

L'évolution du débat sur le paradoxe de Solow depuis sa formulation : les raisons d'une récurrence et les bases de l'argumentation.

Denis REQUIER-DESJARDINS

Séminaire LEREPS, 13/12/2024

Introduction :

La révolution des technologies de l'information et de la communication, de la généralisation des ordinateurs à la digitalisation, et maintenant à l'intelligence artificielle, a profondément transformé les systèmes productifs, et au-delà l'ensemble des pratiques sociales, depuis bientôt un demi-siècle. Dans ce contexte, on peut s'étonner du maintien tout au long de la période d'un débat qui a émergé dès la fin des années 1980, à la suite de la publication d'un article de Solow (1987)¹, et qui est connu de ce fait sous le nom de débat sur le paradoxe de Solow, ce paradoxe étant résumé par la formule : « on voit partout des ordinateurs, excepté dans les statistiques de productivité ». La résurgence périodique de ce débat, alors même que de nouvelles étapes dans le processus d'innovation se développent (internet, digitalisation, big data) et le fait qu'il semble toujours d'actualité à l'ère de l'intelligence artificielle, comme en témoigne un certain nombre de publications récentes (Van Ark, 2016 ; Ahmad et Scheyer, 2016 ; Brynjolfsson et al., 2017 ; Van Ark et al., 2021 ; Capello et al. 2022, Parteka et Kordalska, 2023), renvoie à une évolution de la productivité qui paraît toujours en décalage avec ce qui est attendu de ces innovations.

Cet article n'a évidemment pas pour ambition de clore le débat, mais entend s'appuyer sur son historique, en liaison avec les trajectoires d'innovation, pour revenir sur les arguments invoqués tout au long de cette période relativement longue, et montrer dans quelle mesure, au-delà de leur réponse éventuelle à la question posée par le paradoxe, ils révèlent la transformation des économies de marché et de leur encastrement social. En effet, si le maintien d'un débat sur la réalité du paradoxe jusqu'à aujourd'hui pose question, les analyses de la faiblesse relative de cet impact sur la productivité proposées par la littérature interrogent, explicitement ou implicitement, la nature de l'économie de marché capitaliste et celle des dualités qui la fondent, telles que offre/demande, production/consommation, travail/inactivité.

Après avoir tout d'abord rappelé l'évolution de la productivité dans les économies industrialisées depuis les années 1980, telle qu'elle est retracée par la littérature, nous reviendrons sur la chronologie de la prise en compte de l'évolution de la relation entre productivité et technologies numériques depuis l'énoncé du paradoxe, et donc sur la périodisation du débat, avant de nous concentrer sur l'argumentation développée dans ce débat, autour des délais d'adoption, de la méthodologie de mesure de la productivité et de la caractérisation des biens et services produit par ces technologies.

I L'évolution de la productivité depuis l'énoncé du paradoxe.

La littérature sur le paradoxe privilégie en général l'approche de la productivité par les indicateurs de productivité du travail, mais l'on trouve également de nombreuses références à la productivité globale

¹ Il s'agit en fait d'une phrase dans un article dans la New York Times Book Review, consacré à la critique de la thèse de la désindustrialisation des USA face au Japon et à l'Allemagne.

des facteurs. Elle se base sur les données de l'OCDE portant sur les pays membres de cette organisation, et en particulier sur les pays du G7, essentiellement l'Europe et l'Amérique du Nord, pays industrialisés qui ont vu depuis les années 80 l'émergence et la consolidation de la révolution numérique et des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC)

Si on se place donc dans la perspective des 50 dernières années, on constate dans les années 80 un ralentissement de la croissance la productivité du travail (PIB par heure travaillée) aux Etats-Unis qui prolonge d'ailleurs une tendance antérieure, et aucune accélération ailleurs, alors même qu'émerge cette révolution numérique. Après un rebond du rythme de croissance de la productivité entre 1995 et 2005, principalement aux Etats-Unis, on constate un ralentissement à la fin de la première décennie du siècle et après 2010, alors même que se développe, après internet, la digitalisation et la supposée « quatrième révolution technologique » autour du big data, de l'internet des objets et de l'intelligence artificielle (cf. tableau 1 et graphique 1 et 2). Le dynamisme plus important des Etats-Unis, par comparaison avec l'Union Européenne disparaît après 2005, les courbes devenant parallèles.²

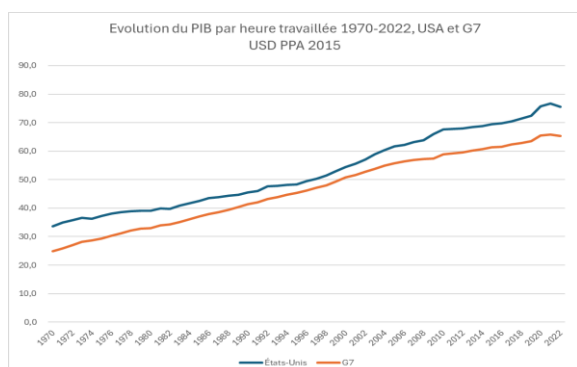
Cette évolution est confirmée par la prise en compte de la productivité globale des facteurs, qui est censée mesurer l'apport spécifique de la combinaison des facteurs de production et donc de l'innovation sur la croissance (graphique 3). Le découpage en période révèle un sursaut de l'apport de la PGF à la croissance entre 1995 et 2005, correspondant aux données sur la productivité du travail, même s'il est moins important que celui correspondant aux « 30 glorieuses. La baisse depuis 2005 n'en est que plus marquée.

Tableau 1

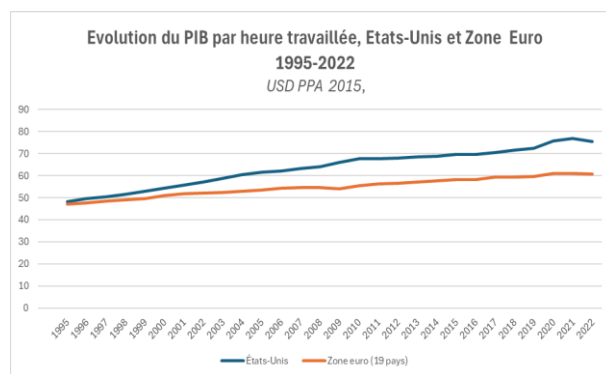
Croissance de la productivité du travail par période %					
	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2010	2010-2020
Royaume Uni	33,3%	24,3%	24,3%	12,2%	5,4%
Etats-Unis	16%	16,6%	19,5%	11,7%	9,1%
U.E. (27 pays)			10,7% (1995-2000)	12,4%	10,8%
G7	32,9%	25,4%	22,4%	15,9%	17%
OCDE				14,1%	13,2%

Source : OCDE

Graphique 1 : Croissance de la productivité du travail dans les pays du G7

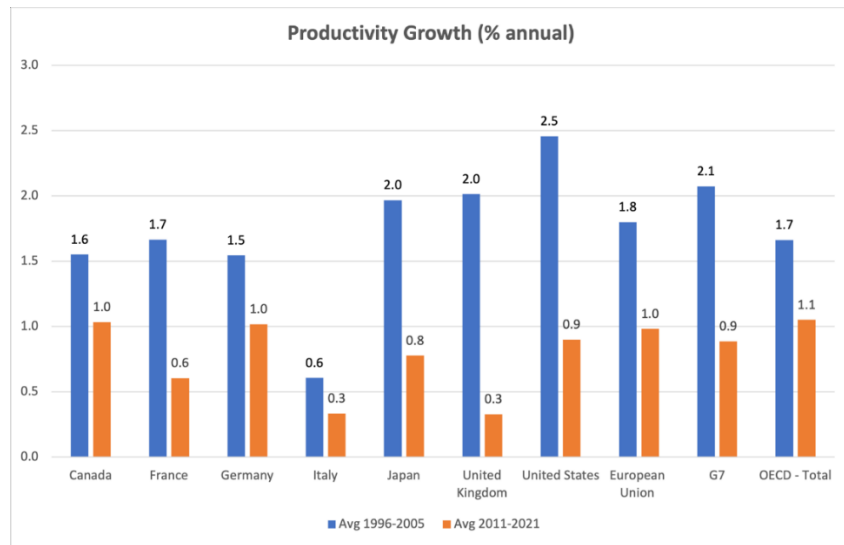


Source : OCDE



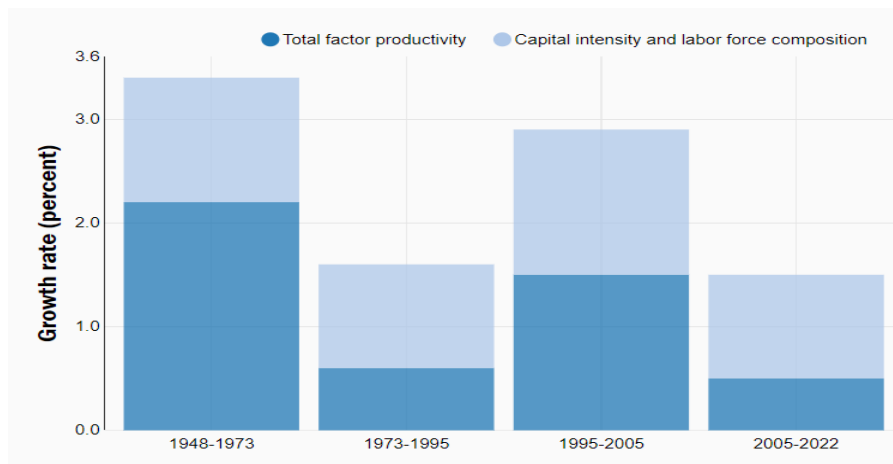
² Le rebond en 2021-2022, peut-être lié à l'émergence de l'IA générative mais aussi aux effets de la crise sanitaire. Il est de toute façon impossible de savoir s'il correspond à une inflexion de long terme.

Graphique 2 : Croissance de la productivité du travail depuis 2000 dans les pays de l'OCDE



Source : OCDE

Graphique 3 : les composants de la croissance de la productivité globale des facteurs de 1948 à 2022

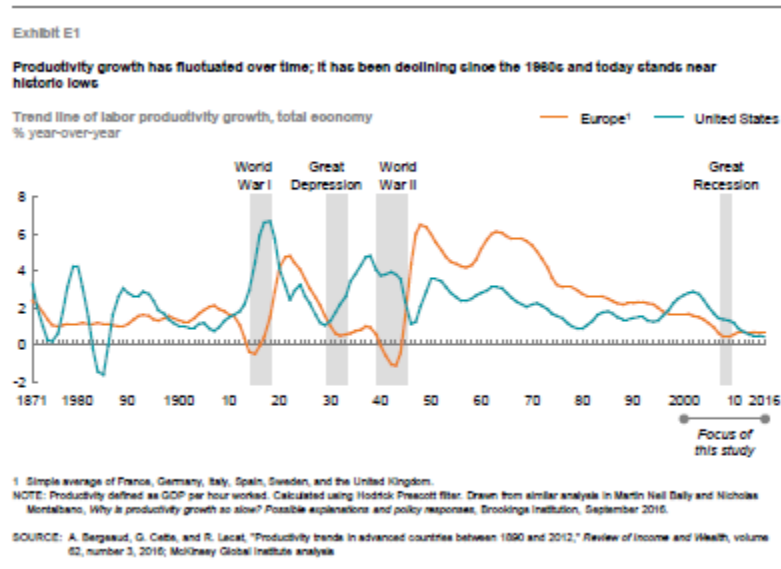


Source: OCDE Bureau of Labor Statistics, Productivity Database (Brynjolfsson et al. 2023)

Ces variations de l'évolution de la productivité selon les périodes renvoient principalement à une différenciation entre Etats-Unis et autres pays développés : ce sont essentiellement les Etats-Unis qui connaissent une évolution favorable de leur productivité entre 1995 et 2005 alors qu'ils ont connu une croissance modérée de cet indicateur dans les années 1970 (avec un niveau de départ en 1970 plus élevé que le reste du G7). La croissance du reste des économies développées (assimilées au G7) entre 1995 et 2005 se situe en faible accélération par rapport à la période antérieure, ce qui creuse l'écart avec les Etats-Unis dans la période 1995-2005. Dans la décennie 2010-2020, toutefois, l'évolution de la productivité est parallèle entre les deux zones, ce qui correspond à un ralentissement pour les Etats-Unis avant un bref sursaut entre 2019 et 2021. Ces comportements différenciés entre zones

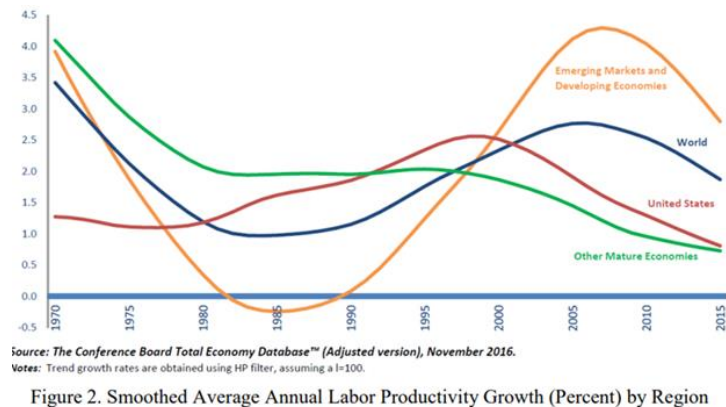
géographiques nourrissent, comme nous le verrons plus bas, le débat sur le paradoxe, mais il reste l'ensemble des pays développés connaît après 2000 un ralentissement de la croissance de la productivité, qui s'inscrit dans le long terme (graphique 4a) et qui contraste avec le monde en général et les pays émergents et en développement en particulier (graphique 4b).

Graphique 4a



Source : Remes et al. 2018

Graphique 4b



Source : Brynjolfsson et al. (2017)

La période 1980-2020 ayant été caractérisée par l'émergence de la révolution numérique, ces données nourrissent le paradoxe. Il s'agit toutefois de données très globales. Il convient donc de s'interroger plus spécifiquement sur la relation entre productivité et TIC, en mobilisant des données non seulement macroéconomiques mais aussi microéconomiques au niveau des secteurs et des entreprises.

II Technologies de l'information et de la communication et évolution de la productivité

L'évolution de la productivité pose la question de sa relation avec le développement des TIC, au cœur de l'expression du paradoxe de Solow, dans la mesure où on est en présence d'une « General Purpose

Technology » (GPT) supposée affecter l'ensemble des secteurs des économies concernées. Même si des éléments conjoncturels (comme la crise financière de 2008) peuvent évidemment influencer fortement sur cette évolution et notamment sur ses variations interannuelles, on peut la rapprocher sur la longue période des étapes de l'innovation dans les technologies numériques.

Les différenciations entre périodes, entre zones géographiques et entre secteurs, que révèle cette évolution de la productivité alimentent le débat sur la réalité du paradoxe dans la littérature : la position dominante sur la pertinence du paradoxe y évolue selon l'état de la relation selon les périodes.

De fait la différenciation des périodes est rattachée par la littérature essentiellement aux étapes de la trajectoire technologique initiée dans les années 1980, considérée comme définissant une troisième révolution industrielle, du fait du caractère transversal de ses applications. Elle commence par la diffusion des ordinateurs, suivie par la généralisation de l'internet, qui entraîne le bouleversement des réseaux de communication (qui débouche lui-même sur le développement des réseaux sociaux). L'étape suivante est marquée par une série d'innovations, résumée par le terme de digitalisation, qui peuvent être considérées comme incrémentales par rapport à cette troisième révolution industrielle, mais dont la convergence et le caractère transversal dessinerait en fait pour certains une quatrième révolution industrielle (Benassi et al., 2022) : elle serait marquée notamment par la gestion du cyberspace, l'internet des objets, l'intelligence artificielle et le traitement du big data, le cloud computing, la réalité augmentée et la technologie sans fil développée par la 5G. La temporalité de cette trajectoire technologique couvrant aujourd'hui une quarantaine d'années, la littérature s'emploie à rattacher l'évolution de la productivité sur cette période aux effets de la révolution numérique dans ses différentes étapes.

Si l'énoncé du paradoxe renvoie à l'évolution de la productivité des années 80 avec une référence explicite à la généralisation progressive de l'usage des ordinateurs à cette époque, présente dans la formule même de Solow, et si le constat de ce paradoxe est validé à l'époque par les analystes de la trajectoire technologique associée initiée par cette innovation (David, 1990), le rebond des gains de productivité dans la période qui suit son énoncé, et plus particulièrement dans la période 1995-2005, contemporaine de la généralisation du recours à Internet, rebond particulièrement sensible aux USA, mais moins en Europe³, est attribué (Vanark et al., 2003 ; Draca et al., 2006 ; Muet, 2006 ; Fernald et Ramnath, 2004) au développement des Technologies de l'Information et de la Communication, ce qui conduit à relativiser la pertinence du paradoxe^{4 5}.

³ Le taux moyen de croissance de la productivité du travail (PIB par personne employé) est passé de 1,1% en 1990-95 à 2,5% en 1995-2000 aux USA, alors que les chiffres correspondants sont 1,3% et 1,8% pour le Canada et 1,9% et 1,4% pour l'Europe (Van Ark et al., 2003 ; Muet, 2006). Cette croissance de la productivité, qui serait liée à la révolution numérique, se poursuit dans la première moitié de la décennie suivante : Van Ark et al. (2016) relève un taux moyen pour les USA de 2,5% entre 1999 et 2006, contre 1,6% pour l'Allemagne et 1,9% pour le Royaume Uni.

⁴ Muet (2006) estime quant à lui sur cette base que le paradoxe de Solow est « dépassé ». Draca et al. (2006) considère que la perspective est plus optimiste dans la première décennie du siècle qu'à la fin des années 1980.

⁵ Greenan et L'Horty (2002) relèvent cependant un retournement conjoncturel en 2001-2002 et soulignent que, au moins dans le cas de la France, la hausse de la productivité dans les années 90 reste inférieure à celle des années 1970, qui marque la fin des trente glorieuses, ce qui marque la persistance de la référence au paradoxe.

Cependant entre 2007 et 2014 la retombée des taux de croissance annuels de la productivité à un niveau proche de 1%, alors même que les technologies numériques rentrent dans l'étape du développement des réseaux sociaux et de la digitalisation conduit à la réhabilitation des interrogations sur la permanence du paradoxe, même si le contexte de croissance ralentie s'inscrit également dans la suite d'une crise économique et financière (2007-2008). Ce contexte conduit d'ailleurs à mettre en doute le lien de ce ralentissement avec l'évolution des TIC, justifiant donc le maintien de l'optimisme quant à l'évolution future.

Le paradoxe reste cependant à l'ordre du jour dans la période 2007-2016 qui enregistre une croissance de la productivité inférieure à celle de la période 1999-2006 (Van Ark, et al. 2016 ; Remes et al, 2018), alors que la digitalisation se développe.

A la fin de la deuxième décennie du siècle qui a pourtant vu le développement accéléré de la digitalisation et du Big data, ainsi que les débuts de l'intelligence artificielle, la faiblesse de la croissance de la productivité est un constat largement partagé (Cette et al. 2020, pour la France par exemple, Brynjolfsson et al., 2017 pour les Etats-Unis, Capello et al., 2022 pour l'Europe, Parteka et Kordalska, 2023). La problématique du paradoxe reste posée par toute une série de contributions récentes (Brynjolfsson et al. 2017 ; Cette et al. 2020 ; Van Ark et al. 2021, Capello et al. 2022), y compris celles qui portent plus spécifiquement sur l'impact de l'Intelligence artificielle (Damioli et al., 2021 ; Parteka et Kordalska, 2023).

Pour prendre en compte la relation entre l'évolution de la productivité et développement des technologies numériques, l'analyse peut être conduite non seulement au niveau macroéconomique mais également au niveau méso des secteurs et au niveau micro des firmes. De plus, il faut rendre compte de la différenciation des trajectoires entre zones géographiques, que la littérature s'efforce de rattacher aux caractéristiques des liens qu'elles entretiennent avec le développement des TIC aux différents niveaux.

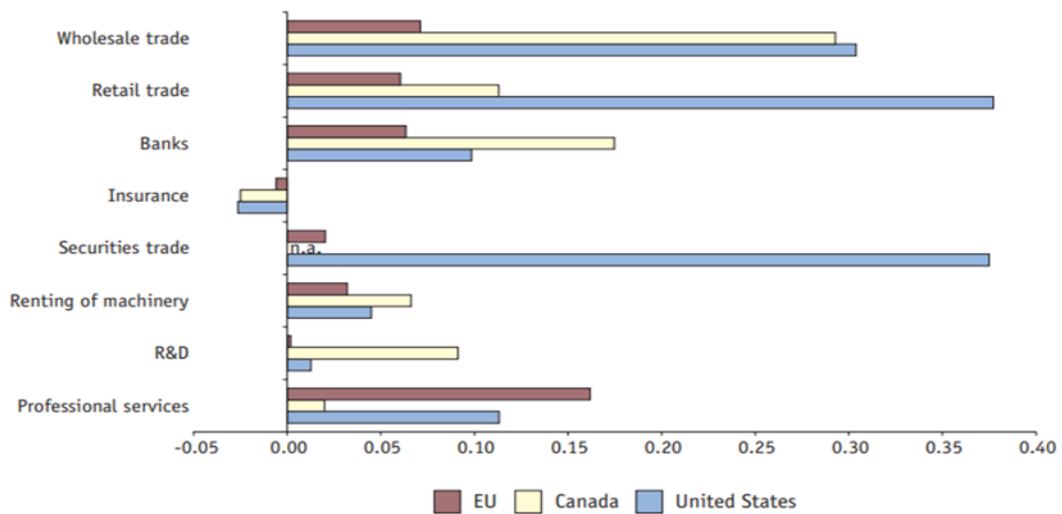
Dans le cas d'une technologie transversale qui a vocation à se généraliser la différenciation entre secteurs est une donnée cruciale pour évaluer sa diffusion. La littérature consacrée au paradoxe prend en compte essentiellement les secteurs producteurs d'équipement et de services numériques, les secteurs à forte utilisation de ces technologies, et les secteurs à faible utilisation. Greenan et L'Horty (2002) par exemple, qui soulignent que la hausse de la productivité dans les années 1990, considérée comme liée à l'impact de la révolution numérique, est en fait moins importante que durant la décennie 1970, avancent l'hypothèse que la hausse de la productivité dans la production des équipements ne s'accompagne pas de celle des secteurs qui les utilisent et que les secteurs des services qui utilisent les TIC sont aussi ceux où la croissance de la productivité est plus faible. Également en référence à la période des années 90, Van Ark et al. (2003) souligne que parallèlement l'évolution de la productivité dans les différents secteurs utilisateurs montre d'abord pour les années 90, du moins aux USA, une utilisation de ces techniques plutôt centrée sur le commerce de gros et de détail et la finance (Graphique 5).

Dans la période suivante toutefois la comparaison de la contribution à la hausse de la productivité des différents secteurs entre 1999-2006 et 2007-2014 (Van Ark et al., 2016), montre que la réduction de cette hausse constatée d'une période à l'autre est due principalement aux secteurs producteurs de technologie et des services numériques et aux secteurs à forte utilisation de ces services, (cf. graphique 6) ce qui démontre a contrario le lien prioritaire entre TIC et évolution de la productivité.

Graphique 5

Contributions to Aggregate Productivity Growth in the ICT-using Services Industries, 1995-2000

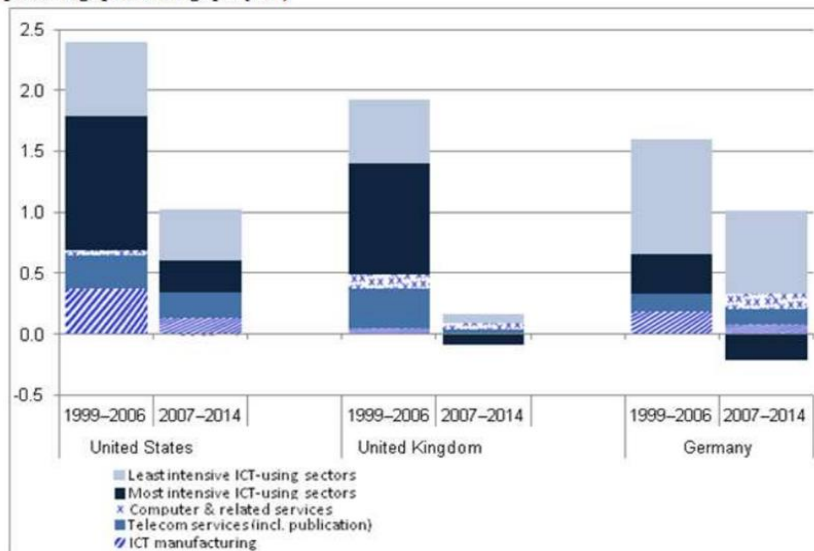
(average annual percentage points)



Source : VanArk et al. 2003

Graphique 6

Chart 1
Contribution of ICT-Producing, Most Intensive ICT-Using and Least Intensive ICT-Using Industries to Total Economy Labour Productivity Growth, 1996-2006 and 2007-2014 (average percentage point change per year)



Note: "Most intensive ICT-using industries" refer to the top half of the industries with the highest share of value of ICT investment plus purchases of ICT services as a percentage of "synthetic output" (which is value added at industry level plus the intermediate use of ICT services) for each period. Least intensive ICT-using sectors refer to the bottom half of industries in terms of ICT intensity. The contribution of ICT-producing industries (which are also part of "most intensive ICT-using industries") to labour productivity growth are shown separately.

Source : Van Ark 2016

La différenciation des évolutions de productivité entre secteurs producteurs de TIC, secteurs utilisateurs et secteurs non-utilisateurs, pose donc la question du rythme de diffusion des TIC dans l'économie. Il semble exister un consensus pour reconnaître que l'innovation dans le secteur de production des TIC garantit une hausse importante de la productivité dans ce secteur. Parallèlement il

semble établi que l'adoption des technologies numériques et leur utilisation, mesurées au niveau des entreprises, se traduit par une hausse de la productivité à cette échelle mais sans que cette hausse se reflète systématiquement dans les statistiques globales de productivité, qui concerne l'ensemble des secteurs. Au niveau microéconomique des entreprises, pour la période 1995-2005 plus d'une vingtaine d'études menées dans différents secteurs qui établissent un lien très fort entre l'investissement dans les technologies numériques et l'évolution de la productivité (Draca et al. 2006). Des contributions plus récentes (Cette et al. 2020 ; Van Ark et al. 2021) insistent également sur cette relation positive au niveau de la firme. Ce résultat est cohérent avec la situation des secteurs producteurs ou fortement utilisateurs de ces technologies. Cependant la relation globale reste marquée, comme on l'a vu par un décalage récurrent entre productivité et investissement numérique qui entraîne par là-même la récurrence du paradoxe.

Certaines contributions (Cappello et al., 2022) pointent à ce sujet l'existence d'effets de réallocation des emplois des secteurs innovateurs vers les secteurs à faible productivité qui ne peuvent être concernés par la numérisation parce qu'ils impliquent une interaction physique (services à la personne par exemple), ce qui pourrait contribuer à rendre compte de la stagnation de la productivité du travail au niveau global : Il s'agirait selon lui du plus important facteur qui expliquerait le paradoxe, à l'ère de la digitalisation. De plus la concentration des gains de productivité sur certains secteurs peut favoriser des comportements de rent-seeking de la part des firmes de ces secteurs au détriment de la diffusion de ces gains à l'ensemble de l'économie (Aghion et al., 2019). Cette concentration des progrès de productivité sur quelques firmes et leurs efforts pour protéger leur rente se manifeste par l'écart grandissant entre elles et leurs concurrents en matière de productivité, notamment dans le cas de l'intelligence artificielle (McElheran et al, 2024).

Cette interrogation sur la différenciation des résultats au niveau macro, méso et micro s'articule avec celle la différenciation géographique de l'évolution de la productivité depuis la formulation du paradoxe, entre les Etats-Unis et les autres pays du G7, notamment européens, particulièrement pendant la période 1995-2005,⁶ : la poussée de la productivité aux USA peut être rattachée à l'investissement globalement plus important dans les TIC, en opposition avec l'Europe.

Ainsi Greenan et l'Horty (2002) reconnaissent que la hausse de la productivité liée aux TIC se limite surtout aux USA dans la seconde moitié des années 90. Selon eux, la différence entre USA et Europe en matière de productivité, paraît surtout liée à l'impact des technologies numériques sur les secteurs utilisateurs de ces technologies, beaucoup plus fort aux USA. Biagi (2013) constate également une relation entre l'investissement dans les TIC et l'accélération de la croissance américaine entre 1995 et 2005. Toutefois cette accélération concerne le secteur de production des TIC entre 1995 et 2000, mais cet effet diminue largement par la suite, en partie remplacé par le comportement des secteurs utilisateurs. Le décalage entre USA et Europe serait lié à une taille plus faible du secteur des TIC en Europe, un niveau d'investissement dans les TIC également globalement plus faible, surtout dans le commerce de gros et de détail et la finance, secteurs ayant fortement stimulé la croissance aux USA. Van Ark et Inklaar (2003) attribue également le différentiel de productivité entre USA et Europe au niveau de l'investissement dans les TIC, qu'il relie à sa différenciation sectorielle. Dans le même ordre d'idée Muet (2006) constate sur le cas européen une augmentation de la productivité du travail dans le secteur des TIC qui ne s'étend pas aux autres secteurs. La différenciation géographique marquée dans la période 1995-2005 paraît donc liée au poids différencié du secteur innovateur des TIC, ce poids plus important aux USA étant susceptible de stimuler l'innovation dans les autres secteurs. Au-delà des secteurs, le comportement d'investissement au niveau des firmes est également mis en avant, dans la

⁶ Il y a très peu de références concernant les régions ou les pays hors OCDE. On peut néanmoins citer Cirera et al. (2016) sur l'Afrique Sub-Saharienne.

mesure où la littérature insiste sur l'importance aux USA de l'investissement en capital organisationnel et en compétences qui accompagne l'investissement dans les équipements, et qui ne se retrouverait pas en Europe.

La question du décalage entre Etats-Unis et Europe semble toutefois perdre en partie son acuité dans la littérature de la période récente, compte tenu de la globalisation très forte du secteur des TIC, qui intègre notamment l'Asie de l'Est, et de l'harmonisation relative des rythmes de croissance de la productivité. Comme souligné plus haut, on constate néanmoins dans la période très récente de nouveau un décalage entre Europe et Etats-Unis, décalage qui pourrait correspondre à l'avance américaine dans le domaine de l'intelligence artificielle.

Au total, on constate que tout au long de ces quasi-quarante dernières années, si les données statistiques semblent maintenir le débat sur le paradoxe, les positions ont divergé aux différentes étapes sur le caractère temporaire ou permanent du paradoxe et sur ses causes. L'élément essentiel du débat semble être une déconnexion entre une évolution macroéconomique qui constituerait le paradoxe, des données microéconomiques au niveau des entreprises qui le nieraient et des évolutions sectorielles ambivalentes. La définition des périodes d'analyse, la mesure des indicateurs et la caractérisation des biens produits interviennent en arrière-plan.

On peut ainsi définir une périodisation du débat en fonction des conclusions dominantes. L'énoncé et le premier débat sur le paradoxe prennent acte du décalage entre développement des TIC et productivité, comme le souligne Solow mais surtout David (1990). La littérature insiste d'abord sur l'hypothèse d'une situation de transition par définition limitée dans le temps qui débouche sur une relativisation de la pertinence du paradoxe dans la période 1995-2010, liée au rebond de la productivité au tournant du siècle, particulièrement sensible aux USA, mais moins en Europe, attribué à la diffusion des TIC (Greenan et L'Horty, 2002 ; Van Ark et al., 2003 ; Draca et al., 2006 ; Muet, 2006). On observe néanmoins après 2010 un retour de la référence au paradoxe (Van Ark, et al. 2016) de sorte que cette problématique reste posée par une série de contributions récentes (Ahmad et Scheyer, 2016 ; Brynjolfsson et al. 2017 ; Cette et al. 2020 ; Van Ark et al. 2021, Capello et al. 2022), y compris celles qui portent plus spécifiquement sur l'impact de l'Intelligence artificielle (Damioli et al., 2021 ; Parteka et Kordalska, 2023). On peut noter que les premières estimations sur l'impact de l'IA générative (Brynjolfsson et al., 2023), malgré leur optimisme sur les potentialités ouvertes en termes de croissance de la productivité, restent prudentes.

Il convient donc de s'interroger, au-delà de ces divergences, sur les arguments avancés dans le débat. Ils permettent en effet une approche sur la relation entre innovation numérique et évolution du système économique, comme nous allons maintenant l'envisager.

II Les arguments du débat.

La littérature consacrée au paradoxe, qui couvre donc trois décennies, met en avant une variété d'arguments pour rendre compte de sa pertinence ou au contraire pour l'invalider.

Les arguments utilisés, soit pour valider le paradoxe, soit pour le remettre en cause, peuvent se regrouper principalement en trois grandes catégories :

- La question du délai d'adoption d'une technologie à application générale (« General Purpose Technology »)

- La question de la mesure des données sur la productivité et les variables qui permettent de la calculer, tels les facteurs de production comme le capital et l'investissement ou les coûts de production comme l'amortissement.
- La question de la caractérisation des biens et services numériques, compte tenu de l'appartenance de l'information, à la fois intrant et produit du secteur des TIC, au spectre des biens publics.

La question du délai d'adoption des technologies numériques est cruciale pour l'appréciation du paradoxe et elle est logiquement présente dès sa formulation, notamment dans la contribution fondatrice de David (1990) qui suit l'énoncé du paradoxe par Solow en 1987; elle renvoie au lien de ce débat avec les théories de l'innovation et notamment avec la distinction propre à la théorie néo-schumpétérienne de l'innovation⁷, entre innovations de rupture et innovations incrémentales, les premières générant un paradigme et une trajectoire technologiques spécifiques, et les secondes s'inscrivant dans ce paradigme et modulant la trajectoire. Elle permet donc de poser la question du délai de concrétisation de l'impact d'une innovation du type « General Purpose Technology », dont le domaine d'application est a priori transversal à l'ensemble des secteurs et des activités, délai en partie conditionné par l'émergence d'innovations incrémentales qui développent la trajectoire technologique correspondant à leur paradigme. David effectue notamment une comparaison des délais d'adoption de deux de ces innovations, la dynamo électrique et l'ordinateur développées à un siècle de distance ; selon lui les délais d'adoption, les seuils de diffusion de ces technologies et la diversité sectorielle de leur adoption, sont comparables. Il souligne dans les deux cas l'existence d'un recouvrement des nouvelles et anciennes technologies, ces dernières étant encore utilisées pendant une certaine période après l'émergence des nouvelles : il en résulte une hausse provisoire du coefficient de capital pour un même niveau de production et expliquerait donc un retard dans la mesure de l'impact de la nouvelle technologie sur la productivité. Le délai d'adoption dépend notamment de la situation des différents secteurs. Capello et al. (2022), qui valide par ailleurs le maintien du paradoxe dans la période récente, insiste sur cette importance du contexte sectoriel⁸.

Cette réflexion sur les délais de diffusion entre secteurs est alimentée par la rupture déjà mentionnée entre la période 1995-2010 et celle après 2010.

Dans la première période la hausse de la productivité concerne surtout le secteur de la production d'équipement numériques et moins la fourniture de services numériques, leur utilisation étant plutôt centrée sur le commerce de gros et de détail et la finance (Van Ark 2003) : la hausse de la productivité dans la production des équipements ne s'accompagne pas de celle dans les secteurs qui les utilisent; les secteurs des services qui utilisent les TIC sont aussi ceux où la croissance de la productivité est plus faible (Greenan et l'Horty 2002). Le schéma paraît donc bien correspondre à l'hypothèse d'une diffusion progressive mais lente à partir du secteur responsable de l'innovation radicale⁹.

⁷ David est un des principaux représentants de ce courant, comme l'illustre d'ailleurs sa caractérisation des « *General Purpose Technologies* » qu'il compare (dynamo et computerisation) : « *an extended trajectory of incremental technical improvements, confluence with other streams of technological innovations, a broad domain of specific applications* ». Muet (2006) fait également une référence explicite à l'approche néo-schumpétérienne.

⁸ « *Technology adoption in fact is not a generic process but is highly sector specific* ». (Capello et al., 2022)

⁹ Le processus de diffusion entre secteurs peut par ailleurs associer plusieurs innovations apparaissant comme radicales : Muet (2006), en se situant explicitement dans la perspective néo-schumpétérienne des innovations radicales et incrémentales, considère que l'émergence dans l'industrie de la « nouvelle économie » (juste à temps, autonomie des équipes, toyotisme) en même temps que les TIC n'est pas une coïncidence, mais une innovation incrémentale, la baisse du coût de l'information rendant possible ce type d'organisation dans l'industrie et étendant ensuite ses effets au transport aérien ou à la finance.

Dans la seconde période la réduction de la croissance de la productivité est due principalement aux secteurs producteurs de technologies et de services numériques et aux secteurs à forte utilisation de ces services, (Van Ark et al., 2016), ce qui certes démontre à contrario le lien prioritaire entre TIC et évolution de la productivité, mais semble signaler un certain épuisement de la trajectoire technologique.

La nécessité de prendre en compte les délais d'adoption se retrouve au fil du temps (Muet, 2006 ; Van Ark et al., 2016), dans la mesure où elle permet de considérer la constatation du paradoxe, même établi sur une période significative, comme un état essentiellement transitionnel. On peut toutefois rattacher cette question des délais d'adoption à l'approche de l'innovation technologique formulée par Geels et al. (2017), approche « multi-niveaux » niche-paysage-régime, que l'on peut inscrire dans la continuité de l'approche néo-schumpetérienne de l'innovation : le délai d'adoption est en effet marqué par le passage d'une situation d'innovation de niche à un régime basé sur sa généralisation, mais cela doit conduire à prendre en compte justement le paysage, c'est-à-dire l'ensemble du contexte sociotechnique au-delà de l'espace productif. Cette approche élargit donc le cadre de la diffusion qui ne se limite plus à la diffusion intersectorielle mais prend en compte l'ensemble de la société. Si la focalisation sur le délai d'adoption suppose qu'à terme l'ensemble des secteurs productifs soit concerné par cette diffusion, dans cette approche le processus de diffusion a vocation à concerner l'intégralité du système social.

Le débat sur le délai d'adoption a conduit par ailleurs certains à considérer que la première phase des innovations dans les TIC (ordinateurs et internet essentiellement) a produit l'ensemble de ses effets à la fin de la première décennie du siècle. Si Gordon (2018) considère que cela montre le faible potentiel de la troisième révolution industrielle par rapport à la seconde, que ce soit en termes de croissance ou de bien-être, Muet (2006), tout en avalisant la fin d'une phase d'innovation centrée sur l'internet, envisage clairement la relance d'un processus d'innovation global, autour de nouvelles technologies, liée notamment à l'exploitation des données préparant ainsi le terrain à la notion de « quatrième révolution industrielle », basée sur la digitalisation, qui s'impose dans la décennie suivante (Zervoudi, 2020 ; Benassi et al., 2022).

Cependant une des conséquences implicites de l'émergence de ce concept est de relancer la problématique du délai d'adoption, qui paraît donc liée à la définition que l'on donne de l'innovation radicale qui définit la trajectoire technologique. La distinction entre innovation radicale et innovation incrémentale devient plus floue et la succession des « révolutions industrielles » permet de reporter le diagnostic final sur la validité du paradoxe.

La critique de la mesure des indicateurs et des méthodologies statistiques constitue un second type d'argument qui, en permettant de réévaluer l'impact des technologies de l'information sur la productivité, a pour but de mettre en doute la relation qui fonde le paradoxe de Solow. Elle conduit aussi cependant à mettre en évidence une série d'impacts de la révolution numérique non révélés par l'approche traditionnelle de la productivité. Elle porte non seulement sur la mesure de la productivité, qui évalue cet impact en termes de création de valeur ajoutée par heure de travail, mais aussi sur la définition de l'investissement en capital dans ces technologies qui est à l'origine de cet impact et qui intervient notamment dans l'évaluation de la productivité globale des facteurs.

La critique porte, sur les méthodologies statistiques de traitement de la relation entre technologies numériques et productivité, sur la mesure comptable des variables permettant de calculer les indicateurs de productivité, ainsi que sur l'absence de prise en compte par ces indicateurs d'éléments tels que la qualité des biens et services numériques, les actifs intangibles qu'ils génèrent ou la fourniture de services gratuits aux utilisateurs.

Le débat sur les méthodologies (Draca et al. 2006, Muet 2006, Biagi 2013) oppose une approche globale qui se base sur l'évaluation des coefficients d'une fonction de production macroéconomique, intégrant généralement les investissements dans les technologies numériques à travers l'introduction d'un facteur spécifique « capital numérique », à une approche économétrique faisant dépendre une variable endogène de productivité d'une série de variables intégrant parmi d'autres les investissements en biens et services numériques.

Dans l'approche globale, l'estimation d'une fonction de Cobb-Douglas permet une identification des composants de la croissance. La possibilité d'identifier par secteur la part du capital TIC dans le total du capital permet d'identifier et de distinguer dans l'écriture de la fonction les différents secteurs et d'y mesurer l'impact sur la productivité globale des facteurs de l'investissement dans les TIC (Muet, 2006). Elle ne prend toutefois pas en compte les apports des théories de la croissance endogène sur l'endogénéité des choix technologiques par rapport à la caractérisation des formes de travail et de capital productif, voire du contexte sociotechnique.

L'estimation de régressions économétriques, peut s'appliquer à l'échelle des secteurs et des firmes. La productivité du travail, généralement le PIB par heure travaillée, est la variable endogène, même si certaines démarches économétriques cherchent à mesurer l'impact des investissements dans les TIC sur la productivité globale des facteurs. (Draca et al., 2006).

Les résultats divergent selon les niveaux d'appréhension. Au niveau des firmes et des secteurs, ou prédomine l'approche économétrique, la relation entre TIC et productivité est généralement forte¹⁰. Ce résultat se retrouve au niveau des secteurs producteur d'équipement, ou fortement utilisateurs de ces équipements, en contraste avec les secteurs peu concernés par les TIC. Mais au niveau macroéconomique, comme on l'a vu, les résultats, à l'exception de la décennie 1995-2005, tendent à confirmer le maintien du paradoxe, que ce soit en référence à la productivité du travail ou à la productivité globale des facteurs.

Si le débat sur les méthodologies n'est pas spécifique au cas des TIC, la critique du calcul des variables permettant de mesurer la valeur ajoutée et la productivité renvoie cependant à une spécificité liée à la temporalité de l'innovation dans le secteur numérique et notamment à sa rapidité.

La critique se déploie en trois étapes : en premier lieu elle porte essentiellement sur la méthodologie comptable de calcul des indicateurs, tenant à la signification des indices de prix et la difficulté à distinguer les consommations intermédiaires de la formation de capital. Cela conduit à poser la question de la non prise en compte de l'évolution de la qualité des produits numériques au cours du temps et en arrière-plan celle de la définition de cette qualité. Une troisième étape part de l'identification des éléments produits par les technologies numériques mais non pris en compte dans l'évaluation de la valeur ajoutée du fait de leur nature intangible, tels que le « capital organisationnel », mais aussi la fourniture de services qui apparaissent comme des services gratuits.

Concernant le calcul des indices de prix, les produits numériques, équipements ou services numériques, sont soumis à une obsolescence qui peut se manifester sur un délai très court, inférieur à une année. Une baisse de prix d'un équipement dont l'efficacité a cru d'une année sur l'autre, liée par exemple à des nouvelles fonctionnalités, sera donc sous-estimée, majorant donc la valeur du capital et son coût d'amortissement pour un même niveau de production et donc sous-évaluant la hausse de la productivité (Biagi, 2013)

¹⁰ Brynjolfson et al. (2023) se situent même au niveau des tâches pour évaluer la relation entre productivité et IA générative.

Le débat se focalise en particulier sur la définition, et donc l'évaluation, des investissements en capital, notamment en référence au fait que ceux-ci intègrent des services numériques tels que par exemple les logiciels¹¹. Muet (2006) s'interroge sur la caractérisation du coût des logiciels informatiques et leur intégration dans le produit du secteur des TIC et dans les coûts des secteurs qui les utilisent : on peut considérer les logiciels comme un produit du secteur des TIC qui va apparaître comme un investissement du point de vue des utilisateurs. Mais dans certains cas, compte tenu de leur obsolescence très rapide, ils seront considérés comme une simple consommation intermédiaire. Ces deux options affectent de manière différente la mesure de la productivité du travail, puisque, selon l'option retenue les logiciels seront considérés comme un capital produit, augmentant le numérateur de la mesure de la productivité, ou comme une consommation intermédiaire qui le diminue. Selon Greenan et l'Horty (2002), cela explique en partie les différences d'impact des technologies numériques sur la productivité entre les USA et l'Europe : les comptes nationaux européens recensent fréquemment les achats de logiciels en consommations intermédiaires, comme les comptes privés, alors que les comptes nationaux américains les imputent systématiquement en investissement. Foster (2016) soulève également la question de la distinction entre inputs et output et de la mesure du capital : dans les années 2000 la comptabilité nationale aux USA s'est heurtée à plusieurs difficultés pour classer des éléments tels que les logiciels, les dépenses de R&D, les droits de copyright ou la publicité comme des éléments de capital ou des coûts dans la mesure de la productivité des industries numériques.

L'impact de la rapidité du rythme d'innovation sur la remise en cause de la définition des indices de prix, censés suivre des biens et services à qualité constante peut être assimilé à un « effet qualité », des biens et services numériques, appréhendé par une mesure quantitative de leur efficacité : Greenan et l'Horty, 2002 se réfèrent à cette approche lorsqu'ils affirment que la baisse du prix des équipements est généralement inversement proportionnelle à l'augmentation de leurs performances et donc sous-estimée si on retient une hypothèse d'efficacité constante. Mais l'effet qualité, au-delà du niveau d'efficacité d'une fonctionnalité identifiée d'un produit des TIC, renvoie à l'émergence de nouvelles fonctionnalités non prises en compte préalablement ce qui en élargit la portée : ainsi Cappello et al. (2022) reprend l'idée que la sous-évaluation de la croissance de la productivité pourrait être due à la non prise en compte de la « qualité » des nouveaux produits de la digitalisation, mais sans réellement renvoyer à une mesure quantitative. Au-delà de la relation entre qualité et impact sur les indices de prix, on peut s'interroger sur la définition de la qualité et sur son appréciation par les utilisateurs (alors qu'il est souligné que dans ce cas ce sont les services qui sont particulièrement concernés) : selon Muet (2006), l'effet qualité est liée à des performances potentielles qui doivent mobiliser les compétences des utilisateurs, non seulement en entreprise mais également dans le public, c'est-à-dire au-delà des limites du système productif.¹² Il concerne donc de manière significative non seulement le secteur productif qui commercialise ces biens et services, mais également la consommation, dans la mesure où les consommateurs les utilisent, en mobilisant un certain niveau de compétences.

De ce fait cette référence à l'effet- qualité des produits de l'innovation dans les TIC est très ambivalente : soit la qualité renvoie à l'efficacité des procédés basée sur ces objets techniques, qui devrait avoir un impact direct sur la productivité et donc être mesuré par sa hausse, soit la qualité renvoie à l'appréciation par les utilisateurs de ces produits, notamment les consommateurs, et, dans ce cas, on

¹¹ Van Ark et al. (2016) souligne que pour la période 2007-2016 les investissements dans les services numériques ont été plus importants que ceux dans les équipements et que la baisse du prix de ces services a été également plus rapide.

¹² Il souligne même que les entreprises ont investi dans internet une fois que son usage s'est répandu dans le public,

est renvoyé à la définition d'un accord entre offreurs et demandeurs sur la caractérisation de la qualité qui renvoie au « paysage » social dans lequel s'inscrit le processus. Le fait qu'une utilisation des prix hédoniques pour estimer la baisse réelle du coût des équipements intégrant l'effet qualité puisse être envisagée, plaide pour la seconde interprétation, à savoir la valorisation d'une caractéristique de qualité validée par les utilisateurs et les consommateurs et non objectivée uniquement par des caractéristiques techniques. L'utilisation des potentialités des ordinateurs par leurs utilisateurs, dont une partie se situe dans le public, c'est-à-dire hors organisation des entreprises, est inférieure à leur niveau théorique, ce qui rend l'effet qualité en partie virtuel. (Muet, 2006).

Le débat sur la mesure de l'effet qualité conduit donc à mettre en avant la relation entre TIC et consommation : les TIC n'impactent pas uniquement les processus de production mais aussi les processus de consommation et le bien-être. « L'effet qualité » des biens et services numériques impacte des processus liés aux modes de vie, par définition non liés à des transactions de marché. Ainsi les analyses du paradoxe de la productivité se focalisent sur l'ampleur du choc d'offre mais négligent l'aspect demande (Greenan et L'Horty 2002)¹³, et les externalités de la diffusion des technologies numériques dans le domaine des modes de vie et de la consommation pourraient modifier la mesure de leur impact (Biagi 2013)¹⁴. De ce fait l'impact différencié des TIC sur la productivité entre les USA et l'Europe dans la période 1995-2005 serait lié moins au niveau d'équipement du secteur productif, analogue dans les deux cas, qu'à la demande domestique d'équipement moins forte en Europe (Greenan et L'Horty 2002). Cette remarque suggère que les consommateurs européens étaient moins sensibles à la qualité de ces équipements, voire moins compétents pour les utiliser. Van Ark (2016) quant à lui souligne également que les investissements en services numériques concernent plus les secteurs de la distribution, donc proches de la consommation, que l'industrie à proprement parler.

L'effet qualité est donc dépendant de la compétence des utilisateurs dans l'utilisation de ces technologies, compétence qui opère de manière significative au-delà des limites de l'espace productif : Brynjolfsson et al. (2019) précise, à propos des innovations incrémentales liées au développement de l'e-commerce, que le changement organisationnel et de compétences ne concerne pas uniquement le secteur productif mais aussi les consommateurs : « *Customers had to be "retrained."* Par ailleurs s'il a un impact favorable sur le niveau de la consommation à travers l'amélioration du bien-être des utilisateurs, sans que cela puisse être mesuré au niveau du PIB et donc intégré à la mesure de l'impact sur la productivité, une telle interprétation de la sous-évaluation de cet impact pose renvoi à l'intégration du bien-être aux indicateurs économiques, au-delà de la mesure du revenu.

L'importance des investissements en actifs intangibles au-delà du capital physique générés par le recours aux technologies numériques est illustré par leur appréhension en termes de « capital organisationnel » (Muet, 2006, Van Ark, 2016 ;). Cet « actif intangible » contribue à la performance et à la durabilité d'une organisation ; il inclut les compétences, les connaissances et l'expertise des employés, les systèmes, les processus, les bases de données, les brevets, les marques déposées et les autres actifs immatériels de l'organisation, les réseaux avec les clients, fournisseurs, partenaires commerciaux et autres parties prenantes et enfin la culture organisationnelle, les valeurs partagées,

¹³ « L'ordinateur n'est pas seulement un facteur de production, c'est aussi un objet de consommation. La diffusion des technologies de l'information et des communications constitue à la fois un choc d'offre, comme celle de la dynamo ou du moteur à explosion, et un choc de demande, comme celle de l'automobile. Les analyses du paradoxe de la productivité se focalisent sur l'ampleur du choc d'offre et négligent l'aspect demande » (Greenan et L'Horty, 2002)

¹⁴ "The growth-accounting model looks at the supply or production side of the economy only. It does not investigate the impact of ICT on consumer behaviour and welfare (productivity effects that take place in the household production and consumption process)". (Biagi, 2013)

les normes et les croyances ainsi que la capacité de l'organisation à générer de nouvelles idées, à adopter des technologies émergentes et à s'adapter aux changements du marché.

Leur non-prise en compte sous-évaluerait la productivité mais le problème de leur mesure, en l'absence d'unités de comptabilisation, reste ouvert¹⁵. Elle serait possible à travers l'évaluation de leur « prix hédonique » : par exemple la différence entre le prix des équipements et le prix de rachat de la firme qui les utilisent. La valorisation des start-ups pourrait en être un exemple : selon Muet (2006) le financement de la recherche-développement à travers de « start-ups », non rentables au départ mais rachetées ensuite à un prix qui intègre leur investissement en capital organisationnel. Mais il reconnaît que ce rachat n'est pas garanti et qu'une partie d'entre elles va disparaître. Il ne s'interroge pas cependant sur le coût de cette disparition, qui correspond à une perte d'actif intangible, alors même qu'en général elles n'ont pas été rentables durant leur vie.

Parmi les actifs non pris en compte par l'évaluation de la productivité, on compte des services fournis par les technologies numériques à l'ensemble des utilisateurs mais qui ne donne lieu à aucune transaction enregistrée et apparaissent donc comme gratuits.

La difficulté d'évaluation pour leur intégration au PIB et au revenu est liée à leur intangibilité (pas d'unités discrètes) et leur gratuité, mais ils génèrent aussi un recouvrement entre production et consommation (Foster, 2016 ; Ahmad et Scheyer, 2016) : le consommateur fournit des inputs informationnels utilisés pour le financement par la publicité de ces services et participe donc à la production. Ces « services gratuits » sont donc une externalité d'une activité de production qu'ils permettent.

Muet (2006) signale déjà que les services gratuits sur le net, tels que ceux financés par la publicité, qui apparaît ainsi comme une consommation intermédiaire des entreprises qui la diffusent, n'entrent ni dans le PIB, au numérateur des indices de productivité, ni dans la consommation des ménages et donc dans leur revenu. Foster (2016) reprend la question de la mesure de la production de services numériques au départ considérés comme non productifs, question qui se fait plus pressante au fur et à mesure du développement des TIC et de la digitalisation qui renvoient justement à ce type de services. La digitalisation accentue en effet la tendance à l'effacement de la limite entre consommation et participation à la production (Ahmad et Schreyer, 2016) : de nouvelles formes d'intermédiation, de fourniture de services et de consommation non intégrés à la mesure de la valeur ajoutée apparaissent, telles que les plateformes facilitant les transactions « peer-to-peer » entre consommateurs : logement, transport, distribution ou B-to-P, entre producteurs et consommateurs

Ces structures remettent en cause la mesure traditionnelle des revenus et du PIB, malgré l'enregistrement formel des intermédiaires, qui en principe enregistrent les transactions notamment du fait de :

- L'extraterritorialité des intermédiaires qui affecte l'enregistrement
- Le recouvrement entre consommation et capital productif.
- L'évaluation de l'activité de production des consommateurs

Ces actifs basés sur la connaissance perturbent l'évaluation des PIB nationaux (Ahmad et Schreyer, 2016), du fait de leur usage en dehors de leur lieu de production sans que le transfert puisse être

¹⁵ Brynjolfsson et al. (2021) considèrent que l'évolution de la balance entre input et output intangibles permet de rendre compte d'une courbe en J des effets d'une « General Purpose Technology » sur la productivité avec un premier impact négatif où les inputs dominent et un second impact positif où l'effet sur les outputs est dominant, soit une interprétation en cohérence avec la thèse du délai d'adoption.

correctement évalué, comme le montre la question de l'évaluation du e-commerce transfrontalier surtout pour les services, par exemple le streaming.

La difficulté de distinguer les biens de consommation durables et l'investissement productif dans les transactions entre particuliers est illustrée par l'exemple des locations Airbnb : Le loyer potentiel est une mesure du revenu du propriétaire résident mais les loyers Airbnb sont plus élevés et constituent aussi des loyers potentiels. De même dans le cas de services de transport (type blablacar) comment distinguer la consommation de biens durables de l'investissement en capital ? Les véhicules sont-ils des biens de consommation ou capital productif ? Or la mesure du capital intervient dans l'évaluation de la productivité globale des facteurs

Dans les transactions B-to-C on assiste à la prise en charge par les consommateurs de tâches de production dans la fourniture des services : par exemple dans le cas d'une réservation d'un service de transport ou de logement (Booking, Opodo, etc), d'un rendez-vous médical (doctolib), etc. ce qui renvoie au débat ancien sur la mesure de la production pour l'autoconsommation.

Il est difficile de mesurer l'activité des « auto-entrepreneurs occasionnels » intervenant pour l'intégrer à la mesure du PIB. L'évaluation des services gratuits fournis aux consommateurs non pris en compte dans leur consommation peut renvoyer à deux cas : soit le financement du service se fait par la publicité, diffusée par le fournisseur du service et financée par les entreprises concernées, soit il est la contrepartie de la fourniture de données par les consommateurs, alimentant les bases de données du « big data ».

Dans le premier cas différentes interprétations sont possibles (Ahmad et Schreyer, 2016) :

- Le financement des services par la publicité constitue un transfert en nature qui rentre dans la consommation
- Ou le paiement du service gratuit se fait par la hausse du prix des produits couverts par la publicité ce qui augmente le PIB
- Ou on considère que le temps passé par le consommateur à consulter le service est rémunéré par la valeur de la publicité mais cette valeur est transférée au fournisseur du service ce qui augmente le revenu et le PIB

Mais ces interprétations ne tiennent pas compte de la valorisation en termes d'utilité, voire de bien-être, de ces services par le consommateur.

Dans l'autre cas, la fourniture de données dans le cadre des big data finance les services et est implicitement le paiement du service rendu. Mais on peut s'interroger sur la base de son évaluation. Celle-ci intègre le coût du processus de digitalisation des données mais pas la valeur des données en elle-même.

Ahmad et Schreyer (2016) identifient ainsi les défis posés par le lien entre TIC et sphère de la consommation pour la mesure de la production et de la productivité dans la comptabilité nationale. S'ils soulignent que ces problématiques ne sont pas nouvelles, ils insistent sur leur ampleur et leur impact dans le contexte du développement de la révolution numérique. Même s'ils se refusent à prendre en compte la dimension du bien-être, au motif qu'ils existent des indicateurs spécifiques pour le mesurer et que leur intégration à la comptabilité nationale est trop complexe, il reste que l'évaluation du PIB et de la productivité, qui conduit par exemple à une évaluation du revenu par tête est considérée comme une évaluation, certes imparfaite, du bien-être des consommateurs. Gordon (2016 et 2018) en relevant ce qu'il considère comme un épuisement de la croissance dans le contexte de la 3ème

révolution industrielle plus rapide que pour la 2ème, considère quant à lui que l'effet sur le bien-être des technologies numériques est encore plus fort que l'effet sur le revenu.

Ces questions posées en matière d'évaluation des variables intervenant dans l'évaluation de la productivité ne concernent pas uniquement le secteur des TIC, dans la mesure où elles se posent de manière générale pour le système de prix et la mesure de la valeur¹⁶ qui concerne l'ensemble de l'économie. Mais elles prennent une importance particulière dans le cas des technologies numériques et génèrent des débats qui semblent remettre en cause implicitement des distinctions fondamentales de la comptabilité d'une économie de marché. Cette importance est en partie conditionnée par un élément spécifique : l'identification d'externalités importantes, positives ou négatives, renvoie implicitement à la caractérisation des biens et services numériques en lien avec l'information, « matière première » fondamentale de ces biens et services, qui apparaît intégrée au spectre des biens publics. Sa prise en compte permet de dépasser la simple approche en termes de méthodologie de la mesure de la productivité.

La question de la nature de bien public de l'information est liée au fait que l'information est un bien non rival, même s'il peut être exclusif. Elle est posée notamment en référence aux externalités non prises en compte par le marché qu'elle implique, dont on a vu qu'elle impacte la mesure de la productivité en liaison avec l'impact des technologies numériques, notamment autour de la question des actifs intangibles.

Cette caractéristique de l'information est soulignée dès la première phase du débat sur le paradoxe : David (1990) reconnaît la spécificité de l'information comme bien caractérisé par la non-rivalité et coût de transfert très faible, qui ne permettent pas de s'appuyer sur les mécanismes de marché traditionnels pour son évaluation¹⁷. Cette dimension est mentionnée régulièrement dans les étapes suivantes du débat.

Muet (2006), qui considère cependant « dépassé » le paradoxe, compte tenu de la croissance de la productivité de la fin des années 90, insiste sur l'importance des phénomènes de réseau dans la diffusion de l'information et reconnaît sa nature de bien public qui transforme la nature même des économies¹⁸. Carlow et al. (2008) met en avant la non-rivalité de l'information comme sa caractéristique essentielle, ce qui génère des rendements croissants du fait du coût marginal nul de la transmission d'information, associé à l'externalité résultant de l'augmentation de la taille du réseau, censée bénéficier à tous ses membres. Par contraste, dans des contributions plus récentes, cette même caractéristique est reliée à l'importance des comportements de recherche de rente de la part des acteurs les plus puissants des secteurs de l'innovation (Cappello et al. 2022, Aghion et al. 2019), qui renvoient à la structure monopolistique des secteurs concernés et donc en arrière-plan sur leur nature de bien non rival qui conduit à la nullité du coût marginal.¹⁹ La structure monopolistique se traduit

¹⁶ La question de la relation entre indicateurs de revenu et indicateur de bien-être pour l'appréciation du niveau de vie en est une illustration.

¹⁷ Cela le conduit d'ailleurs à signaler un risque possible de surinformation (« information overload »), compte tenu de son coût marginal nul, qui peut selon lui conduire à détourner vers le traitement de ces informations des ressources humaines utilisées pour d'autres activités, ce qui constituerait une externalité négative.

¹⁸ « 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 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 ».

¹⁹ Selon Van Ark 2016 "Many digital products and services can be produced at such low marginal cost that they can essentially be provided for free."

selon Aghion et al. (2019) par une inégalité très forte de la rentabilité entre les quelques « superstars » du secteur des TIC, qui bénéficient d'un capital organisationnel et d'un réseau plus important (associé également par l'auteur à une plus grande capacité d'évasion fiscale) et l'ensemble des suiveurs utilisant ces technologies. De ce fait un « boom » initial de la hausse de la productivité, liée à l'existence de ces « superstars », pourrait être suivi d'une plus faible innovation globale et hausse de productivité et donc rendre compte du paradoxe.

Si l'impact sur la structure des marchés liés à cette révolution technologique, notamment leur structure monopolistique et les effets de réseau manifestant un coût marginal nul, est reconnue, cette nature de bien public conduit à prendre en compte les externalités qu'elle implique, qu'elles soient positives ou négatives. Certaines contributions, notamment celles des décennies 1990 et 2000, mettent en évidence essentiellement des externalités positives : la non-rivalité de l'information est considérée comme une source essentielle de l'impact des TIC sur la productivité. Par exemple Muet (2006) souligne notamment les effets de la diffusion de l'information et des compétences au sein des collectifs de travail, en dehors même des initiatives spécifiques des entreprises, ce qui conduit à une diffusion au-delà de l'entreprise et même au-delà du système productif stricto sensu. Comme soulignés plus haut, les « actifs intangibles » supposés non mesurés par les statistiques de productivité rentrent en partie dans ces effets externes. Dans la période récente cependant, l'existence d'effets négatifs a été largement documentées aux niveaux sociologique et politique, par exemple à propos du rôle des réseaux sociaux sur un certain nombre de phénomènes sociétaux, comme les formes de harcèlement, la diffusion de fausses informations, les différentes formes de cybercriminalité, etc. Ces externalités négatives des innovations numériques se manifestent donc non seulement au niveau des unités de production mais également au niveau de l'activité de consommation et plus largement des modes de vie et de la société.

Ces éléments sont plus rarement invoqués dans l'évaluation du bilan économique de l'impact effectué par la littérature, alors qu'elles pourraient contribuer à expliquer le décalage entre les données sectorielles et globales de productivité. Néanmoins Aghion et al. (2019) souligne les effets sur l'emploi, mentionnés également par Cappello (2022), mais il insiste sur leur répartition inégalitaire, visant les « routine jobs » de la classe moyenne, dont le statut social se trouve ainsi menacé. Gutu (2019) souligne l'impact des outils numériques sur la perception des « externalités de positionnement » au sein et entre les « groupes de référence » des consommateurs, avec un impact sur la perception de leur bien-être, liée à leur positionnement social, et sur la surconsommation qui peut en résulter²⁰. Koizumi (2019) aborde quant à lui les externalités négatives notamment au point de vue du fonctionnement politique. Gordon (2016) quant à lui insiste sur la faible contribution en matière de croissance et de bien-être de la 3^{ème} révolution industrielle, comparée à la seconde. Mais il faut reconnaître que l'impact sociétal est relativement peu abordé par la littérature alors qu'il peut générer des coûts impactant le niveau de productivité de l'économie.

Finalement il faut souligner le lien entre les questions abordées précédemment et la nature de bien public de l'information : les problématiques de mesure de l'impact des TIC sur la productivité renvoient en partie à la non-rivalité de l'information et à ses conséquences sur les structures de production et de consommation. Par ailleurs le délai entre la mise en évidence des externalités positives lié à ce statut de bien public et l'accent mis sur la possibilité d'externalités négatives peut être rattachée également

²⁰ On peut faire le lien entre cette question et la mise en évidence de l'importance des émotions dans la définition des comportements économiques, qui peut conduire au ressentiment ou à l'humiliation chez certains (Requier-Desjardins, 2022).

à la problématique du délai d'adoption de ces technologies, dans la mesure où elle résulte d'une diffusion de ces effets au-delà du système productif.

En guise de conclusion : travail, activité, économie de marché.

Les questions soulevées par le débat sur le paradoxe de Solow ne sont pas en elles-mêmes nouvelles, qu'elles portent sur l'évaluation des variables, sur la prise en compte d'externalités, ou sur l'économie de la consommation. Mais elles ont pendant longtemps été importantes dans des domaines spécifiques : par exemple l'économie du développement a dû les prendre en compte dans l'approche du secteur informel, des formes d'agriculture avec une importante autoconsommation, etc.... L'élément nouveau est la portée de ces interrogations, générées par des technologies à vocation universelle affectant tous les aspects du système productif et plus largement des modes de vie.

De l'examen de l'argumentaire mobilisé dans le débat sur le paradoxe de Solow se dégage une première conclusion : l'importance de la question de la temporalité dans ces analyses

- Cette importance est d'abord illustrée par le débat sur la durée d'impact du développement d'une technologie type GPT et de la trajectoire technologique qu'elle génère engendrant une « révolution industrielle ». Celle-ci renvoie à l'identification d'une innovation de rupture associée à un paradigme technologique. Le débat a mis en évidence une incertitude sur cette identification (3^{ème} ou 4^{ème} révolution industrielle ?), ayant permis par ailleurs de relancer le débat sur le paradoxe.²¹
- La temporalité est également un élément important sur la mesure des indicateurs de productivité, en liaison avec l'appréhension de la rapidité du développement des technologies, dans la mesure où elle structure la réflexion sur la mesure du capital et la définition des biens et services qui le composent.
- La temporalité intervient enfin dans la définition des frontières du système productif dans la mesure où celle-ci renvoie à la place de la production sur les budgets-temps et identifie des temps qui peuvent être à la fois temps de production et temps de consommation.

L'appréhension de la temporalité apparaît donc comme un élément de caractérisation des concepts de l'analyse économique remis en question par l'émergence des technologies numériques. Elle s'associe également à la remise en cause des frontières entre système productif et consommation et plus largement à des interrogations sur les limites de la régulation par le marché, qui renvoie justement à la définition et à l'opérationnalité de ces concepts.

Les « échecs du marché » liés au développement des TIC, sont liés à des caractéristiques telles que sa structure monopolistique, l'existence de rentes de situation liés à cette structure et la non prise en compte par les prix de marché des effets externes induits, mais également à l'effet sur le bien-être de biens et services produits au sein des ménages, qui relèvent de ce qu'il est convenu de qualifier de « sphère de la consommation », et par définition non évalués par le système de prix, ainsi que les services fournis aux ménages par les gouvernements (Foster, 2016)²².

²¹ Cette incertitude concerne également la seconde révolution industrielle. Ses externalités négatives n'ont-elles pas mis plus d'un siècle à se manifester, à travers notamment ses conséquences environnementales alors que celles des révolutions numériques sont immédiates ?

²² Foster (2016) "*neither GDP nor the productivity measures it enables account for "household production" or any other activity producing outputs that are not commodified, such as unpaid care work, many kinds of volunteer work, and exchanges of services and goods among community members. In addition, as Stiglitz, Sen, and Fitoussi emphasized, publicly provided (i.e., government) services, and services that are paid for by a third party (e.g.,*

Le champ des effets des innovations numériques s'étend donc du domaine du travail considéré comme productif (salarial ou indépendant) à celui plus large des activités qui renvoie aussi à la consommation et plus largement aux modes de vie. Comme le soulignait déjà Muet (2006) les technologies numériques ont eu un impact considérable sur l'organisation du travail et sur le marché du travail lui-même²³. Au-delà elles impactent l'ensemble des pratiques sociales au-delà de ce qu'il est convenu d'appeler les activités productives. Elles sont notamment censées élever les compétences non seulement au sein du système productif mais également dans ce qu'il est convenu de considérer comme relevant de la consommation avec un effet en retour sur la sphère productive²⁴. L'utilisation des biens et services numériques par les consommateurs nécessite en effet un niveau de compétence qu'ils peuvent avoir acquis dans leurs activités productives ou en dehors mais qui conditionne la perception de la « qualité » de ces biens et services, liée aux « caractéristiques » recherchées des biens et services numériques.

Cela conduit à une approche de la consommation qui reprend l'approche de Becker (1965) de la nouvelle économie des ménages, ou celle de Lancaster (1971)²⁵ basée justement sur la notion de caractéristique et qui définit une fonction de production du consommateur. Le niveau de compétence des consommateurs dans l'utilisation des technologies numériques définit cette fonction de production. Elle peut se traduire notamment par une utilisation considérée comme non optimale des équipements et des services qui aurait un effet direct sur la productivité à l'échelle globale, mais aussi sur le bien-être. Mais il faut également prendre en compte la définition des caractéristiques recherchées à travers l'utilisation des technologies numériques dans cette fonction de production du consommateur. Celles-ci peuvent ne pas inclure l'ensemble des possibilités théoriques ouvertes par ces technologies.

Par ailleurs, dans la mesure où production et consommation utilisent les mêmes technologies, ce recouvrement contribue à brouiller la frontière entre temps de travail productif de valeur et temps consacré à des activités autres, supposées non productives. Un des indices en est le développement du télétravail (même s'il a été lié à un contexte sanitaire et si son développement semble marquer le pas depuis la fin de la pandémie), dans la mesure où le passage du travail à une activité « hors-travail » est particulièrement simple, dans un sens comme dans l'autre, au sein d'un temps qui ne peut plus être institutionnellement divisé entre travail et non-travail. L'autre indice résulte dans la difficulté d'établir une distinction claire dans le domaine numérique entre des catégories pourtant fondamentales dans l'analyse économique, telles qu'investissement, coût, production ou consommation. Elles rendent encore plus nécessaire la prise en compte des activités non rémunérées dans l'approche de la création

medical services by health insurers), posed their own conceptual challenges. Specifically, they argued that the relationship between "government-provided individual services" and people's well-being is qualitatively different from the relationship between privately purchased consumer goods and quality of life." (Foster, 2016)

²³ « 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... [elles ont] un effet positif sur la productivité en augmentant la productivité des salariés qualifiés et très qualifiés, développement du travail indépendant, du temps partiel, de la sous-traitance et des activités de conseil. » (Muet, 2006).

²⁴ « 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 bureaucratisation 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... les travailleurs de l'ère informationnelle mobilisent un bagage culturel au moins partiellement acquis en dehors de leurs activités de travail. » Muet (2006)

²⁵ Cette fonction de production a pour facteurs les biens et services disponibles définis par leurs caractéristiques et combinent ces biens et services pour produire le panier de caractéristiques valorisés par le consommateur.

de valeur, activités qui peuvent apparaître comme des externalités liées à la caractéristique de bien public de l'information.

La considération de l'ensemble travail et activité permet d'ailleurs de mettre l'accent sur une des limites de la révolution numérique, à savoir la disponibilité du temps pour utiliser ces technologies²⁶, qu'il s'agisse d'un temps de travail salarié ou indépendant dans le cadre d'une activité productive, ou d'un temps en dehors de ce cadre, classé comme non productif. Dans la mesure où dans les deux cas les mêmes technologies sont concernées, la contrainte temporelle s'exerce globalement : le temps constitue une limite de plus en plus importante à l'extension de la consommation digitale.²⁷

Cela conduit donc à reconsidérer dans leur globalité l'ensemble des activités qui constitue les modes de vie et les choix qui leurs sont associés. Les choix de vie, mis en avant par l'approche des capacités, sont élargis par les technologies numériques qui correspondent à des fonctionnements spécifiques. Mais ces technologies impactent également les budgets-temps, éventuellement au détriment du temps de travail productif. Par ailleurs elles accroissent les inégalités d'accès aux fonctionnements liés au numérique et donc l'inégalité d'accès aux capacités.

Ces différents éléments tendent à montrer que l'émergence des technologies numériques met en cause de manière déterminante le marché comme processus de régulation. Ces phénomènes ne sont pas nouveaux dans le fonctionnement des économies capitalistes mais l'ubiquité des technologies numériques, de la généralisation des ordinateurs à l'intelligence artificielle, font que le marché en tant que mode de régulation de l'économie risque d'être de plus en plus marginalisé, derrière un paravent qui continue à utiliser des concepts tels que les prix ou la demande. La rapidité de transfert et de traitement de l'information liée aux technologies numériques peut certes permettre, dans une référence à la conception hayekienne de la dimension cognitive du marché, une réactivité plus forte face aux évolutions du marché. Encore faut-il maîtriser ces technologies au niveau individuel, ce qui pose la question des compétences personnelles, bien au-delà des limites du secteur productif.

Cela pose le problème de la régulation publique comme alternative.²⁸ Même si le rôle de l'Etat reste déterminant, d'autres niveaux peuvent certes être sollicités, à l'échelle des régions ou au niveau international, mais la concentration du secteur ainsi que l'intangibilité des effets de ces technologies réduisent l'effectivité des mesures territorialisées. Cela élargit le champ des possibilités de « government failures ».

Enfin la relation entre technologies digitales et productivité pose la question de la signification de la croissance économique, à l'heure où s'impose un débat sur l'hypothèse d'une décroissance qui serait nécessaire pour assurer la préservation du climat et des écosystèmes. D'une part elle limite la portée du débat sur la signification d'un taux de croissance, d'autre part elle relativise la croissance du bien-être résultant de l'innovation technologique dont on sait par ailleurs que son empreinte carbone est particulièrement élevée et en croissance continue. Il existe donc une opportunité de réduction des externalités négatives des technologies numériques à laquelle serait associée une réduction de l'empreinte écologique.

²⁶ Les ajustements actuels des plateformes de streaming seraient liés en partie à la restriction des budgets-temps qui peuvent leur être consacrés par les utilisateurs.

²⁷ Le poids de la contrainte des budgets-temps sur la pratique numérique est parfois évoqué, par exemple par Olivier Passet (2023).

²⁸ La dimension des politiques est soulignée notamment à propos de l'IA par Aghion et al. 2019.

Références

- Aghion, P., Antonin, C. & Bunel, S. (2019). Artificial Intelligence, Growth and Employment: The Role of Policy. *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, 510-511-512, 149–164
- Ahmad N., Schreyer P. (2016): Are GDP and Productivity Measures Up to the Challenges of the Digital Economy? *International Productivity Monitor*, N° 30, Spring 2016, pp 4-27.
- Becker G. (1965). "A theory of the allocation of time". *The Economic Journal*. 75 (299): 493–517.
- Benassi B., Grinza E., Rentocchini F., Rondi L. (2022): Patenting in 4IR technologies and firm performance. *Industrial and Corporate Change*, 2022, 31, 112–136
- Biagi F. (2013): ICT and Productivity: A Review of the Literature, *Digital Economy Working Paper 2013/09*, European Commission Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Report EUR 26216 EN, 68p.
- Brynjolfsson E, Li D., Raymond L. R. (2023) Generative AI at work, *Working Paper 31161*, NBER, Cambridge, MA 02138, April 2023, revised November 2023
- Brynjolfsson E., Korinek A., Neil Bailey M. (2023): Can artificial intelligence actually increase human productivity? *World Economic Forum 16 May 2023*
- Brynjolfsson E., Rock D., Syverson C. (2021): The Productivity J-Curve: How Intangibles Complement General Purpose Technologies *American Economic Journal: Macroeconomics*. Jan 2021, Vol. 13, No. 1: Pages 333-372
- Brynjolfsson E., Rock D., Syverson C. (2017): Artificial Intelligence and the Modern Productivity Paradox: a clash of expectations and Statistics, *Working Paper 24001*, NBER November 2017 <http://www.nber.org/papers/w24001>
- Calvino F., Fontanelli L. (2023): A portrait of AI adopters across countries, *OECD Science Technology and Industry working papers*, 86p
- Cappello R., Lenzi C., Perucca G. (2022): The modern Solow paradox. In search for explanations, *Structural Change and Economic Dynamics* 63 (2022) 166–180
- Carlaw K. I., Lipsey R. G., Webb R. (2008): Has the ICT Revolution Run its Course? *International Congress on Environmental Modelling and Software*. 262. <https://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2008/all/262>
- Cette G., Nevoux S., Py L. (2020): The impact of ICTs and digitalization on productivity and labor share: Evidence from French firms, *Working Paper, n° 785*, Banque de France, November 2020, 26p.
- Cirera X., Lage F., Sabetti L. (2016): ICT Use, Innovation, and Productivity: Evidence from Sub-Saharan Africa, *Policy Research Working Paper 7868*, World Bank Group, Trade and Competitiveness Global Practice Group, October 2016
- Damioli G., Van Roy V., V. Daniel (2021): The impact of artificial intelligence on labor productivity, *Eurasian Business Review* (2021) 11:1–25

- David P.A. (1990): The Dynamo and the Computer: An Historical Perspective on the Modern Productivity Paradox, January 1990, *American Economic Review* 80(2):355-61
- Draca M., Sadun R., Van Reenen J. (2006): Productivity and ICT: A Review of the Evidence, *CEP Discussion Paper No 749*, August 2006, Centre for Economic Performance, MIT, 72p
- Fernald J. G., Ramnath S, (2004). "The acceleration in U.S. total productivity after 1995: the role of information technology," *Economic Perspectives*, Federal Reserve Bank of Chicago, vol. 28(Q I), pages 52-67.
- Foster K. R. (2016): *Productivity and Prosperity: A Historical Sociology of Productivist Thought*, University of Toronto Press, 304p.
- Geels F. W., Sovacool B. K., Schwanen T., Sorrell S. (2017): The Socio-Technical Dynamics of Low-Carbon Transitions, *Joule* 1, 463–479, November 15, 2017
- Gordon R. (2018). Why has economic growth slowed when innovation appears to be accelerating? *Working Paper 24554* NBER
- Gordon R. (2016): *The rise and fall of American Growth*, Princeton University Press, Princeton, 762p.
- Greenan N., L'Horty Y. (2002) : Le paradoxe de la productivité, *Travail et Emploi* no 91 • Juillet 2002, pp 31-42
- Guțu V. (2019): *The American consumerism – a context for positional concerns, excessive consumption, and government intervention*, Bachelor Thesis, Stockholm School of Economics, Riga, 63pp
- Koizumi S. (2019): The Light and Shadow of the Fourth Industrial Revolution, in "*Innovation Beyond Technology*" (Delapierre éd.) pp 63-86
- Lancaster K (1966): A new approach to consumer theory, *Journal of Political Economy*, 1966
- McElheran K., Li F., Brynjolfsson E., Kroff Z., Dinlersoz E., Foster L., Zolas N. (2024): AI adoption in America: Who, what, and where, *Journal of Economics & Management Strategy* · January 2024, 33:375–415.
- Muet P.-A. (2006) : Impacts économiques de la révolution numérique, *Revue économique*, 2006/3 Vol. 57 | pages 347 à 375
- Parteka A., Kordalska A. (2023): Artificial intelligence and productivity: global evidence from AI patent and bibliometric data, *Technovation* 125 (2023) 102764, 16p
- Passet O. (2023) : Derrière les crises, quelle CRISE du capitalisme ? *Xerfi canal*, 4 mai 2023 .
- Remes J., Manyika J., Bughin J., Woetzel J., Mischke J., Krishnan M. (2018): *Solving the Productivity Puzzle: The Role of Demand and The Promise of Digitalization*, February 2018, McKinsey Global Institute, 20p.
- Requier-Desjardins D. (2022) : "Méritocratie, humiliation, souffrance, épreuves, et « élites multiples ». Une mise en dialogue de contributions récentes." *Journal Ethics, Economics and Common Goods* 19 (2) : 9-32
- Solow R. M. (1987): We'd Better Watch Out, *New York Times Book Review*, July 12, 1987

Van Ark B., Inklaar R., McGuckin R. H. (2003): The Contribution of ICT-Producing and ICT-Using Industries to Productivity Growth: A Comparison of Canada, Europe and the United States, *International Productivity Monitor*, n°6, spring 2003, pp 56-63

Van Ark B. (2016): The Productivity Paradox of the New Digital Economy, *International Productivity Monitor*, n° 31, Fall 2016, pp 3-18

Van Ark B., De Vries K., Erumban A. (2021): How not to miss a productivity revival once again, *National Institute Economic Review* (2021), 255: 1, 9–24.

Zervoudi E. K. (2020): Fourth Industrial Revolution: Opportunities, Challenges, and Proposed Policies Industrial Robotics - New Paradigms in Fourth Industrial Revolution: Opportunities, Challenges, and Proposed Policies, DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.90412>