

AJUSTEMENT MACROÉCONOMIQUE AUX TECHNOLOGIES MULTI-USAGES

Peter Howitt and Philippe Aghion

Volume 96, Number 4, December 2020

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1087021ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/1087021ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

HEC Montréal

ISSN

0001-771X (print)

1710-3991 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Howitt, P. & Aghion, P. (2020). AJUSTEMENT MACROÉCONOMIQUE AUX TECHNOLOGIES MULTI-USAGES. *L'Actualité économique*, 96(4), 657–675. <https://doi.org/10.7202/1087021ar>

Article abstract

This paper examines the macroeconomic effects that follow from the introduction of what Bresnahan and Trajtenberg have called a "general-purpose technology" (GPT), such as the computer. The analysis is based on the idea that a new GPT accelerates the pace of technological change by spawning a wave of secondary innovations aimed at improving upon and realizing the potential of the original GPT. The paper analyzes the channels through which such an increase in the pace of technological change might reduce the measured level of economic activity for some period before it ultimately brings the economy to a higher growth path. Two such channels are capital-obsolescence and the failure to measure knowledge-investment in the national accounts. A simple endogenous growth model that was constructed and calibrated to the US economy, predicts that capital-obsolescence is the more significant of the two channels, and that through this channel, output can fall below its no-shock path for almost 3 decades after the introduction of a new GPT.

AJUSTEMENT MACROÉCONOMIQUE AUX TECHNOLOGIES MULTI-USAGES*

Peter HOWITT
Ohio State University,
CIAR

Philippe AGHION
University College London,
EBRD

RÉSUMÉ – Cet article examine les effets macroéconomiques résultant de l'introduction de ce que Bresnahan et Trajtenberg appellent une «technologie multi-usages» (TMU) comme, par exemple, la technologie informatique. L'analyse est basée sur le principe qu'une nouvelle TMU accélère le rythme de changement technologique en créant une vague d'innovations secondaires destinées à améliorer et à atteindre le potentiel de la TMU d'origine. Cet article étudie les voies à travers lesquelles une hausse du rythme de changement technologique pourrait réduire le niveau d'activité économique mesuré avant de conduire l'économie à un niveau de croissance supérieur. Deux voies sont l'obsolescence du capital et l'absence de mesure de l'investissement de la connaissance dans les comptes nationaux. Un modèle de croissance endogène simple qui a été construit et adapté à l'économie américaine prévoit que l'obsolescence du capital est la plus significative des deux voies, et que, dans ce cas, la production sera pendant près de trois décennies inférieure à ce qu'elle aurait été sans l'introduction de la nouvelle TMU.

ABSTRACT – This paper examines the macroeconomic effects that follow from the introduction of what Bresnahan and Trajtenberg have called a «general-purpose technology» (GPT), such as the computer. The analysis is based on the idea that a new GPT accelerates the pace of technological change by spawning a wave of secondary innovations aimed at improving upon and realizing the potential of the original GPT. The paper analyzes the channels through which such an increase in the pace of technological change might reduce the measured level of economic activity for some period before it ultimately brings the economy to a higher growth path. Two such channels are capital-obsolescence and the

* Cet article a été présenté par Peter Howitt lors de son allocution d'ouverture à l'assemblée conjointe de l'ASDEQ et de la SCSE tenue à Montréal, le 15 mai 1997. Il s'inspire des travaux sur les technologies multi-usages réalisés par plusieurs membres du *Economic Growth and Policy Program* du CIAR. Ces travaux feront l'objet d'un volume édité par Helpman (1997). Cet article est aussi bâti sur les travaux que les auteurs ont effectués lors de la préparation de leur volume (1997a) sur la théorie de la croissance endogène.

failure to measure knowledge-investment in the national accounts. A simple endogenous growth model that was constructed and calibrated to the US economy, predicts that capital-obsolescence is the more significant of the two channels, and that through this channel, output can fall below its no-shock path for almost 3 decades after the introduction of a new GPT.

INTRODUCTION

La technologie informatique est un exemple de ce que Bresnahan et Trajtenberg (1995) appellent une technologie multi-usages (TMU), c'est-à-dire une technologie qui affecte radicalement les méthodes de production de l'ensemble de l'économie¹. À l'instar d'autres TMU telles que la machine à vapeur ou l'énergie électrique, la technologie informatique ne consiste pas en une innovation unique, mais en une pépinière, ou une vague, d'innovations. Une découverte en rend d'autres possibles, des composantes et des technologies complémentaires sont développées, les problèmes engendrés par l'utilisation de la nouvelle technologie stimulent les innovations destinées à les résoudre et la possibilité d'utiliser la technologie à des fins inattendues commence à apparaître. Ainsi, l'introduction et la croissance de la technologie informatique ont été accompagnées d'une hausse rapide du rythme de changement technologique.

L'accélération du changement technologique associé à l'informatique a créé de sérieux problèmes d'ajustement, aussi bien pour les ménages que pour les firmes. De vieilles méthodes, des emplois, des professions, des maisons de commerce, des tendances géographiques et des relations de travail ont dû être relégués aux oubliettes. Et les individus ont dû apprendre de nouvelles méthodes, trouver de nouveaux emplois, occuper de nouvelles professions, créer de nouvelles entreprises, se relocaliser, et tisser de nouveaux liens. Le prix de l'ajustement à la TMU a été payé par ceux qui ont été contraints de faire, entre autres, cet ajustement.

L'objet de cet article est de montrer que les coûts de l'ajustement à la TMU sont importants, non seulement au niveau individuel, mais aussi au niveau macroéconomique. Plus précisément, cet article identifie deux mécanismes, l'un relatif au chômage et l'autre relatif à l'obsolescence du capital, à travers lesquels l'introduction d'une TMU risque fortement de réduire le taux de croissance économique pendant une longue période, avant de porter fruit et de permettre une hausse de la production par personne. Dans une certaine mesure, l'effet de la TMU est exagéré parce que le traitement que les comptes nationaux réservent à la connaissance est erroné. Toutefois, ce problème persisterait même en l'absence d'erreur de mesure. En effet, la difficulté à mesurer l'obsolescence amène probablement les comptes nationaux à sous-estimer le ralentissement de la production nette.

1. Voir Lipsey, Bekar et Carlaw (1997) pour une analyse approfondie de ce qui constitue une TMU.

Le thème secondaire de cet article est que la branche schumpéterienne de la théorie moderne de la croissance endogène procure un cadre de travail qui permet d'étudier la relation changeante entre la croissance et les cycles. Ce cadre de travail, contrairement aux théories plus globales fondées sur le capital et d'abord apparues dans les premiers articles de Romer (1986) et Lucas (1988), met explicitement l'accent sur le processus d'innovation, source du progrès technologique à l'origine de la croissance observée à long terme. Plus précisément, ce cadre de travail permet de constater non seulement les gains engendrés par l'innovation technologique, mais également les coûts. Ces coûts surgissent parce qu'un grand nombre de changements technologiques engendre ce que Schumpeter appelle de la destruction créatrice. L'objectif de cet article est de montrer, qu'au niveau macro-économique, la destruction causée par une nouvelle TMU risque de précéder de beaucoup la création.

1. CROISSANCE ET FLUCTUATIONS SCHUMPÉTERIENNES

Notre point de départ est le modèle de base de la croissance à travers une destruction créatrice, modèle présenté pour la première fois par Aghion et Howitt (1992). Le modèle fait complètement abstraction de l'accumulation de capital. La production du bien de consommation dépend de l'intrant d'un bien intermédiaire x , soit :

$$Y = AF(x) .$$

Les innovations consistent en l'invention d'un nouveau bien intermédiaire qui vient remplacer le précédent, et dont l'utilisation augmente le paramètre technologique A d'un facteur constant $\gamma > 1$. La production finale est réalisée par plusieurs secteurs différents. Chacun de ces secteurs a la même fonction de production à rendements constants, avec x et un autre facteur fixe spécifique au secteur, et où chaque secteur a la même quantité du facteur fixe.

La société dispose d'un stock fixe de main-d'oeuvre qui peut être employé à deux fins : produire des biens intermédiaires, un pour un, ou être employé dans la recherche. Lorsque la quantité n est utilisée dans la recherche, les innovations surviennent de façon aléatoire selon un taux d'arrivée λn , suivant une distribution de Poisson, dans lequel $\lambda > 0$ est le paramètre qui indique la productivité de la technologie de recherche. La firme qui réussit à innover peut monopoliser le secteur intermédiaire jusqu'au moment où elle sera remplacée par une autre firme innovatrice.

Le secteur de la recherche est dépeint comme le font Tirole (1988) et Reinganum (1989) dans leur recension des écrits sur la course aux brevets. La somme de travail consacrée à la recherche est déterminée par la condition de profit nul découlant de l'entrée libre :

$$w_t = \lambda V_{t+1} , \tag{1}$$

où t n'est pas le temps, mais le nombre d'innovations; w_t , la rémunération, et V_{t+1} le gain anticipé actualisé de la firme qui réalise l'innovation $t + 1$. L'actualisation du gain anticipé est simplement :

$$V_{t+1} = \frac{\pi_{t+1}}{r + \lambda n_{t+1}} \quad , \quad (2)$$

où π_{t+1} est le flux de profit que peut atteindre la firme en obtenant le monopole grâce à son bien intermédiaire $t + 1$, et r , le taux d'intérêt que l'on considère comme étant exogène. Le dénominateur de l'équation (2) montre les effets de la destruction créatrice. Plus les gens anticipent que la recherche qui suivra la prochaine innovation sera importante, moins longue sera la durée des profits de monopole dont jouira la firme propriétaire de cette innovation, et plus le rendement sera faible. Cela introduit une dépendance négative entre la recherche actuelle et le niveau anticipé de recherche future.

Les profits π_{t+1} apparaissent lorsque le monopole qui produit le bien intermédiaire choisit le niveau de production x_{t+1} qui lui permet de résoudre le problème standard de maximisation de profits avec une fonction de coûts $w_{t+1} x_{t+1}$, et une fonction de revenus dans laquelle le prix est simplement le produit marginal du bien intermédiaire : $A_{t+1} F'(x_{t+1})$. Ce problème amène la solution :

$$x_{t+1} = x(\omega_{t+1}), \pi_{t+1} = A_{t+1} \pi(\omega_{t+1}), x' < 0, \pi' < 0,$$

où $\omega_{t+1} \equiv w_{t+1}/A_{t+1}$. Dans un état stationnaire où la croissance est équilibrée, chaque innovation amène une hausse des salaires et des profits proportionnelle au paramètre A (où A désigne la productivité), ce qui permet de maintenir ω (le salaire ajusté pour la productivité) constant. Ainsi, les équations (1) et (2) peuvent être combinées à la condition $A_{t+1} = \gamma A_t$ de manière à déduire l'équilibre stationnaire entre les salaires et la recherche :

$$\omega = \lambda \frac{\gamma \pi(\omega)}{r + \lambda n} \quad . \quad (R)$$

La combinaison des équations de «l'arbitrage de recherche» et de «l'équilibre du marché du travail»,

$$n = L - x(\omega) \quad , \quad (L)$$

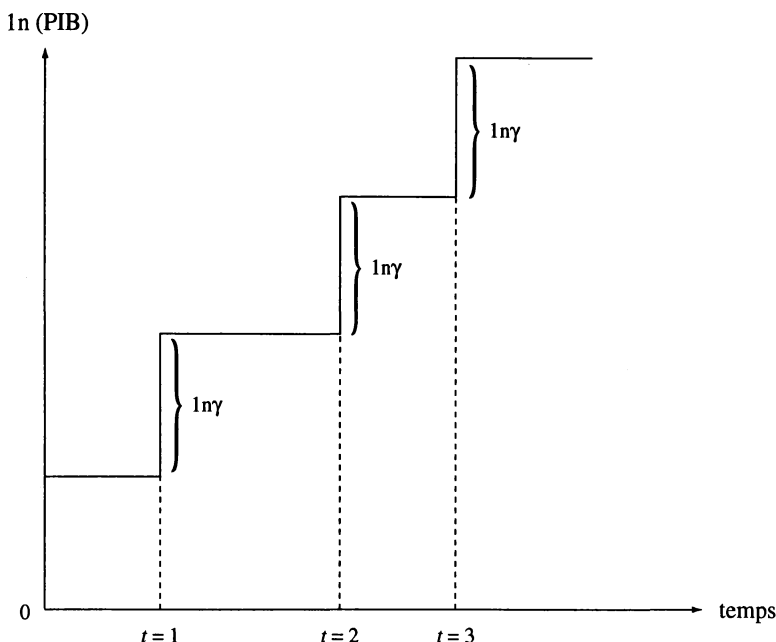
définit un état stationnaire dans lequel le niveau de recherche entretient (1) une relation positive avec la taille γ et la fréquence λ des innovations, et la taille L de la population; et (2) une relation négative avec le taux d'intérêt r .

À l'équilibre stationnaire, la croissance est stochastique, ce qui reflète l'incertitude entourant le processus d'innovation. Comme le montre le graphique 1, la production augmente d'une proportion constante γ à chaque innovation. Cependant, le temps écoulé entre chaque hausse discrète est aléatoire. Plus formellement, le log de la production suit une marche aléatoire avec une dérive dont la taille $\lambda n \ln \gamma$ correspond au taux de croissance moyen observé quand

l'économie est en équilibre stationnaire. On peut facilement constater que ce taux augmente avec tout changement de paramètre qui accroît le niveau d'équilibre de la recherche.

GRAPHIQUE 1

CROISSANCE AVEC FLUCTUATIONS DANS LE MODÈLE DE AGHION ET HOWITT (1992)



Ainsi, avec ce modèle très simple de croissance schumpéterienne, nous obtenons déjà une théorie selon laquelle les TMU engendrent une hausse de la croissance et des fluctuations. En d'autres termes, de chaque innovation naît une nouvelle technologie qui sera utilisée par l'ensemble de l'économie. De plus, l'apparition aléatoire de telles innovations cause des fluctuations stochastiques au niveau macroéconomique. Toutefois, cette théorie est trop simpliste pour expliquer que l'introduction d'une nouvelle technologie puisse causer un ralentissement. Comme ce modèle ne tient pas compte du coût des ressources nécessaires à l'implantation d'une nouvelle technologie, la production ne diminue jamais.

2. LE MODÈLE DE HELPMAN ET TRAJTENBERG

Helpman et Trajtenberg (1997) (dorénavant HT) analysent une nouvelle voie à travers laquelle une TMU *peut* causer un ralentissement. D'après cette nouvelle voie, pour qu'on puisse adopter la nouvelle TMU, l'économie doit au préalable traverser une période préparatoire au cours de laquelle une partie de la force de

travail est transférée de la production vers la R&D. Ce transfert permet de développer de nouveaux biens qui seront finalement produits à titre de biens intermédiaires et qui serviront à implanter la nouvelle technologie. Les firmes continueront à réaliser leur production avec l'ancienne technologie jusqu'à ce que suffisamment de nouveaux biens (composants) aient été inventés. Toutefois, elles produiront moins puisqu'une partie de la force de travail a été retirée de la production.

Dans le prochain² volume du CIAR sur les TMU, nous développons une version simple du modèle de HT à partir de celui de Aghion-Howitt présenté à la section précédente. À ce modèle, nous avons ajouté une étape supplémentaire au processus d'innovation : la création de composants. Comme précédemment, il y a L travailleurs qui peuvent participer, soit à la production des biens intermédiaires existants, soit à des activités de recherche dont l'objectif est de découvrir de nouveaux biens intermédiaires. De même, chaque bien intermédiaire est associé à une TMU particulière, mais nous distinguons maintenant l'invention de la TMU de l'invention du bien intermédiaire qui permet d'implanter cette technologie. Tout comme HT, nous supposons que la société dispose d'un minimum de biens intermédiaires associé à une TMU avant que l'un de ces biens puisse être utilisé de manière rentable dans le secteur des biens finals. Nous ne perdons rien d'essentiel en supposant que ce minimum est un. Une fois le bien inventé, son créateur jouit d'un brevet lui octroyant l'utilisation exclusive de son bien dans la production, exactement comme dans le modèle de base.

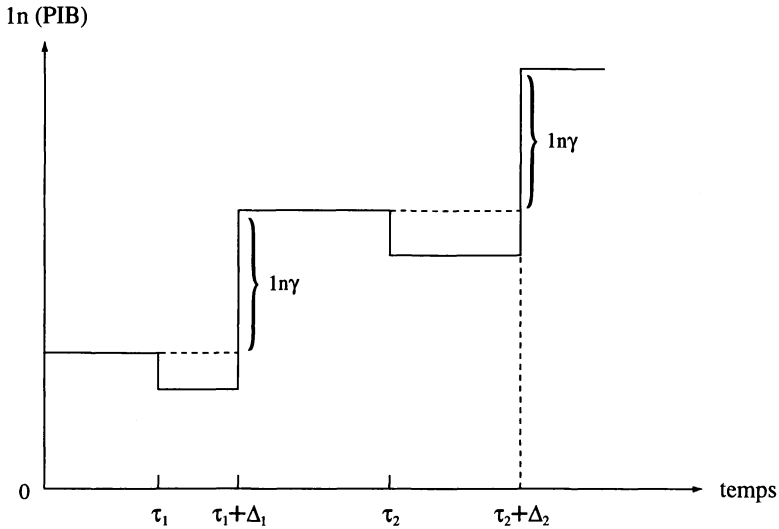
Contrairement au modèle de base, l'apparition d'une nouvelle génération de biens intermédiaires se fait à présent en deux étapes. Une nouvelle TMU doit d'abord faire son entrée avant que le bien qui permettra son implantation ne soit inventé dans le contexte actuel. Il est nécessaire de connaître la TMU avant de savoir quel type de bien permettra son implantation. De plus, il faut voir la TMU précédente à l'oeuvre avant de pouvoir en imaginer une nouvelle. Pour simplifier, nous partons du principe que personne n'oriente les activités de R&D vers l'invention d'une TMU. L'invention est plutôt la conséquence heureuse de l'expérience collective relative à l'utilisation de la technologie précédente.

L'économie va traverser une série de cycles, chacun ayant deux phases, comme l'indique le graphique 2. La TMU _{t} survient au temps τ_t . À ce moment-là, l'économie entre dans la phase 1 du cycle t . Au cours de la phase 1, la quantité n de travail est consacrée à la recherche. La phase 2 débute au temps $\tau_t + \Delta_t$, lorsque cette recherche aboutit à la découverte du bien intermédiaire qui permettra d'implanter la TMU _{t} . Tout au long de la phase 2, la totalité de la main-d'oeuvre est affectée à la production jusqu'à l'arrivée de la TMU _{$t+1$} , moment auquel débute le cycle suivant. Au cours du cycle, la production est égale à $A_{t-1}F(L - n)$ et à $A_t F(L)$ au cours des phases 1 et 2 respectivement. Ainsi, le fait d'augmenter le personnel affecté à la recherche entraîne, chaque fois qu'une nouvelle technologie est découverte, une diminution de la production égale à $A_{t-1}[F(L) - F(L - n)]$.

2. Aghion et Howitt (1997b).

GRAPHIQUE 2

CROISSANCE AVEC RALENTISSEMENTS DANS UN MODÈLE DU TYPE
DE CELUI DE HELPMAN ET TRAJTENBERG (1997)



Un équilibre stationnaire est un état où l'on choisit le même niveau de recherche chaque fois que l'économie est dans la phase 1, c'est-à-dire un état dans lequel n est constant d'une TMU à l'autre. Comme précédemment, nous pouvons trouver la valeur d'équilibre n en utilisant l'équation de l'arbitrage de recherche et une courbe d'équilibre du marché du travail. Soit ω_j le salaire, et v_j , la valeur nette des profits actualisés dans le secteur des biens intermédiaires à la phase j , avec ω_j et v_j divisés par le paramètre A (où A représente la productivité de la TMU actuellement utilisée). À l'équilibre stationnaire, une fois ces variables ajustées pour la productivité, elles seront toutes les mêmes, quelle que soit la TMU utilisée.

Comme la recherche a lieu à la phase 1, mais ne porte fruit que lorsque l'économie entre dans la phase 2 et que l'on observe une hausse du paramètre de la productivité d'un facteur γ , la condition usuelle d'arbitrage doit être respectée afin que le niveau de recherche dans l'économie soit positif :

$$\omega_1 = \lambda \gamma v_2 . \quad (3)$$

Une fois dans la phase 2, la nouvelle TMU fera son apparition suivant un processus de Poisson avec un taux d'arrivée constant égal à μ . La valeur v_2 sera alors déterminée par l'équation de Bellman :

$$rv_2 = \pi(\omega_2) + \mu(v_1 - v_2) . \quad (4)$$

Par un raisonnement analogue, nous obtenons :

$$rv_1 = \pi(\omega_1) - \lambda v_1 . \quad (5)$$

En combinant les équations (3) à (5), nous obtenons l'équation de l'arbitrage de recherche :

$$\omega_1 = \lambda \gamma \frac{\pi(\omega_2) + \frac{\mu \pi(\omega_1)}{r + \lambda n}}{r + \mu} . \quad (R')$$

Comme aucune firme ne fait de recherche à la phase 2, nous savons que la valeur de ω_2 est déterminée, indépendamment de la recherche, par la condition d'équilibre du marché : $L = x(\omega_2)$. Par conséquent, nous pouvons considérer cette valeur comme une donnée, auquel cas la valeur de n est déterminée, comme d'habitude, par les équations de l'arbitrage de recherche (R') et d'équilibre du marché du travail :

$$n = L - x(\omega_1) . \quad (L')$$

Comme dans le modèle de base, le niveau de recherche n est : (1) une fonction croissante de la productivité de la recherche (λ), de l'ampleur de l'amélioration créée par chaque TMU (γ), et de la population (L); et (2) une fonction décroissante du taux d'intérêt (r). Il est possible de démontrer que le taux d'arrivée μ des TMU a un effet négatif sur la recherche : intuitivement, une hausse de μ décourage la recherche en réduisant la durée anticipée de la première des deux phases, phase au cours de laquelle la firme innovatrice peut tirer profit de son innovation. L'ampleur de la baisse ($\ln F(L) - \ln F(L - n)$) est une fonction croissante de n et, par conséquent, aura tendance à afficher une corrélation positive avec le taux de croissance moyen.

L'élément-clé de l'analyse de HT est l'accélération de l'investissement dans la connaissance au cours de la phase 1. Cette accélération est l'un des faits saillants des stades d'introduction des nouvelles TMU. Elle est à la fois la cause immédiate et la conséquence de la hausse du rythme de changement technologique dont il a été question en introduction : les investissements dans la connaissance sont stimulés par les nouvelles possibilités d'innovations introduites par la récente TMU, ainsi que par la nécessité d'apprendre à l'exploiter, ou du moins à y faire face, afin de rester compétitif. On pourrait remettre en question l'ampleur de l'effet macroéconomique, effet qui pourrait s'expliquer par le simple transfert de la main-d'œuvre du secteur de la production de biens vers un secteur (R&D) qui absorbe en moyenne uniquement 2,5 % de la force de travail, même aux États-Unis où la R&D est plus intensive qu'au Canada³. Toutefois, il existe des mécanismes

3. En fait, les fluctuations observées dans le modèle de HT sont encore plus petites car les auteurs assument que le calcul du PIB tient compte du coût total de la R&D. Nous pouvons expliquer que, dans leur modèle, l'introduction d'une nouvelle technologie cause néanmoins une chute du PIB par le fait que la découverte amène les travailleurs à quitter un secteur dans lequel la valeur de leur produit marginal excède le salaire réel (parce que le secteur intermédiaire n'est pas parfaitement compétitif), et à entrer dans un secteur compétitif - la recherche - dans lequel le produit marginal est égal au salaire réel.

empiriquement significatifs, à travers lesquels l'accélération du changement technologique peut causer un ralentissement économique, mécanismes qui sont absents de l'analyse de HT.

3. CHANGEMENT TECHNOLOGIQUE ET CHÔMAGE

Un de ces mécanismes est le chômage. Le rythme accéléré de changement technologique peut accroître le taux de chômage pour différentes raisons : l'obsolescence des habiletés, l'automatisation, les faillites des firmes incapables d'adopter la nouvelle technologie ou qui produisent des biens rendus désuets par la nouvelle technologie, et les transformations sectorielles qui sont produites par les changements technologiques qui affectent d'abord un secteur, puis un autre.

Dans notre article publié en 1994 sur ce sujet, le changement technologique est responsable de la désuétude des vieux équipements parce qu'il hausse le prix d'autres facteurs qui doivent être combinés au capital et au travail pour réaliser une production. Lorsque le prix de ces autres facteurs a augmenté au point qu'une machine ou une usine n'est plus économiquement viable, les travailleurs en place perdront leur emploi. Plus le taux de croissance est élevé, plus ce point sera atteint rapidement pour tous les emplois de l'économie et, par conséquent, plus la durée moyenne d'un emploi sera courte, autrement dit, le taux de destruction d'emplois à la grandeur de l'économie sera d'autant plus élevé. À travers ce mécanisme, une croissance plus rapide aura tendance à créer un taux de chômage d'équilibre plus élevé.

Bien entendu, l'effet global sur le chômage dépendra également du taux de création d'emplois, lequel détermine la durée pendant laquelle un chômeur doit se chercher un emploi avant de trouver un employeur qui accepte de le faire travailler sur une machine, ou dans une usine de technologie plus récente. À son tour, le taux de création d'emplois dépendra de la motivation des entrepreneurs à encourir les coûts pour (1) mettre en place de nouveaux équipements, (2) créer de nouveaux postes, (3) trouver un travailleur apte à opérer les nouveaux équipements, (4) instituer une relation de travail avec ce travailleur. Cet incitatif peut être augmenté ou réduit par la perspective d'une croissance plus rapide. D'une part, lorsque la durée d'un emploi est réduite, le flux de profits actualisés que la firme peut espérer de cet emploi est aussi réduit. D'autre part, si le fait de payer ces coûts d'implantation permet à l'entrepreneur de tirer profit des opportunités technologiques futures, une croissance accélérée haussera la valeur actuelle des rendements anticipés. Dans l'ensemble, notre analyse prévoit que la relation de long terme entre la croissance et le chômage aura la forme d'un U renversé. Cette forme signifie que l'accélération d'un rythme de croissance déjà lent crée davantage de chômage, tandis que l'accélération d'un rythme de croissance déjà rapide réduit le chômage⁴.

4. Une croissance plus rapide peut aussi créer du chômage si elle accroît la dispersion de la distribution des salaires parce que (a) une dispersion plus élevée va causer aux chômeurs des périodes de recherche plus longues et (b) les salaires minimum et les bénéfices de l'assurance-chômage liés au salaire moyen vont causer plus de chômage à mesure que le taux de dispersion augmentera.

Alors que cette analyse traite uniquement du taux de chômage d'équilibre stationnaire, les théories dynamiques basées sur les mêmes prémisses⁵ montrent qu'une hausse temporaire du rythme de changement technologique provoque au moins un bond temporaire du chômage. De plus, lorsque les rigidités sous-jacentes au chômage ne sont pas trop sévères, la hausse drastique du chômage est remplacée par une croissance marquée des inégalités salariales dans la mesure où les personnes aptes à travailler avec les nouvelles technologies exigent une prime par rapport à ceux qui sont plus lents à s'adapter. Ces derniers peuvent alors voir leur salaire réduit, même en termes absolus, parce que leur savoir-faire est tombé en désuétude. Bien entendu, cet effet différentiel coïncide exactement avec les expériences relatives de l'Amérique du Nord et de l'Europe au cours des deux dernières décennies.

4. OBSOLESCENCE

L'obsolescence du capital est une voie indépendante à travers laquelle l'accélération du changement technologique peut causer un ralentissement dans la production réelle, même sans créer de chômage. Un autre article (Howitt, 1997), dont la publication est prévue dans le volume du CIAR sur les technologies multi-usages, prétend que dans des hypothèses réalistes, la désuétude des équipements peut expliquer un ralentissement économique substantiel qui pourrait durer des décennies.

Les grandes lignes de cet argument peuvent être comprises en termes du modèle de Solow-Swan de croissance exogène avec progrès technologique neutre au sens de Harrod (strictement par croissance du travail). Dans ce modèle, le stock de capital k par unité de travail efficace augmente suivant l'équation ci-après :

$$\frac{dk}{dt} = sk^\alpha - (\delta + \beta + n + g)k, \quad (6)$$

où s est le taux d'épargne; k^α , la fonction de production qui détermine la production par unité efficace, où $0 < \alpha < 1$; δ est le taux de dépréciation physique du capital; β le taux de désuétude du capital; n le taux de croissance de la population; et g le taux (exogène) de progrès technologique. Le premier terme du côté droit de l'équation (6) représente l'accumulation brute du capital par unité efficace. Le second terme inclut à la fois la réduction du stock de capital à travers la dépréciation et la désuétude, et l'augmentation du nombre d'unités efficaces.

La taux de croissance G de la production réelle par personne représente le taux de croissance de la production par unité efficace (c'est-à-dire k^α) auquel s'ajoute le taux de progrès technologique :

$$G = \alpha \frac{1}{k} \frac{dk}{dt} + g = \alpha sk^{\alpha-1} - \alpha(\delta + \beta + n + g) + g.$$

5. Voir, par exemple, Aghion et Howitt (1997b).

À long terme, l'intensité de capital k approchera une valeur d'équilibre stationnaire constante, la production par unité efficace cessera alors de croître, et le taux de croissance G sera égal au taux de progrès technologique g . Par conséquent, chaque augmentation du progrès technologique d'un point de pourcentage produit, à long terme, une hausse exactement équivalente du taux de croissance économique. Même à court terme, *si les autres paramètres du modèle sont indépendants du taux de progrès technologique*, une hausse de celui-ci provoquera une poussée de la croissance. Dans ce cas, cependant, la hausse de la croissance sera inférieure à celle du progrès technologique et l'effet d'impact sera :

$$\frac{\partial G}{\partial g} = 1 - \alpha > 0.$$

En pratique, toutefois, les autres paramètres du modèle ne demeureront pas inchangés si le taux de progrès technologique s'accroît. Plus particulièrement, le taux d'obsolescence β augmentera sûrement, surtout si l'accélération du progrès technologique provient de l'introduction d'une nouvelle TMU, qui vient supplanter les vieilles méthodes de production et les vieux équipements. Ainsi, il y aura un effet négatif supplémentaire sur $\frac{dk}{dt}$, en sus de celui dû à la croissance plus rapide des unités efficaces. Pour cette raison, l'effet global pourrait très bien prendre la forme d'une réduction du taux de croissance économique.

Supposons, par exemple, que β soit proportionnel à g . Alors, à partir de l'équation précédente de G , nous obtenons :

$$\frac{\partial G}{\partial g} = 1 - \alpha \left(1 + \frac{\beta}{g} \right).$$

Plus le paramètre α (qui mesure la portion du capital dans le PIB) est élevé et plus le ratio $\frac{\beta}{g}$ (l'obsolescence par rapport à la croissance) sera grand, plus l'effet risque d'être négatif.

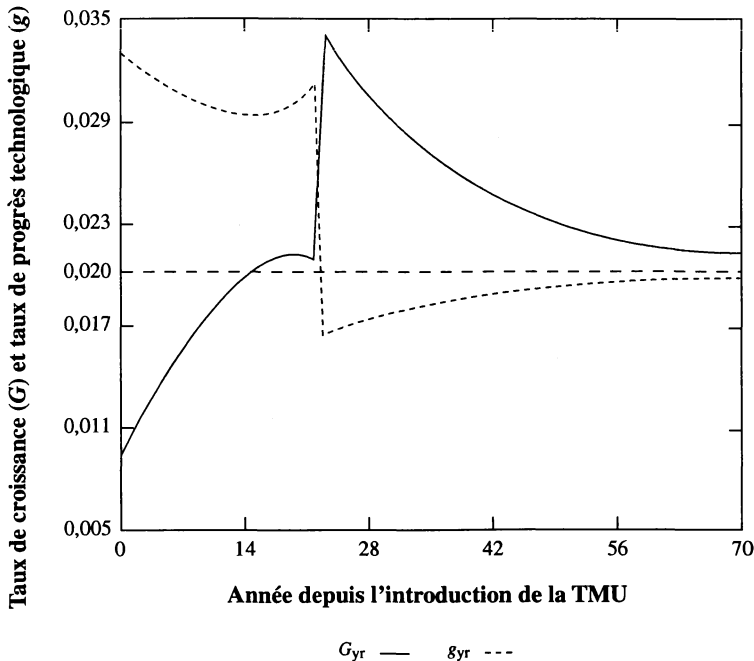
Supposons que le capital inclut aussi bien le capital humain que physique. (Pendant les périodes de changements technologiques rapides, le capital humain est aussi sujet à l'obsolescence à cause du processus de déqualification). Alors, selon le raisonnement de Mankiw (1995), $\frac{2}{3}$ est une estimation conservatrice de α . Pour β , prenons la valeur que Caballero et Jaffe (1993) ont estimée pour le taux de déclin annuel de la valeur d'une firme américaine qui n'innove pas, soit 0,036. Pour g , prenons le taux de croissance moyen de la production par travailleur entre 1948 et 1991, soit 0,02. Ainsi, nous arrivons à l'estimation : $\frac{\partial G}{\partial g} = -0,87$.

Cette estimation signifie qu'une hausse du taux de progrès technologique de 2 % par an à 3 % aura pour effet de réduire le taux de croissance de la production par travailleur de 2 % par an à 1,13 %.

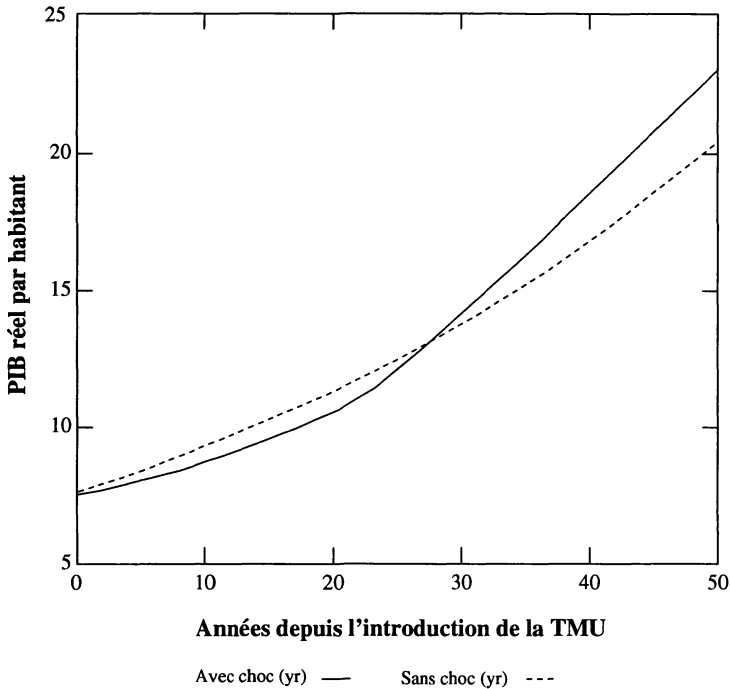
Pour se faire une idée du temps que durera ce ralentissement, tout en tenant compte de l'effet de la croissance sur l'incitation à innover, l'article construit un modèle de croissance endogène incluant aussi bien l'innovation que le capital. Ce modèle, une combinaison des modèles de Solow-Swan et de Aghion-Howitt, est bâti en fonction de l'économie américaine et simule les effets observés lorsque l'on perturbe l'équilibre stationnaire en augmentant la productivité de la technologie de recherche de 50 %, jusqu'à ce que la productivité globale des facteurs ait augmenté de 100 %, ce qui prend 23 ans. Cette période de 23 ans, nécessaire à l'introduction de la nouvelle TMU, est une période de recherche intense au cours de laquelle on observe un taux d'obsolescence inhabituellement élevé.

Le graphique 3 illustre les trajectoires de la croissance économique (G) et du progrès technologique (g). Alors que le progrès technologique monte en flèche après l'introduction d'une nouvelle TMU, le taux de croissance économique chute et demeure inférieur à sa valeur initiale de 2 % pendant 14 ans. Comme le montre le graphique 4, le niveau de production par personne reste, pendant 28 ans, inférieur à ce qu'il aurait été sans l'introduction de la TMU, ce qui représente 5 années de plus que la période de changement technologique rapide. L'écart maximum par rapport à la situation sans choc est observé à l'année 15 alors que la courbe avec choc est inférieure de 6,6 % à celle sans choc.

GRAPHIQUE 3



GRAPHIQUE 4



5. QUESTIONS DE MESURE⁶

5.1 Investissement dans la connaissance

Le ralentissement économique que nous avons analysé risque d'être exagéré par la mesure actuelle du produit intérieur brut (PIB). En effet, les comptes nationaux ne permettent de mesurer qu'une portion minimale de la croissance de l'investissement dans la connaissance qui a lieu durant la phase d'introduction de la nouvelle TMU. Cette difficulté de mesure s'explique par le fait que les dépenses finales des comptes nationaux ne comptabilisent pas la croissance annuelle du stock de connaissances de la société (comme c'est le cas pour le stock de capital), exceptions faites de la production du secteur de l'éducation et de la R&D entreprise par / ou vendue au secteur gouvernemental. La majeure partie du coût de l'éducation post-secondaire, constituée des salaires auxquels on a renoncé, n'est pas incluse. De plus, aucune des connaissances générées par la R&D entreprise par les firmes (ce qui inclut la plupart de la R&D industrielle) n'a pour résultat une contribution positive directe au PIB courant, ou à la valeur ajoutée courante de ce secteur de l'économie, comme cela aurait été le cas si les ressources avaient été allouées à la création de nouveaux moyens de production.

6. Cette section s'inspire de Howitt (1996)

Plus explicitement, considérons le cas d'une firme qui embauche des travailleurs supplémentaires dans son département de R&D au coût d'un million de dollars pendant l'année courante. En fin d'année, la firme obtient pour unique résultat un brevet qui lui permettra de réaliser, au cours des prochaines années, des profits additionnels dont la valeur actualisée est de deux millions de dollars. D'après les comptes nationaux, ces événements n'augmenteront pas la production de ce secteur puisque les firmes n'ont pas le droit de capitaliser le fruit de leurs efforts en R&D. Selon l'approche du revenu, bien qu'il y ait eu un million versé en salaires (en supposant que les travailleurs se soient ajoutés à la force de travail), il y a eu une diminution exactement équivalente des profits puisque les dépenses encourues par la firme n'ont permis aucune augmentation des revenus courants. Si les travailleurs avaient produit une machine de deux millions de dollars plutôt qu'un brevet, le PIB aurait été supérieur de deux millions de dollars⁷.

Bien entendu, dans la mesure où la R&D permet d'augmenter et d'améliorer la production de biens, elle affecte éventuellement la mesure du PIB. Cependant, chaque nouvelle connaissance devrait aussi être considérée comme une production au moment où elle surgit, tout comme un investissement physique est compté au moment de sa réalisation bien qu'il affecte éventuellement le PIB en augmentant la production potentielle d'autres biens. Comme les comptes nationaux ne considèrent pas les nouvelles connaissances comme faisant partie de la production, le ralentissement observé, chaque fois que des ressources sont détournées de la production de biens vers la production de connaissances (comme c'est le cas lors de la phase d'introduction d'une TMU), est exagéré. L'exagération du ralentissement est due au fait que la baisse de la production de biens est mesurée, tandis que la hausse de la production de connaissances ne l'est pas.

Outre les arguments précédents, on peut expliquer que plus de travailleurs se dirigent vers des activités où l'on crée des connaissances lorsqu'une nouvelle TMU est introduite par le fait que le rendement de ce type d'activités augmente relativement à celui de la production de biens. Par conséquent, l'investissement en connaissances qui échappe à la mesure est probablement supérieur à la baisse de la production de biens qui, elle, est mesurée. Il est donc possible qu'une nouvelle TMU engendre simultanément une hausse du taux de croissance de la production effective et une réduction du taux de croissance de la production mesurée.

L'exercice effectué par Howitt (1997) a fait la lumière sur l'importance empirique de ce problème de mesure. Le ralentissement observé aux graphiques 3 et 4 a été obtenu en supposant que l'ensemble des dépenses en R&D est inclus dans la production finale, de telle sorte que ce ralentissement ne soit pas uniquement une illusion statistique. Lorsqu'on effectue le même exercice dans l'hypothèse

7. Le groupe de travail qui a produit le Système international des comptes nationaux 1993 a envisagé recommander la capitalisation des dépenses en R&D précisément pour ces raisons. En fin de compte, la recommandation a été abandonnée à cause des difficultés à mesurer et à évaluer un investissement aussi intangible. Par contre, le groupe de travail a recommandé la création, sur une base expérimentale, de comptes capital satellites réservés à la R&D.

plus réaliste qu'aucune dépense en R&D n'est incluse, l'écart observé entre le PIB par personne et le PIB sans choc est alors plus important que le véritable écart (comme nous pouvons le constater au graphique 4). La différence peut aller jusqu'à 2,5 points de pourcentage pendant la période de ralentissement.

5.2 Amélioration de la qualité

De plus, dans la mesure où la R&D permet la production de biens de meilleure qualité, un bon nombre de ses effets futurs sur le PIB ne pourra pas être évalué à cause d'un deuxième problème majeur de mesure : la mesure de l'amélioration de la qualité. Comme le font remarquer plusieurs auteurs, lorsque les firmes disposent de nouvelles connaissances qui leur permettent d'augmenter et d'améliorer la production de biens, il devient difficile de tenir compte de ces augmentations lors de la construction des indices de prix. Cette difficulté a pour effet de rendre non mesurable la majeure partie des bénéfices résultant de nouvelles connaissances.

Ce problème d'amélioration de la qualité peut avoir pour effet d'exagérer davantage le ralentissement de la croissance du PIB au cours de la phase d'introduction de la nouvelle TMU. Par exemple, le problème de l'amélioration de la qualité risque de causer la majeure partie de la croissance économique non mesurée, croissance engendrée par des ordinateurs, et des biens similaires, de meilleure qualité. Ce problème a été partiellement résolu lorsque les États-Unis ont adopté des mesures hédonistes d'amélioration de la qualité des ordinateurs. Toutefois, des dispositions similaires n'ont pas été prises dans des secteurs comme celui des équipements électroniques où l'on fabrique les pastilles de silicium.

Griliches (1994) affirme d'ailleurs que les fruits de la révolution informatique ont été utilisés de façon disproportionnée dans les secteurs où l'amélioration de la qualité est pratiquement impossible à mesurer. Il estime que plus des trois quarts de la production de l'industrie informatique sont utilisés dans ce qu'il appelle les secteurs non mesurables. De plus, la révolution informatique a contribué à augmenter la taille relative des secteurs non mesurables qui représentent maintenant, d'après Griliches, 70 % du PIB américain.

5.3 Mesure de l'obsolescence

Tandis qu'une mesure imparfaite de l'investissement dans la connaissance et de la hausse de la qualité fait en sorte que le PIB mesuré exagère l'effet de court terme d'une accélération du progrès technologique sur la croissance, un troisième problème de mesure, celui-ci relié à l'obsolescence, exerce un effet contraire si l'on utilise le revenu intérieur net (ou le revenu national) plutôt que le PIB comme mesure de la croissance. En effet, on connaît bien la difficulté qu'on a de mesurer les concepts de dépréciation et d'obsolescence. L'échelonnement et l'importance des investissements de renouvellement sont des variables endogènes que la méthode comptable du revenu national ne peut qu'estimer approximativement

par l'application de formules mécaniques simples. L'acuité du problème augmente lorsqu'une vague d'innovations accroît le taux de vieillissement du capital physique et du capital humain. Si les taux de dépréciation mesurés sont modifiés, ils ne le seront qu'après un long délai.

Ce problème ne biaise pas la mesure de la croissance du PIB parce que la dépréciation du capital n'entre pas dans le calcul. Toutefois, le problème peut atténuer, voire même inverser, celui exercé par l'investissement dans la connaissance sur la mesure du revenu intérieur net ou du revenu national. Si l'accélération de l'obsolescence n'est pas prise en considération, on observera une surévaluation de l'augmentation nette des stocks de capital et de connaissances dont disposera la société suite à la révolution informatique. Par exemple, le développement de l'ordinateur personnel a grandement réduit la valeur des ordinateurs centraux, du secrétariat, des machines à écrire, des connaissances en programmation par lots, et de bien d'autres éléments relatifs au capital physique et au capital humain. De plus, le fait que de nouvelles versions de chaque marque d'ordinateurs apparaissent tous les six mois reflète l'accélération du rythme auquel les vieux ordinateurs sont mis au rancart. Ainsi, si nous devions résoudre le problème de l'investissement dans la connaissance sans tenir compte de celui de l'obsolescence, nous exagérerions certainement le gain enregistré par le revenu intérieur net et le revenu national au cours d'un changement technologique. Pourtant, cette omission n'affecterait pas la mesure du PIB.

Les résultats de Howitt (1997) suggèrent que ce problème de mesure est plus important que celui que nous rencontrerions si l'investissement dans la connaissance n'était pas mesuré. Dans son analyse, la hausse du taux d'obsolescence, qui survient au début de l'introduction d'une nouvelle TMU, cause une réduction de plus de 8 % du niveau des comptes nationaux. Toutefois, dans l'hypothèse réaliste où aucun ajustement ne serait apporté aux taux de dépréciation utilisés dans les comptes nationaux, la mesure du revenu national n'afficherait qu'une baisse de 1,9 %, et cette baisse serait uniquement imputable au fait que l'investissement dans la connaissance n'a pas été mesuré. Ainsi, ces deux problèmes⁸ de mesure ont pour effet global de conduire les comptes nationaux à *sous-estimer* l'effet négatif de court terme du progrès technologique sur la croissance économique.

CONCLUSION

De toute évidence, la proposition selon laquelle une accélération du rythme de la productivité commencerait par réduire la croissance économique avant de la stimuler, nécessite une analyse beaucoup plus approfondie avant de pouvoir être affirmée avec assurance⁹. Deux problèmes particuliers semblent nécessiter

8. Nous n'avons pas tenté de tenir compte du biais introduit par le problème d'amélioration de la qualité.

9. La même proposition a été obtenue au terme d'analyses indépendantes menées par David (1991), Atkeson et Kehoe (1993), et Greenwood et Yorukoglu (1997).

un travail plus sérieux. Tout d'abord, la proposition doit être testée. Il est donc nécessaire de s'assurer le concours d'économétriciens spécialisés en séries chronologiques qui pourront travailler avec un système dans lequel les modèles impulsion-réponse sont largement plus atténués qu'habituellement. Dans le modèle établi en fonction de l'économie américaine (présenté au graphique 4), il faut 14 ans avant que l'effet de court terme de la croissance de la productivité sur la croissance économique ne passe de négatif à positif.

Le second problème en est un plus profond de compréhension théorique. En effet, les mécanismes dont nous avons discuté, et selon lesquels une TMU peut réduire la croissance, sont des mécanismes très simples où il n'est question que d'un seul secteur à la fois. En fait, un changement technologique majeur pose un grand nombre de problèmes d'ajustements complexes qui nécessitent la coordination de plusieurs secteurs. Le plus élémentaire de ces problèmes est celui de Harrod-Domar qui vise à s'assurer que la demande d'investissement est toujours suffisante pour maintenir le plein emploi chaque fois que le progrès technologique hausse la capacité de production. Mais ce problème, qui requiert la coordination de décisions indépendantes entre l'épargnant et l'investisseur, n'est toutefois que la pointe de l'iceberg.

L'ajustement au changement technologique nécessite la coordination de nombreux éléments impossibles à prévoir : les investissements en capital physique, les investissements complémentaires en capital humain, les changements de la structure réglementaire, les modèles de demandes finales, la structure géographique des activités, la manière dont le travail est organisé et toute une séquence de changements technologiques futurs. Ces problèmes de coordination, ainsi que d'autres problèmes, sont décrits par Lipsey et Bekar (1995) comme nécessitant «un ajustement structurel profond». Freeman et Perez (1988) traitent de la difficulté à atteindre un ensemble de changements coordonnés lorsque l'économie subit une «transformation du paradigme techno-économique». Ces problèmes de coordination sont certainement importants, et il semble fort probable qu'ils aient des implications macroéconomiques majeures. Cependant, il reste beaucoup de travail à effectuer avant que ces problèmes et leurs effets macroéconomiques ne puissent être analysés à l'aide de modèles simples du type de ceux employés dans les écrits dont nous avons discuté.

BIBLIOGRAPHIE

- AGHION, PHILIPPE, et PETER HOWITT (1992), «A Model of Growth through Creative Destruction», *Econometrica*, 60 : 323-51.
- AGHION, PHILIPPE, et PETER HOWITT (1994), «Growth and Unemployment», *Review of Economic Studies*, 61 : 477-94.
- AGHION, PHILIPPE, et PETER HOWITT (1997a), *Endogenous Growth Theory*, MIT Press, Cambridge, MA.
- AGHION, PHILIPPE, et PETER HOWITT (1997b), «On the Macroeconomic Effects of General Purpose Technologies», dans *General Purpose Technologies and Economic Growth*, édité par ELHANAN HELPMAN, MIT Press, Cambridge, MA, à paraître.
- ATKESON, ANDREW, et PAT KEHOE (1993), «Industry Evolution and Transition: The Role of Information Capital», non publié, Univ. of Pennsylvania.
- BRESNAHAN, TIMOTHY F., et MANUEL TRAJTENBERG (1995), «General Purpose Technologies: Engines of Growth?», *Journal of Econometrics*, 65 : 83-108.
- CABALLERO, RICARDO J., et ADAM B. JAFFE (1993), «How High are the Giants Shoulders : An Empirical Assessment of Knowledge Spillovers and Creative Destruction in a Model of Economic Growth», *NBER Macroeconomics Annual* : 15-74.
- DAVID, PAUL (1991), «Computer and Dynamo : The Modern Productivity Paradox in a Not-Too-Distant Mirror», *Technology and Productivity* : 315-48, Organization for Economic Cooperation and Development, Paris.
- FELLI, L. (1996), «Preventing Collusion through Discretion», mimeo, London School of Economics.
- FREEMAN, CHRISTOPHER, et CARLOTA PEREZ (1988), «Structural Crises of Adjustment, Business Cycles and Investment Behaviour», dans *Technical Change and Economic Theory* : 38-66, édité par GIOVANNI DOSI, CHRISTOPHER FREEMAN, RICHARD NELSON, GERALD SILVERBERG, et LUC SOETE, Pinter Publishers, London.
- GREENWOOD, JEREMY, et MEHMET YORUKOGLU (1997), «1974», *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy*, 46 : 49-95.
- GRILICHES, ZVI (1994), «Productivity, R&D, and the Data Constraint», *American Economic Review*, 84 : 1-23.
- HELPMAN, ELHANAN, ed. (1997), *General Purpose Technologies and Economic Growth*, MIT Press, Cambridge, MA, à paraître.
- HELPMAN, ELHANAN, et MANUEL TRAJTENBERG (1997), «A Time to Sow and a Time to Reap : Growth Based on General Purpose Technologies», dans *General Purpose Technologies and Economic Growth*, édité par ELHANAN HELPMAN, MIT Press, Cambridge, MA, à paraître.
- HOWITT, PETER (1996), «On Some Problems in Measuring Knowledge-Based Growth», dans *The Implications of Knowledge-Based Growth for Micro-*

- Economic Policies* : 9-29, édité par PETER HOWITT, University of Calgary Press, Calgary.
- HOWITT, PETER (1997), «Measurement, Obsolescence, and General Purpose Technologies», dans *General Purpose Technologies and Economic Growth*, édité par ELHANAN HELPMAN, MIT Press, Cambridge, MA, à paraître.
- LIPSEY, RICHARD G., et CLIFF BEKAR (1995), «A Structuralist View of Technical Change and Economic Growth», dans *Technology, Information and Public Policy* : 9-75, édité par THOMAS J. COURCHENE, The Bell Canada Papers on Economic and Public Policy, Vol. 3, John Deutsch Institute for the Study of Economic Policy, Kingston, Ont.
- LIPSEY, RICHARD G., CLIFF BEKAR, et KENNETH CARLAW (1997), «What Requires Explanation?», dans *General Purpose Technologies and Economic Growth*, édité par ELHANAN HELPMAN, MIT Press, Cambridge, MA, à paraître.
- LUCAS, ROBERT E. JR. (1988), «On the Mechanics of Economic Development», *Journal of Monetary Economics*, 22 : 3-42.
- MANKIW, GREGORY N. (1995), «The Growth of Nations», *Brooking Papers on Economic Activity*, 25 : 275-310.
- REINGANUM, J. (1989), «The Timing of Innovation: Research, Development and Diffusion», dans *Handbook of Industrial Organization*, édité par R. SCHMALENSSEE et R. WILLIG, Vol. I, North Holland, Amsterdam.
- ROBINSON, M.S. (1985), «Collusion and the Choice of Auction», *Rand Journal of Economics*, 16 : 141-145.
- ROMER, PAUL M. (1986), «Increasing Returns and Long-Run Growth», *Journal of Political Economy*, 94 : 1002-37.
- TIROLE, JEAN (1988), *The Theory of Industrial Organization*, MIT Press, Cambridge, MA.