

IMPACTS ÉCONOMIQUES DE LA RÉVOLUTION NUMÉRIQUE

[Pierre-Alain Muet](#)

Presses de Sciences Po | « *Revue économique* »

2006/3 Vol. 57 | pages 347 à 375

ISSN 0035-2764

ISBN 272463036X

Article disponible en ligne à l'adresse :

<https://www.cairn.info/revue-economique-2006-3-page-347.htm>

Distribution électronique Cairn.info pour Presses de Sciences Po.

© Presses de Sciences Po. Tous droits réservés pour tous pays.

La reproduction ou représentation de cet article, notamment par photocopie, n'est autorisée que dans les limites des conditions générales d'utilisation du site ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Toute autre reproduction ou représentation, en tout ou partie, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit, est interdite sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France. Il est précisé que son stockage dans une base de données est également interdit.



Impacts économiques de la révolution numérique

Presses de Sc. Po. | *Revue économique*

2006/3 - Vol. 57

pages 347 à 375

ISSN 0035-2764

Article disponible en ligne à l'adresse:

<http://www.cairn.info/revue-economique-2006-3-page-347.htm>

Pour citer cet article :

"Impacts économiques de la révolution numérique", *Revue économique*, 2006/3 Vol. 57, p. 347-375.

Distribution électronique Cairn.info pour Presses de Sc. Po..

© Presses de Sc. Po.. Tous droits réservés pour tous pays.

La reproduction ou représentation de cet article, notamment par photocopie, n'est autorisée que dans les limites des conditions générales d'utilisation du site ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Toute autre reproduction ou représentation, en tout ou partie, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit, est interdite sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France. Il est précisé que son stockage dans une base de données est également interdit.

Impacts économiques de la révolution numérique

Pierre-Alain Muet*

« Le processus du développement technologique est comparable à la construction d'une cathédrale, chaque nouvel arrivant laisse un bloc au sommet des fondations antérieures, de sorte que chacun peut dire qu'il a construit la cathédrale... »

Paul BARAN, un des fondateurs de l'Internet.

INTRODUCTION

De la même façon que la machine à vapeur puis l'électricité ont rendu possible l'apparition de l'usine, puis de la firme géante, entraînant la concentration des emplois dans les villes et les banlieues, l'Internet et la révolution numérique déterminent peu à peu la base organisationnelle d'une « nouvelle économie » fondée sur le réseau. L'abondante littérature sur le sujet a d'ailleurs toujours eu en arrière-plan les deux précédentes révolutions industrielles.

Si pendant longtemps, l'impact macroéconomique de la révolution numérique a été difficile à mettre en évidence, comme l'exprimait le paradoxe de Solow [1987] – « on voit des ordinateurs partout sauf dans les statistiques de productivité » –, cet impact ne fait guère de doute aujourd'hui. La forte baisse du coût de l'information impulse en effet des changements organisationnels qui affectent progressivement l'entreprise et l'organisation du travail, en permettant la mise en œuvre de principes organisationnels qui lui étaient bien antérieurs.

Mais la « nouvelle économie » qui se met lentement en place ne se réduit ni à l'ancienne économie médiatisée par l'Internet¹ ni à une économie dont les coûts d'information seraient proche de zéro. Elle fait apparaître des originalités qui tiennent notamment au fait que les biens informationnels partagent de nombreuses caractéristiques des « biens publics ». Émergent à la fois une « nouvelle révolution industrielle » comparable, par ses effets potentiels, aux deux précédentes, et des changements plus profonds qui ressemblent en partie à

* Ministère de l'Économie et des Finances, Inspection générale des Finances. Courriel : pierre-alain.muet@jgf.finances.gouv.fr

De nombreux thèmes développés dans cet article s'appuient sur des travaux réalisés avec Nicolas Curien et publiés dans le rapport du CAE sur la société de l'information. Je tiens également à remercier Gilbert Cette pour ses remarques. J'ai bénéficié également des présentations faites par différents auteurs dans le cadre du groupe de travail INSEE-Direction du Trésor et de la Prévision Économique.

1. L'expression est empruntée à Gensollen [2003].

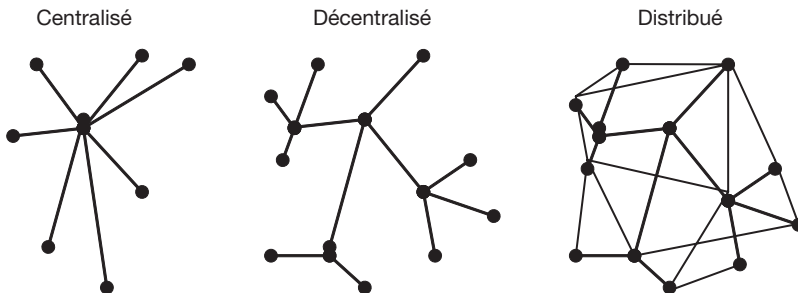
ceux qu'a initiés la précédente révolution de l'information : l'imprimerie. Les conséquences de la révolution numérique sont encore largement à venir et la thèse implicite à cet article est que le fonctionnement et les usages actuels du système Internet constituent une sorte de « laboratoire », préfigurant des phénomènes qui régiront à terme une part importante des activités socio-économiques.

DU PARADOXE DE SOLOW À LA REDÉCOUVERTE DES COMPTABILITÉS DE LA CROISSANCE

Né de l'improbable conjonction entre la recherche militaire et l'esprit universitaire, Internet est au confluent de deux histoires déjà anciennes¹ : celle des télécommunications et celle de l'informatique qu'il a contribué à faire converger. Avec l'augmentation de puissance des ordinateurs, et des capacités des réseaux, des documents aussi différents que des textes, des sons, des photos ou des vidéos peuvent être numérisés, c'est-à-dire transformés en une suite de 0 et de 1, et envoyés à un coût quasiment nul à des ordinateurs situés à l'autre bout du monde.

Son architecture « ouverte », qui a en partie son origine dans les objectifs initiaux des recherches² explique son développement. Il s'agit en effet d'un réseau « distribué » – par opposition aux réseaux hiérarchiques – centralisés ou décentralisés – (fig. 1) où la redondance, la flexibilité, l'absence de centre de commandement unique et l'autonomie de chaque nœud, qui assuraient la capacité du système à résister à des destructions locales, définissent aujourd'hui un réseau susceptible de s'étendre en se répliquant, à l'image des processus biologiques. Cette réplication peut aussi bien permettre l'extension géographique (la création d'un réseau universel), que la constitution de réseaux et de clubs fermés (extranet ou intranet). Ces caractéristiques, jointes à l'invention de logiciels capables d'envoyer et de recevoir de l'information en provenance ou en direction de tout ordinateur permirent à l'Internet de s'étendre au monde entier.

Graphique 1. Différentes structures en réseaux



1. Sur l'histoire d'Internet, voir notamment Naughton [1999] et Leiner *et al.* [2003] et Castells ([2002], chap. 1).

2. Un réseau susceptible de résister à une destruction nucléaire pour la Rand et l'interconnexion des ordinateurs pour l'ARPA.

Au début des années 1980, les réseaux constitutifs de l'Internet furent progressivement transférés à des initiatives privées, qui assurèrent aux normes ouvertes et au système d'adressage d'Internet le succès universel qu'ils connaissent aujourd'hui. Ce processus d'émergence fut cependant loin d'être spontané et le secteur privé ne s'y intéressa vraiment que lorsque le développement de la numérisation et les usages de l'Internet commencèrent à gagner le grand public.

« On voit des ordinateurs partout... »

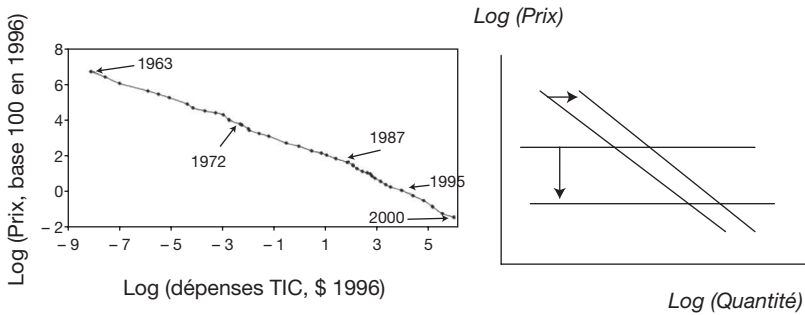
En l'espace de deux décennies, l'ordinateur a progressivement envahi presque tous les domaines de l'activité humaine. Au sein des entreprises, l'informatique a d'abord permis l'automatisation de la gestion des dossiers (paye, facturation,...) puis la gestion des stocks, la comptabilité, ou la gestion commerciale, avant de prendre en charge le pilotage de processus puis leur réorganisation (*reengineering*). Parallèlement, les réseaux Intranet ou Internet sont devenus l'ossature centrale du système informatique de l'entreprise, notamment dans la relation avec les clients ou avec les fournisseurs. Enfin, dans les secteurs des transports, de la logistique et des services financiers, le réseau a pris une place décisive.

Cette évolution a conduit à une augmentation importante de la part des TIC dans l'investissement des entreprises qui a doublé ou triplé selon les pays en un quart de siècle, passant de 6,8 % en 1980 à 14,4 % en 2000 en France et de 15 à 30 % aux États-Unis. Toutefois, cette évolution à prix courant masque l'extraordinaire croissance en volume de l'investissement dans ces technologies. Le phénomène marquant est en effet, la baisse considérable du prix des matériels informatiques depuis trente ans (et, si l'on en croit les évaluations de Gordon [2000], depuis pratiquement les origines de l'informatique). Au cours du dernier quart de siècle, selon les méthodes d'évaluation dites hédoniques sur lesquelles nous reviendrons, le prix relatif des ordinateurs aux États-Unis a baissé de 20 % par an.

Exprimés en volume, les taux de croissance des investissements en TIC ont été extrêmement élevés dans la plupart des pays industrialisés, atteignant souvent 20 à 30 % par an pour les matériels informatiques et entre 10 et 20 % pour les équipements de communication et les logiciels. La baisse rapide du prix des ordinateurs, conjuguée au développement d'Internet ont entraîné en quelques années une forte augmentation de l'équipement des ménages à la fois en ordinateurs et en connexion à l'Internet. Le graphique 2 (Gordon [2000]) représente l'évolution du prix et du volume des dépenses d'ordinateurs et de périphériques aux États-Unis dans l'ensemble de l'économie sur la période 1963-2000. La forme de la courbe suggère une assez grande stabilité à long terme de la courbe de demande face à un déplacement continu de la courbe d'offre résultant du progrès technique (partie droite de la fig. 2).

Si l'on considère que la courbe empirique représente principalement la demande, son élasticité, égale à l'inverse de la pente, est légèrement supérieure à l'unité (1,4 en moyenne sur l'ensemble de la période), ce qui traduit l'augmentation de la part des dépenses dans le PIB.

Graphique 2. Achat d'ordinateurs aux États-Unis : évolution des prix et des quantités
(Source : Gordon [2000])



« ... sauf dans les statistiques¹ »

Comme tous les produits qui changent rapidement, les TIC posent un problème majeur au statisticien, car la construction de séries statistiques suppose par construction un environnement stable. Quatre incertitudes concernent directement les analyses quantitatives qui suivent : le partage volume-prix, le partage entre consommations intermédiaires et investissement, enfin la mesure de la production des services TIC et plus généralement l'évaluation de la productivité des services qui sont de gros consommateurs de TIC.

La méthode traditionnelle d'élaboration des indices de prix (chaînage) consiste à n'utiliser le prix d'un nouveau modèle que lors de la seconde période de présence de ce modèle sur le marché. Or, elle est peu adaptée au cas des TIC car, d'une année sur l'autre, il n'y a pratiquement aucun micro-ordinateur identique. La méthode hédonique, largement utilisée aux États-Unis pour les biens TIC, et plus récemment en France pour les prix à la production des micro-ordinateurs et certaines catégories d'imprimantes, consiste à évaluer économétriquement le prix de certaines des caractéristiques des ordinateurs (vitesse d'horloge, taille mémoire, taille du disque dur...) et les appliquer au nouveau modèle. Les écarts sont parfois considérables (8 % par an en France sur la période récente²). Les disparités de méthodes sont également une source d'importants écarts entre comptabilités nationales. C'est ainsi que, dans les comptes nationaux, la baisse des prix des ordinateurs et équipements de bureau qui était de 22 % aux États-Unis de 1995 à 2001, n'était que de 15 % en France, 7 % au Royaume-Uni et en Allemagne et seulement de 1 % en Italie. Les États-Unis utilisent les méthodes hédoniques pour tous les biens du secteur, la France ne le fait que partiellement et le Royaume-Uni, l'Allemagne et l'Italie ne les utilisaient pas (l'Allemagne a commencé seulement depuis 2002).

Cette méthode hédonique, qui conduit à un effet qualité très important est elle-même critiquée. Le consommateur n'utilise en fait qu'une petite partie de

1. Voir sur ces questions statistiques, Lequiller [2000], Triplett [1999], Roussel *et al.* [2001], Ahmad *et al.* [2004].

2. On retrouve par exemple ce type d'écart en France entre les prix à la production des ordinateurs évalué par des méthodes hédoniques et le prix à la consommation évalué par la méthode du chaînage.

l'augmentation de puissance des ordinateurs et celle-ci est souvent utilisée pour satisfaire des logiciels toujours plus complexes mais pas forcément plus utiles. Comme le remarque Gordon ([2000], p. 63) les gains de productivité réels accomplis par exemple en matière de traitement de texte sont loin d'être aussi importants que le suggère l'augmentation des fonctionnalités des différentes versions d'un logiciel comme Word. Bref, le consommateur se verrait imposer une augmentation de puissance et des améliorations sans rapport avec leur utilité ? Pourtant si le marché des ordinateurs est concurrentiel, on devrait observer des concurrents proposant des modèles moins performants et moins chers. Si ce n'est pas le cas, c'est que les consommateurs se portent spontanément vers des ordinateurs plus performants et qu'ils attribuent aux performances une réelle utilité.

Une incertitude comparable affecte le partage entre investissement et consommations intermédiaires, notamment pour les logiciels. La Royaume-Uni n'incorpore dans le capital que 5 % des achats de logiciels, la Suède 40 % et l'Espagne 70 %. De ce fait, la part des investissements en logiciels dans le PIB est de 0,5 % au Royaume-Uni en 1999, contre 2,6 % en Suède selon les données nationales, alors que ces chiffres sont respectivement de 1,5 % et 2,2 % en données harmonisées (cf. Ahmad [2000] et Ahmad, Schreyer, Wolfi [2003]). Ces exemples montrent l'importance pour les études quantitatives comparatives des données harmonisées.

La comptabilité nationale ignore par ailleurs la production des services dont le prix est nul ou payé par la publicité. En France, la consommation de télévision est égale à la redevance augmentée des abonnements aux chaînes payantes et la publicité sur les chaînes de télévision sont des consommations intermédiaires qui n'entrent pas dans le PIB. De la même façon, les services gratuits sur le net financés par la publicité n'entrent ni dans le PIB ni dans la consommation des ménages. Si la contrepartie de ce développement est la diminution des services payants, il peut même en résulter une baisse du PIB.

Enfin, une bonne partie des technologies de l'information s'applique à des services dont on ne sait pas mesurer la productivité. Peut-on considérer, par exemple, que ces technologies n'améliorent pas les services de santé ? Leurs gains de productivité, évalués par les mesures traditionnelles, sont passés en France d'un rythme annuel de 4 % dans les années 1980 à 1 % dans les années 1990, alors même que ce secteur a développé des méthodes de plus en plus performantes (imagerie médicale, ...). Il en est de même pour les services financiers dont la productivité stagne dans les années 1990, alors même que les services directs par Internet ou par l'usage des distributeurs de billets se sont largement développés. Ces difficultés statistiques ne doivent pas être oubliées lorsqu'on examine l'évaluation quantitative de l'impact de ces technologies.

La comptabilité de la croissance « redécouverte »

Le paradoxe de Solow, puis l'accélération des gains de productivité du travail aux États-Unis à partir du milieu des années 1990 ont donné une nouvelle jeunesse aux méthodes de décomposition « comptable » de la croissance, initiées par Solow [1957], Denison [1962, 1967], Jorgenson et Griliches [1967] et appliquées dans de nombreux pays au milieu des années 1960 pour analyser les facteurs de la croissance des Trente Glorieuses (par exemple Carré, Dubois, Malinvaud [1965] en France).

Trente ans plus tard, Jorgenson et Stiroh [1995] et Oliner et Sichel [1994] reprenaient cette décomposition en isolant le capital TIC, c'est-à-dire l'ensemble constitué des matériels informatiques, des logiciels, et des équipements de communications pour évaluer l'impact des TIC sur la croissance potentielle et sur la productivité du travail. Au milieu des années 1990, il s'agissait de comprendre le paradoxe de Solow, c'est-à-dire d'expliquer pourquoi la croissance de la productivité du travail était aussi faible aux États-Unis dans les années 1980 et au début des années 1990, alors même que les investissements du secteur informatique augmentaient déjà très fortement. À la fin des années 1990 et dans les années 2000, l'ampleur des gains de productivité enregistrés aux États-Unis dans la seconde moitié des années 1990, donnait naissance au thème de la « nouvelle économie » et conduisait à une accumulation tout aussi impressionnante de ces évaluations comptables, souvent par les mêmes auteurs¹. Compte tenu de l'ampleur du rythme de croissance du capital TIC, et de la part croissante du capital TIC dans le capital total des firmes, rien d'étonnant à ce qu'apparaisse « enfin » un impact significatif des ordinateurs sur la productivité.

Cette méthode comptable utilise jusqu'au bout les propriétés log-linéaires extrêmement sympathiques de la fonction Cobb-Douglas, qui permettent de décomposer le taux de croissance du PIB (Q) en contribution de chacun des inputs (capital K et travail N) et en productivité globale des facteurs (ou résidu de Solow A), comme l'exprime l'équation (1). De façon équivalente, on peut décomposer la croissance de la productivité du travail, en effet de l'approfondissement du capital (substitution capital-travail), et croissance de la productivité globale des facteurs (1 bis) :

$$\dot{Q} = \alpha \dot{K} + (1 - \alpha) \dot{N} + \dot{A} \quad (1)$$

$$\dot{Q} - \dot{N} = \alpha(\dot{K} - \dot{N}) + \dot{A} \quad (1 \text{ bis})$$

où le point au-dessus des variables indique un taux de croissance.

Distinguer plusieurs facteurs de capital (K_i) et de travail (N_j), conduit à « endogénéiser » (au sens ancien) en partie le résidu de Solow, c'est-à-dire en fait à le réduire en expliquant une partie de ce résidu par des effets structurels (c'est l'approche traditionnelle de l'analyse des facteurs de la croissance popularisée par Denison dans les années 1960).

On peut enfin également décomposer l'output en plusieurs secteurs, ce qui permet de distinguer, dans la productivité globale des facteurs, ce qui relève de chacun des secteurs (secteurs TIC et autres secteurs notamment). On obtient alors la formulation générale utilisée dans l'analyse de la comptabilité de la croissance pour mesurer l'impact des TIC :

$$\dot{Q} = \sum_k \lambda_k \dot{Q}_k = \sum_i \alpha_i \dot{K}_i + \sum_j \beta_j \dot{N}_j + \sum_k \lambda_k \dot{A}_k \quad (2)$$

$$\text{avec } \sum_i \alpha_i + \sum_j \beta_j = 1 \quad \text{et} \quad \sum_k \lambda_k = 1$$

1. Presque tous les ans, les auteurs reprennent et actualisent leurs évaluations : Jorgenson et Stiroh [1999, 2000, 2002], Oliner et Sichel [1995, 2000, 2002], pour les États-Unis ; Cette, Mairesse et Kocoglu [2000, 2002, 2004] pour la France ; Coleccia et Schreyer [2001], pour les différents pays de l'OCDE.

où α_i et β_j sont les parts respectives des rémunérations des facteurs de production K et N et λ_k la part du secteur k dans l'output global.

Ce modèle est simple, additif et se prête particulièrement bien à une décomposition de la croissance. Et sous réserve de l'égalité des coûts des facteurs à leur productivité marginale, la contribution de chaque facteur peut être évaluée comptablement par sa part dans le coût total, c'est-à-dire dans la valeur ajoutée. Dans les années 1960, Jorgenson et Griliches [1967] critiquant les évaluations de Denison avaient tenté de prouver, sans succès, que le résidu de Solow pouvait presque disparaître si la contribution de chacun des facteurs était correctement évaluée.

Les propriétés de neutralité de la fonction Cobb-Douglas à l'égard des différentes formes de progrès technique la rendent en outre parfaitement compatible avec une croissance à taux d'épargne et à coefficient de capital constants, comme cela est postulé dans les modèles de croissance équilibrée et correspond aux faits stylisés observés en longue période. On peut alors, en utilisant la dualité fonction de production-fonction de coût, faire apparaître directement l'effet d'approfondissement du capital résultant de la baisse du prix relatif du capital due aux TIC¹. Si le coefficient de capital est constant en valeur, on a, en notant p le prix de l'output et p_k celui du capital : $Q + \overset{\circ}{p} = \overset{\circ}{K} + \overset{\circ}{p}_k$. La relation (1) peut alors s'écrire sous la forme suivante qui fait directement apparaître l'effet de la baisse du coût relatif du capital du aux TIC :

$$\overset{\circ}{Q} - \overset{\circ}{N} = \frac{\alpha}{1-\alpha} (\overset{\circ}{p} - \overset{\circ}{p}_k) + \frac{\overset{\circ}{A}}{1-\alpha}, \quad (1 \text{ ter})$$

Dans un régime de croissance équilibrée où le prix du capital est identique à celui de l'output, la productivité du travail et le capital par tête croissent tous les deux au taux $\overset{\circ}{A}/(1-\alpha)$. Sur la période 1996-2001, la baisse du prix relatif du capital total (résultant de la baisse du prix relatif de la composante TIC) dépasse 2 % par an aux États-Unis et est de l'ordre de 1 % en France (la baisse du prix des TIC est identique dans les deux pays, mais le poids du capital TIC est deux fois plus faible en France). Avec la valeur $\alpha = 1/3$ pour l'ensemble du capital, l'impact de l'accumulation du capital TIC serait alors de l'ordre de 1 point aux États-Unis et 0,5 point en France. Ce sont les ordres de grandeur que mettent en évidence les études de comptabilité de la croissance.

On peut intégrer à ce type d'analyse des considérations issues des modèles de croissance endogène, où l'accumulation du capital engendre des externalités. Par exemple dans le modèle de Romer, la productivité globale des facteurs, fonction du stock de connaissances globales dans l'économie, est liée à l'accumulation du capital des firmes individuelles par une relation du type $A(K) = K^\eta$. La relation (1) reste valable avec un coefficient du taux de croissance du capital qui est alors la somme de la part de la rémunération du facteur capital augmenté de cet effet de spillover ($\alpha + \eta$). Mais, contrairement aux autres paramètres, cet effet de spillover ne peut être évalué qu'en recourant à l'économétrie.

Enfin, pour boucler complètement l'analyse macro-économique et en déduire l'impact des TIC sur la croissance potentielle, il faudrait tenir compte de l'accélération (transitoire) de cette croissance potentielle résultant de la baisse

1. Cf. Cette G., Mairesse J. et Kocoglu Y. [2005b].

(également transitoire) du NAIRU, induite par le retard d'indexation des salaires sur la productivité.

Outre les problèmes de mesure du capital TIC, la principale difficulté de ce type d'analyse repose sur l'évaluation du coût d'usage du capital appliqué aux TIC. Dans la relation (2), le coefficient α_i du bien en capital i est en effet égal au produit du coût d'usage du capital par le coefficient de capital en valeur :

$$\alpha_i = (r + \delta_i - \overset{\circ}{p}_i) \frac{p_i K_i}{pQ} \quad (3)$$

où r est le taux d'intérêt nominal à long terme, δ_i le taux de dépréciation du bien capital (i), p_i son prix.

Cette formule usuelle a une interprétation simple : en concurrence parfaite, chaque input capital doit avoir un taux de rendement qui couvre le taux d'intérêt r commun à tous les biens de capitaux augmenté de sa dépréciation annuelle et diminué de l'augmentation anticipée de sa valeur. Dans le cas des technologies de l'information, ce qui les caractérise est, d'une part, leur rapide obsolescence qui se traduit par un taux de dépréciation très élevé (de l'ordre de 30 % pour les ordinateurs), d'autre part, la forte baisse des prix, qui ajoute une dépréciation nominale du même ordre de grandeur que l'obsolescence (de l'ordre de 20 %). De ce fait, alors que le coût d'usage du capital est, pour un bien d'équipement usuel de l'ordre de 10 % (6 % de rendement nominal¹ plus 6 % de dépréciation moins 2 % d'inflation), celui qui s'applique aux ordinateurs est en général supérieur à 50 % et de l'ordre de 20 % pour les équipements de communication. En moyenne, pour l'ensemble des biens TIC, il est de l'ordre de 40 %. Ce taux de rendement élevé explique que, bien que le coefficient de capital en équipement TIC soit faible (de l'ordre de 0,06 en France et 0,13 aux États-Unis pour un coefficient global de capital de 2), la contribution du capital TIC à la croissance soit relativement forte.

De nombreux auteurs ont appliqué cette « comptabilité de la croissance » aux évolutions observées au cours des dix dernières années et leurs résultats sont relativement convergents. Le tableau (1) résume les résultats les plus caractéristiques de ces études pour les États-Unis (Oliner et Sichel [2000, 2002]) et pour la France (Cette, Mairesse, Kocoglu [2002, 2004]). Les différents travaux d'Oliner Sichel ont le mérite, non seulement de refléter assez fidèlement les évaluations faites sur données américaines (Jorgenson et Stiroh trouvent des résultats voisins), mais surtout de détailler² les différents calculs.

L'impact de l'accumulation de capital TIC (ligne 2) qui était de l'ordre de 0,4 % par an aux États-Unis jusqu'au milieu des années 1995, passe à 1 % dans la période récente. Sur la même période en France, il passe de 0,15 % à 0,4 % par an. Cette accélération traduit en partie l'accélération du rythme d'accumulation du capital TIC, mais plus encore les conséquences progressives d'une accumulation rapide depuis plusieurs décennies. La différence entre l'importance de cet effet aux États-Unis et en France ne réside pas dans le rythme de croissance du capital TIC en volume, qui est identique dans les deux pays sur la période

1. Oliner-Sichel retiennent 5 %, Cette, Mairesse, Kocoglu 10 %.

2. L'ensemble des paramètres des évaluations est présenté dans le tableau 3 de leur article de 2002. C'est en utilisant ces paramètres qu'a été réalisé le tableau 1.

Tableau 1. *Analyse comptable : comparaison France et États-Unis*

	États-Unis			France		
	Oliner et Sichel [2002]			Cette, Mairesse, Kocoglu [2002, 2004]		
	1974-1990	1990-1995	1995-2001	1980-1990	1990-1995	1995-2002
(1) Productivité par tête	1.4 %	1.5 %	2.4 %	2.7 %	1.5 %	0.9 %
(2a) Croissance Cap TIC	15 %	11 %	16 %	8,7 %	6,3 %	15,2 %
(2b) Part Capital TIC	0.033	0.046	0.063	0,018	0,024	0,026
(2) Effet Capital TIC	0.4 %	0.5 %	1.0 %	0.15 %	0.15 %	0.4 %
(3) Effet Capital hors TIC	0.4 %	0.1 %	0.2 %	1.2 %	1.5 %	0.2 %
(4a) Qualité du travail	0.2 %	0.45 %	0.2 %	–	–	–
(4b) Durée du travail	–	–	–	–0.4 %	–0.2 %	–0.6 %
(5) PGF effet sect TIC	0.3 %	0.4 %	0.8 %	0.4 %	0.1 %	0.6 %
(6) PGF effet sect hors TIC	0.1 %	0.2 %	0.2 %	1.3 %	–0.1 %	0.4 %
(7) Effet TIC total (2+5)	0.7 %	0.9 %	1.8 %	0.6 %	0.3 %	1.0 %

La décomposition est : 1 = 2 + 3 + 4 + 5 + 6 ; 7 = 2 + 5 ;

L'effet de l'approfondissement du capital TIC (2) est le produit de la croissance du capital TIC par tête (2a) par la part du capital TIC dans le coût total (2b).

récente (15 % en moyenne de 1995 à 2002, ligne 2 a), mais dans le niveau du stock de capital résultant du rythme d'accumulation antérieur. Le rapport du stock de capital TIC au PIB est en effet de 6 % en France et de 13 % aux États-Unis. Avec un coût d'usage du capital de l'ordre de 40 % en moyenne dans les deux pays, la relation 3 donne une élasticité de l'output au capital TIC de 0,024 en France et 0,6 aux États-Unis (ligne 2b).

La comparaison des lignes 2 et 3 du tableau montre que, dans les deux pays, l'effet de substitution résultant du capital TIC est très supérieur, dans la période récente, à celui qui résulte du reste du capital, alors même que le stock global de capital est près de vingt fois supérieur au stock de capital TIC. Cela est particulièrement vrai en France où la substitution capital travail¹ s'est très fortement ralentie sur la dernière période, en raison de l'impact des politiques d'enrichissement de la croissance en emploi (baisse des cotisations patronales sur les bas salaires et 35 heures).

Les résultats présentés dans le tableau 1 se retrouvent pratiquement dans tous les pays industrialisés, avec des différences qui tiennent pour l'essentiel à l'importance du stock de capital TIC accumulé. C'est ainsi qu'Alessandra Coleccia et Paul Schreyer [2001], qui évaluent pour neuf pays de l'OCDE l'impact des TIC, en se limitant à l'aspect approfondissement du capital, obtiennent sur la période 1996-2000 une contribution du capital TIC de l'ordre de 0,35 point en France, Allemagne et Italie, 0,5 point au Royaume-Uni, autour de 0,6 point en Australie, en Finlande et au Canada, et 0,9 point aux États-Unis. Estavao [2004] obtient des résultats comparables en distinguant en outre le secteur producteur de TIC et les autres secteurs.

1. Pour une étude de la sensibilité de ces analyses à l'élasticité de substitution capital-travail et capital TIC et hors TIC on pourra se reporter à Audenis, Deroyon, Fourcade [2005].

Le retard dans la diffusion du capital TIC en France et en Europe pourrait résulter d'une élasticité-prix de la demande de capital TIC plus faible en Europe qu'aux États-Unis. Cette hypothèse n'est pas confirmée par l'estimation économétrique directe de demandes de facteurs de production incluant les TIC pour les États-Unis et différents pays européens. Cette, Lopez et Noual [2005] trouvent, par exemple pour l'investissement en TIC, des élasticités proches de celle qui apparaît implicitement pour les achats d'ordinateurs dans le graphique 2 (de l'ordre de 1,3 pour les ordinateurs et voisines de 2 pour les logiciels), sans que les différences entre pays soient significatives, notamment entre les pays européens et les États-Unis.

Y a-t-il un impact sur la productivité globale des secteurs utilisateurs ?

Que l'accumulation du capital TIC conduise dans cette décomposition comptable à un effet significatif sur la croissance de la productivité du travail se comprend aisément, dès lors que le rythme très rapide de croissance du capital TIC se conjugue à un stock accumulé qui commence à ne plus être négligeable au regard des autres composantes du capital. Mais cette accumulation a-t-elle un impact sur la productivité globale des facteurs des secteurs utilisant des technologies ? Or la principale conclusion qui émerge de l'ensemble de ces analyses est que, si l'accélération de la productivité globale des facteurs (PGF) est nette dans le secteur des TIC (elle contribue par exemple dans le tableau 1 – ligne 5 – pour 0,8 point aux États-Unis et 0,6 point en France à la PGF globale de la période récente), elle n'est, en revanche, guère perceptible dans le reste de l'économie comme le montre la ligne 6 du tableau 1.

Dans ses articles critiques sur l'impact de la révolution numérique, Robert Gordon [2000, 2002] note que, si l'on corrige ces évaluations de l'impact du cycle sur la productivité globale, il ne reste rien de l'accélération de la PGF dans les secteurs utilisateurs des TIC¹. Ce résultat empirique n'est guère étonnant quand on note que plus des trois quarts des ordinateurs sont utilisés dans le secteur des services, des banques et des assurances où, comme nous l'avons noté précédemment, la comptabilité nationale décrit un ralentissement des gains de productivité pourtant peu crédible statistiquement.

Une vision optimiste des effets de la révolution numérique notera l'importante contribution des TIC aux gains de productivité du travail sur la période récente (1,8 point aux États-Unis et 1 point en France – ligne 6 du tableau 1) en ajoutant l'effet d'accumulation du capital (ligne 2) et la PGF du secteur produisant les TIC (ligne 5). Une vision pessimiste reformulera le paradoxe de Solow de la façon suivante : « il y a bien une effet important des TIC sur la productivité du travail notamment en raison des gains de productivité globale enregistrés dans le secteur producteur des TIC, mais sa diffusion au reste de l'économie se limite aux effets de substitution habituels sans gains de PGF. » Nous allons voir que l'économétrie sur données de panel permet de dépasser ce constat.

1. Dans l'évaluation initiale Gordon [2000], il obtenait une même réduction de – 0,3 point.

Économétrie sur données de panel

Les premières études économétriques sur l'impact des ordinateurs sur la productivité n'étaient guère concluantes. Par exemple, Roach [1987] trouvait que, alors que l'investissement en ordinateurs avait augmenté de 1977 à 1987 de façon considérable dans le système bancaire, la productivité par tête n'avait pas connu d'accélération marquée. De même Berndt et Morrison [1995] analysant les données sectorielles obtenaient une productivité marginale inférieure à leur coût et plutôt une augmentation de la demande de travail associée.

En sens contraire, les données d'entreprise mettent souvent en évidence des effets supérieurs à leur rémunération. Utilisant des estimations en niveau pour 300 grandes entreprises américaines sur la période 1988-1992, Brynjolfsson et Hitt [1996], Lichtenberg [1995], Dewan et Min [1997] obtiennent des rendements de l'ordre de 0,60 \$ par \$ investis, supérieurs au coût d'usage du capital, estimé à 0,4 en moyenne pour les TIC. Les études portant sur des firmes utilisant les TIC font également apparaître des gains de productivité plus importants que la moyenne, mais la question qui se pose est celle de la causalité. Doms, Dunne et Troske [1997] trouvent par exemple que les entreprises qui utilisent des TIC sont celles qui ont la plus forte productivité et les salaires les plus élevés, mais que cela était également vrai avant que ces technologies soient introduites. En d'autres termes, les firmes performantes investissent à la fois dans les changements organisationnels et dans les nouvelles technologies.

Les analyses économétriques ont porté également sur des bases de données internationales : Gust et Marquez [2002] sur treize pays de l'OCDE, Belorgey *et al.* [2004] sur quarante-neuf pays utilisateurs. L'impact de la part des TIC sur la croissance de la productivité est significatif : une hausse d'un point de PIB des dépenses en TIC (en moyenne 5,9 % du PIB) conduirait à une accélération de 0,45 point de croissance de la productivité du travail (1 point dans l'étude de Gust et Marquez), mais la différence entre les deux études semble assez largement s'expliquer par les méthodes d'estimation. À titre de comparaison, dans les évaluations comptables présentées dans le tableau 1, si l'on augmente d'un point la part des TIC dans l'économie, l'impact de l'effet de substitution augmente de 0,1 % ou 0,2 % et celui de la PGF du secteur TIC de 0,1 %, soit 0,3 % au total.

Une étude particulièrement intéressante des résultats économétriques portant sur l'élasticité de l'output aux TIC a été développée par Stiroh [2002], utilisant à la fois une « meta-analyse » portant sur vingt études économétriques américaines¹, et une étude détaillée de l'impact des différents spécifications et méthodes d'estimation, à partir d'une base de donnée sectorielle portant sur la période 1987-2000. La forte dispersion des résultats obtenus pour l'élasticité dans les vingt études économétriques analysées, autour d'une médiane un peu supérieure à la part de l'input TIC, s'explique assez largement par des différences de spécification (niveau ou différence première) et de méthodes d'estimation. L'étude économétrique qui complète l'article fait également apparaître une élasticité nettement supérieure à la part de l'input TIC dans la valeur ajoutée.

Le fait que les rendements des TIC soient plus élevés que leur part dans les inputs, peut s'expliquer par l'importance des changements organisationnels qui y

1. Les études en questions concernent aussi bien des données d'entreprises que des données sectorielles.

sont associés. En divisant les gains d'output seulement par la part des TIC, on omet le coût des changements organisationnels et on sur-évalue l'impact des TIC seuls. Une autre évidence de la complémentarité entre changements organisationnels et TIC peut être trouvée dans le fait que les effets des technologies de l'information sont significativement plus élevés quand on les appréhende sur une période plus longue. Analysant l'impact des TIC sur le taux de croissance de l'output, en utilisant un fichier de 600 firmes sur la période 1987-1994, Brynjolfsson et Hitt [2003] trouvent que sur un horizon court (un an) la contribution des TIC à la croissance est égale à peu près à leur coût, tel que mesuré par l'approche comptable. Lorsque l'horizon temporel s'élargit, la contribution augmente très fortement, impliquant une nette contribution à la productivité globale des facteurs. À long terme, l'analyse appréhende non seulement l'effet direct de l'input TIC, mais aussi l'effet des ajustements des facteurs organisationnels complémentaires.

On peut également utiliser l'approche initiée par Tobin (Tobin's q) pour évaluer directement la valeur du capital TIC. Utilisée autrefois en combinaison avec l'hypothèse de coûts d'ajustements pour estimer de façon implicite des demandes de facteurs de production¹, elle a été plus récemment appliquée par Hall [2001] pour évaluer la valeur des composantes intangibles du capital (R et D, Capital organisationnel...). L'hypothèse de Hall est que l'écart entre la valeur de marché de l'entreprise et la valeur de remplacement du capital traduit notamment la valeur du capital intangible. En l'appliquant aux technologies de l'information, Brynjolfsson, Hitt et Yang [2002], trouvent ainsi que la valeur de marché du capital TIC est près de dix fois supérieure au coût du capital TIC, alors qu'elle reste proche de l'unité pour les autres composantes du capital. Leur analyse appliquée aux grandes firmes (et non aux start-ups) sur une période longue, en grande partie antérieure à la « bulle internet », ne semble pas affectée par celle-ci. Ces résultats suggèrent que les entreprises qui investissent dans ces technologies supportent des coûts d'ajustements organisationnels importants avant que la technologie soit effective. Ces coûts traduisent le fossé qui sépare la « valeur d'un ordinateur totalement intégré dans le processus de production de la firme et le coût brut de l'ordinateur... Il faut en quelque sorte accumuler 9 \$ de capital intangible (organisationnel) pour 1 \$ investi en bien informatique² ».

Bref, l'économétrie semble mettre en évidence à la fois l'impact des TIC sur la productivité globale des facteurs qui échappait à l'approche comptable et la complémentarité avec les changements organisationnels. Nous allons revenir plus en détail sur cette complémentarité car c'est cet ensemble de transformations qui dessine les éléments d'une troisième révolution industrielle.

RÉVOLUTION NUMÉRIQUE ET CHANGEMENTS ORGANISATIONNELS : UNE PERSPECTIVE HISTORIQUE

Les deux premières révolutions industrielles introduisaient un changement radical dans la maîtrise de l'énergie. La substitution de la puissance des machines à la force de l'homme, puis la diffusion spatiale de l'énergie – avec l'électricité

1. On trouvera une présentation des différentes approches dans Artus Muet ([1990], chap. 1).
2. Brynjolfsson, Hitt et Yang [2002].

– ont permis l'apparition des firmes géantes, la mise en œuvre du travail à la chaîne et l'organisation d'unités de production permettant de bénéficier pleinement des économies d'échelle et de la standardisation. Que les ordinateurs et les TIC jouent un rôle aussi décisif dans les bouleversements de l'économie se comprend aisément lorsqu'on pense le marché et les systèmes d'organisation comme un processus de transmission et d'échange d'information (Hayek [1945] ; Galbraith [1977] ; Simon [1976]). Un abaissement considérable du coût de l'information peut rendre efficaces des systèmes d'organisations qui étaient incompatibles avec les coûts de communication antérieurs.

L'informatisation et l'Internet ont en effet rendu possible un changement dans l'organisation de l'entreprise, dont les principes sont bien antérieurs à la révolution numérique : le « juste à temps », le « sur-mesure », la réduction des échelons hiérarchiques (qui permet de déléguer plus de responsabilités à des niveaux autrefois encadrés), facteurs souvent désignés sous le vocable de « toyotisme », sont en effet apparus dès les années 1960. Mais la diffusion de l'informatique et de l'Internet ont permis de généraliser ces pratiques, en conduisant les entreprises à travailler en réseau et à externaliser massivement une partie de leurs activités auprès de sous-traitants.

Dans presque tous les domaines, les modes d'organisation des entreprises de la « nouvelle économie » sont à l'opposé du « fordisme ». À l'organisation hiérarchique s'oppose le travail en équipe autonome ; à la concentration dans de grandes unités, l'entreprise en réseau ; à la production de masse standardisée (Ford disait le consommateur peut choisir la couleur de sa voiture à condition qu'elle soit noire), la flexibilité et le « sur mesure » ; aux dynasties industrielles, qui mettaient du temps à se construire et à se défaire (les constructeurs d'automobiles actuels sont tous nés au début du XX^e siècle), un pouvoir économique devenu extrêmement mobile. À l'économie d'endettement qui a dominé l'après-guerre, le financement de start-ups innovantes par le marché financier.

La question qui se pose est de savoir s'il s'agit d'une simple coïncidence, dans une période marquée par la mondialisation, ou si la révolution numérique joue un rôle majeur dans le déclenchement de ces évolutions.

Innovations génériques et complémentaires

Les expressions « technologie générique » ou « technologie à caractère général » (Bresnahan et Trajtenberg [1995]) ont été utilisées pour caractériser des innovations qui ouvrent un vaste espace pour d'autres innovations dans des domaines parfois très éloignés de l'innovation initiale. La complémentarité entre innovations, et le fait que celles-ci se développent par grappe (clusters) a été fréquemment soulignée par les historiens des technologies (Gille [1978] ; Mokyr [1995] ; David [1990]). Dans une perspective schumpétérienne, Freeman [1990] distingue les innovations « radicales » des innovations « incrémentales » ou progressives. Les innovations radicales introduisent des discontinuités, les innovations incrémentales résultent des améliorations ou des innovations produites par l'usage des innovations radicales (*learning by doing* ou *learning by using*). Évoquant le parallèle entre l'ordinateur et la première révolution industrielle (dans laquelle il inclut l'électricité), Herbert Simon [1987] souligne également le rôle des innovations dérivées ou complémentaires engendrées par les innova-

tions fondamentales, parmi lesquelles il ajoute « l'éducation par immersion » qui s'applique à l'ordinateur comme elle s'est appliquée à l'automobile.

Ces innovations incrémentales jouent un rôle décisif dans l'apparition des gains de productivité résultant des innovations radicales. Dans la phase initiale d'émergence d'une innovation radicale, l'échelle de production est trop petite pour que ces gains soient significatifs à l'échelle globale : ils restent concentrés dans le secteur producteur des nouvelles technologies. C'est au contraire dans la phase incrémentale, quand les innovations complémentaires – organisationnelles ou sociales – se développent, qu'apparaissent les gains de productivité.

Ces idées ont été formalisées par Young [1993], Bresnahan et Trajtenberg [1992], Milgrom et Roberts [1990a et b]. La complémentarité des biens est traduite par le fait que la demande adressée à chacun (ou l'efficacité dans le cas d'input) est accrue par la présence des autres. L'apparition d'un nouveau bien va améliorer l'efficacité des biens complémentaires produits antérieurement et diminuer celle des biens non complémentaires, décrivant ainsi le cycle de vie des produits (Young). Bresnahan et Trajtenberg appliquent cette notion de complémentarité à une technologie générique qui se caractérise par une évolution rapide, une multiplicité de secteurs d'application et un potentiel d'innovations complémentaires dans chacun de ces secteurs. Comme le notent Guellec et Ralle [1995]¹, il y a deux cercles vertueux : « un premier qui lie le secteur générique et le secteur d'application (fournisseur et client), un second qui lie les secteurs d'application entre eux » car une forte croissance de l'un va encourager le développement du secteur générique et bénéficier à tous les autres. Le modèle possède en outre, pour certaines valeurs des paramètres, des équilibres multiples. L'innovation de l'un favorise celle des autres de sorte que les anticipations sont autoréalisatrices : les croyances des inventeurs devenant le déterminant de la croissance (voir également Milgrom et Roberts [1990a]).

Réduction de la hiérarchie et développement en réseau

De nombreuses caractéristiques du système d'organisation de l'ère industrielle reflétaient le coût élevé de l'information. L'organisation hiérarchique de l'entreprise avait notamment pour objectif de réduire les coûts de communication parce qu'elle minimise le nombre de communications entre des acteurs multiples comparativement à de structures plus décentralisées (Malone [1987] ; Radner [1993]). Mais l'abaissement considérable du coût de l'information a bouleversé cette situation : la circulation horizontale et rapide de l'information est plus adaptée à un environnement devenu volatil avec la mondialisation que l'organisation hiérarchique qui demande de longs délais de transmission de l'information. Il en est de même de l'adaptation du processus de production à des biens différenciés. La production de biens standardisés était efficace pour bénéficier des économies d'échelle quand la mise au point du processus de production demandait de long délais de réalisation. Elle n'a plus lieu d'être lorsque l'automatisation de la chaîne permet de reprogrammer sans délai la chaîne de fabrication.

Dans les années 1980 et 1990, de nombreuses études de cas ont documenté l'importance des changements organisationnels liés notamment au développe-

1. Voir Complémentarité et dynamique technologique, p. 79 à 82.

ment de l'automatisation et de l'informatique (de Roos [1990] ; Milgrom et Roberts [1990b]) ; de Roos notait par exemple, en 1990, que dans le secteur automobile la conception dominante qui prévalait dix ans plus tôt était qu'il ne subsisterait que quelques modèles d'automobile standardisés avec un long cycle de production (l'aboutissement en quelque sorte du modèle « fordiste »). Sous l'effet de l'informatisation des processus, c'est le contraire qui s'est produit : on a vu apparaître des modèles différenciés avec des cycles de production plus courts. Ce modèle organisationnel était déjà en œuvre au Japon et l'économie américaine l'importa à travers une joint-venture célèbre entre Général Motors et Toyota, le projet NUMMI (New United Motor Manufacturing) qui transforma un établissement traditionnel au bord de la faillite en *success story* (cf. de Roos [1990]).

S'appuyant sur ces études de cas, Milgrom et Roberts [1990] ont construit un modèle dans lequel la transition des firmes du modèle fordiste de production de masse vers une organisation flexible utilisant les systèmes d'information est induite par la baisse continue du coût de l'information. Aghion et Tirole [1997] montrent également qu'une baisse du coût de l'information peut entraîner une délégitimation de l'autorité aux niveaux hiérarchiques plus bas¹.

Le même changement a affecté les relations des grandes entreprises avec leurs fournisseurs. L'entreprise « fordiste » était intégrée verticalement et passait des contrats de moyen terme avec les fournisseurs externes. L'entreprise flexible est recentrée sur sa fonction principale et entretient des relations de long terme avec ses fournisseurs qui sont reliés à elle par des réseaux informatiques. Général Motors, autrefois exemple de firme fortement intégrée verticalement, a également bouleversé son organisation. Comme le résumait un observateur (Schnapp [1998] ; cité par Brynjolfsson et Hitt [2000]) : « La stratégie de tout faire à domicile qui était autrefois la grande force de General Motors était devenu sa plus grande faiblesse. »

Les grands systèmes de transactions en ligne empruntant des réseaux numériques sont apparus dès les années 1970, notamment dans la finance, le transport aérien et les marchés énergétiques. Les années 1980 virent ensuite se multiplier différents types de systèmes d'intégration informationnelle interentreprises, notamment dans le commerce, la logistique, et les industries d'assemblage telles que l'automobile ou l'aéronautique. Le développement d'Internet a contribué à généraliser ces pratiques et à développer l'intégration des fournisseurs sur des plates formes collaboratives. L'étape ultérieure est celle de l'entreprise en réseau, c'est-à-dire, dans son stade le plus développé, « l'organisation autour de projets réalisés en coopération par des segments de firmes différentes² », une organisation particulièrement souple car elle peut être configurée pour la durée de chaque projet.

L'entreprise en réseau est particulièrement présente dans le secteur de l'information : des sociétés telles que Nokia, IBM, Sun Microsystems, Hewlett Packard ou Cisco se sont restructurées autour de l'Internet. C'est ainsi que Cisco, le plus grand fabricant d'épines dorsales (*backbones*) pour l'Internet, est organisé autour d'un site accessible à ses clients et ses fournisseurs et externalise plus de

1. Ces modèles exploitent la propriété de complémentarité précédemment évoquée.

2. Cf. M. Castells [2002], p. 86.

90 % de sa production vers un réseau de fournisseurs, qu'elle intègre à ses systèmes de production en automatisant les transferts de données. En plus de ses propres investissements dans la recherche, l'entreprise a mené une politique active d'acquisition de start-up innovantes, que la souplesse du réseau permet d'intégrer à sa stratégie globale sans bouleverser leur activité. Enfin, elle s'appuie sur les réseaux de ses clients pour améliorer et corriger ses produits. Le modèle de l'entreprise en réseau se retrouve aussi chez Valéo, l'un des plus grands fabricants de pièces détachées pour l'automobile, qui satisfait en ligne plus de 50 % de ses commandes et il pénètre l'industrie automobile en France et en Allemagne.

Changement dans l'organisation du travail

À l'ère de l'information, le travail est l'objet de deux transformations majeures : d'une part, le retour vers une plus grande autonomie, après la bureaucratiation de l'ère industrielle ; d'autre part, la réintégration dans la pratique professionnelle d'un savoir et d'une culture acquis dans la sphère de vie quotidienne. Alors qu'à l'ère industrielle, les travailleurs des industries taylorisées ne devenaient opérationnels qu'en étant « dépouillés des savoirs, des habiletés et des habitudes développés par la culture du quotidien¹ », les travailleurs de l'ère informationnelle mobilisent un bagage culturel au moins partiellement acquis en dehors de leurs activités de travail. Philippe Askenazy [2000] montre que le développement de l'autonomie, la polyvalence des salariés et la délégation des responsabilités aux niveaux inférieurs de la hiérarchie sont les principaux éléments de l'évolution récente de l'organisation du travail. En 1992, 54 % des entreprises du secteur privé aux États-Unis avaient introduit des équipes autonomes, c'est-à-dire des équipes d'ouvriers, d'employés, de commerciaux ou de cadres, libres de s'organiser autour d'un ensemble cohérent de tâches. En France, le pourcentage correspondant s'est élevé de 11 % en 1992 à 35 % en 1998.

Une étude de la DARES [2003-a] confirme cette analyse, en montrant que le développement des technologies de l'information et de la communication a pour conséquence d'étendre le mode d'organisation du travail des cadres vers les autres groupes socio-professionnels. Cela conduit à « une homogénéisation du rapport au travail, qui passe par plus d'autonomie, plus de communication, plus de réunions, plus de tâches indirectes ». Ce phénomène s'accompagne toutefois d'un clivage fort au sein de l'entreprise, entre utilisateurs et non-utilisateurs des TIC.

Des conclusions comparables émergent des travaux sur données d'entreprises françaises, utilisant notamment l'enquête sur les changements organisationnels – dite enquête COI – de 1998. Greenan et Mairesse [2003] construisent des indicateurs synthétiques du degré d'informatisation et d'organisations du travail innovantes, pour tester la complémentarité entre l'adoption des TIC et les changements organisationnels. Ces deux pratiques ont l'une et l'autre un impact positif sur la productivité et l'effet de leur adoption couplée est supérieur à la somme des deux effets séparés. Crépon, Heckel Riedinger [2005] montrent également que l'adoption d'Internet a un effet positif sur la productivité en augmentant la productivité des salariés qualifiés et très qualifiés. Elle est fortement corrélée à l'adoption de pratiques organisationnelles innovantes, mais

1. Cf. A. Gorz [2003], p. 17.

contrairement à l'étude précédente, ils ne mettent pas en évidence d'effet net du couplage « pratique innovantes-adoption d'Internet ».

Analysant les conséquences des TIC sur la flexibilité du travail, Martin Carnoy [2000] souligne le développement du travail indépendant, du temps partiel, de la sous-traitance et des activités de conseil. C'est évidemment dans la micro-entreprise du secteur des TIC, composée de quelques personnes travaillant comme consultants ou sous-traitants, que cette évolution est la plus spectaculaire. Comme le souligne l'étude de l'emploi dans le secteur des TIC en France réalisée par la DARES [2003-b], les emplois salariés sont dans ce secteur globalement de meilleure qualité que dans le reste de l'économie : la proportion de CDI y est forte dès l'embauche et les rémunérations y sont importantes, quoique sensibles aux conditions du marché et largement individualisées. La mobilité externe y est élevée et résulte très largement de l'initiative du salarié.

Marchés financiers et innovation

Le développement de la nouvelle économie entraîne également une mutation importante du fonctionnement des marchés financiers. La déréglementation des marchés, amorcée aux États-Unis dans les années 1980, a ouvert à la concurrence des secteurs initialement occupés par des quasi-monopoles (comme IBM dans l'informatique, ou encore AT&T dans les télécommunications), facilitant l'apparition de nouvelles firmes telles que Microsoft, Intel ou Cisco. À cette déréglementation, s'est ajoutée une profonde modification des modes de financement des entreprises qui a conduit, en l'espace de quelques années, d'une économie d'intermédiation financière dominée par le crédit à une économie de marchés financiers.

Avec l'essor du capital risque, les marchés financiers, qui n'avaient joué qu'un rôle modeste dans le développement économique du dernier demi-siècle, ont retrouvé un rôle majeur dans le financement de l'investissement et de l'innovation. Le développement du capital risque résulte d'une constatation simple : les entreprises innovantes en début de vie n'ont pas accès aux marchés financiers et ne peuvent pas obtenir de crédit bancaire. Elles ont en effet une forte probabilité d'échouer, mais si elles réussissent, elles sont très profitables : il faut donc que le prêteur soit intéressé au résultat en cas de succès, ce que ne permet pas le crédit bancaire (Artus [2000]). Parallèlement, la rémunération par *stock option* est devenue une composante importante de la rémunération du travail dans les *start-up*, et plus généralement dans les entreprises du secteur informationnel, non seulement parce qu'elle contribue à une fidélisation du personnel, mais aussi parce qu'elle permet d'alléger les coûts du travail du montant du revenu différé.

Dans l'« ancienne économie », la R&D restait l'apanage des grands groupes intégrés verticalement, qui pouvaient adopter des stratégies très contrastées :

- soit faire piloter leurs centres de recherche par les unités d'affaire, supposées « connaître le marché », avec un risque élevé de stériliser l'innovation, car comment les unités d'affaire pourraient-elles piloter une recherche qui vise justement à détruire leur modèle actuel ?

- soit isoler les équipes de recherche (par exemple, Xerox parc ou ibm à l'époque du PC) et leur laisser une entière liberté, avec le risque symétrique que très peu d'innovations soient effectivement reprises au sein de l'entreprise elle-même.

D'où le dilemme classique de l'organisation de l'innovation : d'un côté, une recherche fondamentale en partie sacrifiée au profit d'une recherche appliquée trop asservie à des finalités commerciales à court terme ; de l'autre, une recherche fondamentale préservée, mais insuffisamment couplée à la recherche appliquée et au développement. Dans la nouvelle économie de l'information, le dilemme est résolu par une structure hybride, dans laquelle la recherche et les premiers stades du développement sont réalisés par un vivier de *start-up* indépendantes, qui meurent en cas d'échec et sont rachetées (ou croissent) en cas de succès.

La diffusion de l'ordinateur et de l'électricité : la comptabilité de la croissance appliquée à l'histoire

La conviction que la révolution numérique ouvre une nouvelle révolution industrielle a conduit de nombreux économistes à se pencher de façon comparative sur les précédentes (notamment David [1990a et b] ; Simon [1986], Crafts [2002]). L'analyse que fait David de la diffusion du moteur électrique (la dynamo) est particulièrement instructive, car le parallèle avec l'ordinateur est parfois saisissant. Comme pour l'ordinateur un siècle plus tard, la puissance du moteur électrique s'est développée tout au long de la seconde moitié du XIX^e siècle. En 1900, ses potentialités étaient au centre de l'exposition universelle de Paris, et les ingénieurs prédisaient déjà une nouvelle ère industrielle fondée sur l'électricité. Pourtant la place du moteur électrique était encore modeste dans les forces motrices. La machine à vapeur était à son apogée (81 %), l'énergie hydraulique qui représentait la moitié de la puissance utilisée en 1870 était tombée à 13 % et la part de l'électricité n'était que de 5 %. En 1930, l'électricité, qui a connu tout au long du XX^e siècle une baisse forte des prix et une forte croissance en volume, représentait 78 % de l'énergie motrice dans l'industrie, la vapeur était devenue marginale et l'usage direct de l'hydraulique avait quasiment disparu.

Dans toute la phase de diffusion du moteur électrique, en dépit d'une croissance de 15 % par an en volume, la part de l'électricité dans le capital productif était encore trop faible pour que l'application de la comptabilité de la croissance conduise à des effets importants (Craft [2002]). Cette caractéristique était encore plus nette pour la diffusion du moteur à vapeur dans la première révolution industrielle, comme le montre le tableau 2. L'impact de la machine à vapeur sur la productivité du travail n'est devenu significatif qu'avec le développement du chemin de fer à partir de 1830. Et, si la contribution de l'électricité à la croissance de la productivité du travail atteint 1 % dans les années 1920, c'est parce que Craft, suivant l'analyse de David et Wright [1999], attribue la plus grande partie de l'accélération de la productivité globale des facteurs observée au cours de la période à cette diffusion. La contribution de l'accumulation du capital n'est que de 0,3 %, celle de la diffusion de 0,7 %.

La conclusion qui émerge de ces travaux est que, tant par son impact sur l'organisation de la production que par ses effets sur la productivité globale des facteurs, la révolution numérique apparaît bien comme une troisième révolution industrielle. Si Oulton [2002] souligne à juste titre que l'élasticité de la demande de biens TIC (dont nous avons vu qu'elle était supérieure à l'unité) devrait à long terme décliner, avec l'épuisement du processus de diffusion de l'ordinateur, il semble bien, en revanche, que la plupart des changements organisationnels induits soient encore à venir.

Tableau 2. Retour sur les deux précédentes révolutions industrielles

	Machine à vapeur		Électricité	
	Grande-Bretagne		États-Unis	
	1760-1830	1830-1860	1899-1929	1919-1929
(1) Productivité par tête	1,2 %	1,1 %	2,0 %	2,1 %
<i>Moteurs</i>				
(2b) Croissance capital	5 %	6,3 %	15,2 %	8,0 %
(2b) Part capital	0,15 %	0,7 %	0,6 %	0,6 %
(2) Contribution capital	0,01 %	0,04 %	0,09 %	0,15 %
<i>Autres usages</i>		<i>Chemin de fer</i>	<i>Électricité...</i>	<i>Électricité...</i>
(3a) Croissance capital	–	17,5 %	8,8 %	7,4 %
(3b) Part capital	–	0,9 %	2,4 %	2,4 %
(3) Contribution capital	–	0,16 %	0,21 %	0,18 %
(4) Contrib. PGF secteur	0,0 %	0,06 %	0,06 %	0,02 %
(5) Effets induit PGF	–	–	0,2 %	0,7 %
(6) Impact total	0,01 %	0,26 %	0,56 %	1,0 %

Les parts du capital électricité sont celles de 1925.

Source : Craft [2002].

PARADOXES ET ORIGINALITÉS DE LA GALAXIE INTERNET

Parce qu'elle transforme l'un des caractères les plus fondamentaux de l'humanité – la communication –, la révolution numérique surgit dans presque tous les domaines de l'activité humaine : l'économie et le travail, mais aussi l'éducation, les pratiques culturelles, les relations sociales... Au milieu du XV^e siècle, l'invention de l'imprimerie avait ouvert l'ère moderne. Cinq siècles plus tard, les TIC pourraient avoir des conséquences comparables. La révolution numérique prolonge en effet l'un des aspects les plus fondamentaux de la première révolution industrielle, dont les racines remontent en fait à la Renaissance : la relation étroite qui lie la science au développement des techniques de production.

L'émergence d'une société de l'information et d'une économie du savoir¹

Mokyr [2002] distingue le savoir propositionnel qui représente les connaissances (scientifiques) relatives aux phénomènes naturels et le savoir prescriptif qui concerne les connaissances sur les techniques ; celles-ci peuvent être effi-

1. L'introduction de cette troisième section s'appuie sur l'analyse de Mokyr [2002] et sur la remarquable présentation qu'en fait Varian [2004]. Elle reprend également des éléments de Curien, Muet [2003].

caces, même si l'on ne sait pas pourquoi. Avant 1800, le progrès technique était essentiellement un progrès du savoir prescriptif, c'est-à-dire une accumulation de techniques qui fonctionnaient. Au cours du XIX^e siècle, on a commencé à s'interroger sur le fonctionnement des techniques, et la science moderne s'est développée. Cette émergence de la pensée scientifique a constitué une réelle rupture, parce qu'elle a permis de généraliser le savoir propositionnel et de l'appliquer à de nouveaux domaines.

Avant l'invention de l'imprimerie, le savoir prescriptif était protégé par les secrets commerciaux qui étaient transmis du maître à l'apprenti. Les formes modernes de propriété intellectuelle, nées d'ailleurs à la Renaissance¹, ont contribué à la diffusion des savoirs prescriptifs en parallèle avec l'imprimerie qui a permis l'apparition de communautés internationales de savant. Les XVII^e et XVIII^e siècles ont été en effet ceux de la diffusion et de la transmission du savoir (créations de bibliothèques souvent privées, encyclopédies), et la révolution industrielle a elle-même nourrie une révolution concomitante de l'information par la baisse du prix des livres et des communications qui a conduit à un développement considérable des publications scientifiques et techniques.

Or, en rendant possible une dissociation complète entre l'information et son support physique, la révolution numérique constitue l'étape ultime d'une évolution qui remonte presque aux origines de l'humanité. Avant l'apparition de l'écriture, l'information était indissociable de la parole. Avant l'invention de l'imprimerie, un texte était rigidement lié au support sur lequel il était inscrit et il n'était communicable que si le support était lui-même cédé. L'invention de l'imprimerie a permis la réplique des textes et leur diffusion élargie, en maintenant toutefois un lien physique entre l'information et un support. Avec les réseaux numériques la circulation de contenus d'information devient débarrassée de tout contenant : l'information est ainsi en train de devenir un bien économique autonome.

La révolution numérique et l'Internet bouleversent profondément l'accès au savoir. Non seulement parce que l'Internet permet d'accéder ou de transférer à des coûts dérisoires des textes des sons ou des images d'un bout à l'autre de la planète, mais parce qu'il remplit des fonctions traditionnellement dévolues aux bibliothèques. La bibliothèque a pour objectif d'organiser les savoirs par un classement raisonné, qui permet au lecteur de trouver le document qu'il cherche. La forte augmentation du nombre de documents, qui s'est manifestée bien antérieurement à la révolution numérique, a conduit, dès la fin du XIX^e siècle, à l'invention des langages documentaires. Or le Web est aussi, à travers les moteurs de recherche ou l'hypertexte, un outil documentaire. Comme l'écrit Jean Michel Salaün [2004], « La publication, le stockage, le classement, la recherche, c'est-à-dire les activités ordinaires du métier du document, sont ses fonctions. » Le Web n'utilise encore que de façon très marginale la puissance et la capacité de calcul des ordinateurs. L'ambition des promoteurs du « Web sémantique » est d'employer pleinement cette puissance et cette capacité pour développer une modélisation des connaissances basée sur un traitement sémantique des textes.

1. C'est en effet à la Renaissance et notamment avec le développement de l'imprimerie qu'est née la notion de droit d'auteur : un décret de 1554 à Venise, interdisait l'édition d'une œuvre en l'absence d'autorisation écrite de l'auteur (David [1993]). Presque un siècle plus tôt (en 1474), toujours à Venise, une loi avait inventé le brevet en exigeant l'enregistrement de toute découverte « nouvelle et ingénieuse » et en interdisant pendant dix ans l'usage à toute autre personne.

Parallèlement à une « dématérialisation » de l'information, l'Internet consacre une convergence entre deux types de communication auparavant séparés : la « communication adressée » de personne à personne, du type courrier ou téléphone ; et la « communication flottante » de point à groupe, du type télévision, presse, publication, conférence, etc. Cette convergence induit une hybridation des processus de création de valeur respectivement associés à chacun de ces deux modes de communication.

Le second paradoxe de l'économie numérique : aboutissement de l'économie de marché ou économie publique ?

Nous avons analysé dans les deux premières parties de ce texte les conséquences de la formidable baisse du coût de l'information et son impact sur les changements organisationnels et les gains de productivité. Si le paradoxe de Solow est aujourd'hui résolu, le développement de l'économie numérique soulève un second paradoxe qu'on peut formuler ainsi (Curien et Muet [2004]) : « La réduction du coût de l'information qui devrait conduire à la forme la plus aboutie d'une économie de marché, développe au contraire de nombreuses caractéristiques d'une économie publique. »

Le secteur de l'information présente en effet de nombreux ingrédients d'une économie publique¹ :

1. Les biens informationnels présentent les caractères de « non-rivalité » et de « non-exclusion » propres aux biens publics : leur consommation par les uns n'induit ni restriction ni réduction de la consommation des autres. La « marchandise information » est comme une idée : on ne la perd pas en la communiquant à autrui.

2. La fonction de production d'un bien informationnel a une structure de coût très particulière que notait déjà Arrow [1962] : la recherche-développement et les dépenses d'investissements pour produire la première unité du bien sont généralement importantes et représentent des coûts non recouvrables (*sunk costs*), alors que le coût marginal de reproduction (la copie) est quasi nul. Cette structure de coût (coût fixe élevé et faible coût marginal) est génératrice d'économies d'échelle. Il en résulte que, contrairement à ce que pourrait laisser penser la seule prise en considération de l'abaissement des coûts de transmission, l'économie numérique ne sera pas exempte de coûts d'information. Elle est au contraire une économie où la valeur se crée et s'accumule dans la création de contenus et dans la transformation d'informations brutes en connaissances mobilisables.

3. Les biens informationnels dont l'utilisation est liée à des réseaux, sont à l'origine d'« effets de club » considérables : les consommations individuelles, loin de s'exclure, se valorisent mutuellement, l'utilité de chaque consommateur étant renforcée du fait de la présence des autres sur un même réseau. Par exemple, plus un site d'échange « pair à pair » de fichiers musicaux MP3 fédère un grand nombre d'internautes, plus large est le catalogue musical auquel chacun peut accéder. Ces différentes formes d'effets de club constituent des « économies

1. Cette partie s'appuie très largement sur Curien et Muet [2004]. On trouvera les mêmes idées et une étude plus détaillée de l'économie de l'Internet dans Brousseau et Curien [2001].

d'échelle de consommation » qui, en se cumulant aux économies d'échelle de production, favorisent l'émergence de standards dominants¹, et de situations de monopole comme on a pu l'observer pour Microsoft.

4. Dans une économie où le rythme de renouvellement des produits est de plus en plus rapide, les biens et services sont le plus souvent à la fois des biens complexes, des biens d'expérience² (dont l'utilité est difficilement connaissable à l'avance), et des biens paramétrables (dont les conditions d'utilisation sont adaptables au profil du consommateur). Dans un espace de biens ainsi complexifié, le signal-prix adressé par un marché traditionnel s'avère insuffisant pour éclairer les choix des consommateurs, surtout si le modèle de la gratuité tend à perdurer pour les biens purement informationnels ! Il est par conséquent nécessaire que se développe une « infrastructure » collective d'échange de signaux, ou « infomédiation », qui rende les biens et services plus « lisibles » par les consommateurs.

Biens publics, rendements croissants, externalités positives de consommation, échanges de signaux hors marché, montrent que l'économie numérique s'éloigne singulièrement des hypothèses de la concurrence parfaite. Que faire lorsque les défaillances de marché qui représentaient hier des phénomènes marginaux deviennent, aujourd'hui, l'un des moteurs de la dynamique économique ? Face à une évolution qui remet profondément en cause le modèle économique du secteur informationnel de l'« ancienne économie » (éditeurs de contenus et grands groupes de médias), la tentation est forte de rendre à nouveau l'information captive. En créant artificiellement la rareté, les biens informationnels pourraient ainsi continuer à être échangés et mis en valeur comme des biens ordinaires. C'est une des questions qui est en filigrane du débat sur la propriété intellectuelle.

Propriété intellectuelle³

L'objectif de la protection intellectuelle est d'inciter *ex ante* à l'innovation, en procurant un monopole transitoire à l'innovateur, mais avec pour conséquence de nuire à sa diffusion *ex post*. Cette protection a toutefois l'avantage sur le secret de fabrication de ne pas s'opposer à cette diffusion, mais « la privatisation d'une connaissance faisant partie du patrimoine commun de l'humanité⁴ » est une question qui mérite d'être soigneusement pesée. Deux dispositifs sont disponibles : le brevet, qui protège l'idée (sous réserve qu'elle soit rendue publique), et le droit d'auteur (*copyright*) qui protège l'expression de l'idée. Traditionnellement, les programmes d'ordinateurs, tout comme les méthodes mathématiques, étaient exclus du champ du brevetable en Europe, alors qu'ils sont brevetables aux États-Unis, au même titre que les méthodes commerciales.

Pour comprendre les enjeux du débat, il faut rappeler les caractéristiques d'un logiciel. Un logiciel (ou un programme) se présente comme une suite d'instruc-

1. Cf. Shapiro et Varian [1999].

2. Le cinéma est typiquement un bien d'expérience : le prix d'une place de cinéma n'a aucun rapport avec la dépense d'investissement réalisé ; la rentabilité d'un film dépend uniquement de son succès.

3. Cf. sur ce thème Bernard Caillaud [2003] ainsi que Béatrice Dumont [2003].

4. L'expression est empruntée à Tirole [2003].

tions écrites dans un langage compréhensible par l'homme (Java, Basic, etc.) : on parle alors de programme source ou de « code source ». Ce programme peut être ensuite compilé, c'est-à-dire transcrit en une suite numérique de 0 et de 1, compréhensible par la machine mais illisible par l'homme (code binaire). C'est le programme compilé qui est généralement commercialisé. Comme nous l'avons indiqué, la recherche-développement pour produire le code source est importante et représente des coûts non recouvrables alors que le coût marginal de reproduction (la copie) est quasi nul. Le logiciel se rapproche ainsi de l'œuvre littéraire ou artistique ou encore de la production cinématographique qui a une structure de coût comparable. Le coût quasi nul de reproduction justifie une protection par le droit d'auteur (*copyright*) qui en interdit la copie sauf à des fins de sauvegarde. Toutefois, le droit d'auteur appliqué au logiciel protège la reproduction du code binaire (l'expression de l'idée), sans obliger à dévoiler le contenu (le code source) ; il s'apparente plus au secret de fabrication qu'au droit d'auteur traditionnel et contourne l'une des motivations du droit d'auteur (Tirole [2003] ; Vivant [1993] ; Foray et Zimmerman [2001]).

S'il n'y a guère de débat sur le *copyright* appliqué au logiciel, la protection de l'innovation logicielle, elle, fait débat. Par sa dynamique d'accumulation des connaissances, la production de logiciel s'apparente assez fortement à la recherche fondamentale. La conception d'un nouveau logiciel s'appuie en effet de manière cumulative sur des dizaines de logiciels ou d'algorithmes précédents. Dans ce contexte, les restrictions d'usage qui résulteraient d'un recours systématique aux brevets peuvent freiner l'innovation. Bessen et Manskin [2000] montrent par exemple que, lorsque les innovations sont cumulatives et complémentaires, les gains à long terme pour l'entreprise innovante résultant du partage des connaissances peuvent être plus importants que la perte due à l'imitation, ce qui plaide pour l'absence de protection par des brevets. On assiste en outre aux États-Unis à une prolifération de brevets de type défensifs dont l'objet est moins de récolter des droits de licence que de se prémunir contre des litiges éventuels (Tirole [2003]). Dans un domaine où la création de connaissances repose largement sur la recombinaison d'éléments existants, la brevetabilité du logiciel, en augmentant le coût et l'incertitude juridique d'une innovation, peut donc avoir un effet négatif sur son développement. Si la mise en commun de brevets ou les échanges de licence croisées peuvent en limiter les effets négatifs, ces pratiques ne sont guère accessibles aux PME et aux inventeurs individuels. Enfin les rendements croissants résultant des effets de réseau confèrent un avantage décisif au premier innovateur, de sorte que le pouvoir de monopole temporaire du brevet peut conduire à une position dominante durable (Foray [1993]).

À l'opposé du brevet et du *copyright*, le développement du logiciel libre relève du modèle du « savoir ouvert » propre à la recherche scientifique. Un logiciel libre (*open source*) est un logiciel dont le programme source est fourni gratuitement aux utilisateurs (*copyleft*), avec l'engagement en contrepartie que les améliorations apportées par chacun d'eux bénéficient à la communauté tout entière¹. La correction des défauts, qui représente jusqu'à 80 % du coût du logiciel, s'appuie notamment sur l'expérience des utilisateurs. Comme dans la production scientifique, la reconnaissance par les pairs, mais aussi la perspective d'une future embauche lucrative dans une société informatique traditionnelle, se

1. Il existe plusieurs types de licences de logiciel libre.

substituent pour les développeurs du logiciel libre à la rémunération directe de l'innovation (Lerner et Tirole [2002] ; Foray et Zimmermann [2001]).

Les logiciels libres sont souvent utilisés dans les applications sophistiquées comme les systèmes d'exploitation des grands ordinateurs (par exemple le système Linux). Des administrations soucieuses de réduire leur dépendance à l'égard de Microsoft ont eu recours à ce type de logiciel (le Pentagone, la Gendarmerie canadienne, le ministère allemand des Finances ou encore les Pays-Bas qui envisagent d'en étendre l'usage à l'ensemble des administrations à l'horizon [2006]). La plupart des sociétés de services informatiques intègrent des briques de logiciels libres dans leur prestations, ce qui décale vers les services informatiques les coûts pour les utilisateurs. Cette évolution est liée notamment à l'implication des grandes sociétés informatiques (IBM, Sun...) qui y voient, elles aussi, la possibilité de s'émanciper du monopole de Microsoft.

Le débat sur la brevetabilité du logiciel oppose en fait deux visions de la production logicielle. Les opposants au brevet logiciel mettent en avant l'aspect accumulation des connaissances, les partisans (par exemple, Benzoni [2004]) considèrent que l'édition logicielle relève majoritairement d'une logique de production industrielle et que la référence à une production intellectuelle ne correspond plus à la réalité de la production logicielle aujourd'hui. Cette distinction production matérielle-production intellectuelle est implicite à la décision récente du Parlement européen, de n'autoriser la brevetabilité d'un logiciel que lorsque celui-ci agit sur la matière ou l'énergie, en excluant du champ du brevetable les créations de l'esprit humain.

Abondance, gratuité et infomédiation

La gratuité et le bénévolat, présents sur certaines composantes d'Internet, ne sont pas les turbulences incontrôlées d'un média dans l'enfance qui disparaîtraient à l'âge adulte, mais l'un des ressorts importants du développement du secteur de l'internet. Comme l'ont révélé les désillusions de la bulle Internet, l'idée selon laquelle les TIC rapprocheraient l'économie d'un marché parfait est inexacte. Le succès mitigé des tentatives de transposition directe sur Internet des pratiques traditionnelles de l'économie de marché, ainsi que l'échec relatif d'un certain type de commerce électronique ont contribué à révéler certaines originalités de l'Internet, notamment l'émergence d'une forme originale d'intermédiation, l'« infomédiation » permettant l'articulation de l'offre et de la demande, à travers des échanges spontanés au sein de communautés d'internautes-consommateurs (Curien [2003], Gensollen [2003]). Du côté de l'offre apparaît également un mélange de compétition et de coopération (Curien et Gensollen [2003]). Ce mode de fonctionnement diffère du marché walrassien et se rapproche d'un marché hayekien fondé sur l'apprentissage réciproque.

CONCLUSION

Discutant notre rapport du CAE sur la société de l'information, Elie Cohen [2004] soulignait que « à 0,35 % d'impact sur la croissance on est dans l'innovation ordinaire, à 1 % on entre dans la zone d'innovation disruptive ». Si de

nombreuses incertitudes subsistent quant à l'impact des TIC, il semble toutefois que le consensus s'inscrive de plus en plus dans la zone disruptive. Mais il est vrai que pour juger des révolutions industrielles, comme des révolutions technologiques, les contemporains des phénomènes restent les plus mal placés. Après avoir longtemps attendu la fin du paradoxe de Solow, ne risque-t-on pas, par une sorte de biais de sélection, de privilégier une prophétie imparfaitement autoréalisatrice.

Bien d'autres aspects de la révolution numérique, qui dépassent le strict cadre économique mériteraient d'être abordés, comme ses conséquences sur l'éducation. Par son impact sur l'accès aux connaissances, la formation à l'usage de ces technologies est un enjeu éducatif qui n'est pas sans rappeler, par certains côtés, ce qu'a pu être, il y a un peu plus d'un siècle, la généralisation de l'apprentissage de la lecture et de l'écriture dans les pays industrialisés. De même, ses conséquences en matière culturelle vont certainement bien au-delà de la transformation du modèle économique évoquée dans cet article¹.

Analysant les effets de la première révolution industrielle, Varian se demandait si celle-ci était plus importante dans l'histoire de l'humanité que la découverte du feu. On peut certainement hésiter à mettre en parallèle la révolution numérique avec l'invention du langage, de l'écriture et de l'imprimerie, mais elle s'inscrit incontestablement dans cette longue histoire de la communication. Si, comme nous le pensons, les effets de l'irruption des technologies de l'information et de la communication dans la société sont encore à venir, la littérature sur la « révolution numérique » a sans doute encore de beaux jours devant elle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AHMAD [2000], « Measuring Investment in software », *STI Working Paper*, 2003/6, OCDE.
- AHMAD N., SCHREYER P., WOLFI A. [2004], « ICT investment in OECD Countries and its Economic Impact », chap. 4 in OECD [2004].
- ARTUS [2001], *La nouvelle économie*, Paris, La Découverte.
- ARTUS P. et MUET P.-A. [1990], *Investment and Factor Demand*, North Holland, Contributions to *Economic Analysis*, n° 193.
- ARROW K. [1962], « Economic Welfare and the Allocation of Resources for Invention », dans *The Rate and Direction of Incentive Activity: Economic and Social Factors*, NBER, Princeton University Press, p. 609-626.
- AUDENIS, DERUYON et FOURCADE [2005], « L'impact des nouvelles technologies de l'information et de la communication sur l'économie française. Un bouclage macro-économique », *Revue économique*, 1.
- AZKENAZY Ph. [1998], « Le développement des pratiques flexibles de travail », dans *La Nouvelle Économie*, Rapport CAE n° 28.
- AZKENAZY Ph. et GIANELLA Ch. [2000], « Le paradoxe de la productivité : les changements organisationnels facteurs complémentaires à l'information », *Économie et Statistiques*, 339-340, p. 219.
- AZKENAZY Ph. et MORENO GALBIS E. [2005], « L'impact des changements technologiques et organisationnels sur les flux de main-d'œuvre », *Revue économique*, 56 (3), p. 541-550.

1. Cf., par exemple, Chantepie et Le Diberder [2005].

- BASLÉ M. et PENARD T. [2002] (dir.), *e-Europe : la société européenne de l'information en 2010*, Paris, Economica.
- BELORGEY N., LECAT R., MAURY T. [2004], « Determinants of Productivity per Employee: an Empirical Estimation Using Panel Data », *Bulletin de la Banque de France Digest*, 123, mars, p. 43-68.
- BENGHOZI P.J. et COHENDET P. [1997], « L'organisation de la production et de la décision face aux TIC », dans E. BROUSSEAU et A. RALLET (dir.), *Technologies de l'information, organisation et performances économiques*, Rapport du Commissariat général au Plan, chap. 2.
- BENZONI, « L'édition logicielle », *Livre blanc*, avril 2004.
- BESSEN J. et MANSKIN E. [2000], « Sequential innovation, patents and Imitation », *MIT Working Paper* n° 00-01.
- BERNER-LEE T. [2000], *Courrier de l'Unesco*, septembre.
- BERNT E. et MORRISSON C. J. [1995], « High Tech Capital Formation and Economic Performance in US Manufacturing Industry », *Journal of Econometrics*, 65, p. 9-43.
- BROUSSEAU E. [2000], « Ce que disent les chiffres et ce qu'il faudrait savoir », *Économie et Statistiques*, 339-340 (9/10), p. 147-170.
- BROUSSEAU E. et RALLET A. (dir.) [1999], *Technologies de l'information, organisation et performances économiques*, Paris, Commissariat général du Plan.
- BROUSSEAU E. et CURIEN N. [2001], « Économie d'Internet, économie du numérique », dans E. BROUSSEAU et N. CURIEN (dir.), *Économie de l'Internet*, *Revue économique*, 52 (hors série).
- BRESNAHAM T., BRYNJOLFSSON E. et HITT L. [2002], « Information Technology, Workplace Organization and the Demand for Skill labor: Firm Level Evidence », *Quarterly Journal of Economics*, 117 (1), p. 339-376.
- BRESNAHAM T. et TRAJTENBERG M. [1995], « General purpose technologies: Engines of Growth », *Journal of Econometrics*, 65, p. 83-108.
- BRYNJOLFSSON E. et HITT L. [1996], « Paradox Lost? Firm-level Evidence on the Returns to Information system Spending », *Management Science*, 42 (4), p. 541-558.
- BRYNJOLFSSON E. et HITT L. [2000], « Beyond Computation: Information technology, Organizational Transformation and Business Performance », *Journal of Economics Perspectives*, 14, automne, p. 23-48.
- BRYNJOLFSSON E. et HITT L. [2003], « Computing Productivity: Firm-Level Evidence », *MIT Sloan Working Paper* 4210-01, juin.
- BRYNJOLFSSON E., HITT L. et YANG [2002], « Intangible Assets: Computers and Organizational Capital », *MIT Sloan Paper* 138, Octobre, and *Brookings papers on Economic Activity*.
- CAILLAUD B. [2003], « La propriété intellectuelle sur les logiciels », dans *Propriété intellectuelle*, Rapport du CAE n° 41.
- CARNOY M. [2000], « Sustaining the New Economy: Work, Family and Community in the Information Age », Cambridge, Harvard University Press.
- CARRÉ P., DUBOIS, MALINVAUD E. [1965], *La croissance française*, Paris, Le Seuil.
- CASTELLS M. [2002], *La galaxie internet*, Paris, Fayard, trad. fr.
- CASTELLS M. [1998], *La société en réseau*, Paris, Fayard, trad. fr.
- CETTE G., LOPEZ J. et NOUAL P.A. [2005], « Investment in ICT: an Empirical Analysis », *Applied Economics Letters*, 12 (5), p. 309-312.
- CETTE G., MAIRESSE J. et KOCOGLU Y. [2000], « La diffusion des technologies de l'information et de la Communication en France : mesure et contribution à la croissance », complément B, *Rapport du CAE* n° 28.
- CETTE G., MAIRESSE J. et KOCOGLU Y. [2002], « Croissance économique et diffusion des TIC : le cas de la France sur longue période », *Revue française d'économie*, 16 (3).
- CETTE G., MAIRESSE J. et KOCOGLU Y. [2004], « The Impact of diffusion of ICT on Productivity per Employee in France », *Bulletin de la Banque de France, Digest*, mars.
- CETTE G., MAIRESSE J. et KOCOGLU Y. [2005], « ICT and potential output growth », *Economics Letters*, 87 (2), p. 231-234.

- COHEN E. [1992], *Le colbertisme High Tech. : économie des Telecom et du grand projet*, Pluriel.
- COHEN E. [2004], « Commentaire de Curien et Muet », dans *La Société de l'Information*, Rapport du CAE n° 47.
- COHEN D. et DEBONNEUIL M. [2000], *L'économie de la nouvelle économie*, Rapport du CAE n° 28.
- COHEN W., NELSON R. R., WALSH J. [2000], « Protecting Their Intellectual Assets », *NBER Working Paper*, W 7552, février.
- COLECCHIA A. et SHREYER P. [2001], « ICT Investment and Economic Growth in the 1990s: Is the United States a Unique Case; a Comparative Study of 9 Countries », OECD, *DSTI Working Paper*, octobre.
- CHANTEPIE Ph. et LE DIBERDER A. [2005], « Révolution numérique et industries culturelles », Paris, La Découverte.
- CRAFTS N. [2002], « The Solow Productivity Paradox in Historical Perspective », *CEPR Discussion Paper* n° 3142, janvier.
- CREPON B., HECCKEL T. et RIDINGER N. [2004], « Have Information Technology Shift Upward Multifactor Productivity in the 90s? », *Mimeo*.
- CSA [2003], Enquête CSA sur les Français et l'utilisation des micro-ordinateurs, juin, Minefi.
- CURIEN N. et GENSOLLEN M. [2003], « TIC et nouvelles relations économiques, écosystèmes et coopération » dans MUSTAR P. et PÉNaN H. (dir.), *Encyclopédie de l'innovation*, Paris, Economica.
- CURIEN N. [2003], « Auto-organisation de la demande : apprentissage par info-médiation », *Revue d'économie politique*, 113.
- CURIEN N. et MUET P.-A. [2004], « La société de l'Information », *Rapport du CAE*, n° 47.
- DAVID P. [1990a], « Computer and Dynamo: The modern productivity Paradox in a not too Distant Mirror », dans *Technology and Productivity*, OECD, p. 315-347.
- DAVID P. [1990b], « The Dynamo and the Computer: An Historical Perspective on the Modern Productivity Paradox », *American Economic Review*, 80 (2).
- DAVID P. et WRIGHT [1999], « Early 20th Century Productivity Growth Dynamics », *University of Oxford Discussion papers in Economic History*, n° 33.
- DAVID P. [1993], « International Property Institutions and the Panda's Thumb: Patents, Copyrights and Trade Secrets in Economic Theory and History », *The Global Dimensions of Properties Rights in Science and Technology*, Office of International Affairs.
- DARES [2003a], « Autonomie et communication dans le travail : les effets des nouvelles technologies », *Premières Informations et Premières Synthèses*, 2003-05, n° 20.1.
- DARES [2003b], « Technologies de l'information : normes d'emploi et marché du travail », *Premières Informations et Premières Synthèses*, 2003-03 n° 13.2.
- DENISON E.F. [1962], « The Source of Economic Growth in the US and the Alternatives before US », Supplementary Paper 13, *Comittee for Economic Development*, NY.
- DENISON E.F. [1967], *Why Growth Rates Differ?*, Brookings.
- DE ROOS [1990], « The Importance of Organisational Structure and Production System Design in Deployment of New Technology », dans *Technology and Productivity*, OECD, p. 105-117.
- DEWAN et MIN [1997], « Substitution of Information Technology for Other factors of Production », *Management Science*, 43 (12), p. 1660-1675.
- DOMS M. T., DUNNE et TROSKE K. [1997], « Workers, Wage and Technology », *Quarterly Journal of Economics*, 112 (1), p. 253-290.
- DUMONT B., « Brevet logiciels et droit européens de la concurrence », dans BASLÉ M. et PÉNARD T. [2001], p. 271-298.
- DUCHÈNE A. [2004], « Droits de propriété intellectuelle et nouvelles technologies », Thèse, Université Lille 1.
- ESTAVAO [2004], « Why is Productivity Growth in the Euro Area so Sluggish? » *IMF Working Paper*, WP/04/200.
- FORAY D. [1993], « Standardisation et concurrence : des relations ambivalentes », *Revue d'économie industrielle*, 63, p. 84-101.

- FORAY D., ZIMMERMANN J.-B. [2001], « L'économie du logiciel libre », dans *Économie de l'Internet, Revue économique*, 52 (hors série).
- FREEMAN [1990], « The Nature of Innovation and the Revolution of the Productive System », dans *Technology and Productivity*, OECD, p. 303-314.
- GALBRAITH J. [1977], *Organizational Design*, Reading (Mass.), Addison-Wesley.
- GENSOULEN M. [2003], « Biens informationnels et Communautés médiatées », *Revue d'économie politique*, 113.
- GILLE B. [1978], *Histoire des techniques*, Paris, Gallimard.
- GORDON R. J. [2000], « Does the New economy measure up to the Great Inventions of the Past », *Journal of Economic Perspectives*, 14 (4), automne.
- GORDON R. J. [2002], « Technology and Economic performance in the American Economy », *CEPR Discussion Paper*, n° 3213, février.
- GORZ A. [2003], *L'immatériel*, Galilée, Paris.
- GREENAM N. et MAIRESSE J. [2003], « How do New Organizational Practice Shape Production Jobs? » *NBER Working Paper* n° 7285.
- GUELLEC D. [2004], « Gutenberg revisité : une analyse économique de l'invention de l'imprimerie », *Revue d'économie politique*, 114 (2), mars-avril.
- GUELLEC D. et RALLE P. [1995], *Les nouvelles théories de la croissance*, Paris, La Découverte.
- GUST C. et MARQUEZ J. [2002], « International Comparisons of Productivity Growth », *International Discussion Papers*, n° 727, Federal Reserve.
- HALL [2001], « Stock Market and Capital Accumulation », *American Economic Review*, 91 (5), p. 1203-1220.
- HAYEK [1945], « The Use of Knowledge in Society », *American Economic Review*, 35, p. 519-530.
- HAYEK [1978], « Competition as a Discovery Procedure », dans *New Studies in Philosophy, Politics and Economics*, Chicago University Press.
- JORGENSEN D.W. et GRILICHES Z. [1967], « The explanation of productivity change », *Review of Economics Studies*, vol. 34.
- JORGENSEN D.W. et STIROCH K. [1995], « Computers and Growth » *Economics of Innovation and New Technology*, 3 (3-4), p. 295-316.
- JORGENSEN D.W. et STIROCH K. [1999], « Information Technology and Growth », *American Economic Review*, 89 (2).
- JORGENSEN D.W. et STIROCH K. [2000], « Raising the Speed Limit: US Economic Growth in the Information Age », *Brookings Papers on Economic Activity*, (1), p. 125-211.
- JORGENSEN D.W., HO M. et TIROCH K. [2002], « Projecting Productivity Growth: Lessons from the US Growth Resurgence », *FRB Bank of Atlanta*, 3^e trimestre.
- LERNER J. et TIROLE J. [2002], « The simple economics of Open Source », *Journal of Industrial Economics*, 52, p. 197-234.
- LEQUILLER F. [2000], « La nouvelle économie et la mesure de la croissance », *Économie et Statistiques*, 339-340, 200-9/10.
- LICHTENBERG F. [1995], « The Output contribution of Computer Equipment and Personal: A Firm Level Analysis », *Economics of Innovation and New Technology*, 3, p. 201-217.
- MAIRESSE J., CETTE G. et KOCOGLU Y. [2000], « Les technologies de l'information et de la communication en France : diffusion et contribution à la croissance », *Économie et statistiques*, 339-340, 200-9/10.
- MALONE T. [1987], « Modelling Coordination in Organizations and Markets », *Management Science*, 33 (10), p. 1317-1332.
- MILGROM P. et ROBERTS J. [1990a], « Rationalizability, Learning and Equilibrium with Strategic Complementarities », *Econometrica*, 58 (6), p. 1255-1277.
- MILGROM P. et ROBERTS J. [1990b], « The Economics of Modern manufacturing », *American Economic Review*, juin 1990, 80 (3), p. 511-528.
- MOKYR J. [1995], *The Lever of Riches*, Oxford University Press.

- MOKYR J. [2002], *The Gifts of Athena: Historical origins of the Knowledge Economy*, Princeton University Press.
- NAUGHTON J. [1999], *A Brief History of the Future. The Origins of the Internet*, Londres, Wendelfeld et Nicholson.
- NORA S. et MINC A. [1978], *L'informatisation de la société*, Paris, La Documentation Française.
- OECD [1990], *Technology and Productivity*.
- OECD [2004], *The Economic Impact of ICT: Measurement, Evidence and Implications*, 303 p.
- OLINER S. et SICHEL D.E. [1995], « Computers and Output Growth revisited: How big is the Puzzle », *Brookings Papers on Economic Activity*, 2, p. 273-317.
- OLINER S. et SICHEL D.E. [2000], « The resurgence of Growth in the Late 1990s: Is Information Technology the Story? », *Journal of Economic Perspectives*, 14 (4), p. 3-22.
- OLINER S. et SICHEL D.E. [2002], « Information technology and Productivity: Where Are We Going », *FRB Bank of Atlanta*, 3^e trimestre, p. 15-44.
- OULTON [2002], « ICT and Productivity Growth in the United Kingdom », *Oxford Review of Economic Policy*, 18 (3).
- RADNER R. [1993], « The Organization of Decentralised Information Processing », *Econometrica*, 62, p. 1109-1146.
- ROUSSEL *et al.* [2001], « Observations statistique du développement des TIC et leur impact sur l'économie », *Rapport du CNIS*, n° 63, février.
- ROACH [1987], « America's Technology Dilemma: A Profile of the Information Economy », *Morgan Stanley*, septembre.
- SALAÜN J.-M. [2004], « Documents et numérique », dans *Société de l'Information*, Rapport du CAE n° 47.
- SCHNAPP J. [1998], « An Old Strategy is Backfiring at GM », *New York Times*, 12 juillet.
- SHAPIRO C. et VARIAN H.R. [1999], *Information Rules: A Strategic Guide to the Network Economy*, Harvard Business School Press.
- SIMON H. [1976], *Administrative Behavior*, New York, The Free Press, 3^e éd.
- SIMON H. [1987], « The Steam Engine and the Computer. What makes technology revolutionary? », *Educom Bulletin*, printemps, 22, p. 2-5.
- STIROH [2002], « Reassessing The Impact of IT in the Production Function: A Meta Analysis », *Mimeo*, *FRB New York*, novembre.
- SOLOW R. [1957], « Technical Change and The Aggregate Production Function », *Review of Economics and Statistics*, 39, p. 312-320.
- SOLOW R. [1987], « We'd Better Watch Out », *New York Times Book Review*, 12 juillet.
- TRIPLETT J. [1999], « The Solow Productivity Paradox: What Do Computers Do to Productivity », *The Canadian Journal of Economics*, avril.
- TIROLE [2003], « Protection de la propriété intellectuelle : une introduction et quelques pistes de réflexion », *Rapport du CAE, Propriété intellectuelle*, n° 41.
- VARIAN H. [2004], « Review of Mokyr's Gifts of Athena », *Journal of Economic Literature*, 52 (3), septembre, trad. fr. dans *Problèmes économiques*, juillet [2005].
- VIVANT [1993], « Une épreuve de vérité pour les droits de propriété intellectuelle : le développement de l'informatique », dans *L'avenir de la propriété intellectuelle*, Paris, Librairies techniques.
- WOLF E. [2002], « Productivity, Computerization, and Skill Change », *FRB Bank of Atlanta*, 3^e trimestre.
- YOUNG [1993], « Substitution and Complementarity in Endogenous Innovation », *Quarterly Journal of Economics*, 108.