Un survol des théories de la croissance endogène

Bruno Amable (Université de Paris I)

Texte de Mars 2000

1 Introduction

Il existe maintenant une littérature abondante sur la croissance endogène, des ouvrages entiers lui ont été consacrés[1], de nombreuses revues de littérature ont déjà été publiées[2] et les principaux résultats des 'nouvelles théories de la croissance' figurent maintenant aux programmes de deuxième cycle d'économie dans de nombreuses universités. Bref, la croissance endogène a perdu le charme de la nouveauté. Les principales questions que ce courant a adressé à la science économique méritent cependant un bref retour. La première d'entre elles est probablement celle des sources de la croissance. Alors que le modèle canonique de la croissance néo-classique, celui de Solow [1956], évacuait la question des sources de la croissance à long terme pour se concentrer sur le mécanisme d'accumulation du capital et la convergence vers l'état stationnaire, les nouvelles théories ont cherché à réintégrer une analyse explicite des déterminants de long terme de l'augmentation de la productivité. Cette démarche a conduit à élargir la gamme des facteurs de production traditionnellement pris en compte dans les formalisations, quitte à aller chercher l'inspiration auprès de certains auteurs dont les contributions étaient plus ou moins tombées dans l'oubli: effet d'apprentissage, capital humain, infrastructures publiques,... Elle a aussi conduit à s'interroger sur les conditions "techniques" d'obtention d'une croissance véritablement endogène: les rendements constants sur les facteurs de production accumulables. Cette recherche a conduit à s'interroger sur les effets externes positifs liés à l'investissement dans tel ou tel facteur de production et sur le rôle de la connaissance dans la croissance de la productivité. Par extension, les modèles de croissance endogène ont été amené à prendre explicitement en compte l'innovation et par voie de conséquence la concurrence imparfaite. La plupart des modèles de croissance endogène intègrent donc des externalités positives et/ou négatives liées à l'accumulation des connaissances et à l'innovation ainsi que des imperfections liées au pouvoir de marché procuré par la protection des innovations, avec pour résultat prévisible que l'équilibre décentralisé est sous-optimal. Ceci a donc ouvert la possibilité pour des interventions publiques correctrices en vue de modifier le taux de croissance.

Un autre thème concerne le rattrapage et la convergence des différentes économies vers un même niveau de développement. Alors que le modèle de Solow, reposant sur des rendements décroissants sur les facteurs accumulables, prédit une convergence des économies structurellement similaires vers un même niveau de développement, la plupart des modèles de croissance endogène prédisent une persistance des écarts de niveau de développement. Ce point a suscité une abondante littérature empirique[3] afin de déterminer si on pouvait déceler des tendances à la convergence après avoir corrigé des différences structurelles, si on assistait à la formation de clubs de convergence ou si les trajectoires de croissance restaient spécifiquement nationales.

Une partie de la littérature qui ne sera pas abordé ici concerne les applications de la croissance endogène à d'autres domaines que la stricte théorie de la croissance. Ont

[1] Grossman et Helpman [1991], Barro et Sala-i-Martin [1995], Aghion et Howitt [1998].
[2] Voir notamment Amable et Guellec [1992].
[3] Voir Durlauf et Quah [1998] pour une contribution récente.

ainsi été étudiés les liens entre croissance et commerce international[4], croissance et secteur financier[5], croissance et répartition du revenu[6], etc. La présente contribution n'a pas pour but de faire un tour d'horizon exhaustif des théories de la croissance endogène, ce qui serait impossible dans le cadre restreint adopté ici. On se contentera dans un premier temps de rappeler en quoi elle se démarque de la théorie traditionnelle de la croissance celle dite 'du modèle de Solow' puis de présenter les modèles canoniques de croissance endogène. On abordera ensuite des développements plus récents de cette approche, ceux qui distinguent entre innovations radicales et innovations incrémentales, et les contribution qui traitent de l'effet de taille.

2 Les limites de la croissance exogène

Afin de comprendre l'apport de la croissance endogène, il n'est pas inutile de repartir du modèle traditionnel néo-classique de croissance "exogène" tel que celui proposé par Solow [1956]. Le cadre est extrèmement simple. On considère une économie avec un comportement de consommation de type "keynésien" (à propension à consommer constante) et un secteur des entreprises qui produit un bien unique pouvant alternativement servir à l'investissement ou à la consommation. Il y a concurrence parfaite sur le marché du bien comme sur celui des facteurs de production, lesquels sont au nombre de deux: le capital et le travail. La production se fait à rendements constants sur l'ensemble des facteurs et donc à rendements marginaux décroissants sur chacun des deux facteurs. La fonction de production est:

$$Y = F(K, L) \tag{1}$$

où Y est la production nette du bien, K le stock de capital et L le facteur travail. F est une fonction homogène de degré 1. On ajoute généralement les "conditions d'Inada": les productivités marginales de chacun des facteurs tendent vers zéro lorsque les facteurs tendent vers l'infini, et vers l'infini lorsque chacun des facteurs concernés tend vers zéro.

Il est plus aisé de considérer l'évolution du produit par tête (ou encore par travailleur). Compte tenu de l'homogénéité de degré 1 de la fonction de production, on peut écrire le produit par tête comme:

$$y \equiv \frac{Y}{L} = F\left(\frac{K}{L}, 1\right) \equiv f(k) \tag{2}$$

avec $k \equiv \frac{K}{L}$. La fonction f n'a comme seul argument que le stock de capital par travailleur. f est à rendements décroissants. L'accumulation du capital par tête peut alors s'écrire comme:

$$\dot{k} = s \cdot f(k) - (\delta + n) \cdot k \tag{3}$$

où s est le taux d'épargne, δ le taux de dépréciation du capital et n le taux de croissance de la population. Les propriétés de la fonction f font que l'économie converge vers un état stationnaire k^* tel que:

$$k^* = \frac{s \cdot f(k^*)}{n + \delta} \tag{4}$$

En ce point, le taux de croissance de l'économie est nul. Par conséquent, le modèle de croissance néo-classique sans progrès technique ne peut représenter qu'une croissance de moyen terme, lorsqu'une économie dont le stock de capital par tête est inférieur à sa valeur d'équilibre stationnaire, converge vers cette valeur d'équilibre. Une fois parvenue à l'équilibre stationnaire, l'économie cesse de croître.

[4] Voir Grossman et Helpman [1991]
[5] Voir Amable et Chatelain [1996].
[6] Voir Benabou [1996].

Il est possible d'obtenir une croissance de long terme si on spécifie un changement technique exogène qui "déplace" la fonction de production au cours du temps. Le comportement de l'économie est peu changé par rapport à la situation d'absence de progrès technique. Il est indispensable de prendre en compte des améliorations techniques qui améliorent l'efficacité du facteur travail, en spécifiant par exemple que le facteur travail "efficace" est la multiplication du travail proprement dit (L) et d'une facteur d'efficacité qui croît à un taux constant. On peut obtenir le même type de résolution que précédemment en considérant des variables corrigées de l'effet du changement technique c'est à dire des valeurs des variables rapportées au travail "efficace" et non plus au seul travail. On obtient alors un état stationnaire vers lequel l'économie converge dans les mêmes conditions que précédemment. La seule différence par rapport au cas précédent est que l'état stationnaire se déplace au cours du temps, sous l'influence du progrès technique exogène.

Cette dépendance de la croissance de long terme du produit par tête à la présence d'un terme exogène est une des principales faiblesses du modèle de croissance néo-classique. Il est nécessaire d'avoir recours à un facteur non expliqué pour lui faire reproduire une croissance qui va au-delà de la seule convergence vers l'état stationnaire. De plus, le changement technique étant exogène, le phénomène de croissance de long terme reste pour une large part inexpliqué. Dans le long terme, la croissance dépend du changement technique, lequel ne dépend de rien dans le modèle; il est même gratuit, ce qui est aussi bien compte tenu du fait que la rémunération des facteurs de production épuise la totalité du produit. En raison du manque d'explication quant à la présence d'un facteur crucial, on peut donc dire que le modèle néo-classique ne propose pas de théorie de la croissance de long terme.

Il existe d'autres aspects du modèle de croissance "exogène" qui ont fait l'objet de critiques dans les années 1980 et 1990. L'une des principales implications du modèle de croissance néo-classique concerne la convergence des niveaux de vie des différents pays vers une même valeur. Le cadre dans lequel on se place est celui d'un monde composé d'un certain nombres d'économies fermées caractérisées par des stocks de capital accumulé différents. Par conséquent, il existe des économies riches et des économies pauvres. L'une des hypothèses communes du modèle néo-classique est que toutes les économies ont accès à la même technique, ce qui est logique puisque le changement technique est gratuit. La fonction de production f est donc la même pour tous les pays (de même que le taux de dépréciation δ). Dans ces conditions, la persistance à long terme d'écarts dans les niveaux de développement des différents pays repose sur la possibilité de valeurs d'équilibre stationnaire différentes pour les stocks de capital par travailleur. Cette valeur est donnée par (4) et on constate que les seuls paramètres susceptibles d'influencer k^* sont le taux d'épargne s et le taux de croissance de la population n. Par conséquent, des économies "structurellement similaires", c'est à dire caractérisées par les mêmes valeurs du taux d'épargne et la même croissance de la population, devraient converger vers le même niveau de développement. Par corollaire, les différences dans les niveaux de développement à court terme devraient être attribuées à des différences internationales dans les rythmes d'accumulation des facteurs de production.

Cette proposition a donné lieu à de nombreux tests empiriques aux conclusions contrastées, qui ne seront pas passés en revue dans cet article. Nous nous concentrons sur les modèles théoriques. L'extinction de la croissance et la convergence vers un certain niveau de capital par tête proviennent de la décroissance du produit marginal du capital, seul facteur accumulable dans le modèle.[7] Dans ces conditions, les pays les plus riches, ceux dont le stock de capital par tête est le plus élevé, sont aussi les pays où le rendement du capital est le plus faible, ce qui explique que l'accumulation du capital y soit plus lente qu'ailleurs. Cette décroissance de la productivité marginale du (ou de l'ensemble des) facteur(s) accumulable(s) est donc l'hypothèse centrale pour l'obtention de la convergence de même qu'elle est responsable de l'extinction de la croissance.

La levée de cette hypothèse et la prise en compte de rendements marginaux constants

[7] Les tests empiriques sur la convergence considèrent le plus souvent un modèle avec un troisième facteur: le capital humain.

permet l'obtention d'une croissance de long terme. Si la fonction de production est transformée en:

$$y = A \cdot k \tag{5}$$

on obtient un taux de croissance du produit par tête y égal à :

$$g_y = s \cdot A - (n + \delta) \tag{6}$$

Comme il n'y a pas de dynamique transitoire dans ce modèle, ce taux de croissance s'applique à tout instant. Comme le rendement marginal du capital est constant, les incitations à investir ne diminuent pas avec l'accumulation du capital. Les conséquences en termes de convergence sont également modifiées. On peut déduire de (6) que le taux de croissance sera identique pour toutes les économies structurellement similaires; cependant, deux de ces économies partant de niveaux de développement différents ne verront pas les écarts diminuer au cours du temps. La similarités des économies n'implique qu'une convergence en taux de croissance, pas en niveau de développement.

3 Les sources de la croissance endogène

Nous pouvons maintenant nous intéresser aux modèles de croissance endogène qui reposent sur des rendements constants dans l'accumulation des facteurs de croissance. La plupart de ces modèles ont été développés dans les années 1980, c'est à dire à une époque où la fonction de consommation keynésienne n'était plus considérée comme une hypothèse admissible dans des modèles aux fondements microéconomiques soi-disant rigoureux. La plupart des modèles font donc reposer les comportements d'épargne et de consommation sur à partir de la maximisation intertemporelle d'une fonction d'utilité qui peut ne dépendre que de la seule consommation:

$$U = \int_0^\infty e^{-\rho t} \cdot u\left[c\left(t\right)\right]\ dt \tag{7}$$

En choisissant pour la fonction d'utilité instantanée une spécification à élasticité de substitution intertemporelle constante:

$$u\left[c\right] = \frac{c^{1-\sigma} - 1}{1 - \sigma} \tag{8}$$

et en supposant qu'il n'existe pas de contrainte de crédit, on obtient une expression du taux de croissance de la consommation dépendant du taux d'intérêt r et donc de la productivité marginale du capital, du taux de préférence pour le présent ρ et de l'élasticité de substitution intertemporelle σ.

$$\frac{\dot{c}}{c} = \frac{r - \rho}{\sigma} \tag{9}$$

Comme à l'équilibre -c'est à dire hors dynamique transitoire- consommation et produit croîtront au même taux, cette équation fournit la moitié de la résolution de bon nombre de modèles de croissance endogène. L'autre moitié consiste à déterminer la valeur de r.

3.1 l'accumulation de facteurs sans rendements marginaux décroissants

3.1.1 l'accumulation de connaissances

Le premier modèle de croissance endogène est le modèle de Romer [1986] qui repose sur l'accumulation de connaissances. En supposant que les connaissances et le capital physique sont assimilables l'un à l'autre, on peut aussi parler de croissance fondée sur l'accumulation d'équipements productifs incorporant les dernières connaissances techniques découvertes. On peut alors poser la fonction de production d'une firme telle que:

$$y = A \cdot K^{\eta} \cdot k^{\alpha} \tag{10}$$

Les lettres minuscules renvoient à la firme alors que les lettres majuscules concernent l'économie aggrégée. Le terme en K^{η} est une externalité positive pour chaque firme, qui représente l'effet positif mais inappropriable que l'accumulation de connaissances représente pour chaque firme. Ce terme d'externalité positive implique que les décisions d'investissement prises par les firmes seront sous-optimales. En supposant un nombre fixe, N, de firmes symétriques dans l'économie, la fonction de production agrégée s'écrit comme:

$$Y = A \cdot K^{\eta} \cdot K^{\alpha} \tag{11}$$

La stabilité du sentier de croissance dépend alors de la valeur des paramètres α et η. Si $\alpha + \eta = 1$, les rendements agrégés du capital sont constants et l'économie se comporte comme le modèle $A \cdot K$ présenté précédemment. Le taux de croissance de l'économie est alors:

$$g = \frac{\alpha \cdot A - \rho}{\sigma} \tag{12}$$

Si la somme des coefficients excède 1, l'économie est sur un sentier de croissance explosive, ce qui se comprend facilement puisque le rendement marginal du capital est toujours croissant, ce qui renforce perpétuellement l'incitation à investir. Si la somme des coefficients est strictement inférieure à 1, on retombe dans le cas du modèle de croissance néo-classique, avec extinction de la croissance à long terme et convergence des pays structurellement similaires vers le même niveau de développement économique.

La sous-optimalité de l'équilibre décentralisé résulte de la différence entre la productivité marginale privée du capital, $\alpha \cdot A$, et la productivité marginale sociale, A, qui prend en compte l'effet externe positif exercée par l'accumulation de capital (et donc de connaissances) de chacune des firmes sur la productivité de toutes. Par conséquent, le taux de croissance optimal $g^* = \frac{A-\rho}{\sigma}$ est supérieur au taux de croissance résultant de l'équilibre décentralisé donné par (12). Cette différence ouvre la possibilité d'une intervention publique optimale. Comme les firmes laissées à elles-même sous-investissent dans le facteur responsable de la croissance à long-terme, il est nécessaire d'encourager cet investissement. C'est d'ailleurs une politique qui pourra trouver à s'appliquer dans la plupart des modèles de croissance endogène avec externalités positives associées à un ou plusieurs des facteurs de production. Dans le cadre du modèle de Romer [1986], une subvention à l'investissement permettra de faire en sorte que les firmes investissent plus et rapprochera l'économie de son taux de croissance optimal.

Comme l'ont charitablement fait remarquer Aghion et Howitt [1998], cette idée était déjà présente chez Frankel [1962]. Ce dernier considérait un "modificateur de développement" fonction du rapport capital/travail agrégé. L'idée que le niveau de la productivité est fonction (croissante) de la mécanisation peut se justifier de plusieurs façons; on retrouve une idée proche, exprimée en taux de croissance, dans la fonction de progrès technique de Kaldor [1957]. La production d'une firme pouvait donc s'écrire:

$$y = A \cdot k^{\alpha} \cdot l^{1-\alpha} \tag{13}$$

avec:

$$A = A_0 \cdot \left(\frac{K}{L}\right)^{\gamma} \tag{14}$$

les lettres minuscules étant employées pour les firmes et les lettres majuscules pour l'économie entière. En supposant un nombre fixe de firmes, la fonction de production de l'économie agrégée s'écrit comme:

$$Y = A_0 \cdot \left(\frac{K}{L}\right)^{\gamma} \cdot K^{\alpha} \cdot L^{1-\alpha} \tag{15}$$

et on retrouve le modèle "$A \cdot K$" si $\gamma = 1 - \alpha$.

3.1.2 l'accumulation de capital humain

Lucas [1988] a proposé un modèle de croissance endogène qui repose sur l'accumulation de capital humain;[8] les individus doivent arbitrer entre travailler pour produire ou consacrer leur temps à accumuler du capital humain afin d'être plus productif. La fonction de production de l'économie se déduit de la fonction de production de chacun des individus qui la composent. La production nette par travailleur s'écrit comme

$$y = A \cdot k^{\beta} \cdot (u \cdot h)^{1-\beta} \cdot h_a^{\gamma} \tag{16}$$

$u \in [0, 1]$ est la fraction du temps disponible consacré à la production, la fraction $1 - u$ sera donc consacrée à l'accumulation individuelle de capital humain. Le terme en h_a^{γ} représente les effets externes de l'éducation. h_a est le niveau moyen de capital humain par individu dans l'économie. Unepopulation où le niveau moyen de capital humain est élevé améliorera donc la productivité de chacun. Il s'agit donc d'une sorte de compétence collective liée aux échanges d'information entre agents. Lucas met en avant leur rôle dans les effets d'agglomération (la formation des villes).

L'accumulation individuelle de capital humain se fait selon:

$$\dot{h} = \delta \cdot (1 - u) \cdot h \tag{17}$$

La forme linéaire en h de l'accumulation de capital humain va permettre une croissance endogène de l'économie.

L'accumulation de capital physique par travailleur suit

$$\dot{k} = y - c - n \cdot k \tag{18}$$

La résolution du programme de maximisation intertemporelle conduit à une expression du taux de croissance de la consommation qui n'est autre qu'une version de (**??**):

$$g_c = \frac{A \cdot \beta \cdot \left(\frac{u \cdot h}{k}\right)^{1-\beta} \cdot h^{\gamma} - \rho - n}{\sigma} \tag{19}$$

et le taux de croissance du capital physique est:

$$\widehat{g_k} = \frac{1 + \beta + \gamma}{1 - \beta} \cdot \widehat{g_h} \tag{20}$$

Un chapeau désignant les taux de croissance d'équilibre dynamique. Le taux de croissance d'équilibre du capital humain s'exprime, lui, comme :

$$\widehat{g_h} = \frac{1 - \beta}{\sigma \cdot (1 - \beta + \gamma) - \gamma} \cdot (\delta - \rho) \tag{21}$$

La fraction du temps destiné à l'éducation, c'est à dire à l'accumulation du capital humain, est:

$$1 - \widehat{u} = \frac{1 - \beta}{\sigma \cdot (1 - \beta + \gamma) - \gamma} \cdot \frac{\delta - \rho}{\delta} \tag{22}$$

En raison de la non prise en compte de l'externalité sur le capital humain, l'équilibre décentralisé est sous-optimal. L'investissement en éducation est inférieur à l'investissement de l'optimum social:

[8] Le premier modèle de ce genre remonte au moins à Uzawa [1965].

$$1 - u^* = \frac{(1-\beta)\cdot(\delta-\rho)+\gamma\cdot\delta}{(1-\beta+\gamma)} \cdot \frac{1}{\delta\cdot\sigma} > 1 - \widehat{u} \tag{23}$$

$$g_h^* = \frac{(1-\beta)\cdot(\delta-\rho)+\gamma\cdot\delta}{(1-\beta+\gamma)} \cdot \frac{1}{\sigma} > \widehat{g_h} \tag{24}$$

La sous-optimalité de l'équilibre de marché est dûe à la négligence de l'effet externe positif lié à l'accumulation de capital humain par chaque agent. Il est donc possible d'intervenir pour, par exemple, subventionner l'accumulation de capital humain.

Une autre implication du modèle concerne l'explication de la persistance des disparités de niveaux de développement. Deux économies possédant initialement le même ratio k/h peuvent connaître des trajectoires divergentes. Le pays qui possède la plus grande quantité de chacun des deux facteurs aura aussi une rentabilité de ces facteurs plus élevée. Par conséquent, les facteurs mobiles auront tendance à émigrer vers ce pays, ce qui enclenchera une dynamique de divergence des niveaux de développement entre les deux pays.

Ces phénomènes de divergence et de convergence peuvent se représenter plus simplement encore en prenant en compte le modèle de Lucas [1993]. La fonction de production ne prend plus en compte l'externalité liée au capital humain:

$$y = A \cdot k^{\alpha} \cdot (u \cdot h)^{1-\alpha} \tag{25}$$

u est, comme précédemment, la fraction du temps disponible passée à produire. Lucas adopte une fonction d'épargne "à l'ancienne", avec une propension à épargner s constante; en négligeant la croissance de la population, l'accumulation de capital physique peut donc s'écrire comme:

$$\dot{k} = s \cdot y \tag{26}$$

et l'accumulation de capital humain se fait toujours selon:

$$\dot{h} = \delta \cdot (1-u) \cdot h$$

u et s sont considérés comme des paramètres donnés. Le taux de croissance de la productivité totale des facteurs peut donc s'écrire comme:

$$\widehat{y} - \alpha \cdot \widehat{k} - (1-\alpha)\cdot\widehat{h} = \widehat{y} - \frac{s\cdot y}{k} - (1-\alpha)\cdot\delta\cdot(1-u) \tag{27}$$

On suppose que le travail est immobile et le capital parfaitement mobile. On prend en compte n pays indicés par i. Le stock de capital mondial est:

$$K = \sum_i k_i \tag{28}$$

le stock de capital humain est défini par:

$$H = \sum_i u_i \cdot h_i \tag{29}$$

Le rendement du capital r doit être identique dans tous les pays en raison de la parfaite mobilité du capital. A, facteur technologique, est supposé commun à tous les pays. On a donc:

$$r = \alpha \cdot A \cdot \left(\frac{K}{H}\right)^{\alpha-1} \tag{30}$$

Toujours en raison de la parfaite mobilité du capital physique, cette formule s'applique aussi pour chaque pays:

$$r = \alpha \cdot A \cdot \left(\frac{k_i}{u_i \cdot h_i}\right)^{\alpha-1} \tag{31}$$

ce qui peut encore s'écrire comme:

$$k_i = \left(\frac{r}{\alpha \cdot A}\right)^{\frac{1}{\alpha-1}} \cdot u_i \cdot h_i$$

Le stock de capital mondial est alors:

$$K = \left(\frac{r}{\alpha \cdot A}\right)^{\frac{1}{\alpha-1}} \cdot H \tag{32}$$

et le niveau de production dans chaque pays s'exprime comme:

$$y_i = A \cdot \left(\frac{K}{H}\right)^{\alpha} \cdot u_i \cdot h_i \tag{33}$$

le rapport capital physique sur capital humain $\frac{k_i}{u_i \cdot h_i}$ est identique pour tous les pays.[9] Le long d'une trajectoire de croissance régulière, r est constant, k_i et $u_i \cdot h_i$ croissent au même taux, ainsi que y_i. Comme y_i est proportionnel au niveau de capital humain, des différences initiales en niveau persisteront le long de la trajectoire de croissance d'équilibre. Ceci donne des trajectoires de croissance strictement nationales, tout comme dans les différentes variantes du modèle $A \cdot k$, mais cela ne permet pas d'expliquer la formation de clubs de convergence, c'est à dire la convergence d'un certain nombre de pays vers un même niveau de développement, alors que d'autres groupes de pays convergeront vers leurs niveaux de développement d'équilibre respectifs.

La reproduction du fait stylisé relatif à l'existence de clubs de convergence nécessite une modification des hypothèses du modèle afin d'intégrer un mécanisme de rattrapage. Pour ce faire, on peut supposer qu'au sein d'un club de convergence, les économies les plus avancées exercent des externalités positives sur l'accumulation de capital humain ou de connaissances des pays les plus en retard, au moyen d'importations de techniques, de connaissances spécifiques, de mode d'organisation, d'imitation, etc. On peut intégrer explicitement ce type de mécanisme en considérant la variable $Z = \frac{H}{\sum_i u_i}$ qui est le niveau moyen de capital humain dans un club donné, et on pose maintenant l'accumulation de capital humain comme:

$$\dot{h} = \delta \cdot (1-u) \cdot h^{1-\theta} \cdot Z^{\theta} \tag{34}$$

Cette spécification rend l'accumulation du capital humain dépendant du niveau moyen dans un groupe de pays donné. Dans ces conditions, une économie dont le stock de capital humain est inférieur à la moyenne croîtra plus rapidement qu'une autre. Si par exemple les u_i sont les mêmes pour tous les pays ($= u$), H et Z croissent au taux $\delta \cdot (1-u)$ et $z_i \equiv \frac{h_i}{Z}$, le niveau relatif de capital humain augmente comme:

$$\begin{aligned} \dot{z_i} &= \frac{\dot{h_i}}{Z} - \frac{h_i}{Z} \cdot \frac{\dot{Z}}{Z} = \delta \cdot (1-u) \cdot z_i^{1-\theta} - z_i \cdot \delta \cdot (1-u) \\ &= \delta \cdot (1-u) \cdot z_i \cdot \left(z_i^{-\theta} - 1\right) \end{aligned}$$

Donc z_i augmente lorsqu'il est inférieur à 1 et diminue sinon. On peut donc observer une convergence des niveaux relatifs de capital humain vers 1, et donc une convergence vers les mêmes niveaux de revenu. On peut alors expliquer la convergence, par clubs ou non, à partir d'un mécanisme tel que donné dans (34), qui ne rend plus l'accumulation du capital humain uniquement dépendante du niveau national de capital humain, mais permet des externalités positives provenant des pays les plus avancés du club.

[9] En raison de l'unicité du taux d'intérêt pour l'ensemble de l'économie mondiale.

3.2 l'innovation

Une deuxième classe de modèles aborde le changement technique de manière plus précise que les modèles à accumulation de facteurs et fait reposer le mécanisme endogène de croissance sur les innovations. Ces innovations se manifestent sous la forme de nouveaux biens ou de nouvelles qualités de biens déjà existants. Il peut s'agir de biens de production, auquel cas les innovations contribueront à la croissance de la productivité, ou de biens de consommation, qui augmenteront alors directement l'utilité des agents. Ces modèles sont assez "naturellement" amenés à adopter un cadre de concurrence imparfaite puisque les incitations à l'innovation dépendent des rentes auxquelles celle-ci pourra donner lieu.

Il existe deux grandes familles de modèles d'innovation et de croissance. La première rassemble les modèles où l'innovation augmente la gamme de produits intermédiaires utilisés dans la production du bien final ou la gamme de produits consommé par les agents et entrant directement ou indirectement comme arguments de leur fonction d'utilité. La première interprétation est une représentation de l'idée de rendements croissants permis par l'augmentation de la division du travail exprimée par Young [1928].[10] La division macroéconomique du travail prend la forme d'un accroissement du détour de production, c'est à dire qu'un plus grand nombre d'étapes intermédiaires de production s'insèrent entre les facteurs primaire et le produit final. Cette plus grande sophistication de la production demande une utilisation de biens d'équipements spécialisés, dont la mise en oeuvre est permise par l'accroissement de la taille du marché qui est lui même rendu possible par les progrès de productivité dus au plus grand détour de production. On voit donc là une représentation cumulative de la croissance qui associe progrès technique, innovation et accroissement de la taille du marché.

La deuxième famille de modèles se concentre sur l'innovation 'verticale', c'est à dire portant sur la qualité des produits. Cette représentation suppose que les produits de meilleure qualité remplacent les produits de qualité inférieure. Ce processus se produisant sans cesse, c'est donc une représentation de la croissance où les innovations remplacent d'anciennes découvertes et où les rentes de monopoles associées à une innovation ne durent que jusqu'à ce que survienne une nouveau produit de meilleure qualité.

3.2.1 l'innovation 'horizontale'

Le modèle le plus représentatif de l'innovation horizontale et de la croissance par accroissement de la division sociale du travail. On peut en donner une représentation simplifiée en s'inspirant du livre d'Aghion et Howitt [1998]. La production utilise du travail L_1 et un ensemble de biens intermédiaires qui sont disponibles sur un continuum $[0, A]$:

$$Y = L_1^{1-\alpha} \cdot \int_0^A x_i^\alpha \; di \tag{35}$$

Le secteur du bien final est en concurrence parfaite. L'accroissement de la gamme de produits intermédiaires disponibles est rendu possible par la recherche de nouveaux biens. Cette recherche nécessite l'emploi de personnel spécifique, noté L_2. Le taux de croissance de la gamme de produits intermédiaires est proportionnel au nombre de chercheurs engagés. Le nombre de produits nouveaux découverts croît donc avec le stock de produits déjà découverts, ce qui est une représentation du processus de recherche avec des rendements croissants. Cela suppose donc que les connaissances déjà accumulées, représentées par l'étendu de la gamme de produits disponibles, exercent une externalité positive sur le processus de découverte de nouveaux produits. Cette externalité est ignorée par les agents qui vont investir dans la recherche, avec pour conséquence un sous-investissement et un taux de croissance de l'économie inférieur à la valeur optimale.

$$\frac{\dot{A}}{A} = \delta \cdot L_2 \tag{36}$$

[10] Voir aussi Yang et Borland [1991].

Ainsi le travail disponible dans l'économie $\overline{L}$ peut-il alternativement être employé dans le secteur de la production ou dans le secteur de la recherche.

$$\overline{L} = L_1 + L_2 \tag{37}$$

Le modèle est donc résolu lorsqu'est trouvée l'allocation d'équilibre de la population entre les secteurs de la production et de la recherche. Cet équilibre est réalisé lorsque les salaires payés dans chaque secteur sont égaux. Une unité de travail employée dans la recherche procure un revenu égal à $p_A \cdot \delta \cdot A$ alors qu'elle engendre un revenu de $(1-\alpha) \cdot L_1^{-\alpha} \cdot A \cdot x^{\alpha}$ lorsqu'elle est employé dans le secteur du bien final. La libre circulation entre le secteur de la recherche et le secteur du bien final égalise le salaire des différents travailleurs qualifiés. Chaque nouvelle découverte est protégée par un brevet éternel, le prix d'un brevet sera alors égal à:

$$p_A = \frac{1-\alpha}{\delta} \cdot L_1^{-\alpha} \cdot x^{\alpha} \tag{38}$$

La demande de biens intermédiaires par le secteur du bien final est telle que:

$$p_x = L_1^{1-\alpha} \cdot \alpha \cdot x^{\alpha-1} \tag{39}$$

Le producteur de chaque bien intermédiaire étant un monopole, il fixe donc son prix en conséquence. $\max p_x \cdot x - r \cdot x$ donne la valeur de r :

$$r = \alpha^2 \cdot \left(\frac{x}{L_1}\right)^{\alpha-1} \tag{40}$$

La valeur d'un brevet est égale à la somme actualisée des flux de profits que procure le bien intermédiaire associé :

$$\begin{aligned} p_A &= \int_0^{\infty} e^{-r \cdot t} \cdot [p_x \cdot x - r \cdot x] \; dt \\ &= \frac{1-\alpha}{\alpha} \cdot x \end{aligned} \tag{41}$$

A l'équilibre stationnaire, la répartition de la population entre production et recherche est fixe et le taux de croissance du produit Y est égal au taux de croissance de A :

$$g_Y = g_A = \delta \cdot L_2 \tag{42}$$

Les équations ci-dessus et (**??**) donnent l'expression du taux de croissance :

$$g_Y = \frac{\alpha \cdot \delta \cdot \overline{L} - \rho}{\alpha + \sigma} \tag{43}$$

On peut faire plusieurs remarques sur ce modèle de croissance. La plus importante concerne l'effet de la taille de la population sur la croissance. Comme l'équation ci-dessus l'indique, le taux de croissance de l'économie augmente avec la taille de l'économie elle-même, représentée par la taille de la population. Cet effet taille sera discutée plus bas. Une conséquence de cet effet est qu'en deçà d'une certaine taille de population, il n'est pas rentable de consacrer des moyens à la recherche, et l'économie ne croît pas. L'économie en question reste donc piégée dans la pauvreté en raison des rendements croissants dans la recherche. Une autre conséquence de l'effet taille est que l'ouverture à l'échange international devrait amener une hausse du taux de croissance des économies concernées puisque les externalités liées à la connaissance peuvent déborder les frontières. Les connaissances accumulées dans un pays peuvent entrer dans l'accumulation de connaissances des autres pays (équation 36).

3.2.2 l'innovation horizontale avec obsolescence

Une des caractéristiques du modèle précédent est qu'une invention donne naissance à un nouveau bien intermédiaire qui va être utilisé éternellement. Cette caractéristique apparait peu réaliste, le phénomène d'obsolescence étant présent dans les économies réelles. Caballero et Jaffe [1993] ont proposé un modèle d'innovation et de croissance où l'extention de la gamme de produits intermédiaires s'accompagne d'un effet d'obsolescence. Comme les nouveaux biens intermédiaires sont systématiquement de qualité supérieure aux anciens biens, la demande va se porter prioritairement sur les nouveaux biens et la part de marché des anciens biens va progressivement diminuer. Les améliorations de qualité portant sur les nouveaux biens intermédiaires sont exogènes, il est supposé que la qualité d'un bien intermédiare croît de manière exponentielle avec l'indice du bien en question. On pose la fonction de production suivante pour le bien final:

$$Y = \left[\int_{-\infty}^{A} \left[x\left(i\right) \cdot e^{i} \right]^{\frac{\eta-1}{\eta}} \; di \right]^{\frac{\eta}{\eta-1}} \tag{44}$$

$\eta > 1$. A est l'indice du bien intermédiaire le plus récent utilisé dans la production du bien final. La concurrence est parfaite dans le secteur du bien final. Une unité de travail donne une unité de bien intermédiaire. La demande de bien intermédiaire est telle que la dépense sur le bien i est:

$$p_i \cdot x\left(i\right) = \left[\frac{e^{i} \cdot P_Y}{p_i} \right]^{\eta-1} \tag{45}$$

avec p_i le prix du bien intermédiaire i et P_Y le prix du bien final qui est égal à:

$$P_Y = \left[\int_{-\infty}^{A} \left[p_i \cdot e^{-i} \right]^{1-\eta} \; di \right]^{\frac{1}{1-\eta}} \tag{46}$$

Comme l'élasticité prix de la demande de bien intermédiaire est la même pour tous les producteurs et qu'ils ont tous le même coût marginal, ils pratiqueront tous le même prix p qui est donné par l'application d'un taux de marge sur le coût salarial w:

$$p = \frac{\eta}{\eta - 1} \cdot w \tag{47}$$

En notant $l\left(i\right)$ ($= x\left(i\right)$ pusqu'il faut une unité de travail pour produire une unité de bien intermédiaire) le travail affecté à la production du bien intermédiaire i,on peut déduire :

$$l\left(i\right) = \frac{\left(\eta - 1\right)^{2}}{\eta \cdot w} \cdot e^{(\eta-1)\cdot(i-A)} \tag{48}$$

On voit donc que les biens les plus anciens sont produits en quantité moindre et que le travail qui leur est affecté diminue avec la découverte de nouveaux biens. La production des biens intermédiaires les plus récents absorbe une plus grande quantité de travail que celle des biens anciens. L'effet d'obsolescence des biens se traduit donc par une diminution progressive de la production et des déplacements de la force de travail en direction des nouveaux secteurs de biens intermédiaires. La relation entre l'emploi dans le secteur des biens intermédiaires et le salaire donne:

$$w = \frac{\eta - 1}{\eta \cdot L_1} \tag{49}$$

où L_1 est le travail affecté à la production des biens intermédiaires, et donc:

$$l\left(i\right) = \left(\eta - 1\right) \cdot e^{(\eta-1)\cdot(i-A)} \cdot L_1 \tag{50}$$

La part de marché du bien i décroît donc bien avec son ancienneté mesurée par la distance $(A - i)$. Le secteur du bien le plus récent, le bien indicé par A, est celui qui emploie le plus de travailleurs. La part d'un secteur dans l'emploi total tend vers zéro quand s'annule quand $i - A \to -\infty$. La croissance de la gamme de produits intermédiaires amène une redistribution de la force de travail en faveur des nouveaux secteurs. On obtient l'expression du produit final:

$$Y_t = (\eta - 1)^{\frac{1}{1-\eta}} \cdot L_1 \cdot e^{A_t}$$

A l'équilibre stationnaire, on obtient un taux de croissance du produit par travailleur constant si A est une fonction linéaire du temps.

Trouver l'expression de $A(t)$ nécessite d'étudier l'allocation du facteur travail à la recherche. Le profit que fait la firme produisant le bien intermédiaire i est donné par :

$$\pi(i) = \frac{(\eta - 1)}{\eta} \cdot e^{(\eta-1)\cdot(i-A_t)} \tag{51}$$

La valeur actualisée des profits de la firme créée à la date t est donc :

$$\int_t^\infty e^{-r\cdot(s-t)} \cdot \frac{(\eta-1)}{\eta} \cdot e^{(\eta-1)\cdot(A_t-A_s)}\, ds = \frac{(\eta-1)}{\eta} \cdot \frac{1}{r + \theta\cdot(\eta-1)} \tag{52}$$

en posant $A(\tau) = \theta \cdot \tau$

Si la découverte d'un nouveau bien demande que μ chercheurs s'y consacrent, on a $\theta = \frac{L_2}{\mu}$ ce qui, compte tenu de (49) et(52), conduit à:

$$L_2 = \frac{\overline{L} - \rho\cdot\mu}{\eta} \tag{53}$$

Comme dans le modèle de Romer, seule une économie possédant une taille suffisante consacrera des ressources à la recherche. Le taux de croissance de l'économie est alors donné par:

$$g_Y = \frac{\frac{\overline{L}}{\mu} - \rho}{\eta} \tag{54}$$

Comme dans le modèle de Romer [1990], on remarque la présence d'un effet taille dans l'équation du taux de croissance.

3.2.3 l'innovation 'verticale'

On vient de voir comment les améliorations de qualité (la dimension verticale de l'innovation) amenait un effet d'obsolescence qui conduisait à l'abandon progressif de l'utilisation de certains biens intermédiaires. Cette idée est systématisée dans les modèles tels que celui d'Aghion et Howitt [1992] où une innovation, baptisée "schumpeterienne", remplace la découverte précédente et met fin aux anciennes rentes de monopole. Chaque innovation augmente la productivité du bien intermédiaire produit grâce à elle. Pour des innovations d'une taille suffisante, le nouveau bien intermédiaire remplace le précédent, jusqu'à la prochaine innovation. On suppose pour simplifier un seul bien intermédiaire servant à produire le bien final, dont la production se fait selon:

$$y(\tau) = A_0 \cdot \gamma^t \cdot x(\tau)^\alpha \tag{55}$$

La fonction de production ci-dessus indique que la production du bien final se fait en utilisant la t-ième innovation du bien intermédiaire au temps τ. Chaque nouvelle innovation multiplie la productivité du bien intermédiaire par un facteur $\gamma > 1$. Le bien intermédiaire est utilisé en quantité $x(\tau)$ et la production se fait avec des rendements décroissants ($\alpha < 1$). Comme dans les modèles précédent, l'équilibre de l'économie implique une certaine répartition du facteur travail entre la production et la recherche. On note toujours L_2 le travail consacré à la recherche. On suppose qu'une unité de travail consacrée à la production donne une unité de bien intermédiaire. La condition de plein emploi s'écrit donc comme:

$$\overline{L} = x + L_2 \tag{56}$$

Dans ce qui suit, on peut abandonner l'indice de temps τ, car la seule dynamique va porter sur les innovations qui se produisent de façon discrète en suivant un processus de Poisson. Les innovations arrivent à chaque instant avec une probabilité instantanée $\lambda \cdot L_2$. On prend donc en compte une processus d'innovation "sans mémoire", au sens où les ressources passées consacrées à la recherche n'exercent aucune influence sur la probabilité contemporaine de faire une iinovation.

En notant w_t le taux de salaire en vigueur lorsque la t-ième innovation est utilisé, et V_{t+1} la valeur de marché de la $t+1$-ième innovation, qui reste à découvrir, la condition d'arbitrage s'écrit comme :

$$w_t = \lambda \cdot V_{t+1}$$

et on peut écrire l'évolution de V_{t+1} comme le profit instantanée associé à la vente du bien intermédiaire associé à la $t+1$-ième innovation, π_{t+1}, diminuée de la probabilité de perte de la rente de monopole, $\lambda \cdot L_{2t+1} \cdot V_{t+1}$:

$$r \cdot V_{t+1} = \pi_{t+1} - \lambda \cdot L_{2t+1} \cdot V_{t+1} \tag{57}$$

L'expression de V_{t+1} est donc :

$$V_{t+1} = \frac{\pi_{t+1}}{r + \lambda \cdot L_{2t+1}} \tag{58}$$

On peut déterminer le profit associé à la t-ième innovation.

$$\pi_t = \max_x p_{xt} \cdot x - w_t \cdot x \tag{59}$$

avec la fonction de demande pour le bien intermédiaire donnée par:

$$p_{xt} = \alpha \cdot A_0 \cdot \gamma^t \cdot x^{\alpha-1} \tag{60}$$

la quantité de bien intermédiaire utilisée est donc:

$$x = \left(\frac{\alpha^2}{\omega_t}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \tag{61}$$

en notant $\omega_t \equiv \frac{w_t}{A_t}$ le salaire ajusté à la productivité. On en déduit alors l'expression du profit associée à l'innovation t:

$$\pi_t = \eta \cdot A_t \cdot \omega_t^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} \tag{62}$$

$\eta \equiv \alpha^{\frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \cdot (1-\alpha)$.

L'équation d'arbitrage sur le salaire réexprimée pour ω donne :

$$\omega_t = \lambda \cdot \frac{\gamma \cdot \eta \cdot \omega_{t+1}^{\frac{\alpha}{\alpha-1}}}{r + \lambda \cdot L_{2t+1}} \tag{63}$$

et l'équation de plein-emploi donne:

$$\overline{L} = \alpha^{\frac{2}{1-\alpha}} \cdot \omega_t^{\frac{1}{\alpha-1}} + L_{2t} \tag{64}$$

(63) et (64) définissent une récurrence du premier ordre sur L_2 la quantité de facteur travail consacrée à la recherche. Il existe trois équilibre possibles: un piège de pauvreté correspondant à une valeur nulle de L_2 et donc à une absence de croissance; un état stationnaire avec une valeur de L_2 comprise strictement entre 0 et $\overline{L}$; un cycle d'ordre 2 qui fait alterner une valeur élevée de L_2 avec une valeur faible.

On peut résoudre à l'état stationnaire, en supposant pour simplifier une fonction d'utilité égale à la consommation réelle actualisée, cequi signifie $r = \rho$,

$$L_2 = \frac{\gamma \cdot (1-\alpha) \cdot \overline{L} - \frac{\rho \cdot \alpha}{\lambda}}{\alpha + \gamma \cdot (1-\alpha)} \tag{65}$$

et le taux de croissance moyen sera:

$$g_Y = \frac{\lambda \cdot \gamma \cdot (1-\alpha) \cdot \overline{L} - \rho \cdot \alpha}{\alpha + \gamma \cdot (1-\alpha)} \cdot \ln \gamma \tag{66}$$

L'effet-taille est donc présent dans ce modèle, g_Y croît avec $\overline{L}$. Comme dans les précédents modèles, l'équilibre décentralisé est sous-optimal. Il n'y a pas ici d'externalités positives de la recherche elle même puisque le processus de Poisson est sans mémoire, mais l'externalité intertemporelle de productivité est bien présente: un innovateur augmente la productivité pour toujours, même si ses rentes de monopoles ne sont pas éternelles. Cet effet conduit à sous-investir en recherche et donc à un taux de croissance trop faible. Un autre effet va dans le sens inverse: l'effet de destruction de rente associée à l'innovation précédente n'est pas pris en compte par le nouvel innovateur, ce qui conduit à une hausse de l'investissement en recherche.

4 La prise en compte de plusieurs types d'innovation

4.1 Innovations radicales et incrémentales

La considération de deux (ou plusieurs) types d'innovation renvoie à la distinction faite couramment dans l'économie du changement technique entre les innovations incrémentales et les innovations radicales. Les premières sont ces petits changements continus qui améliorent progressivement l'état de la technique. Elles correspondent par exemple au premier principe d'invention de Gilfillan [1970]: "*What is called an important invention is a perpetual accretion of little details, probably having neither beginning, completion, nor definable limits (...) An invention is an evolution rather than a series of creations*". A l'opposé se trouve la vision de Schumpeter qui penche plutôt du côté de l'innovation comme une rupture radicale avec les techniques utilisées auparavant: "*Add as many mail coaches as you please, you will never get a railroad by doing so*". Les deux conceptions de l'innovation sont présentes dans les visions cycliques du changement technique, qui associent les ruptures radicales dues aux innovatins du même nom à la phase ascendante d'un cycle long (à la Kondratief bien que ce dernier n'ait pas principalement porté son attention sur le changement technique) et l'épuisement des effets des innovations incrémentales venant se greffer sur une innovation radicale à la phase descendante du même cycle.

Il en ressort que, pour reprendre une expression de Mokyr [1990], les innovations radicales sont des innovations "macro", qui sont un choc pour l'économie entière et qui se produisent de façon discrète, alors que les innovations incrémentales sont des innovations "micro", qui, prises isolément, n'affectent que marginalement l'économie, et qui donnent lieu à une amélioration régulière de la productivité.

Ces idées sont modélisées dans Amable [1996] où sont considérées les deux types d'innovations qui viennent d'être mentionnées; les innovations radicales affectent l'ensemble de l'économie en multipliant la productivité macroéconomique par un facteur $\omega > 1$ et surviennent de façon discrète, les innovations incrémentales se manifestent sous la forme d'un accroissement continu de la gamme de produits intermédiaires utilisés dans la production du bien final. Lorsque survient une innovation radicale, elle se diffuse instantanément dans l'économie sous la forme d'un d'un nombre fixé à 1 (ou plutôt un continuum de longueur 1) de produits intermédiaires. Des innovations incrémentales peuvent se développer sur cette nouvelle technique. L'innovation radicale suivante signifiera la fin des rentes de monopoles pour tous les biens associés à l'innovation radicale précédente, aussi bien ceux du continuum $[0, 1]$ correspondant à l'innovation radicale elle-même que ceux correspondant aux innovations incrémentales qui lui étaient associés. A la place de ces derniers biens, on suppose que d'autres biens intermédiaires, compatibles avec la nouvelle innovation radicale, mais produits dans des conditions de concurrence parfaite, prennent leurs places.

On peut donc écrire la fonction de production comme:

$$y = \omega^n \cdot \left\{ \int_0^{G_n} x_c\left(j\right)^\alpha \ dj + \int_0^{G} x_m\left(i\right)^\alpha \ di + \int_0^{1} x_R\left(u\right)^\alpha \ du \right\} \cdot L^{1-\alpha} \tag{67}$$

L est un facteur fixe qu'on peut normaliser à 1 et dont on peut oublier l'existence. Les quantités x_c correspondent aux biens concurrentiels qui ont remplacé les innovations incrémentales associées aux $n-1$ innovations radicales précédentes, les x_R sont les quantités des biens qui constituent la n-ième innovation radicale elle même, et les x_m sont les quantités de biens intermédiaires correspondant aux innovations incrémentales développées à partir de la n-ième innovation radicale.

Une population fixe H de chercheurs peuvent alternativement se consacrer à la découverte d'innovations radicales ou d'innovations incrémentales. Les innovations incrémentales évoluent comme:

$$\dot{G} = \psi\left(l\right) \tag{68}$$

avec l le nombre de chercheurs se consacrant à l'innovation incrémentale, alors que les innovations radicales surviennent avec la probabilité $\lambda \cdot \varphi\left(c\right)$ avec c le nombre de chercheurs se consacrant à l'innovation radicale. On remarque au passage le caractère incrémental des améliorations de productivité permises par l'équation ci-dessus. Il n'y a aucun effet taille dans l'évolution de G.

On a donc:

$$H = c + n \tag{69}$$

L'équilibre économique est donné par la répartition des chercheurs entre les deux types d'innovation, en utilisant le fait que la mobilité des chercheurs entre l'un ou l'autre type d'innovation conduit à l'équation d'arbitrage suivante :

$$\frac{-\theta\left(c_n\right)}{\left[\rho + \lambda \cdot \varphi\left(c_n\right)\right] \cdot \varphi'\left(c_n\right)} = \frac{\lambda \cdot \omega^{\frac{1}{1-\alpha}}}{\rho + \lambda \cdot \varphi\left(c_{n+1}\right)} \tag{70}$$

qui utilise la notation $\psi\left(l\right) = \psi\left(H-c\right) \equiv \theta\left(c\right)$.

Les solutions de cette équation de récurrence en n, le nombre de chercheurs affectés à l'innovation radicale,sont, comme dans Aghion et Howitt [1992]: une trappe à pauvreté ; un équilibre stationnaire ; des cycles. Mais les cycles ne sont pas nécessairement d'ordre 2 puisque la possibilité de cycles d'ordre 3 ouvre la voie à la possible existence de dynamiques a-périodiques (chaotiques). On a donc une représentation des cycles long technologiques où les innovations radicales ne surviennent pas nécessairement selon une périodicité régulière (même en probabilité), et où les innovations incrémentales augmentent la productivité macroéconomique entre deux innovations radicales. La possible non régularité des apparitions des innovations radicales impliquent que certaines se verront associée une large gamme de produits intermédiaires issus des innovations radicales, alors que d'autres auront une durée de vie très brève et des gammes de produits intermédiaires associées très limitées. Ce dernier phénomène ne repose en rien sur les caractéristiques techniques intrinsèques des inovations radicales, mais uniquement sur des considérations économiques.

4.2 les technologies d'usage général

Une autre formalisation de ces innovations est due à Helpman et Trajtenberg [1998], qui ont proposé un modèle de technologies d'usage général (TUG). On peut adopter la présentation simplifiée par Aghion & Howitt [1998] de ce modèle. Comme dans les modèles précédents, le bien final est produit avec des biens intermédiaires. L'innovation va porter sur les biens intermédiaires, mais au lieu d'être effectuée en une seule étape, celle qui consisterait à découvrir un nouveau bien qui pourrait être mis en service immédiatement, l'innovation chez Helpman et Trajtenberg procède en deux étapes: il faut d'abord la découverte d'une TUG et ensuite des innovations portant sur des biens intermédiaires spécifiques à cette TUG. Chaque bien intermédiaire est donc lié à une TUG particulière. Cette dernière n'est profitable que si elle est mise en service avec un nombre minimal de biens intermédiaire (fixé à 1). Contrairement à Amable [1996], les innovations "radicales", ici les TUG, arrivent de façon exogène.

L'économie va suivre un cycle en deux phases, la première où il faut découvrir les biens intermédiaires en un nombre suffisament important pour pouvoir ultérieurement mettre en place la nouvelle TUG, la seconde où ce montant suffisant de biens intermédiaires découverts, la TUG est mise en place. Lors de la première phase, un montant L_2 des travailleurs est consacré à la recherche portant sur les biens intermédiaires adaptés à la nouvelle TUG, qui n'est pas encore mise en service. La deuxième phase débute au moment où a été découvert un montant suffisant de biens intermédiaires pour pouvoir mettre en service la nouvelle TUG. Durant cette phase, tout le travail est alloué à la production, jusqu'à l'arrivée de la TUG suivante et un nouveau cycle. Donc, le produit vaut $A_{i-1}\left(\overline{L}-L_2\right)^{\alpha}$ pendant la première phase du cycle lié à la TUG i et $A_i\left(\overline{L}\right)^{\alpha}$ au cours de la deuxième phase. On voit donc que la production doit chuter consécutivement à l'arrivée d'une TUG, au cours de la première phase puisque des travailleurs sont retirés de la production pour être affectés à la recherche.

Si on reprend le cadre du modèle d'Aghion et Howitt vu plus haut, à l'état stationnaire, le montant de recherche est déterminé par la condition d'arbitrage:

$$\omega_1 = \lambda \cdot \gamma \cdot V_2 \tag{71}$$

où V_2 est la valeur d'une innovation ajustée du terme de productivité. Les indices 1 et 2 correspondent respectivement aux première net deuxième phases du cycle. La recherche est entreprise au cours de la phase 1, mais ne donne lieu à des revenus qu'au cours de la phase 2, ce qui explique la présence des indices 1 et 2 dans l'équation ci-dessus. On suppose que la nouvelle TUG arrive avec une probabilité constante égale à μ. La valeur de V_2 est donc déterminée par:

$$r \cdot V_2 = \eta \cdot \omega_2^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} - \mu \cdot (V_1 - V_2) \tag{72}$$

alors que la valeur d'une innovation correspondant à la précédente TUG est déterminée par:

$$r \cdot V_1 = \eta \cdot \omega_1^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} - \lambda \cdot L_2 \cdot V_1 \tag{73}$$

Les trois équations ci-dessus donnent l'équation d'arbitrage de la recherche:

$$\omega_1 = \frac{\lambda \cdot \gamma \cdot \left[\eta \cdot \omega_2^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} + \frac{\mu \cdot \eta \cdot \omega_1^{\frac{\alpha}{\alpha-1}}}{r+\lambda \cdot L_2}\right]}{r+\mu} \tag{74}$$

Comme aucune recherche n'est entreprise au cours de la phase 2, ω_2 est déterminée par $\overline{L} = \left(\frac{\alpha^2}{\omega_2}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}}$. L'équation de plein-emploi reste pour la période 1:

$$\overline{L} = \alpha^{\frac{2}{1-\alpha}} \cdot \omega_1^{\frac{1}{\alpha-1}} + L_2 \tag{75}$$

Le taux moyen de croissance sera la fréquence d'arrivée des innovations nécessaires à la TUG multipliée par la taille de l'amélioration de la productivité que ces innovations procurent, $\ln \gamma$. La longueur moyenne de la première phase du cycle est $\frac{1}{\lambda \cdot 2}$ celle de la phase 2 est $\frac{1}{\mu}$. La fréquence augmente avec L_2 et donc avec l'investissement en recherche.

5 Les effets de taille et comment s'en débarrasser

La non-rivalité des connaissances est à la base de rendements croissants dans la découverte des innovations. Une nouvelle idée ne nécessite pas d'être redécouverte lors de chaque utilisation. Une fois découverte, elle est librement à la disposition de tous. De plus, une idée peut être simultanément utilisée par de nombreux utilisateurs sans que l'utilité qu'elle apporte diminue. La connaissance est donc potentiellement un bien public pur. Ce phénomène entraîne dans la plupart des modèles de croissance endogène fondés sur l'innovation ce qu'on appelle un 'effet-taille' : plus grande est la taille de l'économie, mesurée par la taille de la population susceptible de contribuer à l'accumulation de connaissances, plus élevé sera le rythme de croissance. De fait, comme on l'a vu précédemment, les premiers modèles de croissance endogène fondés sur l'innovation exhibent des effets-taille : le taux de croissance est en général une fonction croissante de la taille de la population qualifiée. Si l'ensemble de la population contribue à l'accroissement des connaissances ou si le rapport entre population qualifiée et population non qualifiée reste constant au cours du temps, cela signifie que le taux de croissance devrait augmenter avec l'accroissement de la population.

Cette prédiction est difficilement vérifiable sur longue période, elles est en tous cas contredite sur la période récente. Jones [1995] montre que la croissance des ressources affectées à la recherche et développement observées sur la période de l'après-guerre n'a pas eu sur le taux de croissance de la productivité totale des facteurs aux Etats-Unis (le pays dont la croissance n'est pas susceptible d'être affecté par le phénomène de rattrapage technologique sur la période considérée) l'effet positif que les théories de la croissance endogène fondées sur l'innovation lui aurait attribué. A tout prendre, c'est plutôt une coïncidence entre l'accroissement des moyens consacrés à l'innovation d'une part et une *décroissance* de l'augmentation de la productivité qu'on peut observer, ce qui est donc l'exact contraire de ce qu'on attendrait. Une ligne de défense pourrait être de regarder de plus près les deux séries correspondantes, à la fois les dépenses de RD (ou le nombre de scientifiques et ingénieurs) et la productivité totale des facteurs. Les incertitudes sur la confiance dans cette dernière sont suffisamment connues pour qu'on néglige de s'apesantir sur le sujet. En ce qui concerne les moyens consacrés à la RD, on peut remarquer qu'une bonne partie de la croissance des moyens sur la période de l'après-guerre est sans doute due à des dépenses d'ordre militaire, dont les retombées pour le changement technique 'civil' sont douteuses. Mais cette défense est faible en regard de l'accusation, c'est plutôt l'effet-taille qu'il faudrait supprimer dans les modèles de croissance endogène. Certains modèles ont donc éliminé les effets-taille: Eicher et Turnovski [1999], Jones [1999], Segerstrom [1998] ou Young [1998].

Une procédure simple est la suivante. En s'inspirant de Jones [1999], on suppose un modèle très simple de croissance endogène (pour l'instant) :

$$Y = A \cdot L_1 \tag{76}$$

$$L_2 = \overline{L} - L_1 = s \cdot \overline{L} \tag{77}$$

$$\dot{A} = \delta \cdot A \cdot L_2 \tag{78}$$

Il s'agit d'une forme réduite et simplifiée d'un modèle de croissance endogène par différenciation de produit. Y est le produit final, A le terme de productivité, $\overline{L}$ la population active et s la fraction de cette population qui se consacre à la recherche. Ce dernier paramètre mesure donc l'ampleur des efforts consacrés à la RD. Il vient immédiatement que le taux de croissance d'équilibre du revenu par tête de cette économie est:

$$g_y = \delta \cdot s \cdot \overline{L} \tag{79}$$

L'effet-taille est donc flagrant, le taux de croissance est proportionnel à la taille de la population, une croissance régulière de $\overline{L}$ fait 'exploser' le sentier de croisance.

Si on remplace maintenant l'équation de croissance de la productivité par:

$$\dot{A} = \delta \cdot A^{\phi} \cdot L_2 \tag{80}$$

avec $\phi < 1$. Un ϕ positif traduit une influence positive de la connaissance accumulée sur le processus de découverte, ce qui est donc une forme de rendements croissants, alors qu'un ϕ négatif exprime qu'il est de plus en plus difficile de découvrir de nouvelles connaissances. Avec une croissance régulière de la population au taux n le taux de croissance régulier de l'économie devient :

$$g_y = \frac{n}{1-\phi} \tag{81}$$

Avec cette modification, la croissance est devenue 'semi-endogène', comme c'était déjà le cas du modèle d'Arrow [1962], et l'économie ne peut croître sans augmentation de la population. De fait, on retrouve avec cette spécification des propriétés proches de celles du modèle de Solow :

- en termes de convergence, des économies structurellement similaires convergeront vers un même niveau de développement et croîtront au même taux à l'équilibre stationnaire ;
- en termes des déterminants de la croissance de long terme, le taux de croissance d'équilibre de long terme est indépendant du comportement d'épargne des agents (s) ;
- en revanche, le niveau de produit par tête d'équilibre dépend lui de l'effort de recherche, on peut l'exprimer comme:

$$y^*(t) = (1-s) \cdot \left[\frac{\delta \cdot (1-\phi)}{n} \cdot s \cdot \overline{L}(t)\right]^{\frac{1}{1-\phi}} \tag{82}$$

On retrouve donc sans surprise que toutes les mesures en faveur de la recherche n'ont que des effets en niveau et aucun effet en taux et que les changements de la taille de la population ont des effets en niveau sur le produit si ces changements sont en niveau, et des effets en taux s'ils sont eux même en taux. La clé de la disparition de l'effet taille réside dans l'hypothèse $\phi < 1$. C'est elle qui fait disparaître la possibilité d'une croissance purement endogène.

On peut tenter d'éliminer les effets de taille d'une manière moins voyante en considérant l'innovation verticale en plus de l'innovation horizontale. L'idée principale est de considérer que seules les innovations verticales (portant sur la qualité) contribuent à la croissance de la productivité. Les innovations horizontales vont accroître la gamme de biens disponibles dans l'économie et donc le bien-être des consommateurs, mais ne vont pas contribuer à l'accumulation de connaissances car les bénéfices de la croissance de la population dans le long terme vont être dissipés par la prolifération des produits qu'elle induit (Young [1998]).

On suppose que la consommation est une fonction de différents biens différenciés horizontalement:

$$C = \left(\int_0^B Y_i^{\frac{1}{\theta}}\, di\right)^{\theta} \tag{83}$$

Chaque bien i est produit avec des rendements constants en utilisant le facteur travail spécifique au secteur:

$$Y_i = A_i \cdot L_{1i} \tag{84}$$

et la productivité sectorielle augmente grâce aux efforts de recherche spécifiques au secteur:

$$\dot{A}_i = \delta \cdot A_i \cdot L_{2i} \tag{85}$$

et la variété des biens de consommation est croissante avec la taille de l'économie

$$B = \overline{L}^{\beta} \tag{86}$$

Si tous les biens i sont produits de la même façon, on peut poser $Y_i = Y$ (et $A_i = A$) et $C = B^{\theta} \cdot Y$. Le taux de croissance de la consommation par tête $(C/\overline{L})$ est alors:

$$g_c = \theta \cdot g_B + g_y = \theta \cdot g_B + g_A = \theta \cdot \beta \cdot n + g_A \tag{87}$$

Le taux de croissance du terme de productivité A dépend du personnel de recherche affecté à chaque variété (L_{2i}), soit L_2/B où L_2 représente le personnel de recherche de toute l'économie. On voit donc bien comment l'augmentation de la gamme des produits (B) contribue à diluer l'effort de recherche entrepris sur chacun des produits. Par conséquent:

$$g_A = \delta \cdot \frac{L_2}{B} = \delta \cdot \frac{s \cdot \overline{L}}{B} = \delta \cdot s \cdot \overline{L}^{1-\beta} \tag{88}$$

donc:

$$g_c = \theta \cdot \beta \cdot n + \delta \cdot s \cdot \overline{L}^{1-\beta} \tag{89}$$

Le moyen d'éliminer l'effet-taille dans cette spécification est donc de poser $\beta = 1$ ce qui revient à dire que la croissance de la gamme des produits accompagne la croissance de la population. De cette façon, la croissance de la population amène une répartition de l'effort de RD sur un nombre toujours plus grand de produits, ce qui diminue l'efficacité de la recherche pour chaque variété de produits. On remarque que dans cette configuration, la croissance reste toujours semi-endogène, au sens où une croissance nulle de la population amène une croissance nulle de la consommation. Si $\beta > 1$, l'effet-taille est négatif et le deuxième terme de l'équation ci-dessus disparaît asymptotiquement. Si $\beta < 1$, il subsiste un effet-taille positif qui fait 'exploser' la croissance.

L'équation de croissance ci-dessus peut laisser que dans le cas où $\beta = 1$, c'est à dire lorsqu'on a réussi à éliminer l'effet-taille dans la croissance, le taux de croissance de l'économie est indépendant des variables affectées par la politique économique. C'est à dire que les actions telles que les subventions à la recherche ne joueraient aucun rôle sur le taux de croissance. L'association entre les deux caractéristiques (élimination de l'effet-taille et indépendance de taux de croissance de long terme des interventions de politique économique) n'est pas obligatoire. Howitt [1999] montre comment on peut obtenir l'élimination de l'effet taille tout en conservant les propriétés habituelles de statique comparative associées à un modèle de croissance endogène fondé sur l'inovation "schumpeterienne", c'est à dire avec effet de destruction créatrice.

Il resterait toutefois à s'assurer que la relation entre taux de croissance de la production (par travailleur) et taux de croissance de la population est empiriquement plus robuste que celle entre taux de croissance et ressources affectées à la recherche. Si ce n'est pas le cas, on peut se permettre de douter de l'utilité d'un retour à une formulation semi-endogène, près de quatre décennies après Arrow.

References

[1] Aghion P. et Howitt [1992] A Model of growth through Creative Destruction. *Econometrica.* 60(2), 323-351.

[2] Aghion P. et Howitt P. [1998] *Endogenous Growth Theory.* Cambridge: MIT Press

[3] Amable B. [1996] Croissance et cycles endogènes induits par les innovations incrémentales et radicales. *Annales d'économie et de Statistiques*, n°44,.

[4] Amable B. et Chatelain J.B. [1995] Efficacité des systèmes financiers et développement économique. *Economie Internationale* n°61, 1995.

[5] Amable B. et Guellec D. [1992] Les théories de la croissance endogène. *Revue d'Economie Politique*, 102(3), 313-377.

[6] Arrow K. (1962) the Economic Implications of Learning by Doing. *Review of Economic Studies* XXIX(2), 155-173.

[7] Barro R. et Sala-i-Martin X. [1995] *Economic Growth*. New York: McGraw Hill.

[8] Benabou R. [1996] Inequality and Growth. Dans B. Bernanke et J. Rotemberg (eds) *NBER Macroeconics Annuals*. MIT Press.

[9] Caballero R. et Jaffee A. [1993] How high are the giants' shoulders: an empirical assessment of knowledge spillovers and creative destruction in a model of economic growth. Dans B. Bernanke et J. Rotemberg (eds) *NBER Macroeconics Annuals*. MIT Press.

[10] Dixit A. et Stiglitz J. [1977] Monopolistic Competition and optimal Product Diversity. *American Economic Review.* 67, 297-308.

[11] Durlauf S.N. and Quah D. [1998] The New Empirics of Economic Growth. *Centre for Economic Performance Discussion Paper* No. 384.

[12] Eicher T.S. et Turnovsky S.J [1999] Non-scale Models of Economic Growth, *The Economic Journal,* vol. 109 no. 457.

[13] Frankel M. [1962] The production function in allocation and growth: a synthesis. *American Economic Review*, 52, 995-1022.

[14] Gilfillan S. [1970] *The Sociology of Invention*. Cambridge: MIT Press. Première édition en 1935.

[15] Grossman G.M. and Helpman E. [1991] *Innovation and Growth in the Global Economy,* Cambridge: The MIT Press.

[16] Helpman E. et Trajtenberg M. [1998] A time to sow and a time to reap: growth based on general purpose technologies. in E. Helpman (ed) *General Purpose Technologies and Economic Growth*, Cambridge: MIT Press.

[17] Howitt Peter [1999] Steady Endogenous Growth with Population and R&D Inputs Growing. *Journal of Political Economy*, 107(4), 715-730.

[18] Jones Charles I.[1995] R&D-based Models of Economic Growth, *Journal of Political Economy,* CIII, 759-784.

[19] Jones Charles I.[1999] Growth: with or without scale effects, *American Economic Review (Papers & Proceedings)* 89, 139-144.

[20] Kaldor N. [1957] A Model of Economic Growth. *Economic Journal*, 67, 591-624.

[21] Mokyr J. [1990] *The Lever of Riches*. Oxford: Oxford university Press.

[22] Romer P. [1986] Increasing Returns and Long Run Growth. *Journal of Political Economy*, 94, 1002-1037.

[23] Romer [1990] Endogenous Technical Change. *Journal of Political Economy.* 98(5) pt. 2, S71-S102.

[24] Segerstrom P.[1998] Endogenous Growth Without Scale Effects, *American Economic Review,* vol 88 no. 5

[25] Solow R. [1956] A contribution to the Theory of Economic Growth, *Quaterly Journal of Economics ,* 70, 65-94

[26] Yang X. and Borland J. [1991] A Microeconomic Mechanism for Economic Growth. *Journal of Political Economy.* 34, 199-222.

[27] Young A. [1928] Increasing returns and economic progress, *Economic Journal 38,* 527-542.

[28] Young Alwyn [1998] Growth without scale effects. *Journal of Political Economy*, 106(1), 41-63.