ANNALES D'ÉCONOMIE ET DE STATISTIQUE. – N° 44 — 1996

Croissance et cycles endogènes induits par les innovations radicales et incrémentales

Bruno AMABLE*

RÉSUMÉ. – Un modèle de croissance endogène avec deux types d'innovation, radicale et incrémentale, est développé dans ce papier. Une innovation incrémentale se manifeste par l'apparition d'un nouveau bien intermédiaire dans la production du bien final. Une innovation radicale signifie premièrement que le degré de connaissance est multiplié par un facteur constant, ce qui augmente la productivité de l'économie, et deuxièmement que toutes les innovations précédentes deviennent dépassées. L'économie est constituée d'un nombre fixe de chercheurs, qui peuvent s'engager dans les activités d'innovation radicale ou incrémentale. L'innovation incrémentale se déroule selon un processus déterministe et continu, l'innovation radicale est discrète et stochastique. L'équilibre décentralisé est une allocation des chercheurs entre l'innovation radicale et incrémentale. Différents types d'équilibres avec prévision parfaite sont possibles : allocation fixe, cycles et allocations apériodiques.

Endogenous Growth and Cycles Through Radical and Incremental Innovation

ABSTRACT. – This paper develops a model of endogenous growth where innovation can take two forms, namely radical and incremental. The latter type of innovation means that a new intermediate good is introduced in the production of the final good, thus raising productivity in a Ethier-Romer-type way. A innovation radicale means first that the level of knowledge is multiplied by a constant factor, which raises productivity in an Aghion-Howitt way, and second that the previous innovations are made obsolete. The economy is populated by a constant number of chercheurs, who may either engage in radical or innovation incremental activity. Innovation incrementale is deterministic and continuous, innovation radicale is discrete and stochastic. The market equilibrium is an allocation of the chercheurs between radical and innovation incremental. Different types of equilibria with perfect foresight are possible: fixed as well as periodic or aperiodic allocations.

* B. AMABLE: INRA, CEPREMAP.

1 Introduction

Certains modèles de croissance endogène reposent sur l'accumulation d'un facteur particulier auquel est associé une externalité technologique positive : la connaissance, le capital humain ou tout autre facteur comportant un aspects de bien public, comme dans ROMER [1986a] ou LUCAS [1988]. D'autres modèles sont fondés sur la découverte de nouveaux produits et/ou procédés, c'est à dire l'innovation, qui est alors perçue comme une activité économique ordinaire, à la différence de la conception de la théorie néo-classique de la croissance où le changement technique se situait en dehors du champs économique. La croissance endogène est rendue possible par l'introduction de nouveaux produits ou procédés qui contribuent à augmenter la productivité. Il est possible d'effectuer une distinction supplémentaire parmi cette dernière catégorie de modèles.

Dans ROMER [1990], une fonction de production particulière est posée. Suivant ETHIER [1982], on suppose que l'introduction de nouveaux biens intermédiaires augmente la productivité du secteur du bien final. L'interprétation de cette effet suit l'argument avancé par YOUNG [1928]. La division du travail au plan macro-économique passe par une spécialisation accrue des secteurs, accompagnée par une augmentation de l'efficacité productive.

D'un autre côté, le modèle d'AGHION et HOWITT [1992] incorpore un important aspect de l'innovation : l'obsolescence et la création destructrice. Les nouveaux produits ne font que s'ajouter aux anciens, ils peuvent aussi les remplacer. Chaque innovation prend alors la place de la précédente et augmente le niveau de productivité de l'ensemble de l'économie. De telles innovations ont des conséquences aussi bien techniques qu'économiques différentes des innovations qu'on retrouve chez ROMER [1990], par exemple l'effet de capture du marché, déja présent dans la littérature de l'économie industrielle [1]. De plus, une innovation individuelle est un choc pour l'économie entière.

Ce papier considère un modèle de croissance endogène où deux types d'innovations, respectivement radicales et incrémentales, sont possibles. Il est fait une distinction entre des innovations qui « repoussent les frontières de la science » et celles qui exploitent la connaissance déja existante pour la mettre en pratique à des fins de production. Les innovations radicales ont un aspect destructeur pour le système technique en place. Elles remplacent les techniques dominantes avec une nouvelle technique, comme cela se produit chez AGHION et HOWITT [1992]. En parallèle, il existe aussi une possibilité d'innovation incrémentale, par laquelle un nouveau bien intermédiaire est introduit dans la production du bien final. L'innovation incrementale est

1. La distinction entre les deux types de modèles fondés sur l'innovation se retrouve aussi chez GROSSMAN et HELPMAN [1991]. SEGERSTROM, ANANT and DINOPOULOS [1990] prennent aussi en compte la dimension verticale de l'innovation

toujours réalisée au sein d'un certain système technique, ce dernier étant défini par une certaine innovation radicale.

Les chercheurs peuvent se consacrer à l'un ou l'autre type d'innovation. Dans le long terme, la croissance dépend à la fois d'un flux continu d'innovations incrémentales et d'avancées radicales dans la science et les techniques. La découverte d'un produit radicalement nouveau est incertaine de sorte que la période de temps entre deux innovations radicales est aléatoire. En revanche, la réalisation d'une innovation incrémentale est sûre pour peu que des ressources lui soient consacrées. A chaque instant, un investisseur aura le choix entre investir dans la recherche de la prochaine innovation radicale et investir dans le recherche d'innovations incrémentales supplémentaires dans le cadre du système technique en vigueur. La prise en compte de deux types d'innovations enrichit considérablement la dynamique de l'innovation et de la croissance. Au lieu d'une augmentation régulière de la productivité, le modèle donne pour résultat la croissance avec des cycles d'innovation, lesquels peuvent être de diverses périodicités, ainsi que des trajectoires irrégulières.

Le papier est organisé de la façon suivante. La partie 2 présente et compare les deux formes d'innovation et leurs relations avec la division macroéconomique du travail. La partie 3 présente le modèle de base, la partie 4 discute les trajectoires associées à la prévision parfaite et la partie 5 présente les cycles. Une brève conclusion est proposée en partie 6.

2 Deux formes d'innovation

L'opposition entre les deux formes d'innovation mentionnées en introduction et considérées respectivement dans les modèles de croissance endogène de ROMER [1990] et AGHION et HOWITT [1992] correspond à une importante difference dans le traitement du changement technique dans les théories économiques. Certains économistes conçoivent le changement technique comme relativement régulier, mettant en œuvre une addition de petites améliorations se cumulant les unes aux autres, comme par exemple dans un processus continu d'apprentissage par la pratique (ARROW, 1962). Ces changements peuvent se comprendre comme le résultat d'une activité délibérée de recherche et développement ou découler d'inventions conçues dans le cadre du processus de production. Des études empiriques ont montré que les améliorations incrémentales représentaient de fait une partie importante du changement technique (HOLLANDER, 1965). Cette conception du progrès technique était celle de GILFILLAN [1970], dont le premier principe social d'invention énonçait que : « *Ce qu'on appelle une invention importante est une perpétuelle addition de petits détails, n'ayant probablement ni début ni fin ni limites définissables (...) Une invention est une évolution, plutôt qu'une série de créations...* » (p. 5)

C'est précisément une série de créations (et de destructions) qui caractérise la conception « schumpeterienne » du changement technique. Celle-ci met en avant le caractère irrégulier du changement technique et le représente comme une série de chocs plutôt que comme une tendance régulière. De fait, le changement technique ne se limite pas nécessairement à l'intégration d'une multitude de petites améliorations dont la conséquence est de repousser les frontières des ensembles de production. Il n'est pas nécessairement continu. Les ruptures dans les méthodes de production qui changent profondément la structure de l'économie existent aussi. Selon une conception « schumpeterienne » au sens large, le changement technique est un processus irrégulier qui remet en cause les routines, engendrant « l'instabilité » aussi bien que la croissance. Les changements radicaux ne sont pas réductibles à une cumulation de changements incrémentaux. Selon une formule, maintenant célèbre, de Schumpeter, « *Vous pouvez additionner autant de diligences que vous voulez, vous n'obtiendrez ainsi jamais le chemin de fer* ».

Néanmoins, l'analyse du changement technique ne se réduit pas non plus à ce dernier aspect. Une problématique « schumpeterienne » voisine est que des « essaims » d'innovations provoquent un changement structurel et la naissance de nouveaux secteurs, une caractéristique de la diffusion d'innovations importantes (FREEMAN, 1989). ROSENBERG [1982] mentionne que certaines techniques possèdent un fort aspect de complémentarité mutuelle au cours de leur diffusion conjointe. Le succès d'une innovation dépend du succès de techniques complémentaires développées ailleurs dans l'économie. Les cycles longs (ou ondes longues) de Schumpeter sont reliés à une innnovation majeure, c'est-à-dire une innovation dont les conséquences sont telles qu'elle donne lieu à une vague d'investissement dans d'autres secteurs. Le changement technique prend alors la formes d'essaims d'innovations. Une découverte majeure donne naissance à de nombreuses autres découvertes de moindre importance. Les cycles de Kondratiev sont eux fondés sur l'apparition d'une innovation majeure tous les cinquante ans. Il existe une large littérature, aussi bien théorique qu'empirique, qui examine la pertinence de cette hypothèse (FREEMAN, 1987).

Dans une perspective voisine, GILLE [1978] a développé le concept de « système technique » comme un groupe de techniques complémentaires autour d'un petit nombre d'innovations majeures. Plus récemment, MOKYR (1990) a distingué des inventions « micro » et des inventions « macro », soulignant que le changement technique associe des améliorations régulières à des changements radicaux. On pourrait facilement allonger la liste des références car de telles classifications des innovations sont courantes dans la littérature économique et historique sur le changement technique.

Au centre d'une telle conception de l'innovation est une hiérarchie des innovations quant à leur impact technologique et économique. Une nouvelle phase de croissance doit être initiée par une innovation majeure. Certaines découvertes sont radicalement différentes des techniques précédemment utilisées dans l'économie (la machine à vapeur, le moteur électrique,...) et leur introduction révolutionne la technologie. On peut donc distinguer les innovations « incrémentales », qui portent sur des produits et procédés d'un système technique en place, et des innovations « radicales », qui changent le système technique.

Dans le modèle présenté dans ce papier, une innovation incrémentale signifie qu'un nouveau bien intermédiaire s'ajoute à la gamme de produits déja en place, comme chez ROMER (1990). Une innovation radicale signifie deux choses :

– L'innovation radicale précédente est mise au rebus, tout comme les biens intermédiaires qui avaient été développé à partir d'elle. La nouvelle innovation radicale remplace la précédente et introduit des nouveaux biens substituables aux anciens [2].

– Un nouveau niveau de connaissance est atteint et permet de produire des biens qui accomplissent des fonctions similaires à ceux qui avaient été développé à partir de la précédente innovation radicale. Ces biens sont produits dans des conditions de concurrence parfaite puisque la compétence nécessaire à la production de ces biens n'est pas appropriable.

L'aspect de destruction créatrice d'une innovation radicale est présent. L'innovation radicale permet la mise en œuvre d'un continuum de taille fixe de biens radicalement nouveaux. La croissance est aussi le produit d'une augmentation de la spécialisation des inputs et un élargissement de la gamme des industries intermédiaires. ETHIER [1982] a proposé une fonction de production où la spécialisation des inputs conduisait à une forme de rendements croissants. ROMER [1986b, 1990] a proposé une version de cette fonction de production sous la forme suivante :

$$Y = \int_0^G x(i)^\alpha di \tag{1}$$

$\alpha \leq 1$. Y est la production du bien final et $x(i)$ est le montant de bien intermédiaire i utilisé dans la production de Y. De nouveaux biens intermédiaires sont inventés, allongeant le détour de production du bien final, mesuré par G. Cependant, à la différence de ROMER [1990], on ne suppose pas que les mêmes biens intermédiaires sont perpétuellement utilisés dans la production de Y [3].

Une hypothèse importante du modèle présenté ici est que l'accroissement de la connaissance, conséquence de l'innovation radicale, permet de produire des biens qui remplissent les tâches des anciens biens intermédiaires dans la production de Y. Cette connaissance est publique de sorte que la production de ces biens se fait dans des conditions de concurrence parfaite. Les biens intermédiaires readicalement nouveaux augmentent le niveau de connaissance et sont produits par des monopoles protégés par un brevet

2. Cette hypothèse est certes extrême, mais pas irréaliste. L'introduction d'une innovation radicale telle que, par exemple, le transistor a requis des compétences très différentes de celles nécessaires dans la technique des lampes. Les compagnies qui avaient accumulé des compétences dans la technique des lampes les ont vues devenir obsolètes avec l'apparition du transistor et très peu d'entre elles ont pu effectuer la transition vers la nouvelle technique.
3. On fait la différence entre une augmentation de la division macro-économique du travail, qui se manifeste par une hausse de G, et la découverte d'un nouveau bien particulier. La première n'est pas remise en cause par l'obsolescence d'un bien intermédiaire particulier. L'externalité technologique positive relative à l'introduction d'un nouveau bien survit à la disparition de celui-ci.

sans limite temporelle. En parallèle, de nouveaux biens intermédiaires, compatibles avec le nouveau système technique défini par l'innovation radicale, sont découverts et leurs inventeurs sont aussi protégés par des brevets sans limite dans le temps. Ces biens sont aussi produits par des monopoles.

3 Le modèle de base

3.1. La technique de production

Le modèle qu'on considère ici est simplifié afin de mettre en valeur les aspects principaux. L'économie qu'on considère est peuplée d'un continuum de chercheurs identiques de longueur H. De plus, comme dans AGHION et HOWITT [1992], N travailleurs spécialisés assistent les chercheurs dans l'innovation radicale. Il n'y a pas d'accumulation de facteurs de production traditionnels, ni croissance de la population. Les préférences sont identiques pour tous les agents, additives intertemporellement avec une utilité marginale du revenu constante à chaque date. Ainsi le taux d'actualisation subjectif, constant, est-il égal au taux d'intérêt r. A la différence de ROMER [1990], AGHION et HOWITT [1992], GROSSMAN et HELPMAN [1991] ou beaucoup d'autres modèles de croissance endogène, l'allocation du personnel de recherche ne sera pas la conséquence d'un choix entre recherche et production, mais entre différents types de recherche. Les chercheurs peuvent s'engager dans la voie de l'innovation radicale ou dans celle de l'innovation incrémentale.

On peut exposer le modèle plus précisément. Le bien de consommation unique est produit à l'aide de la fonction de production suivante :

$$(2) \qquad y(t) = \omega^n \left\{ \int_0^{G_n} x_c(j)^\alpha dj + \int_0^{G} x_m(i)^\alpha di + \int_0^{1} x_R(u)^\alpha du \right\}$$

Au temps t, n innovations radicales se sont produites, chacune ayant amélioré le niveau général de connaissance par un facteur constant ω $(\omega > 1)$. $y(t)$ est la production du bien final, G représente l'étendue de la gamme de produits intermédiaires développés spécifiquement sur la n-ième innovation radicale au temps t, G_n est la longueur de la gamme totale de biens intermédiaires développés sur les $n-1$ innovations radicales précédentes, $x_k(i)$ est la quantité de bien intermédiaire i utilisé dans la production du bien final, $k = c, m$ selon que le bien est produit en concurrence parfaite ou par un monopole. $x_R(u)$ est la quantité de bien radicalement nouveau u correspondant à la dernière innovation radicale. Chaque innovation radicale permet la production d'un continuum de longueur 1 de produits radicalement nouveaux. Tous ces produits apparaissent avec le nouveau système technique.

Les inventions correspondant à une innovation radicale ou à une innovation incrémentale sont protégées par des brevets. Ces brevets sont vendus ou accordés sous licence aux producteurs de biens intermédiaires.

Une innovation radicale signifie une rupture avec l'environnement technologique précédent, et la découverte et mise en œuvre de nouveaux principes techniques. La découverte de ce type d'innovation est fondamentalement incertaine, elle sera décrite par un processus aléatoire discret. A l'inverse, une innovation incrémentale ne pose pas ce genre de problèmes, sa découverte découlant de principes déjà découverts. On supposera donc un processus déterministe et continu.

Si c est le flux de chercheurs employé à la découverte d'une innovation radicale, la découverte de celle-ci est caractérisée par un processus de Poisson avec pour paramètre λ. $\varphi(c, N)$, φ est une fonction concave à rendements constants et peut se représenter comme une fonction à rendements non croissants de c. La présence d'un facteur additionnel, les travailleurs spécialisés, font de φ une fonction à rendements constants lorsque les rendements partiels de c sont décroissants. Pour simplifier les notations, le facteur N sera retiré des notations. On suppose de plus que $\varphi'(c)$ reste bornée lorsque c tend vers zéro. λ est un paramètre constant. Le processus de Poisson étant sans mémoire, la probabilité d'arrivée d'une nouvelle technique dépend seulement du montant de ressources courant qui est consacré à l'innovation radicale. La recherche passée n'exerce pas d'influence. Le temps est continu, indexé par t , découpé par une séquence d'innovations radicales. Le temps écoulé entre deux innovations radicales sera indexé par s.

Un bien intermédiaire doit être inventé avant d'être produit avec η unités de bien final. Contrairement à ROMER [1990], les biens intermédiaires ne sont pas durables. Pour découvrir de nouveaux produits, il est nécessaire d'engager un certain nombre de chercheurs. Si l est le nombre de chercheurs se consacrant à la découverte d'innovations incrémentales, la gamme de produits intermédiaires augmente selon :

$$\dot{G} = \psi(l) \tag{3}$$

où ψ est une fonction concave à rendements décroissants. On remarque qu'il n'y a pas d'effets externes positifs dans cette spécification, à la différence de ROMER [1990], où la fonction d'innovation est du type : $\dot{G} = \psi(l) \cdot G$, de sorte qu'une augmentation de la gamme de biens augmente la productivité de la recherche. Dans la spécification adoptée ici, un chercheur aura une productivité non croissante dans l'innovation incrémentale. En tenant compte de la distinction faite entre innovations, il n'y a aucune raison de penser que des externalités positives analogues à celles figurant dans le modèle de ROMER [1990] soient associées à l'innovation incrémentale. La découverte d'un bien intermédiaire supplémentaire n'est pas une contribution substancielle à l'accroissement de la connaissance, mais l'exploitation de connaissances déjà existantes.

3.2. **La détermination des prix et quantités**

La demande d'un bien intermédiaire i découle de la maximisation des profits dans le secteur du bien final (on note $x_j = x(j)$) :

$$x_j \in \mathrm{ArgMax}\Big[\mathrm{y} - \int_0^{G_n} p_c(j) \cdot x_c(j) dj + \int_0^{G} p_m(j) \cdot x_m(i) di + \int_0^{1} p_R(j) \cdot x_R(u) du\Big],$$

la demande pour le bien j est alors :

$$p_j = \alpha \cdot \omega^n \cdot x_j^{\alpha-1} \tag{4}$$

Chaque producteur de bien intermédiaire développé dans le cadre du nouveau système technique défini par une innovation radicale est un monopole. La maximisation du profit est telle que :

$$x_i \in \mathrm{ArgMax}[p_i \cdot x_i - \eta \cdot x_i]$$

.

Le prix d'un bien intermédiaire est alors :

$$p_i = \frac{\eta}{\alpha} \tag{5}$$

Le prix est identique pour chacun de ces biens. Le profit d'un producteur intermédiaire est alors :

$$\pi_i = \eta^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} \cdot \alpha^{\frac{2}{1-\alpha}} \cdot \left[\frac{1-\alpha}{\alpha}\right] \cdot \omega^{\frac{n}{1-\alpha}} \tag{6}$$

Le flux de profit reste constant durant la vie de chaque innovation radicale. Le niveau de production d'un bien intermédiaire reste constant au cours de cette durée de vie.

$$x_i = \left[\frac{\eta}{\alpha^2}\right]^{\frac{1}{\alpha-1}} \cdot \omega^{\frac{n}{1-\alpha}} \tag{7}$$

Le prix d'un bien intermédiaire correspondant à de précédentes innovations radicales est égal au coût marginal puisque ces biens sont produits en concurrence parfaite.

$$p_j = \eta \tag{8}$$

Les quantités produites sont alors :

$$x_j = \left[\frac{\eta}{\alpha}\right]^{\frac{1}{\alpha-1}} \cdot \omega^{\frac{n}{1-\alpha}} \tag{9}$$

La recherche est accomplie par des firmes privées dont c'est l'activité. Elles engagent des chercheurs pour qu'ils découvrent des innovations, obtiennent un brevet qu'elles vendront ou accorderont sous licence aux producteurs de biens intermédiaires. L'entrée libre garantit que les profits de monopole dans les biens intermédiaires peuvent être intégralement appropriés par les firmes faisant de la recherche afin de couvrir les coûts de développement. Les brevets ont alors un prix tel que les firmes faisant de la recherche reçoivent les profits de monopole résultant de la mise en œuvre des biens qu'elles ont découverts. A chaque instant, les investisseurs ont à choisir entre engager des chercheurs pour qu'ils découvrent des biens qui viendront s'ajouter à la gamme des biens déjà existant (innovation incrémentale), ou découvrir des biens radicalement nouveaux qui viendront bouleverser le système technique (innovation radicale). l chercheurs faisant de l'innovation incrémentale produiront $\psi(l)$ nouveaux biens intermediaires alors que c chercheurs faisant de l'innovation radicale réussiront avec une probabilité instantanée $\lambda \cdot \varphi(c)$. Si V_I est la valeur actualisée des profits engendrés par une innovation incrémentale, l'emploi de l chercheurs dans cette activité donnera $\dot{G} \cdot V_I$, avec :

$$V_I = \int_t^{\infty} e^{-r(s-t)} \cdot e^{-\lambda \cdot \varphi(c_n) \cdot (s-t)} \pi_i \cdot ds \tag{10}$$

On remarque que la probabilité d'une découverte d'une nouvelle innovation radicale apparait dans la formule du profit. Si l'activité d'innovation incrémentale n'est pas sujette à l'incertitude, la production du bien intermédiaire correspondant l'est. Une innovation radicale signifiera la fin d'un système technique et la disparition des profits des biens intermédiaires qui lui sont associés.

On suppose ici que les firmes de recherche prennent le salaire des chercheurs comme donnée. Si w est le taux de salaire des chercheurs, la maximisation de profit conduit à la condition suivante :

$$w = \psi'(l) \cdot V_I \tag{11}$$

pour $l \neq 0$.

Concernant la $n+1$-ème innovation radicale, l'emploi des chercheurs correspondra au point où leur productivité marginale égale le coût de leur emploi. Si c_n chercheurs se consacrent à l'innovation radicale, les profits anticipés par l'innovateur sont $\lambda \cdot \varphi(c_n) \cdot V_{n+1}$, avec :

$$V_{n+1} = \int_t^{\infty} e^{-r \cdot (s-t)} \cdot e^{-\lambda \cdot \varphi(c_{n+1}^e) \cdot (s-t)} \cdot \pi_{n+1} \, ds \tag{12}$$

$\pi_{n+1} = \eta^{\frac{\alpha}{\alpha-1}} \cdot \alpha^{\frac{2}{1-\alpha}} \cdot \left[\frac{1-\alpha}{\alpha}\right] \cdot \omega^{\frac{n+1}{1-\alpha}}$. V_{n+1} est la valeur actualisée des profits π_{n+1} engendrés par la $n+1$-ème innovation et c_{n+1}^e est le nombre anticipé de chercheurs se consacrant à l'innovation radicale pendant la période entre la $n+1$-ème et la $n+2$-ème innovation radicale. La maximisation de profits conduit à la condition suivante :

$$w = \lambda \cdot \varphi'(c_n) \cdot V_{n+1} \tag{13}$$

pour $c_n \neq 0$.

Par conséquent, le comportement de chaque type d'investisseur est décrit par les relations d'équilibre de marchés. Dans ce qui suit, on considérera un type particulier d'allocations des chercheurs correspondant à la prévision parfaite des agents.

4 Les équilibres à prévision parfaite

Cette section considère le cas de la prévision parfaite, c'est-à-dire qu'on suppose que $c_{n+1} = c^e_{n+1}$. L'équilibrie sur le marché des chercheurs donne l'allocation entre recherche pour l'innovation radicale et recherche pour l'innovation incrémentale. c_n chercheurs se consacreront à la découverte de la $n+1$-ème innovation radicale pendant la durée de vie de la n-ième innovation radicale, c_{n+1} chercheurs se consacreront à la découverte de la $n+2$-ième innovation radicale, etc.

$\psi(l) = \psi(H - c)$. La condition d'équilibre s'écrit :

$$(14) \qquad \frac{\psi'(H - c_n)}{[r + \lambda \cdot \varphi(c_n)] \cdot \varphi'(c_n)} = \frac{\lambda \cdot \omega^{\frac{1}{1-\alpha}}}{r + \lambda \cdot \varphi(c_{n+1})}$$

Cette formule peut s'exprimer comme :

$$(15) \qquad f(c_n) = g(c_{n+1})$$

g est sans ambiguité une fonction décroissante de c_{n+1}. En revanche, f n'est pas nécessairement monotone. Le signe de $f'(c_n)$ depend du signe d'une différence de termes positifs.

Exemple: Si les fonctions d'innovation sont spécifiées telles que : $\psi(l) = \ln(1 + \beta \cdot l)$ et $\varphi(c) = \sigma \cdot c$, $\sigma, \beta > 0$, f est d'abord décroissante puis croissante sur $[0, H]$ lorsque $\mid \frac{r}{\lambda \cdot \sigma} - \frac{1}{\beta} \mid < H$ (Figure 1). De fait, $f'(0) < 0$ quand $\beta \cdot r - \lambda \cdot \sigma < \lambda \cdot \sigma \cdot \beta \cdot H$. et f' s'annule et change de signe strictement avant H quand $\frac{1}{\beta} - \frac{r}{\lambda \cdot \sigma} < H$.

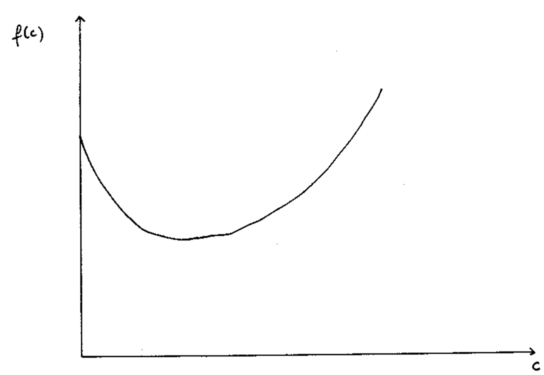

FIGURE 1

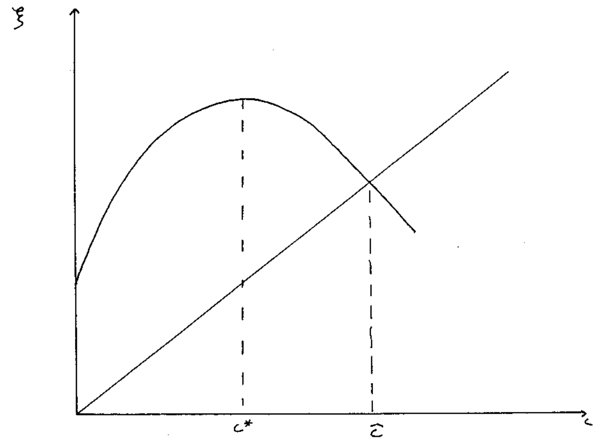

FIGURE 2

g peut s'inverser, la dynamique vers l'avant peut s'écrire comme :

(16) $$c_{n+1} = g^{-1}[f(c_n)] \equiv \xi(c_n)$$

avec :

(17) $$\xi'(c) = \frac{f'(c)}{g'[\xi(c)]}$$

Dans ce qui suit, on suppose que ξ conserve les trajectoires dans $[0, H]$ [4]. Le comportement de ξ repose sur celui de f. Si f décroit d'abord pour croître ensuite, comme dans l'exemple proposé plus haut, ξ croît d'abord pour décroître ensuite, exhibant une bosse comme dans la Figure 2. Cela signifie qu'il existe c^* dans $[0, H]$ tel que $\xi'(c) = 0$, avec $\xi' > 0$ pour $c < c^*$ et $\xi' < 0$ pour $c > c^*$. Cette condition garantit qu'il existe un point fixe unique $\hat{c}$.

Un point fixe de ξ représente un équilibre en prévision parfaite avec une allocation constante du personnel de recherche. Les propriétés de cette allocation constante sont résumées dans la proposition suivante :

PROPOSITION 1 : A un équilibre à allocation constante, (i) le taux d'intérêt n'exerce pas d'influence sur le nombre de chercheurs effectuant l'un ou l'autre type d'innovation et (ii) le montant de personnel de recherche se consacrant à la découverte de la prochaine innovation radicale augmente avec la taille de chaque innovation, le paramètre λ et le paramètre de production α.

4. On pourrait se restreindre à un intervalle à l'intérieur de $[0, H]$ si les trajectoires ne parcourent pas tout l'intervalle. Si jamais des trajectoires quittaient $[0, H]$, les allocations correspondantes seraient infaisables et ne seraient donc pas prévues par les agents. Certaines trajectoires de ξ seraient alors admissibles alors que d'autres ne le seraient pas. Par simplification, on suppose que toutes les trajectoires restent dans $[0, H]$.

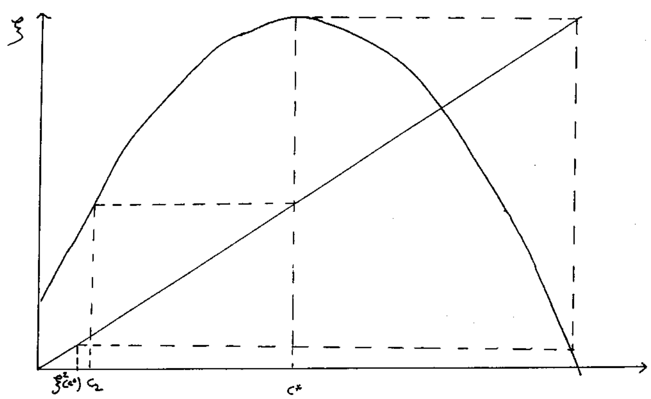

FIGURE 3

Une allocation constante de chercheurs pour l'innovation radicale $\hat{c}$ correspond à un point fixe de ξ tel que :

$$\frac{\psi'(H-\hat{c})}{\varphi'(\hat{c})} = \lambda \cdot \omega^{\frac{1}{1-\alpha}} \tag{18}$$

On peut voir immédiatement dans cette expression que le taux d'intérêt n'intervient pas dans la définission de l'équilibre. En effet, le taux d'actualisation tenant compte de l'incertitude $r + \lambda \cdot (c)$ est le même pour chaque type d'innovation au point fixe. Par conséquent, la valeur du taux d'intérêt n'a aucune conséquence sur l'allocation d'équilibre, qui dépend seulement des productivités marginales associées à chaque type d'innovation. Pour cette allocation, la productivité marginale dans l'innovation incrémentale doit être égale à la productivité marginale des chercheurs dans l'innovation radicale multipliée par le facteur de multiplication des profits qui intervient à l'apparition de cette innovation. La démonstration de la deuxième partie de la proposition découle du fait que $\frac{\partial}{\partial c}\left[\frac{\psi'(H-c)}{\varphi'(c)}\right] \geq 0$. □

L'équilibre $\hat{c}$ est asymptotiquement stable si $\mid \xi'(\hat{c}) \mid < 1$, c'est à dire si :

$$\left|\frac{[r+\lambda\cdot\varphi(\hat{c})]\cdot[\theta''(\hat{c})\cdot\varphi'(\hat{c})-\varphi''(\hat{c})\cdot\theta'(\hat{c})]-\lambda\cdot\theta'(\hat{c})\cdot\varphi'(\hat{c})^2}{\lambda^2\cdot\omega^{\frac{1}{1-\alpha}}\cdot\varphi'(\hat{c})^3}\right| < 1 \tag{19}$$

Pour l'exemple donné précédemment, où $\psi(l) = \ln(1+\beta\cdot l)$ et $\varphi(c) = \sigma\cdot c$, on obtient : $\xi(c) = a_0 + a_1 \cdot c - a_2 \cdot c^2$, avec : $a_0 = r \cdot \left[\frac{\omega^{\frac{1}{1-\alpha}}\cdot(1+\beta\cdot H)}{\beta} - \frac{1}{\lambda\cdot\sigma}\right]$, $a_1 = \omega^{\frac{1}{1-\alpha}} \cdot \left[\frac{\lambda\cdot(1+\beta\cdot H)\cdot\sigma}{\beta} - r\right]$, $a_2 = \sigma \cdot \lambda \cdot \omega^{\frac{1}{1-\alpha}}$, et a_0, a_1 et a_2 supposés positifs. Le point fixe est asymptotiquement stable si :

$$|1 - \sqrt{(1-a_1)^2 + 4 \cdot a_0 \cdot a_1}| < 1,$$

c'est-à-dire si : $|2 - \omega^{\frac{1}{1-\alpha}} \cdot (r + \lambda \cdot \sigma \cdot \nu| < 1$ avec $\nu = \frac{1+\beta\cdot H}{\beta}$.

On peut ainsi obtenir une allocation unique stable $(\hat{l}, \hat{c})$ pour la population de chercheurs. A tout moment, $\hat{c}$ chercheurs sont occupés à la découverte de la prochaine innovation radicale, pendant que $H - \hat{c}$ sont en train de découvrir de nouveaux biens pour le système technique en vigueur. La croissance résulte à la fois de sauts discrets dans le niveau de productivité et d'améliorations continues dues à l'innovation incrémentale. Entre deux innovations radicales, la productivité croît arithmétiquement avec le temps. L'intervalle de temps entre deux innovations radicales est aléatoire.

5 Cycles

Un point fixe unique n'est pas la seule allocation possible. Premièrement, s'il existe un c_{ng} tel que $\xi(c_{ng}) = 0$, il existe alors l'équivalent de l'équilibre à « trappe de pauvreté » qui est présent dans les modèles de ROMER [1990] et AGHION and HOWITT [1992]. Dans ces modèles, un tel équilibre se caractérise par l'allocation de tout le personnel de recherche à la production, et par voie de conséquence la fin de la croissance de la productivité. Ici, tout le personnel de recherche est affecté à l'innovation incrémentale, ce qui signifie la fin de l'innovation radicale. L'économie croît à un taux qui diminue sans cesse, atteignant zéro asymptotiquement, de telle façon que la croissance s'éteint dans le long terme.

Deuxièmement, un système dynamique tel que décrit par l'équation (19) peut engendrer une dynamique complexe. D'autres équilibres qu'un point fixe peuvent exister, par exemple des cycles. Bien sûr, 0 ne doit pas appartenir à une orbite périodique puisque cela signifierait la fin de l'innovation radicale. Seuls les cycles qui ne comprennent pas 0 ont un sens économique

Le cycle le plus simple est un cycle de période deux, ou des périodes de temps où peu de chercheurs se consacrent à la découverte d'une innovation radicale alternent avec des périodes où une forte proportion des chercheurs se consacrent à ce type d'innovation. L'interpretation de tels cycles est immédiate. Un faible niveau pour c_{n+1} signifie une hausse de la durée de vie anticipée pour le prochain système technique fondé sur la prochaine innovation radicale. Le haut niveau de profits anticipés qui en découle rend la recherche de cette innovation radicale d'autant plus attractive, induisant un haut niveau de c_n. Des cycles de période 2 étaient déjà possibles chez AGHION and HOWITT [1992]. Cependant, des trajectoires plus complexes étaient exclues. En revanche, dans le présent modèle, elles deviennent possibles du fait que la « destruction créatrice » touche à la fois les innovations incrémentales et les innovations radicales.

Les fonctions ξ qui admettent un période trois présentent un intérêt particulier. L'existence d'un cycle de période trois peut être prouvée à l'aide du théorème II-9 de BLOCK et COPPEL [1992], qui indique que si pour un quelconque $c \in [0, H]$ et pour un impair $n > 1$, $\xi^n(c) \leq c \leq \xi(c)$, en

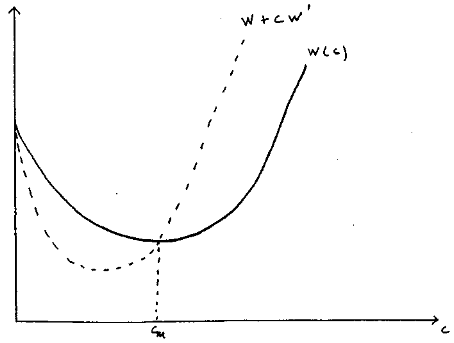

FIGURE 4

notant ξ^j la j-ième itération de ξ, alors ξ a une trajectoire périodique de période q, pour un q impair satisfaisant $1 < q < n$ (Voir Annexe 1) [5].

En revenant à l'exemple ($\psi(l) = \ln(1 + \beta \cdot l)$ et $\varphi(c) = \sigma \cdot c$), on obtient une fonction ξ à un seul pic, de telle sorte que s'il existe un c_0 dans $[0, \hat{c}]$ tel que $\xi^3(c_0) \leq c_0$, alors ξ admet un cycle de période 3 [6]. Pour certaines valeurs des paramètres, on peut immédiatement obtenir un exemple de l'existence d'un tel cycle (Figure 3).

PROPOSITION 2 : si $\psi(l) = \ln(1 + \beta \cdot l)$ et $\varphi(c) = \sigma \cdot c$, $\sigma, \beta > 0$, ξ admet un cycle de période 3 si :
(i) $r + \lambda \cdot \sigma \cdot \nu \cdot (1 - 2 \cdot r \cdot \omega^{\frac{1}{1-\alpha}}) \geq 0$,
(ii) $\omega^{\frac{2}{1-\alpha}} \cdot (r + \lambda \cdot \sigma \cdot \nu)^3 \cdot [4 - \omega^{\frac{1}{1-\alpha}} \cdot (r + \lambda \cdot \sigma \cdot \nu)] - 16 \cdot r > 0$,
(iii) $\omega^{\frac{1}{1-\alpha}} \cdot (r + \lambda \cdot \sigma \cdot \nu) \geq \Lambda$
avec $\Lambda \approx 3.83$.

Soit c_2 tel que $c^* = \xi(c_2)$ et c^* tel que $\xi'(c^*) = 0$, avec $c_2 < c^*$. (i) garantit que c_2 est positif puisque $\xi(c)$ est croissante pour $c \leq c^*$. (ii) garantit que $\xi^2(c^*) > 0$. Selon le théorème mentionné précédemment, il existe un cycle de période trois si $\xi^2(c^*) \leq c_2$. Puisque : $c_2 = \frac{a_1 - \sqrt{a_1^2 - 2 \cdot a_1 + 4 \cdot a_0 \cdot a_2}}{2 \cdot a_2}$, quelques calculs donnent que $c_2 - \xi^2(c^*)$ est du signe de $(z-4) \cdot z - 8 \cdot z$, avec $z = [\omega^{\frac{1}{1-\alpha}} \cdot (r + \lambda \cdot \sigma \cdot \nu) - 1]^2 - 1$, à partir duquel on peut déduire (iii). □

Bien sûr, les conditions données dans la proposition 2 sont suffisante mais pas nécessaire à l'existence d'un cycle de période trois [7].

L'exemple utilisé plus haut donne un graphe de ξ à un seul mode avec un point fixe unique. En restreignant ξ à $[0, \xi(c^*)]$, on suppose que $\xi(c) > c$

5. L'applicabilité de ce théorème ne se limite pas aux fonctions « en cloche ».
6. Des modèles économiques avec dynamique complexe peuvent se trouver dans Grandmont (1985) ou Benhabib (1992).
7. De plus, dans des cas plus généraux, ξ peut ne pas être unimodale.

pour tout c dans $[0, x^*]$, $\xi'(0) > 1$ si $\xi(0) = 0$, ξ possède un point fixe unique dans $[x^*, H]$. On a : $\xi(c) = a_0 + a_1 \cdot c - a_2 \cdot c^2$, $\xi'(c) = a_1 - 2 \cdot a_2 \cdot c$, $\xi''(c) = -2 \cdot a_2$ et $\xi'''(c) = 0$. La stabilité d'au plus un cycle de période quelconque est assurée si la dérivée de Schwarz de ξ est négative pour $c \neq c^*$. Il est évident que pour tout c appartenant à $[0, H]$ différent de c^*, $S\xi$ est négative. Par conséquent, il existe au plus un cycle faiblement stable. Cette orbite périodique faiblement stable, *lorsqu'elle existe*, attire le point critique c^* et tous les points dans $[0, c^*]$ sauf pour un ensemble de mesure 0 si en plus $\xi''(c^*) < 0$, ce qui est à l'évidence le cas dans l'exemple.

La stabilité des orbites périodiques ne peut pas être garantie quelle que soit ξ. Si ξ ne possède pas de cycle stable, le comportement des c_i est apériodique pour toute condition initiale qui n'appartient pas à une orbite périodique. La trajectoire du nombre de chercheurs qui se consacrent à l'innovation radicale va alors devenir complexe, semblant « aléatoire » ou imprévisible.

Pour résumer la croissance de long terme dans ce modèle est un processus irrégulier. Quand l'allocation du personnel de recherche à l'équilibre est constante, les innovations radicales se produisent de façon aléatoire, l'espérance de temps entre deux innovations étant constante. Entre les innovations radicales, le taux de croissance de l'économie n'est pas constant, mais décroît sans cesse. Sans autre innovation radicale, ce taux de croissance s'annulerait dans le long terme. Au bout d'un certain temps, la productivité de l'économie fait un saut, de cette façon, période de forte et de faible croissance se succèdent. Puisque la durée de vie anticipée d'un système technique (défini par une innovation radicale et l'ensemble des biens intermédiaires compatibles avec celle-ci) est fixée, on peut trouver une certaine régularité dans ce processus.

Lorsque la trajectoire d'équilibre n'est pas un point fixe, c'est-à-dire lorsqu'elle suit un cycle qui peut être d'une période bien supérieure à deux voire lorsque cette trajectoire est apériodique, l'espérance de temps écoulé entre deux innovations radicales n'est plus constante, de sorte que le processus de croissance peut être considéré comme plus irrégulier que dans le cas de l'allocation constante des chercheurs. L'allocation du personnel de recherche varie d'un système technique à un autre et la fréquence des innovations radicales varie. Une très longue période sans innovation radicale peut suivre des périodes où des ruptures radicales ont été très rapprochées dans le temps, faisant se succéder des périodes de quasi-stagnation économique et des périodes de forte croissance. Une conséquence est que certains systèmes techniques connaitront un développement plus poussé que d'autres, du fait de leur plus grande durée de vie.

6 Conclusion

Le modèle présenté ici prend en compte deux types d'innovation. L'innovation de nature incrémentale se manifeste par un flux continu d'améliorations au sein d'un système technique donné. Un tel mode d'innovation connait certaines limites, inhérentes au système technique. L'innovation de nature radicale constitue une percée dans la connaissance qui change profondément la technologie et ouvre de nouvelles perspectives à l'innovation incrémentale. Les chercheurs peuvent se consacrer à l'un ou l'autre type d'innovation et leur choix se détermine à partir de mécanismes de marché.

La croissance est déterminée de manière endogène, conséquence des améliorations de la productivité provoquées par les deux types d'innovations : petites améliorations continues ou sauts discrets. La croissance est un processus irrégulier où des phases de croissance à un taux qui diminue sont coupées par des améliorations importantes. Cette irrégularité est d'autant plus prononcée que l'allocation du personnel de recherche entre l'innovation incrémentale peut suivre un processus cyclique ou même apériodique. Les apparitions des innovations radicales peuvent alors être espacées de façon très diverses.

Plusieurs éléments importants ne figurent pas dans ce modèle. L'étude des équilibres a été limitée au cas de la prévision parfaite, ce qui constitue un cas limite. Une prise en compte de la formation des anticipations modifierait les caractéristiques de la dynamique. Une hypothèse extrême a été faite quant à la dissipation des rentes de monopole à l'arrivée d'une innovation radicale. On pourrait imaginer un processus plus graduel, qui prendrait en compte un processus de diffusion de l'innovation. En fait, l'hypothèse simplificatrice adoptée ici est celle de la diffusion instantanée de l'innovation, qui est d'ailleurs commune à la quasi-totalité des modèles de croissance endogène. Une prise en compte explicite des problèmes de diffusion peut constituer un sujet pour des recherches ultérieures. On pourrait aussi envisager des possibilités de partage de la rente entre innovateurs radicaux et innovateurs incrémentaux.

La conception du changement technique adoptée ici est différente de la plupart des approches des modèles de croissance endogène où le changement technique est régulier et où aucune distinction n'est faite entre les différents types d'innovation. JOVANOVIC et ROB [1990] ont distingué entre la recherche intensive et la recherche extensive, qui mènent toutes deux à l'extension d'un seul type de connaissance. YOUNG [1991, 1993a] combine une expansion de la gamme de produits intermédiaires avec une augmentation de la qualité des nouveaux produits, combinant ainsi les dimmensions horizontales et verticales du changement technique. Néanmoins, il n'y a pas l'équivalent d'une innovation radicale puisque le changement survient de façon continue. YOUNG [1993b] considère des innovations qui sont des compléments ou des substituts entre elles. Cependant, il n'y a pas de choix concernant le type d'innovation fait par les agents. Depuis l'écriture du présent article, quelques modèles de croissance endogène ont pris en compte la diversité des innovations. Un papier d'AGHION and HOWITT [1994] prend en compte la distinction entre la recherche et le développement, la première produisant des connaissances fondamentales, le second des connaissances appliquées.

ANNEXE

L'effet de monopsone

On a supposé dans le texte que les firmes qui effectuent de la recherche prennent le salaire des chercheurs comme donné. Si une seule firme engage tous les chercheurs qui se consacrent à l'innovation radicale, cette firme contrôle une partie non négligeable du marché du travail des chercheurs. On considère ici la possibilité pour l'innovateur radical de déterminer sa demande de chercheurs en prenant en compte l'effet qu'il aura sur le salaire de ceux-ci. En prenant les mêmes notations que précédemment, le programme est : $\mathrm{Max}\lambda \cdot \varphi(c_n) \cdot V_{n+1} - w \cdot c_n$, avec : $w = \frac{-\theta'(c_n)\cdot\pi_n}{r+\lambda\cdot\varphi(c_n)}$. La condition du premier ordre est :

$$\frac{\lambda \cdot \varphi'(c_n) \cdot \pi_{n+1}}{r + \lambda \cdot \varphi(c_{n+1}^e)} = w + \frac{\partial w}{\partial c} \cdot c$$

Le deuxième terme dans l'expression ci-dessus est l'effet de la demande de travail sur le salaire des chercheurs. Du fait de la libre entrée dans la recherche, l'effet de monopsone ne s'applique que s'il conduit à un taux de salaire plus élevé que dans le cas concurrentiel pour les chercheurs. Afin de simplifier le traitement, on ne considère que le cas de l'exemple donné dans le texte. Le graphe de $w(c)$ peut être représenté comme dans la Figure 4. $w(c)$ décroit pour c entre 0 et c_m, et croît pour c entre c_m et H. Par conséquent, la courbe représentant $w + c \cdot w'$ se trouve en dessous de celle de $w(c)$ pour c entre 0 et c_m et au dessus d'elle pour c entre c_m et H. La structure de marché qui prévaut est celle qui garantit un nombre plus faible de chercheurs se consacrant à l'innovation radicale sur l'intervalle $[0, c_m]$ et un plus grand nombre de chercheurs se consacrant à cette activité sur l'intervalle $[c_m, H]$. De cette manière, la structure de marché dominante garantit un salaire plus élevé aux chercheurs.

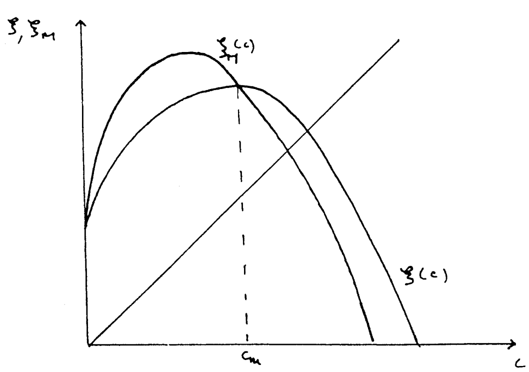

FIGURE 5

On peut définir l'évolution de l'allocation des chercheurs de manière similaire au cas concurrentiel :

$$c_{n+1} = \xi_M(c_n)$$

avec :

$$\xi_M(c) = g^{-1}[f_M(c)]$$

et :

$$\begin{aligned} f_M(c) &= \frac{w(c) + c.w'(c)}{\varphi'(c).\pi_n} \\ &= \frac{\lambda.c.[\theta'(c).\varphi'(c) - \varphi(c).\theta''(c)] - [r + \lambda.\varphi(c)].\theta'(c) - r.c.\theta'(c)}{\varphi'(c).[r + \lambda.\varphi(c)]^2} \end{aligned}$$

ξ_M possède une forme analogue à ξ (Figure 5), laquelle atteint un maximum à $c = c_m$ alors que ξ_M atteint un maximum pour $c = c_M$, avec $c_M \leq c_m$. Les deux courbes se coupent à c_m. Le monopsone ne s'applique que lorsqu'il peut garantir un salaire plus élevé. A gauche de c_m, la solution concurrentielle donne un plus haut niveau de c et donc un salaire plus élevé. A droite de c_m, le monopsone conduit à un plus faible niveau de c.

Par conséquent, la dynamique de c est la suivante :

$$c_{n+1} = \begin{cases} \xi_M(c_n) & \text{for} \quad c \in [0, c_m] \\ \xi(c_n) & \text{for} \quad c \in [c_m, H] \end{cases}$$

La dynamique de c est définie par ξ_M et ξ (Figure 6), le graphe résultant n'étant en général pas unimodal, et pas différentiable à $c = c_m$. Le même type de dynamique complexe que dans le cas concurrentiel peut exister. Les cycles, lorsqu'ils existent, feront alterner périodes concurrentielles et périodes de monopsone.

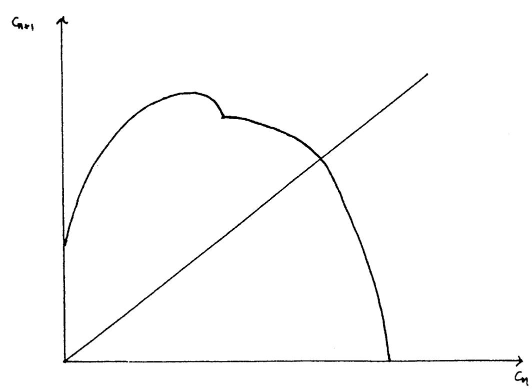

FIGURE 6

• Références bibliographiques

AGHION P., HOWITT P. (1992). – “A Model of Growth Through Creative Destruction”, *Econometrica*. 60(2), pp. 323-351.

AGHION P., HOWITT P. (1994). – “Research and Development in the Growth Process”, *mimeo*, Nuffield College and University of Western Ontario.

ARROW K. (1962). – “The Economic Implications of Learning by Doing”, *Review of Economic Studies*, XXIX(2), pp. 155-173.

BENHABIB J. (Ed.) (1992). – *Cycles and Chaos in Economic Equilibrium*. Princeton: Princeton University Press.

BLOCK L. S., COPPEL W.A. (1992). – *Dynamics in One Dimension*, Lecture Notes in Mathematics n. Berlin: Springer-Verlag.

ETHIER W. (1982). – “National and International Returns to Scale in the Modern Theory of International Trade”. *American Economic Review*, 72, pp. 389-405.

FREEMAN C. (1987). – “Technical Innovation, Diffusion, and Long Cycles of Economic Development”, in T. VASKO Ed. (1987) *The Long-Wave Debate*, Berlin: Springer-Verlag.

FREEMAN C. (1989). – “The Nature of Innovation and the Evolution of the Productive System”, Paper prepared for the *OECD International Seminar on Science, Technology and Economic Growth, 5-8 june 1989*.

GILFILLAN S.C. (1970). – *The Sociology of Invention*, Cambridge: The MIT Press. First Edition, 1935.

GILLE B. (1978). – *Histoire des techniques*, Encyclopédie de la Pléiade, Gallimard, Paris.

GRANDMONT J.M. (1985). – “On Endogenous Competitive Business Cycles”, *Econometrica*. 22, pp. 905-1037.

GRANDMONT J.M. (1988). – “Nonlinear Difference Equations, Bifurcations and Chaos: An Introduction”. CEPREMAP *Working Paper 8811*.

GROSSMAN G. M., HELPMAN E. (1991). – *Innovation and Growth in the Global Economy*, Cambridge: The MIT Press.

HOLLANDER S. (1965). – *The Sources of Increased Efficiency: a study of Du Pont Rayon Plants*, MIT Press.

JOVANOVIC B., ROB R. (1990). – “Long Waves and Short Waves: Growth through Intensive and Extensive Search”, *Econometrica* 58, pp. 1391-1409.

LUCAS R. (1988). – “On the mechanics of economic development”, *Journal of Monetary Economics*, 22, pp. 3-42.

MOKYR J. (1990). – *The Lever of Riches*, Oxford: Oxford University Press.

ROMER P. (1986a). – “Increasing returns and long-run growth”, *Journal of Political Economy*, 94, pp. 1002-1037.

ROMER P. (1986b). – “Increasing returns, Specialization, and External Economies: Growth as Described by Allyn Young”, University of Rochester Working Paper n64.

ROMER P. (1990). – “Endogenous technological change”, *Journal of Political Economy*, 98(5) pt. 2, pp. S71-S102.

ROSENBERG N. (1982). – *Inside the Black Box: Technology and Economics*, Cambridge University Press.

SEGERSTROM P.S., ANANT T.C.A., DINOPOULOS E. (1990). – “A Schumpeterian Model of the Product Life Cycle”. *American Economic Review*. 80, pp. 1077-1091.

YOUNG A. (1928). – “Increasing Returns and Economic Progress”, *Economic Journal*, 38, pp. 527-542.

YOUNG A. (1991). – “Learning by Doing and the Dynamic Effects of International Trade”, *Quarterly Journal of Economics*. 106, pp. 369-405.

YOUNG A. (1993a). – “Invention and Bounded Learning by Doing”, *Journal of Political Economy* 96, pp. 701-717.

YOUNG A. (1993b). – “Substitution and Complementarity in Endogenous Innovation”, *Quarterly Journal of Economics* 108, pp. 775-807.