



**Research Network on Innovation
Réseau de Recherche sur l'Innovation**

WORKING PAPERS

DOCUMENTS DE TRAVAIL

N°52 / 2016

**VINGT ANS D'INNOVATION OU LE DEPLOIEMENT DU SYSTEME
TECHNOLOGIQUE CONTEMPORAIN**

Smaïl AÏT-EL-HADJ

VINGT ANS D'INNOVATION OU LE DEPLOIEMENT DU SYSTEME TECHNOLOGIQUE CONTEMPORAIN

TWENTY YEARS OF INNOVATION AND THE DEPLOYMENT OF CONTEMPORARY TECHNOLOGICAL SYSTEM

Smaïl AÏT-EL-HADJ¹

Résumé : Vingt ans, d'innovation. Déjà vingt ans alors d'un nouveau système technologique. Ces années 1995, début de la « convergence » donnant des produits nouveaux comme le téléphone portable, les réseaux et notamment internet. Mais cette dynamique affirme aussi la maîtrise de génétique et des nouveaux matériaux, alors la contrainte environnementale commence à bouleverser profondément les paradigmes technologiques. Nous faisons appel aux concepts de l'approche des systèmes technologiques, née dans les années 1980, avec des instruments d'analyse de la structure d'organisation de la technologie, de sa dynamique d'évolution, et des transitions entre ses phases. La thèse qui va sous-tendre cette analyse est que la dynamique technologique de ces vingt dernières années est celle d'une deuxième vague d'innovation de ce troisième système technologique.

Mots Clés : Systèmes technologiques, Dynamique technologique, Innovation, Systémique

JEL : 030, 031, 033, 052

Abstract: Twenty years of innovation. These years around 1995, organised in the third technological system, generating new products as network and smartphones, developing new genetics processes and advanced materials. At the same time, the environment constraint begins to deeply change the technological trajectories.

We will use concepts of technological system's approach, born in the 1980's with analysis tools of the organisation of technology and of the dynamics of evolution.. The thesis developed in this article is that the technological dynamics in the last twenty years is a second wave of innovation of the third technological system.

Key words: Technological Systems, Technological Dynamics, Innovation, Systemics

JEL: 030, 031, 033, 052

¹ ITECH-Université de Lyon

**VINGT ANS D'INNOVATION OU LE DEPLOIEMENT DU SYSTEME
TECHNOLOGIQUE CONTEMPORAIN**

**TWENTY YEARS OF INNOVATION AND THE DEPLOYMENT OF
CONTEMPORARY TECHNOLOGICAL SYSTEM**

Smaïl AÏT-EL-HADJ

TABLE

INTRODUCTION	4
1. LE CADRE PERMANENT DE L'INNOVATION : LE SYSTEME TECHNOLOGIQUE	4
1.1. Qu'est-ce qu'un système technologique ?	5
1.2. La succession historique des systèmes technologiques	5
1.3. Quelques mécanismes de la dynamique technologique : la modélisation de la dynamique des systèmes technologiques	6
2. LA MATRICE DES INNOVATIONS DEPUIS 40 ANS : LE TROISIEME SYSTEME TECHNOLOGIQUE	8
2.1. Un nouveau système issu de la crise du grand système technologique industriel.	8
2.2. Les piliers du système technologique contemporain : le faisceau de technologies génériques	8
2.3. Quelques invariants du système technologique contemporain	12
2.4. Une phase initiale de mise en place du nouveau système technologique : la révolution électronique des années 80	9
3. LES 20 ANS D'INNOVATION, LES PHASES DE DEPLOIEMENT DU SYSTEME TECHNOLOGIQUE	10
3.1. Des technologies génériques porteuses d'une nouvelle vague d'innovations	10
3.2. La 2° phase de déploiement du système technologique: Numérisation et intégration, convergence	11
3.3. Le déploiement fonctionnel et organisation du troisième système technologique	12
CONCLUSION	16
BIBLIOGRAPHIE	16

INTRODUCTION

Remonter aujourd'hui 20 ans d'innovation, nous entraîne au milieu des années 1990, moment où se déployait déjà, ce que l'on a nommé le troisième système technologique, qui avait commencé à se constituer dans la crise technologique et économique des années 1975. Le puissant courant d'innovation qui a bouleversé la société mondiale dans les vingt dernières années est issu, et il est toujours porté, par ce système technologique fondé sur les technologies de l'information, par la biotechnologie, par les nouveaux matériaux, en même temps que par la diversification des sources d'énergie.

L'idée développée dans cet article est donc qu'un mouvement récent d'innovation, d'une considérable ampleur, n'est pas, comme cela est parfois exprimé, une nouvelle révolution technologique, qui commencerait aujourd'hui selon la thèse de Rifkin (Rifkin, 2012), mais le déploiement puissant d'une configuration de technologies génériques qui s'est mise en place à la fin des années 1970. Ce mouvement, quelle que soit l'ampleur des changements qualitatifs qu'il génère, ne constitue pas une rupture de système, car l'ensemble des contenus et de la dynamique technologique en développement aujourd'hui, un "momentum" comme le définit Hughes (Hughes, 1987), est issue des technologies génériques qui se sont combinées il y a plus de quarante ans en un nouveau système. Cette révolution technologique continue à réorganiser le monde, en vagues successives, celle des dernières années étant la vague de l'intelligence intégrée, combinée à la génération de nouvelles fonctions et de nouvelles formes d'organisation, succédant à la vague de la convergence numérique des années 90 et à la révolution électronique qui constitua la première vague de ce système techno. Ainsi, comme on le voit ici le système technologique à l'œuvre est dans cette troisième phase en voie d'incorporer au champ technologique et à reconfigurer des domaines entiers de la vie sociale : de l'organisation du travail et de la production au marché, et de la vie quotidienne à la transmission des connaissances.

Cet article s'attache ainsi à montrer comment notre système technologique se déploie en générant de nouvelles configurations innovantes par développement, recombinaison et recombinaison des technologies existantes, par génération de nouvelles fonctions, qui à leur tour, tirent l'évolution technologique. Nous développerons cette présentation à partir d'illustrations significatives, sans pouvoir dans la place et le temps qui nous est imparti développer un tableau d'ensemble de ce déploiement.

1. LE CADRE PERMANENT DE L'INNOVATION : LE SYSTEME TECHNOLOGIQUE

Le cadre de cette modélisation de la dynamique récente de l'innovation est la théorie des systèmes technologiques, dite aussi systémique technologique (Aït-El-Hadj, 2014, Aït-El-Hadj, 2015). Nous allons présenter ce cadre d'analyse à partir de trois mécanismes le constituant : les caractéristiques et l'évolution d'un système technologique en tant que structure, la modélisation du cycle de vie des technologies, la dialectique interne au mouvement technologique à partir de l'interaction procédé/structure/fonction qui permet d'identifier et de comprendre la dominante du mode d'innovation à un moment donné de l'évolution du système technologique, mais aussi le mécanisme de déploiement d'un système technologique dans la société.

1.1. Qu'est-ce qu'un système technologique ?

La systémique technologique est fondée sur la notion originelle de « système technique » formalisée par Bertrand Gille (Gille 1978). Qu'est ce alors qu'un système technique ? C'est le modèle qui va rendre compte de cette relation fondatrice : « dans une période donnée et à des degrés divers, toutes les technologies sont interdépendantes et cohérentes entre elles. » (Gille, 1978). Ainsi toute la technologie d'une période va être structurée par une solidarité générale qui va diffuser, unifier, les technologies du système, en même temps qu'elle va constituer le puissant moyen de génération et de diffusion des innovations. En effet, chaque changement technologique en un point du système, va constituer une incitation au changement par le nouveau possible qu'il représente, ou une contrainte au changement par les requêtes quantitatives et qualitatives qu'il adresse à son système d'interrelations technologiques. Ainsi le système technologique, par son jeu de relations structurelles, va constituer une base permanente de changement technologique en diffusant, relayant et amplifiant toute perturbation.

Le système technologique constitue aussi un système hiérarchique par l'ampleur de diffusion de chacune des technologies. L'ensemble des technologies d'un système procède d'un petit nombre de moyens centraux de transformation de la matière/énergie/information qu'il est convenu d'appeler technologies génériques. C'est cette intégration hiérarchisée des technologies qui génère un ensemble unifié, certains disent un "paradigme technologique" (Dosi, 1982), qui va explorer tout son champ de possibles, avant de s'épuiser et de laisser la place à un nouveau système fondé sur un groupe de nouvelles technologies génériques, un nouveau paradigme structurant un nouveau système technologique.

1.2. La succession historique des systèmes technologiques

Ce modèle permet d'interpréter l'histoire technologique et la dynamique de longue durée de l'innovation comme une succession de systèmes technologiques. On a pu déjà construire une formalisation de la technologie de périodes relativement anciennes sous la forme, plus ou moins achevée, de systèmes technologiques. Ceci déjà pour la préhistoire, mais aussi pour un système technologique antique, ainsi que pour un grand système, novateur quoique fondé sur des technologies génériques traditionnelles telles que l'énergie animale, hydraulique et éolienne, sur le bois, la pierre et les fibres naturelles, qui partant d'une révolution technologique du XII^e siècle va s'achever à la fin du XVIII^e pour déboucher sur la révolution industrielle anglaise. Celle-ci va mettre en place le premier système technologique industriel fondé sur la sidérurgie du fer, l'énergie de vapeur alternative, la mécanisation du textile qui ont constitué ses technologies génériques et fourni les bases de la première transformation industrielle de grande ampleur.

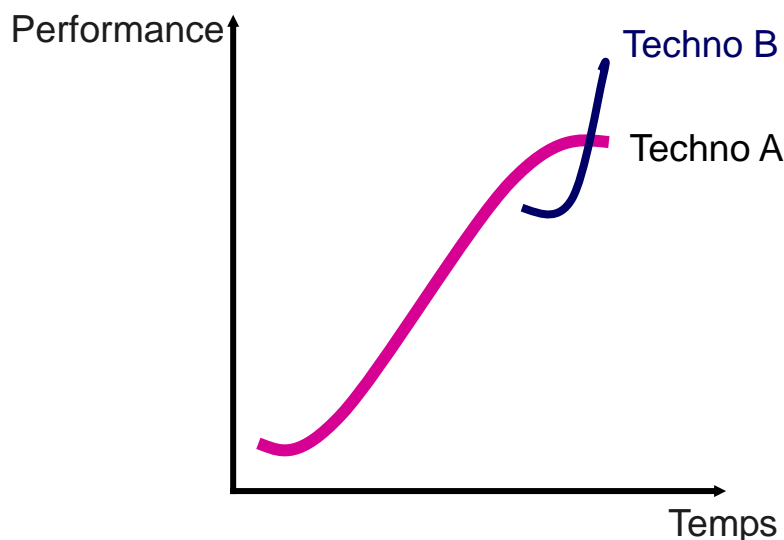
Ce système a donné des signes d'épuisement à la fin des années 1880, pour donner naissance à un nouveau système technologique, dit 2^e système technologique, fondé lui sur l'acier et les alliages, la mécanique, l'électricité, les énergies fossiles, qui va avoir des effets de transformation et d'innovation encore plus considérables que le système précédent, comme le montre bien l'historien David Landes (Landes, 1975).

S'ouvre avec cette période moderne la succession de trois systèmes technologiques, dont les deux premiers se sont respectivement développés sur une période approximative de cent ans et le dernier qui nous occupe ici est encore en cours de développement.

1.3. Quelques mécanismes de la dynamique technologique : la modélisation de la dynamique des systèmes technologiques

Une théorie des systèmes technologiques doit comprendre, au-delà de la formalisation de leur structure, une modélisation de leur dynamique, dynamique temporelle avec le cycle de vie technologique et une modélisation de la dynamique d'interaction entre les trois dimensions de la technologie : fonction, architecture, procédé, qui au cours de son évolution sont successivement moteurs de sa dynamique.

a) Le modèle de mouvement : innovation dépassement d'une limite technologique : L'analyse de l'évolution en termes de systèmes techniques qui se succèdent historiquement a pour fondement l'analyse d'une dynamique, celle du cycle de vie des technologies. B. Gille (1978) formalisant le cycle de vie technologique sous la forme d'un processus croissant, auto-saturé, représenté sous la forme d'une courbe en S. Ce modèle est le modèle central de la génétique technologique qui est déterminante dans l'ensemble du système d'analyse présenté parce que la technologie « est mouvement ». Car comme le souligne B. Gille : « *C'est en définitive l'analyse dynamique proprement dite qui paraît la plus fructueuse. Non seulement elle permet de déceler structure et systèmes, mais elle met en évidence des limites structurelles qui contraignent à l'invention, qui conduisent aux mutations de systèmes* »



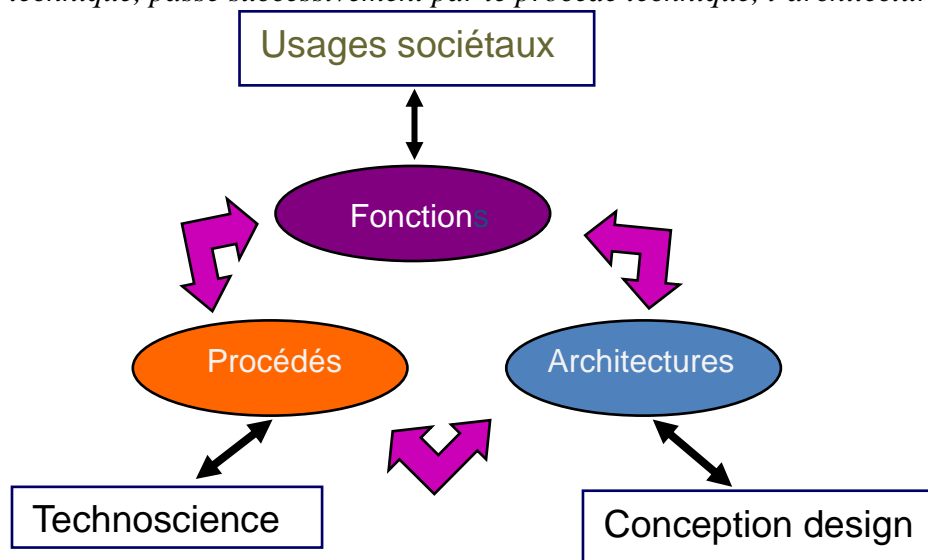
(Gille, 1978).

La courbe en S peut rendre compte de l'ensemble des phases de l'évolution d'une classe de systèmes techniques. Afin de rendre compte de cette évolution, ce cycle d'ensemble a été décomposé en quatre phases – émergence, développement, maturité, saturation – induisant des organisations, comportements et dynamiques différenciés des systèmes techniques, selon ces phases. L'innovation n'aura pas la même dominante dynamique selon la phase : prolifération technologique en phase d'émergence, sélection d'un "Robust design" en phase de croissance, "divergence" fonctionnelle et "convergence" ou « fusion » de systèmes, en phase de maturité.

Enfin ce modèle d'évolution permet l'analyse complexe des limites entre : la saturation d'un principe technique global, la saturation du système par le blocage d'un composant, la saturation du système par les effets de complexité ou de dé-corrélation dimensionnelle ? Ce cycle de vie technologique a été formalisé d'une manière approchée sous les notions d'« itinéraire technologique » et de « régimes d'innovation ».

b) La dialectique interne de la technologie : Le modèle de la relation « fonction-architecture-procédé »

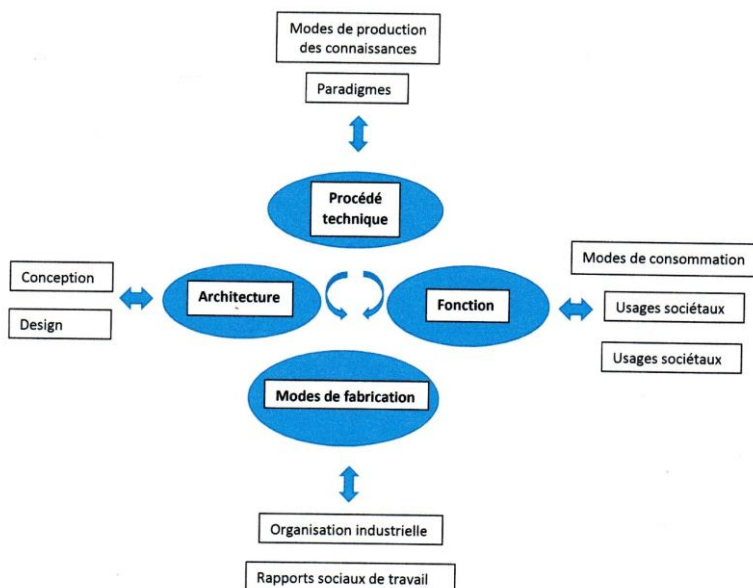
Il s'agit ici de tenter de modéliser la dialectique entre l'évolution des fonctionnalités du système, son architecture et ses composants jusqu'aux principes techniques qui le forment. Le modèle d'Abernathy et Clark, modèle complexe de la relation et de la dominance successive, dans la vie des systèmes techniques des dimensions fonctionnelles, architecturales et proprement techniques au niveau des procédés (Abernathy et Clark, 1988). *Au cours de l'évolution d'un système technique, le facteur dominant de la dynamique du système technique, passe successivement par le procédé technique, l'architecture, la fonction.*



L'intérêt de cette approche est que, selon la phase identifiée, on peut distinguer des phases d'innovation à dominante de procédé, à dominante d'architecture, à dominante fonctionnelle.

La prospective de l'innovation peut ainsi être menée à partir d'un appareillage d'analyse complet permettant de rendre compte de la structure technologique, de la formation de son cadre, des ressorts de sa dynamique, qui va permettre d'identifier une direction de l'innovation à partir d'un itinéraire technologique

c) Le régime de déploiement d'un système technologique



A partir de ce mouvement interne aux différents composants de la technologie, et à un certain degré de maturité atteint par ses configurations, le système technologique va se déployer en reconfigurant des sphères du fonctionnement social (Hughes, 1987) telles que les paradigmes scientifiques et les formes de production de la connaissance scientifique ; avec la transformation des architecture se modifient les méthodes de conception et de design, avec la dynamique fonctionnelle se recomposent les types de marché et modes de consommation ; avec la pratique de fabrication/production se recomposent l'organisation industriel et les rapports sociaux de travail.

C'est cette phase avancée de déploiement qui apparaît dans les derniers mouvements d'innovation.

2. LA MATRICE DES INNOVATIONS DEPUIS 40 ANS : LE TROISIEME SYSTEME TECHNOLOGIQUE

2.1. Un nouveau système issu de la crise du grand système technologique industriel.

Le troisième système technologique, qui est en fait le troisième système technologique de l'ère industrielle, est apparu à la fin des années 1970, à la suite de l'épuisement des technologies génériques du grand système technologique, dit le 2°, marqué par l'acier, la mécanique, l'électricité, la chimie, la première vague de l'électronique et les énergies fossiles. Son effondrement est tout à fait lié à la crise énergétique des années 70 et à la crise de la relation de ce système avec son environnement (Aït-El-Hadj 1989)

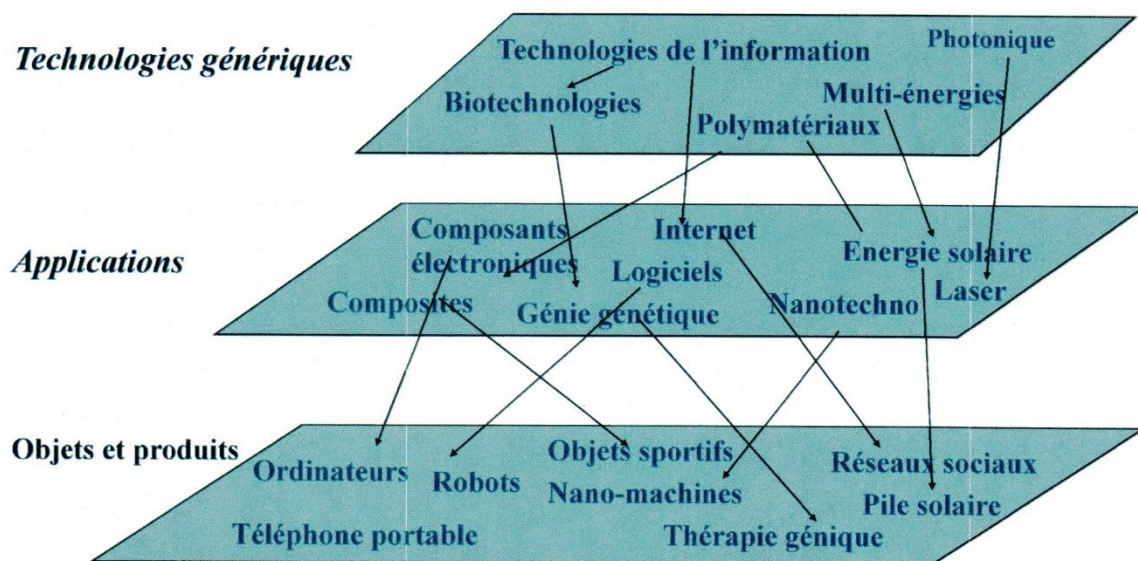


Schéma simplifié du troisième système technologique : 1975 -

2.2. Les piliers du système technologique contemporain : le faisceau de technologies génériques

En réponse à cette crise et en dépassement de cet épuisement technologique le nouveau système s'est constitué sur de nouvelles technologies génériques apparues au même moment et porteuses d'un grand potentiel de développement, telles que la microélectronique, la

biologie à composante génétique, un marqueur de ces apparitions ayant été en 1975 et 1976, l'attribution des prix Nobel aux inventeurs du micro-processeur et des techniques d'intervention sur l'ADN.

Ce faisceau de technologies génériques va être complété par les nouvelles problématiques de matériaux centrées sur les composites et plus généralement sur ce qu'A.Y. Portnoff a appelé "l'hyperchoix des matériaux" (CPE, 1983). Enfin, technologique générique problématique de ce nouveau système, l'orientation vers la diversité énergétique, réponse à la crise de l'énergie qui a ouvert une tension permanente vis à vis de l'environnement.

Ce système technologique a, depuis environ 35 ans, connu plusieurs vagues. La première a été largement centrée sur la micro-électronique et le déploiement du microprocesseur, elle s'est déroulée jusqu'aux années 1990. Un mouvement de relais a été pris, par les technologies de l'information en réseau et l'exploitation des possibilités de la numérisation généralisée. Cette deuxième vague est aussi portée par un développement de la biologie (Roy, 2016) qui atteint à ce moment sa maturité génératrice d'applications en même temps que l'approfondissement des problèmes environnementaux entraîne la reformulation de beaucoup des questions technologiques

2.3. Quelques invariants du système technologique contemporain

Chaque système technologique historique a eu une logique de fonctionnement qui a animé sa trajectoire. Le troisième système est marqué par quatre grandes tendances identifiées qui en quelque sorte lui sont propres :

La tendance à la substitution de l'information à de la matière et à de l'énergie, elle constitue la base de ce que l'on a appelé la dématérialisation ou virtualisation des technologies. Ce processus est puissamment porté par les technologies de l'information au rang desquelles on peut intégrer la biologie.

Le renforcement d'une dimension environnementale, consubstantielle d'ailleurs à ce système technologique, puisqu'il naît en partie d'une crise environnementale. Cette problématique environnementale d'économie de matière et d'énergie sera une stimulation du processus de substitution mentionné plus haut.

Une complexification technologique généralisée. Ce système, ne serait-ce que par l'introduction généralisée de l'électronique et des sciences de l'information dans pratiquement tous les dispositifs techniques, génère une complexification des systèmes et développe des processus de « convergence technologique ».

La continuation de la tendance à la miniaturisation. (Kahane, 2012) Ce système enfin va apporter sa tonalité à des mouvements connus dans les systèmes antérieurs liés à des progrès technologiques rapides telle que la miniaturisation, qui après l'électronique connaît des extrêmes avec les nanotechnologies. Il en est de même pour la maîtrise de l'espace et du temps notamment avec ce qu'on a appelé les technologies nomades.

2.4. Une phase initiale de mise en place du nouveau système technologique : la révolution électronique des années 80

Le troisième système technologique a commencé sa mise en place dès le milieu des années 1970, avec la grande crise de cette époque. L'électronique dont la puissance a été décuplée par la révolution du micro-processeur engendrant le mouvement permanent d'accroissement des puissances, le mouvement dit de la loi de Moore, va s'intégrer et recombinaire toute une série de technologies et d'activités qu'elle sous-tend. Ce fut d'abord le mouvement de

généralisation de la micro-informatique au début des années 1980. Il s'accompagna de l'implantation de dispositifs électroniques de traitement de l'information dans toute une série de domaines : de la commande numérique des machines, aux premiers robots, en passant par la régulation électronique des moteurs automobiles.

3. LES 20 ANS D'INNOVATION, LES PHASES DE DEPLOIEMENT DU SYSTEME TECHNOLOGIQUE

3.1. Des technologies génériques porteuses d'une nouvelle vague d'innovations

Les grandes technologies génériques du troisième système technologique apparaissent comme devant rester le cadre porteur de l'innovation des vingt dernières années.

Les technologies de l'information par exemple apparaissent évidemment riches encore d'applications dynamiques aussi bien dans les systèmes technologiques d'informatique pure, comme la continuation des progrès dans les grands calculateurs par exemple, que dans la multitude des systèmes techniques liant l'informatique à divers processus opératoires, et l'ensemble des dispositifs dit intelligents et en réseau dont nous verrons plus loin qu'ils sont animés d'une dynamique technologique à dominante architecturale et fonctionnelle.

Il reste qu'on anticipe, à assez court terme, une rupture majeure au sein de la technologie de l'information entraînée par l'épuisement de la capacité d'évolution de la micro-électronique de traitement de l'information, ce que l'on a appelé, plus haut, "la fin de la loi de Moore" (Colin, 2002). En effet la croissance exponentielle de la puissance informatique fondée sur la miniaturisation permanente des composants, permettant leur accumulation croissante dans le même espace, bute aujourd'hui sur une limite absolue : la taille des supports d'évolution de l'électron va devenir inférieure à la taille de l'évolution "quantique" de celui-ci, ce qui n'en permettra plus un comportement certain.

La continuation de ce processus est donc impossible d'autant que cet obstacle primaire est renforcé par ce que l'on a appelé le "mur de la chaleur" c'est à dire la nécessité croissante de refroidir des composants d'une densité de concentration extrême. Ceci bloquant les apports de la miniaturisation puisque celles-ci sont neutralisées au niveau du système par la taille constante des systèmes de refroidissement.

Sans remettre en cause le statut des technologies de l'information et même probablement en permettant d'en reprendre le mouvement de croissance, la micro-électronique devra laisser la place à d'autres technologies alternatives de traitement de l'information. Plusieurs technologies sont apparues successivement comme candidates à la succession. Dès les années 1990 la photonique est apparue comme possible support pour la création de "l'ordinateur de lumière", mais l'impossibilité d'un dispositif de stockage de l'information sous forme optique a condamné le procédé. Aujourd'hui c'est une technologie de type quantique qui apparaît la plus probable dans la succession (Papon, 2013).

Au-delà de l'aspect "procédé", la puissance numérique acquise aujourd'hui va permettre de développer les gisements de traitement de l'information vers la modélisation et le traitement de l'hyper complexité, et le développement de la simulation et des "sciences du virtuel".

Un grand champ d'innovation pour le présent et pour le futur repose sur la perpétuation de technologies génériques - électroniques, matériaux, mécaniques - dans un mouvement de miniaturisation qui atteint une échelle - moléculaire voire atomique - de la maîtrise de l'infiniment petit. Or, on peut envisager l'utilisation de « phénomènes qui, à cette échelle sont surprenants tout simplement parce que les propriétés des matériaux (optiques, mécaniques, magnétiques, thermiques, etc.) dépendent de leur taille : certaines disparaissent d'autres apparaissent, d'autres sont améliorées, d'autres encore ne respectent plus les lois de la physique classique, voire de la physique quantique» (Devalan, 2006) Nous assistons ainsi à l'apparition d'un champ technologique, porteur d'un niveau d'innovation très radical, issus de technologies génériques connues mais ouvrant un nouveau paradigme, un faisceau de propriétés émergentes radicales, ceci par un effet de taille. Ces propriétés émergentes, par la radicalité de leur possibilités fonctionnelles, devraient se déployer d'une manière puissante et « pervasive », c'est à dire diffuser dans de multiples domaines -électronique, télécommunications, énergie, médecine, construction, textile, armement etc, et comme d'autres technologies avant elles, les nanotechnologies devraient développer "des potentialités qui ne se dévoilent que progressivement au fur et à mesure de l'extension du réel qui les soutient" (Kahane, 2012)

De même, le grand gisement d'innovations attendu dans les biotechnologies à travers le génie génétique dès le début du nouveau système technologique, est en train de porter ses fruits notamment avec les développements de la thérapie génique, de la médecine régénératrice à l'aide des cellules souches, de la transgénése et des OGM. Ces dernières ouvrent des voies de productions nouvelles non seulement dans l'agriculture, l'agroalimentaire, avec la production d'une alimentation fonctionnalisée, dans toute l'industrie du bio-sourcé et aussi de l'énergie à partir "*des microorganismes et des plantes génétiquement modifiées capables de produire des biocarburants plus facilement et à un moindre coût que les végétaux utilisés actuellement*". (Desaunay, 2012) Le recensement du génome humain ouvre des voies élargies à la recombinaison génétique, dans le domaine de la santé comme il a été mené dans le domaine de l'agriculture. Mais ces deux domaines butent et sont ralentis dans leur développement par une résistance psychologique soutenue et la permanence d'obstacles éthiques. Ceux ci peuvent être d'ailleurs parfois dépassés, comme dans le cas des cellules souches qui peuvent être maintenant obtenues à partir de cellules adultes différenciées, et qui ne nécessitent donc plus le recours à des embryons humains pour être obtenues.

Mais il semble que la bio technologie connaît en même temps une bifurcation vers une conception « plus intégrée du vivant : celui-ci est conçu comme un système bouclé dans lequel les gènes, les ARN et les protéines sont en interaction constante » (Papon, 2013), ceci tout en n'abandonnant pas la voie du développement moléculaire.

3.2. La 2^o phase de déploiement du système technologique: Numérisation et intégration, convergence

Le développement de la puissance informatique va entrainer la numérisation généralisée génératrice de convergence. C'est une phase nouvelle du déploiement de l'électronique

– L'innovation centrée sur la convergence

Notre système technologique est entré dans une phase de maturité qui permet, comme l'a montré le modèle du cycle de vie, de diversifier les technologies en fonction de leur finesse fonctionnelle et surtout de générer des applications et des systèmes nouveaux par la combinaison des technologies auparavant séparées de ce que l'on a appelé la *convergence* ou la *fusion* des technologies.

Ce mécanisme a commencé très tôt dans le système avec la migration fréquente des dispositifs de microélectronique dans des systèmes d'autres natures tels que notamment la mécanique. La naissance dès les années 80 des machines à commande numérique, de ce que l'on a appelé la mécatronique en est déjà une des manifestations. Le phénomène a pris une autre ampleur depuis la fin des années 90 avec la numérisation généralisée qui a suscité une pléiade de systèmes techniques nouveaux, et qui représente à notre sens une source majeure de l'innovation des deux décennies à venir car elle amplifie les gisements propres de progrès de chacun des grands champs technologiques par celui d'un très grand champ de combinatoire.

L'innovation par la convergence des technologies est particulièrement puissante dans le domaine des technologies de l'information et de la communication :

- A partir d'un certain niveau de puissance informatique et de numérisation des technologies de télécommunication s'est mis en place, sous une impulsion militaire liée à la guerre froide, un dispositif de réseau de communication mondial qui s'est généralisé à l'ensemble des activités sous le nom d'internet. Il a ouvert à son tour un ensemble considérable d'innovations d'applications logicielles supportant des services totalement innovants.
- L'accroissement considérable des puissances de traitement permet d'intégrer dans un fonctionnement numérique des domaines d'activités ressortant précédemment des technologies analogiques Celle-ci permet d'unifier le fonctionnement et de rendre compatible des technologies qui, par leur convergence, vont engendrer une multitude d'applications. Les domaines de l'image et du son ont été particulièrement transformés par cette numérisation, aboutissant à l'apparition de dispositifs multimédia intégrés.
- Ce mécanisme va engendrer des objets nouveaux, dont la plupart vont avoir un très large usage dans le public dont le plus emblématique sera le téléphone portable qui va poursuivre son développement dans une forme plus complexe, le smartphone, qui va devenir à son tour le support et le vecteur d'une vague nouvelle d'innovations fonctionnelles.
- Ce mouvement déplace les limites et frontières des objets en combinant une multitude de fonctions dans ces objets, mais à travers cela il génère de nouvelles fonctions, messagerie personnelle téléphonique du type texto, réseaux sociaux ... qui vont à leur tour engendrer des recompositions architecturales, de nouveaux faisceaux de fonctions et des recombinaisons technologiques.

Ce développement par convergence est aussi très puissant dans le domaine professionnel, dont il modifie les pratiques. Le cas de la chirurgie assistée en est un exemple saisissant, comme la généralisation des drones et robots de toute nature dans de multiples domaines d'activités (Oudeyer, 2014). Ceux-ci en arrivent à occuper des domaines de systèmes de plus en plus complexes, et générer des objets sophistiqués de forme totalement nouvelle comme les "araignées" opératoires, qui utilisent une convergence avec la bionique.

3.3. Le déploiement fonctionnel et organisation du troisième système technologique

La projection de la structure et de la dynamique d'innovation nous semble devoir se structurer sur au moins quatre bases. Dans le futur les innovations continueront à être portées par les technologies génériques à l'œuvre dans le système actuel, quitte à ce que ce niveau de développement fasse apparaître des propriétés émergentes. Les innovations auront tendance à se former largement, dans ce cadre, par convergence et recroisement de technologies avec apparition de fonctions nouvelles. La tonalité générale du mouvement d'innovation dans le système sera durablement marquée par la dimension environnementale. Enfin la

complexification des contraintes va concentrer l'innovation sur un nouveau type d'innovation incrémentale polyvalente.

a) L'intelligence

Le déploiement approfondi des technologies de l'information, leur recroisement et leur combinaison dans ce que nous avons vu comme la numérisation intégrale combinée à la mise en réseau a conduit au passage à un niveau supérieur de traitement de l'information que l'on a coutume d'appeler l'intelligence artificielle ou les systèmes intelligents (Brynjolfsson et Mc Affee, 2014).

Cette émergence est parfois le produit qualitatif d'un fantastique accroissement de puissance, puissance de collecte, puissance de stockage, puissance de tri et de traitement qui débouche sur ces dispositifs générateurs de connaissances appelés « big-data ».

La puissance accrue des systèmes informatiques va aussi engendrer un ensemble de capacités par les systèmes de reconnaissance complexe, de mémorisation évolutive, de traitement procédural, de capacité de décision, qui va engendrer ces robots capable d'une grande autonomie d'action qui renouvelle la robotique industrielle, mais qui engendre aussi la robotique domestique, les robots logiciels de recherche, les drones etc... Ce mouvement est en voie de permettre notamment le pilotage automatique complexe de véhicules et de systèmes techniques auparavant exclusivement pilotés par l'homme.

Ces dispositifs intelligents, portés aussi par la miniaturisation, peuvent non pas se substituer à l'action humaine, mais l'amplifier en renforçant ses capacités de perception, capacités cognitives voir d'action physique formant la réalité augmentée voir l'homme augmenté.

b) L'innovation incrémentale polyvalente

Dans le système contemporain, la maturité de certains domaines ne permet plus une avancée significative dans la recherche de la maximisation de la performance unitaire pendant qu'un nombre croissant de contraintes pèse sur celui-ci, dont celle, et non la moindre, de l'environnement et de ses effets technico-économiques.

Une illustration significative de ce processus est l'avion civil de transport de passagers. L'expérience du Concorde a montré que la recherche de la vitesse unitaire la plus élevée atteignait ses limites, et que, dans les conditions complexes du transport civil, mach 2 n'était pas tenable durablement. Ainsi, la vitesse de 900 km/h qu'avait atteint l'aviation civile à réaction dès les années 60 est restée une performance stable jusqu'à nos jours et très probablement pour le futur, jusqu'à la mise au point du lointain avion spatial.

Or depuis cette période, l'innovation s'est déplacée sur la résolution de l'ensemble des contraintes et projets qui pèsent sur cette activité, tels que la réduction de consommation de carburant et la minimisation des rejets de gaz à effet de serre et surtout de bruit avec une forte pression sur les contraintes de silence. Une contrainte structurante du système avion est la sécurité qui est en train de bouleverser une logique de réseau du système élargi de circulation aérienne, et enfin la contrainte d'espace interne et de gestion des flux de passagers qui a donné les évolutions architecturales de l'airbus A380 et du Boeing 787. Ce qui est exprimé ici pour l'avion est à l'œuvre dans tous les systèmes de transport et notamment le système automobile.

Ce mode d'évolution va rester dominant dans le futur lisible, sans rupture majeure prévisible de procédés, ces systèmes soumis à un ensemble de contraintes complexes et croissantes ne

peuvent que continuer à développer ce système d'innovation polyvalente. Elle montre le jeu du modèle d'Abernathy avec des dominantes architecturales et fonctionnelles et la recherche d'un ensemble de fonctionnalités complémentaires et environnementales.

c) Le déploiement fonctionnel, les nouveaux usages

Dans un clip publicitaire récent sur un véhicule nouveau, le slogan central était « inventez la vie qui va avec ». Le déploiement technologique récent a pour caractéristique, encore plus que dans les périodes précédentes, de générer des fonctions nouvelles et de bouleverser des usages.

Une des formes majeures de l'innovation, particulièrement dans les dix dernières années est la génération de fonctions nouvelles prises en compte ou recombinaison par les nouvelles configurations technologiques.

Un des exemples en est la géolocalisation qui rend elle-même possible une dynamisation des réseaux. Une autre fonction nouvelle très technique est la chirurgie à distance, forme extrême, car assortie d'automatisation et d'intelligence, du télétravail ou travail à distance qui avait commencé à se développer dès les années 1980. Dans le domaine de la production, un courant d'innovation majeure est fondé sur l'impression 3d, ou fabrication additive, qui permet d'élargir la possibilité d'objets personnels en très petite série.

La transformation des fonctions et des usages par l'innovation technologique se retrouve dans des domaines de la vie personnelle avec la collecte en temps réel des données physiologiques individuelles, avec une conséquence sur la pratique médicale, donnant au dispositif médical accès à la gestion de données massives.

Dans cette dernière période l'innovation technologique s'approprie des fonctions dans des activités de service sur au moins trois exemples :

La déploiement du transport collectif auto-organisé avec les applications informatiques de gestion du covoiturage, ou de réorganisation de l'activité de taxi avec la gestion de l'intervention d'une flotte de voiture individuelle dans un parc de transport collectif appelé « uberisation » du nom de la société Uber qui l'a mis en place.

L'expansion de nouvelles formes de marché en réseau informatisé, se substituant aux réseaux commerciaux traditionnels, et particulièrement vive et d'une efficacité reconnue dans le marché de l'occasion, voire dans un certaines forme de prise en compte du marché de l'emploi.

L'appropriation par des opérateurs technologiques d'une partie des activités bancaires avec tout le développement du business des banques en ligne, ou des formes de circulation monétaire concentrées, dans une nouvelle de convergence, sur le smartphone.

d) La transformation de l'organisation et des rapports de travail et de connaissance

Ce déploiement de nouvelles manières de faire, conditionné par les nouveaux systèmes technico fonctionnels, en arrive à transformer les rapports de travail et partant les formes d'organisation et formes juridiques de l'activité humaine.

Nous avons déjà évoqué les transformations de marché et de rapports commerciaux. Nous assistons actuellement au remplacement partiel du rapport salarial par un rapport de prestataire dans un rapport client-fournisseur ajusté au besoin d'activité.

Dans l'ordre de ces transformations d'activité on relève le bouleversement profond de l'activité de formation et d'enseignement, ou les possibilités offertes par les nouvelles technologies de communication remettent en cause la dominance magistrale et discursive de la transmission de connaissance.

e) La pression environnementale, une source de changement de la trajectoire d'innovation

La prise de conscience d'une limite environnementale est contemporaine de la naissance d'un nouveau système technologique dans les années 1970 avec la grande crise pétrolière et le Rapport du Club de Rome. Cette contrainte physique et sa prise de conscience à l'échelle mondiale n'ont fait que s'amplifier et se complexifier depuis ce moment avec les pénuries structurelles de matières premières et particulièrement du pétrole mais aussi des matières premières minérales comme les terres rares. L'activité industrielle et de transport, l'agriculture intensive et la concentration urbaine génèrent un niveau élevé de pollution aérienne, terrestre, maritime et fluviale. Le monde a aussi découvert, à partir du début 2000, la tendance au réchauffement climatique par un effet de serre lié à la croissance d'une activité humaine génératrice de quantités gigantesques d'oxyde de carbone relâchées dans l'atmosphère. Cette limite se trouve aussi jusque dans l'exploitation de ressources normalement renouvelables comme le poisson ou la forêt.

Ces différentes formes de limites environnementales prises en charge par les autorités nationales et mondiales, comme par les mouvements d'opinion et les organisations qui se sont créées sur ce sujet, générant aussi des distorsions de prix, exercent une pression sur les activités génératrices de problèmes environnementaux en contribuant à supprimer certaines matières, matériaux ou technologies agressives et destructrices pour l'environnement. D'un autre côté, la nécessité de trouver des solutions alternatives à nos modes de production traditionnels est en voie de générer un courant permanent d'innovations.

Ceci concerne d'une manière renouvelée le mouvement des énergies alternatives (Philibert, 2011) : solaire, éolien qui ont connu un développement exponentiel, soutenu notamment, pour le solaire, par les solutions de photovoltaïque souple et les configurations décentralisées de production. Cette recherche de solutions énergétiques alternatives nouvelles s'étend à des formes non-conventionnelles comme la captation de l'énergie des houles, ou de régénération de dispositifs anciens comme l'hydrolienne résurgence transposée du « moulin à marée » médiéval.

Par l'universalité de certains de ses aspects la contrainte environnementale va exercer une stimulation à l'innovation sur un grand nombre d'activités à travers la problématique croissante de l'économie d'énergie allant maintenant jusqu'aux objectifs d'autonomie et d'autosuffisance énergétique et de minimisation de rejet de CO₂. Ce jeu de contraintes peut peser sur pratiquement tous les types d'activité humaine contribuant à modifier types de constructions, modes de production, de transport et de consommation ; types d'architecture, solution matériaux, réorganisation des supply-chain.... L'échelle de ces phénomènes, l'ampleur des transformations et des réponses qu'elle induit, est en voie de contribuer à une bifurcation de l'innovation sur une base environnementale, en amenant de nouvelles trajectoires technologiques voire la construction de nouveaux paradigmes, comme par exemple la modification de la pensée sur les modes culturels en agriculture.

CONCLUSION

Comme on l'aura compris, la tendance lourde qui apparaît comme ayant structuré le mouvement d'innovation sur les deux dernières décennies reste essentiellement un mouvement d'innovation incrémentale, se déployant au sein d'un espace technologique, le système technologique contemporain, qui ne sera pas bouleversé dans ses fondements. Ceci, alors que le mouvement d'innovation donne toujours les signes d'une capacité de transformation d'une grande ampleur, centrée sur la combinatoire et la maîtrise de la complexité au sein d'un système qui, avec le force croissante de la pression environnementale, connaît à la fois un déplacement de trajectoire technologique en même temps qu'une nouvelle pression à innover pour dépasser les multiples limites que manifeste ou qu'impose ce "mur de l'environnement".

Une rupture de technologie est attendue, nous l'avons vu, sur le procédé central de traitement de l'information avec la fin de la loi de Moore et la remise en cause de la micro-électronique. Mais cette rupture avec l'apparition de nouveaux dispositifs de traitement dont le probable et très performant dispositif quantique va relancer la dynamique de ce bloc des "technologies de l'information", qui constitue le véritable socle de technologies génériques du système.

De même, on ne voit pas de rupture majeure attendue dans la sphère de la technologie biologique, qui, sur le plan des paradigmes scientifiques, continue à exploiter les grands gisements scientifiques qui ont été mis en place avec la révolution génétique des années 1970.

Enfin, dans le domaine de l'énergie, à part l'attente à long terme de la fusion nucléaire et celle non moins hypothétique de la supra conductivité, beaucoup d'innovations d'adaptation qui se combinent et se développent dans les cadres technologiques existant, comme le montre le possible bouleversement quantitatif de la production d'hydrocarbure grâce au développement des "gaz de schiste", jusqu'à la maîtrise "éco-compatible" de son développement et de son exploitation. Sous la pression environnementale une perpétuation du développement de la technologie des piles à combustible ou de l'amélioration des rendements des batteries électriques constitue une constante d'évolution.

Ce courant d'innovation, n'est pas exempt de ruptures locales et de sauts, comme nous le constatons à la fois pour l'informatique, les biotechnologies, et les nanotechnologies. En particulier à partir des combinaisons qui génèrent des bifurcations qualitatives importantes pouvant à leur niveau être qualifiées de ruptures.

BIBLIOGRAPHIE

ABERNATHY W.J., CLARK K.B. 1988, Comment établir un carte des innovations dans un secteur industriel, *Culture Technique*, n°18, CRCT, Paris. pp. 40-56

AÏT-EL-HADJ S., 1989, *L'entreprise face à la mutation technologique*, Les éditions d'organisation, Paris

AÏT-EL-HADJ S., 2013, *La prospective des innovations, le recours à la systémique*, dans RRI, Sophie Boutillier et alii (direction), « L'innovation, analyser anticiper, agir », PIE Peter Lang, Collection Business et innovation n°5, pp. 395 à 410.

AÏT-EL-HADJ S., 2014, Eléments de modélisation systémique de la dynamique technologique, *Marché et organisations n° 23, l'économie du changement*, pp. 99-122.

- AÏT-EL-HADJ S., 2015, De la théorie du système technique à la systémique technologique, une formalisation pertinente pour rendre compte de l'innovation technologique. *Innovations, Revue d'économie et de management de l'innovation*, n° 46, 2015/1, pp. 227-250
- BONNAURE P., 2012, Les automobiles électriques et hybrides, état des lieux et tendances, *Futuribles*, Octobre
- BRYNJOLFSSON E., Mc AFFE A., 2014, *The second machine Age*, Norton
- COLIN, J.P., 2002, *La loi de Moore : quelles limites ?* *Futuribles* n° 278, septembre.
- CPE, 1983, *Rapport sur l'état de la technique, la révolution de l'intelligence*, 4. L'hyperchoix des matériaux, Sciences et techniques, numéro spécial octobre, Paris.
- DESAUNAY C., 2012, Vers un monde génétiquement modifié, Applications possibles des biotechnologies, *Futuribles, Les organismes génétiquement modifiés*, n° 383, Mars, pp. 5-16.
- DEVALAN, P., 2006, *L'innovation de rupture, clé de la compétitivité*, Hermès Lavoisier, Paris
- DOSI G., 1982, *Technological paradigms and technological trajectories, a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change*, *Research Policy*, 11, North Holland publishing.
- GILLE, B.1978, *Prolégomènes à une histoire des techniques*, in *Histoire des techniques*, La Pléiade Paris
- HUGHES, Th. P., 1987, The evolution of large technological systems, in the *Social construction of technological systems*, edited by E. Bijker, Th. P. Hughes, T. Pinch., MIT press, Cambridge, Mass.
- KAHANE, B., 2012, Les nanotechnologies entre rêve et réalité, *Futuribles*, Avril, n° 384, pp. 5-20.
- LANDES, D., 1975, *L'Europe technicienne ou le Prométhée libéré. Révolution technique et libre essor industriel en Europe occidentale de 1750 à nos jours*. NRF Gallimard, Paris.
- OUDEYER, P.Y., 2014, Robotique : les grands défis à venir, *Futuribles* n° 399, mars-avril, pp. 5-24
- PAPON P., 2013, *Les futures ruptures scientifiques sont-elles à l'origine des innovations ?* dans RRI, Sophie Boutillier et alii (direction), « l'Innovation, analyser anticiper, agir », PIE Peter Lang, Collection Business et innovation n°5, pp. 375 à 394.
- PHILIBERT C., 2011, Les énergies renouvelables, jusqu'où ? *Futuribles* n° 376, juillet-août, pp. 29-46
- RIFKIN, J., 2012, *La troisième révolution industrielle, comment le pouvoir latéral va transformer l'énergie, l'économie et el monde*, Les liens qui libèrent, Paris.
- ROY C., 2016, Les potentiels de la bio-économie, *Futuribles* n° 410, janvier-février, pp. 69-80
- SADIN, E., 2013, *L'humanité augmentée, l'administration numérique du monde*, Edition L'échappée.