRD, Eurêka

Index des auteurs (à la fin de la revue) (à inclure dans l'index des auteurs)

Michel Riguidel

Télécom ParisTech

46, rue Barrault

75 013 Paris

[michel.riguidel@telecom-paristech.fr](mailto:michel.riguidel@telecom-paristech.fr)