



The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library

This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.

Help ensure our sustainability.

Give to AgEcon Search

AgEcon Search

<http://ageconsearch.umn.edu>

aesearch@umn.edu

*Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.*

No endorsement of AgEcon Search or its fundraising activities by the author(s) of the following work or their employer(s) is intended or implied.

Recherche publique et dynamique industrielle

Une illustration sur la base d'un modèle
évolutionniste appliqué au secteur des semences

Stéphane LEMARIÉ

Public research and industrial dynamic. An illustration based on an evolutionary model applied to plant breeding industry

Summary – Our aim is to study the interest of public research by analysing its effects on the dynamic of industry. If we refer to evolutionary analysis of technical change, we can distinguish period during which innovations are included into a technological paradigm, and period during which paradigm is changing. In the first case, firms try progressively to adapt their decision rules to the technological and competitive context. The interest of public research lies in its effect on the rhythm of innovations. In the second case, attention focuses on firms which start a learning process by getting committed to the new technology. The interest of public research lies in its capacity to make this choice viable.

The purpose is illustrated by applying an evolutionary model to plant breeding industry. Beforehand, some analytical recall on the evolution of this sector allows to distinguish between the two periods mentioned above, and to show the different roles of public research. The application to plant breeding enables to use results from quantitative genetics, in order to get a more pertinent model for research activities. Furthermore, the model of competition between products of the market is based on an econometric study previously undertaken by the author. Three main potential effects of public research have been found out. (i) An increase of firms incentives to invest in research public research plays a role similar to that of a goad by increasing the power of imitators. In the case of plant breeding, this results in an activity similar to a foundation seed. (ii) A broadening of technological opportunities, which benefits to every firms and leads to increasing technical progress with same investments. In the case of plant breeding, it happens when genetical variability is widened. These two first effects interact together because the broadening of technological opportunities increases incentives to invest in research. (iii) An effect on firms learning which permits easier formation of anticipations by firms and accelerates the development of new competences. This effect can be originated by the cooperation between public and private sectors on programs of applied research or by repercussions of basic research programs. However, the real effect of public research depends both on its level of commitment and on the industrial context. The two first effects happen when innovations are included into a technological paradigm. The third one happens when the paradigm changes. Furthermore, the increase of incentives by a foundation seed strategy is only interesting when both a few opportunities and a stable structure of monopole in the industry exist.

Key-words:

innovation, public research, incitation, learning, evolutionary economics, plant breeding industry

Recherche publique et dynamique industrielle.

Une illustration sur la base d'un modèle évolutionniste appliqué au secteur des semences

Résumé – L'article fait ressortir trois formes principales d'effets de la recherche publique sur la dynamique industrielle, en montrant à chaque fois que l'analyse doit se référer à un certain contexte.

Lorsque l'innovation est contenue dans un certain paradigme, la recherche publique permet (i) un élargissement des opportunités technologiques sur des domaines où l'appropriation de telles opportunités est difficile ou (ii) une augmentation des incitations à investir en recherche dans certaine structure industrielle où des pouvoirs de marché peuvent être acquis en investissant peu en recherche. Enfin (iii), lors d'une phase de changement de paradigme, la recherche publique facilite la transformation en accélérant l'apprentissage des entreprises. Ce dernier effet concerne aussi bien la formation des anticipations avant l'engagement de l'entreprise sur la nouvelle technologie, que le développement de nouvelles compétences après l'engagement.

Mots-clés:

innovation, recherche publique, incitation, apprentissage, économie évolutionniste, industrie des semences

* Station d'économie et sociologie rurales de l'INRA, Unité SERD, BP 47, 38040 Grenoble cedex 09.

Adresse actuelle: Station de génétique végétale de la ferme du Moulon, 91190 Gif-sur-Yvette.

BIEN qu'ayant fait l'objet de nombreuses contributions récentes, l'analyse des effets économiques de la recherche publique souffre encore de certaines insuffisances.

D'un côté, s'inspirant des articles fondamentaux de Nelson (1959) et Arrow (1962), un ensemble de contributions considère que le rôle de la recherche publique est de corriger les défauts d'incitations des mécanismes de marché. Leurs propos peuvent être résumés de la façon suivante en supposant que l'innovation est une activité incertaine produisant de l'information (bien public non appropriable), le système marchand conduit à un sous-investissement en recherche, qui peut être compensé en instituant des droits de propriété, ou un financement public de la recherche. Un tel angle d'attaque est cependant mis en cause par certains travaux montrant que l'innovation ne peut être assimilée à de l'information non appropriable⁽¹⁾.

Les analyses empiriques mobilisent généralement un argument différent : la recherche publique produit des opportunités technologiques qui favorisent l'innovation des entreprises. Jaffe (1989) observe ainsi des effets positifs de la recherche universitaire américaine sur les brevets des entreprises. En prenant comme éclairage les effets de la science sur la technologie, l'enquête de Yale montre d'une part que la plupart des industries intensives en recherche reconnaissent les apports importants de la science, et d'autre part que ces opportunités incitent les entreprises à investir en recherche (Cohen et Levinthal, 1989; Klevorick *et al.*, 1995). En se plaçant à des niveaux d'agrégation plus faibles, d'autres travaux font aussi ressortir les effets de la science sur la technologie (Gibbons et Johnston, 1976; Huffman et Evenson, 1991, pour le cas de l'agriculture aux Etats-Unis).

Pour compléter ces analyses, la voie ouverte par les approches récentes en « nouvelle économie de la science » (Dasgupta et David, 1994) ne paraît pas adéquate. En effet, il s'agit plus de comprendre les conditions qui permettent de maximiser la productivité de l'institution scientifique *per se*, que d'expliquer les effets de ses productions sur la dynamique industrielle afin d'en déduire l'efficacité économique. C'est l'objet de cet article qui analyse comment le produit de la recherche publique influence les décisions et les résultats des recherches des entreprises⁽²⁾.

⁽¹⁾ Voir Guellec et Kabla (1994) pour une synthèse récente sur la question de l'appropriation de l'innovation.

⁽²⁾ Ce papier reprend les résultats d'un travail de thèse co-financé par l'INRA et le groupe Limagrain. Je tiens à remercier Pierre-Benoit Joly, Grégoire Berthe, André Gallais et mes collègues de l'unité SERD de Grenoble pour leurs critiques judicieuses durant cette préparation. Je remercie aussi deux rapporteurs pour leurs commentaires sur une version antérieure de l'article.

Notre propos s'appuie sur deux hypothèses générales. (1) Les effets de la recherche publique doivent être replacés dans le contexte d'une certaine dynamique technologique et industrielle. En référence aux analyses évolutionnistes (Dosi, 1988), une spécificité temporelle doit être envisagée. On distingue ainsi les phases où l'innovation est contenue dans un certain paradigme, et les phases de changement de paradigme où le développement de nouvelles compétences est critique⁽³⁾. (2) Comme les résultats de la recherche publique sont susceptibles d'influencer les résultats des entreprises, alors les décisions publiques en recherche ont une influence sur la rationalité des décisions des firmes.

Les deux phases technologiques distinguées avec l'hypothèse 1 placent les firmes dans des situations de choix différentes, qui conduisent à ne pas apprécier la rationalité des décisions des firmes et le rôle de la recherche publique de la même manière.

Dans le cadre d'un paradigme, l'éventail des choix technologiques est restreint, si bien que les degrés de liberté se limitent au niveau d'investissements en recherche. Cette décision s'ajuste petit à petit, les firmes adoptant progressivement un comportement plus rationnel. A chaque décision publique correspond une réponse rationnelle des entreprises, et c'est dans ces conditions de meilleure réponse qu'est évalué l'intérêt social de la recherche publique.

Dans un contexte de changement de paradigme, les choix technologiques ont une autre dimension. En effet, le problème concerne ici l'émergence d'une technologie nouvelle, pour laquelle les acteurs doivent développer de nouvelles compétences. Il s'agit donc d'un contexte de forte incertitude où l'interaction entre la formation des anticipations et les processus d'apprentissage joue un rôle central. L'intérêt social de la recherche publique est mesuré par sa capacité à rendre viable les choix technologiques les plus favorables à terme.

Dans cet article, le propos est illustré à partir du cas de l'industrie des semences. Dans la première partie, quelques rappels sur l'évolution de l'organisation de la recherche en amélioration des plantes permettent d'identifier le rôle joué par la recherche publique et de distinguer les deux phases de cette évolution. Le modèle évolutionniste utilisé pour étudier les effets de la recherche publique est constitué d'une structure élémentaire représentant la dynamique industrielle en régime stable (avec un paradigme technologique dominant), et d'une structure complémentaire représentant la transformation industrielle comme un processus endogène. L'exposé est facilité, d'une part, en étudiant séparément le modèle en régime stable (seconde partie), et le modèle en régime d'apprentissage (troisième partie), d'autre part, en présentant à

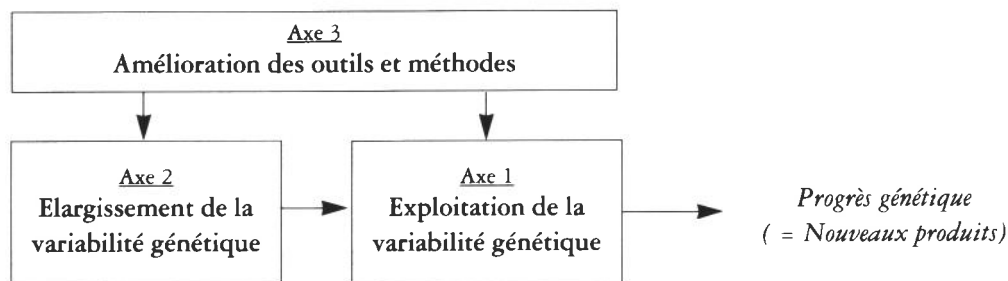
⁽³⁾ Le modèle de Chiaromonte et Dosi (1992) illustre bien cela en montrant que les firmes en concurrence ne parviennent pas à exploiter tous les nouveaux paradigmes potentiels à cause d'une difficulté à créer de nouvelles compétences.

chaque fois la modélisation, d'abord, puis les résultats dans un second temps. Le lecteur pourra se reporter à l'annexe 1 qui donne une synthèse des paramètres, des variables, et certaines formules d'une importance secondaire qui ne sont pas détaillées dans l'article afin de ne pas trop en alourdir la présentation.

L'ÉVOLUTION DE LA RECHERCHE DANS L'INDUSTRIE DES SEMENCES: QUELQUES RAPPELS

Le marché semencier présente une segmentation horizontale relativement stable qui découle des conditions climatiques des cultures. Au sein de chaque segment, les produits sont différenciés verticalement. Les innovations portent principalement sur les produits, et sont générées par les activités de recherche. La production, sous-traitée en grande partie à certains agriculteurs, ne subit généralement pas d'amélioration. L'essor des biotechnologies et les évolutions institutionnelles ont eu des effets majeurs sur l'organisation de l'activité de recherche et le rôle de la recherche publique⁽⁴⁾. Pour donner un résumé synthétique de cette évolution, nous pouvons partir d'une vision globale de l'amélioration des plantes, décomposée en trois axes d'innovations (figure 1).

Figure 1. Les trois axes d'innovation dans le domaine de l'amélioration des plantes



Jusqu'au cours des années 80, deux opérations (reproduction sexuée et évaluation des plantes au champ) constituent la base technologique de l'activité de recherche. Les firmes investissent alors sur l'axe 1 pour deux raisons : (i) la base technologique est suffisamment efficace pour exploiter la variabilité génétique, (ii) l'appropriation des innovations sur cet axe est assumée par le Certificat d'obtention végétale. En revanche, les engagements privés sur les axes 2 et 3 restent limités, à cause des faibles

⁽⁴⁾ Pour une analyse plus détaillée de la réorganisation dans ce secteur et de l'évolution de la recherche publique, voir Joly et Ducos (1993).

opportunités et des faibles moyens d'appropriation. L'analyse montre que les principales innovations sur ces deux axes ont été réalisées par la recherche publique. On définit ainsi le paradigme technologique de la sélection classique caractérisé par une base technologique et une certaine forme d'organisation : les entreprises étant présentes sur l'axe 1, la recherche publique jouant un rôle complémentaire⁽⁵⁾ sur les axes 2 et 3.

Depuis le début des années 80, l'amélioration des plantes subit une transformation importante liée à trois phénomènes : (i) l'essor des biotechnologies, (ii) des changements institutionnels (réforme de la politique agricole, évolution des droits de propriété), (iii) des mouvements d'entrée et de sortie de grands groupes (en particulier du secteur de la chimie). Certaines firmes ont investi massivement sur l'axe 3, motivées par les nouvelles opportunités en biotechnologie et le renforcement des moyens d'appropriation de telles innovations. Compte tenu du changement technologique important, la maîtrise des nouveaux outils et leur insertion dans des schémas d'exploitation de la variabilité génétique nécessite un apprentissage pour transformer les compétences des acteurs. Bien que la répartition des axes de recherche entre public et privé ne soit pas stabilisée, la recherche publique joue un rôle majeur dans l'apprentissage des entreprises (Estades *et al.*, 1995). Elle influence donc la viabilité des nouvelles stratégies d'exploitation de la variabilité génétique intégrant les biotechnologies.

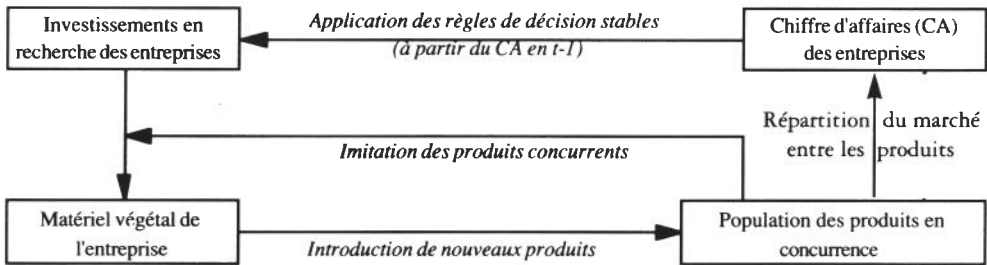
LES EFFETS DE LA RECHERCHE PUBLIQUE EN RÉGIME STABLE

Présentation de la structure élémentaire du modèle

Ce modèle s'insère dans la lignée de ceux proposés par Nelson et Winter (1982) et peut être résumé à l'aide de la figure 2. Seules sont représentées les activités de recherche qui dépendent d'un ensemble de règles de décision stables. L'interaction entre les entreprises concerne non seulement la concurrence entre les produits, mais aussi les possibilités d'imitation. Le temps est une variable discrète (une période représentant une année), et les processus d'entrée et de sortie ne sont pas représentés.

⁽⁵⁾ Ce rôle s'est dessiné petit à petit, la recherche publique couvrant au départ les trois axes. Le passage de l'axe 1 vers le domaine privé a été surtout important pour les espèces représentant d'importants marchés, en contraste avec les « petites espèces » (petits fruits, arbres) pour lesquelles la recherche publique assume encore la majeure partie de la recherche.

Figure 2. Représentation synthétique du modèle en régime stable



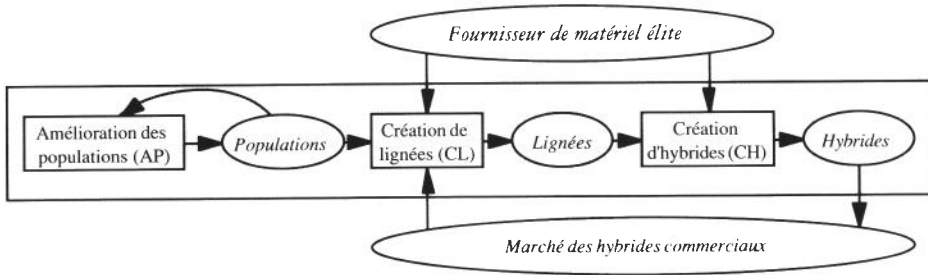
L'activité de recherche des entreprises

Les entreprises se limitent à l'exploitation de la variabilité génétique (axe 1 de la figure 1), en suivant un schéma d'organisation composé de trois modules successifs (figure 3) qui durent chacun trois périodes⁽⁶⁾. Deux types de matériel végétal jouent le rôle de produits intermédiaires entre les différents modules : les populations sont issues du module d'amélioration des populations (AP) et peuvent être utilisées en entrée du module de création de lignées (CL); les lignées sont issues du module CL et servent en entrée du module de création d'hybrides (CH). Les hybrides sont les seuls produits commerciaux. Pour certains modules, il est possible d'utiliser du matériel végétal d'origine externe à l'entreprise : des lignées peuvent être créées à partir d'hybrides du marché; des fournisseurs de matériel élite (FME) peuvent aussi procurer du matériel en entrée des modules CL ou CH. Pour simplifier la présentation, la présence d'un FME n'est pour l'instant pas envisagée.

Deux stratégies de recherche se distinguent : les innovateurs investissent dans l'amélioration des populations afin de produire en interne une base de matériel élite qui pourra servir pour la création de lignées les imitateurs préfèrent plutôt créer des lignées à partir des hybrides disponibles sur le marché, en s'épargnant ainsi d'investir en amélioration des populations. La possibilité d'une stratégie imitatrice signale que la recherche présente des *spillovers* (incorporés dans le matériel végétal). L'imitation ne nécessite pas de capacité d'absorption spécifique mais elle dure six périodes, délai suffisant pour préserver en partie les profits des innovateurs.

⁽⁶⁾ Nous nous référons ici au schéma d'amélioration d'une espèce hybride (maïs, tournesol). Pour les semences de type lignée (blé, orge), le schéma ne présente que deux modules.

Figure 3. L'activité d'amélioration des plantes et la circulation du matériel végétal



Pour formaliser les résultats de l'activité de recherche des entreprises, il est nécessaire de déterminer le niveau génétique des différents types de matériel végétal, et le progrès génétique réalisé avec chaque module en fonction des investissements en recherche.

Le niveau génétique est exprimé par une variable G représentant le rendement potentiel réalisé avec la semence. Cette limitation à une seule variable synthétique est raisonnable car les analyses montrent que l'essentiel du progrès génétique réalisé sur les semences depuis un demi-siècle se traduit par une augmentation du rendement⁽⁷⁾. $G_{jp}(t)$, $G_{jl}(t)$ et $G_{jh}(t)$ sont respectivement le niveau génétique des populations, des lignées et des hybrides de l'entreprise j à la fin de la période t . Le module K ($K=AP, CL$ ou CH) lancé à la période t fait évoluer le niveau génétique du matériel de sortie (indice s) avec un retard de trois périodes sur celui du matériel d'entrée (indice e), en intégrant un progrès génétique (ΔG_K).

$$G_{js}(t+3) = G_{je}(t-1) + \Delta G_K(IT_{jK}(t); \phi_K \cdot \sigma_{G0}; CM_K^{(P)})$$
$$\frac{\partial \Delta G_K}{\partial IT} > 0 ; \frac{\partial^2 \Delta G_K}{\partial IT^2} < 0 ; \frac{\partial \Delta G_K}{\partial (\phi_K \cdot \sigma_{G0})} > 0 ; \frac{\partial \Delta G_K}{\partial CM_K^{(P)}} < 0 \tag{1}$$

Le progrès génétique réalisé avec le module K est une fonction déterministe établie à partir des travaux de génétique quantitative (Gallais, 1989). Il s'agit d'une fonction croissante de l'investissement ($IT_{jK}(t)$) dont les rendements sont décroissants. Cet investissement représente une série d'opérations élémentaires (des parcelles d'essai) dont le coût marginal ($CM_K^{(P)}$) est constant. Enfin, pour un investissement donné, la variabilité génétique ($\phi_K \sigma_{G0}$) a un effet positif sur le progrès génétique. σ_{G0}

⁽⁷⁾ Pour le cas du maïs, voir Duvick (1984), Derieux *et al.* (1987).

est donc un indicateur des opportunités d'innovations sur les différents types de module.

Les règles de décision des entreprises

Compte tenu des difficultés à estimer l'impact des investissements en recherche sur le profit, les entreprises appliquent des règles de décision qui restent stables tout au long de la simulation. L'investissement sur chaque type de module est exprimé à partir de la performance de l'entreprise en appliquant trois règles de décision

$$\begin{cases} ID_{jAP}(t) = CA_{\text{tot}} \cdot PM'_j(t-1) \cdot R0_j \cdot (1 - R4_j) \cdot R5_j \\ ID_{jCL}(t) = CA_{\text{tot}} \cdot PM'_j(t-1) \cdot R0_j \cdot (1 - R4_j) \cdot (1 - R5_j) \\ ID_{jCH}(t) = CA_{\text{tot}} \cdot PM'_j(t-1) \cdot R0_j \cdot R4_j \end{cases} \quad (2)$$

$ID_{jK}(t)$: investissement disponible pour les modules de type K

CA_{tot} : volume total du marché (supposé constant)

$PM'_j(t-1)$: performance de j en $t-1$ (en terme de part du marché total, cf. annexe 1)

$R0_j$: part du chiffre d'affaires de j consacrée à l'amélioration de plantes

$R4_j$: part de l'investissement en recherche de j consacrée à la création d'hybrides

$R5_j$: part de l'investissement de j consacrée à l'amélioration des populations, dans la part non consacrée à la création d'hybrides.

Comme les modules durent plusieurs années, une part de l'investissement disponible est absorbée par les modules lancés aux périodes précédentes, la part restante définissant la taille du module lancé à l'année t . Si l'investissement disponible est insuffisant pour couvrir les investissements déjà engagés, aucun nouveau module n'est lancé, et les modules des années précédentes sont ajustés (de manière homothétique) sur l'investissement disponible.

Les règles $R4$ et $R5$ reflètent le type de stratégie suivie par l'entreprise: les innovateurs répartissent l'investissement de manière équitable entre les trois modules ($R4 = 30\%$ $R5 = 50\%$); les imitateurs n'investissent que sur les modules CL et CH ($R4 = 50\%$ $R5 = 0$). Deux structures industrielles de cinq entreprises sont envisagées: «1+4» avec un innovateur et quatre imitateurs, «2+3» avec deux innovateurs et trois imitateurs.

La concurrence entre produits sur le marché

Les entreprises sont concurrentes sur un seul marché, dont le volume total est supposé constant, et au sein duquel les produits sont différenciés de manière verticale. Les parts de marché des entreprises sont établies à partir des parts de marché de l'ensemble des produits que chacune commercialise.

$\Omega(t)$ est l'ensemble des produits présents sur le marché à la date t . Chaque produit p est caractérisé par la date à laquelle il a été introduit sur le marché (T_p) et sa performance (x_p). La part de marché de p est calculée en utilisant un modèle logit multinomial généralement utilisé pour formaliser la concurrence sur ce type de marché⁽⁸⁾:

$$PM_p(t) = \frac{\exp(a \cdot xr_p(t-1) + f(t - T_p))}{\sum_{i \in \Omega(t)} \exp(a \cdot xr_i(t-1) + f(t - T_i))} \quad (3)$$

L'introduction de nouveaux produits plus performants fait croître le niveau moyen des produits. Pour en tenir compte, les ventes sont exprimées en fonction de la performance relative ($xr_p(t)$) par rapport à une performance de référence ($x_0(t)$: performance moyenne des trois variétés les plus vendues en t).

L'effet de la performance relative du produit est nuancé par un effet de diffusion ($f(\cdot) < 0$) fonction de l'âge du produit. Cet effet (cf. formule 3') est le logarithme d'une fonction de Gompertz (proche d'une logistique) dont le paramètre b_1 reflète le niveau de diffusion initial et b_2 la vitesse de diffusion.

$$f(u) = \ln \left[1 - \exp \left(-\exp(b_1 + b_2 \cdot u) \right) \right] \quad (3')$$

Le prix est supposé endogène, déterminé par la performance relative du produit. Une étude économétrique sur le marché français des semences de maïs entre 1978 et 1992 (Lemarié 1995a) a montré la validité de ce modèle, et donne des estimations pour les paramètres a , b_1 et b_2 .

Tous les ans, chaque entreprise introduit un nouveau produit si sa performance est supérieure à la performance de référence. Inversement, tous les produits dont la part de marché est inférieure à 0,5 % sont éliminés. Ce processus d'entrée et de sortie rend donc endogène l'ensemble des produits en concurrence ($\Omega(t)$).

⁽⁸⁾ Pour une analyse détaillée de ce type de modèle, voir Anderson *et al.* (1992).

Représentation de la recherche publique

Deux types d'interventions publiques sont envisagées :

- Une extension de la variabilité génétique sous la forme, par exemple, d'une mise à disposition d'un nouveau *pool* de matériel végétal. Cette action est représentée par une augmentation de l'écart type génétique moyen ($\sigma_{G0} = 2$ au lieu de 1).
- L'adoption d'une stratégie de fournisseur de matériel élite (FME). En France, ce rôle a été joué par l'INRA depuis les années 50, avec un désengagement progressif. Aux États-Unis, ce rôle est joué par des entreprises privées (*foundations seeds*). Le FME est représenté ici comme une entreprise particulière dont l'activité se limite au seul module d'amélioration des populations, avec un investissement égal à un certain pourcentage (noté $K1$) de CA_{tot} . Les entreprises disposent ensuite gratuitement du matériel élite ainsi créé.

L'extension de la variabilité génétique s'intègre dans l'axe 2 (cf. figure 1), et profite aussi bien aux innovateurs qu'aux imitateurs. L'action de FME s'intègre dans l'axe 1, et profite plus aux imitateurs qu'aux innovateurs qui réalisent déjà l'amélioration des populations en interne.

Méthode d'analyse des effets de la recherche publique sur le surplus social

L'analyse procède en deux étapes : (i) repérer les incitations dans les différentes situations (avec et sans recherche publique), (ii) comparer le surplus social d'une situation à l'autre. Pour faciliter la compréhension, la seconde étape est présentée avant la première.

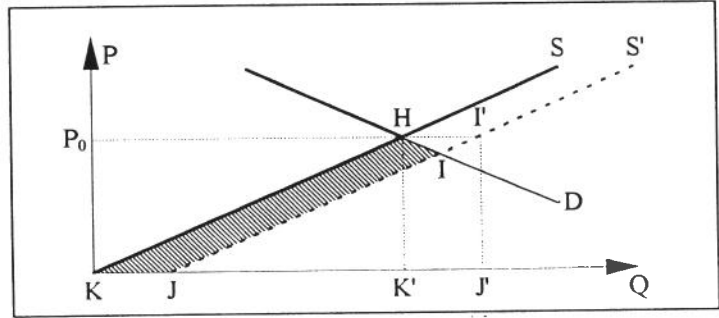
Calcul du surplus social et établissement d'un critère de comparaison

L'évaluation des effets du progrès génétique sur le surplus social nécessite d'envisager la production agricole en aval du secteur des semences. Un certain accroissement du niveau génétique sur toutes les variétés permet d'augmenter la production agricole avec un coût de production équivalent⁽⁹⁾. Graphiquement, cela se traduit par un décalage de la courbe d'offre vers la droite (passage de la courbe S à la courbe S' sur la figure 4). L'accroissement du surplus social est égal à la surface

⁽⁹⁾ Les prix des semences peuvent être supposés stables car les performances relatives ne changent pas. La stabilité du coût des autres inputs agricoles est discutée en annexe 2.

HIJK. Ayant peu d'information sur la forme exacte des courbes S, HI'J'K' (la variation de recette agricole) est pris comme valeur approchée de HIJK⁽¹⁰⁾. Comme le niveau génétique des variétés représente le rendement potentiel de la semence, la distance HI' (= KJ) est égale à la variation du niveau génétique moyen des variétés.

Figure 4.
Augmentation du
niveau génétique
moyen des variétés et
surplus social



Le surplus doit ensuite être cumulé sur plusieurs périodes, car, pour un certain écart de progrès génétique annuel, les écarts de niveaux génétiques des variétés tendent à être de plus en plus importants. Cependant, comme les surplus sont actualisés, cet effet est atténué.

Finalement, une situation est jugée préférable à une autre sur le plan social si la variation de recette agricole (ΔRA^c) est supérieure à la variation des dépenses totales en recherche (ΔDR^c). Ces variations sont cumulées sur T périodes, mais leur rapport peut être exprimé simplement en fonction de données annuelles (cf. annexe 2):

$$\frac{\Delta RA^c}{\Delta DR^c} = \frac{\lambda(r,T)}{PC_0} \cdot \frac{\Delta \dot{x}_{ref}}{\Delta DR^{\%}} \quad (4)$$

r : taux d'actualisation

λ : paramètre exprimant l'accumulation des écarts de progrès génétique sur T périodes

PC_0 : part du coût de la semence dans la recette agricole par hectare

\dot{x}_{ref} : progrès génétique annuel

$DR^{\%}$: dépenses globales en recherche exprimées en pourcentage de CA_{tot} .

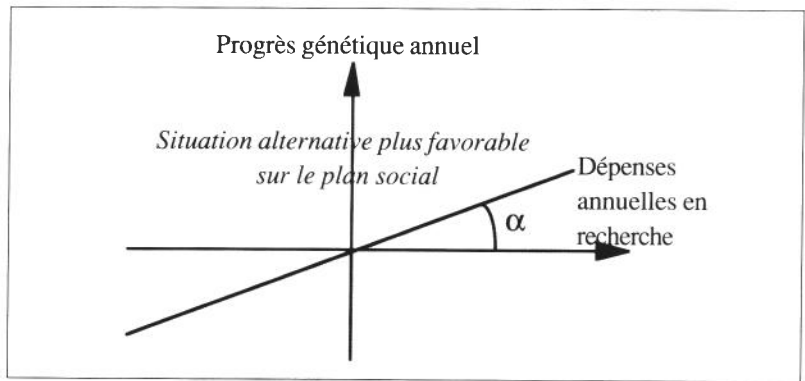
On en déduit un critère de comparaison simplifié:

⁽¹⁰⁾ Cette hypothèse entraîne une surestimation du surplus social, le biais étant égal à HI'I.

$$\Delta RA^c > \Delta DR^c \Leftrightarrow \Delta \dot{x}_{ref} > \frac{PC_0}{\lambda(r,T)} \cdot \Delta DR^{\%} \quad (5)$$

La figure 5 illustre la procédure de comparaison pour deux cas une situation de référence, placée au centre du repère, et une situation alternative placée par rapport à cette dernière selon les variations de dépenses en recherche et de progrès génétique. Le critère de comparaison simplifié permet de définir une droite de pente α ($\tan(\alpha) = PC_0/\lambda(r,T)$) passant par le centre du repère, au dessus de laquelle la situation alternative est préférable à la situation de référence.

Figure 5.
Comparaison entre
deux situations



Analyse des incitations des entreprises

Dans le cadre d'un modèle évolutionniste, l'analyse des incitations revient à étudier les valeurs vers lesquelles les règles de décisions s'adaptent progressivement. Parmi les trois règles de décision du modèle, R0 a l'influence la plus forte sur le surplus social car elle conditionne à la fois les dépenses totales en recherche et le progrès génétique. Les règles R4 et R5 restent fixes, et seules les incitations à investir en recherche sont étudiées pour les différents types d'acteurs (innovateurs et imitateurs).

Le repérage du sens des incitations suffit pour l'analyse envisagée ici. La représentation exacte des processus d'adaptation n'est pas indispensable puisque le sens des incitations peut être établi par une comparaison de l'évolution des parts de marché avec différents niveaux de R0. En prenant, $R0 = 5\%$ ou 9% , nous pouvons donner les règles d'analyse suivantes :

- Si l'augmentation du budget de recherche de 5% à 9% du CA ne modifie pas la part de marché de l'entreprise, le surcroît d'investissement a un effet négatif sur le profit. Avec un processus adaptatif, on observerait donc une décroissance de R0.

- Si l'entreprise accroît nettement sa part de marché en investissant 9% plutôt que 5%, son profit devrait augmenter grâce à l'acquisition d'un pouvoir de marché. Les incitations à investir en recherche augmentent, ce qui revient à dire qu'un processus adaptatif ferait très probablement croître R0.

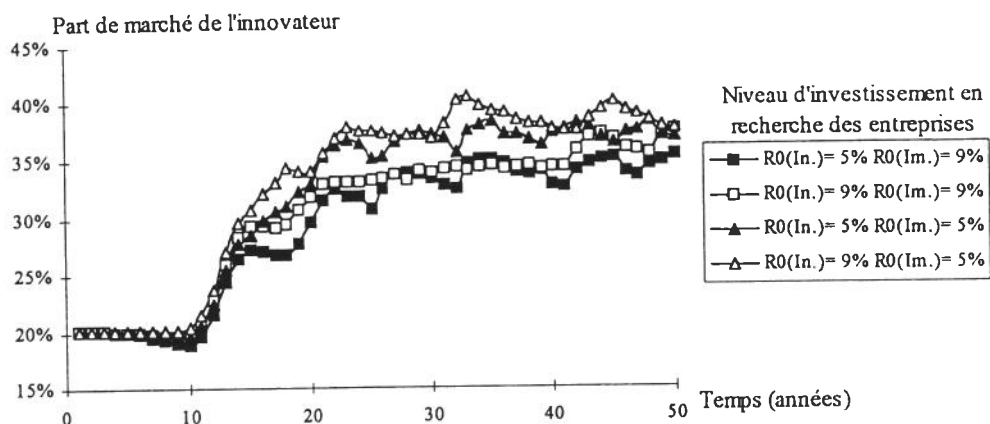
Résultats en régime stable

Le modèle a été calibré en référence au marché des semences de maïs. Les valeurs des paramètres sont présentées dans l'annexe 1.

Incitations des entreprises sans recherche publique

Dans les premières simulations toutes les entreprises ont initialement la même part de marché et le même matériel végétal. Dans une structure « 1+4 » (1 innovateur et 4 imitateurs; cf. graphique 1), l'innovateur s'impose dès la période 10, un équilibre dynamique⁽¹¹⁾ étant ensuite atteint vers la période 25 où l'innovateur domine les imitateurs sans les éliminer. Cette évolution est très peu sensible aux niveaux d'investissements des deux types d'acteur. En d'autres termes, le comportement de l'imitateur a très peu d'effet sur les résultats de l'innovateur, et réciproquement. Ce résultat se retrouve dans presque toutes les autres simulations, et nous permet de déduire que les imitateurs ne sont pas incités à investir en recherche (désormais, nous prendrons donc R0 (imitateurs) = 5%). Pour les innovateurs, aucune conclusion tangible ne peut encore être donnée, puisque la structure « 1+4 » ne permet pas d'étudier les interactions entre innovateurs.

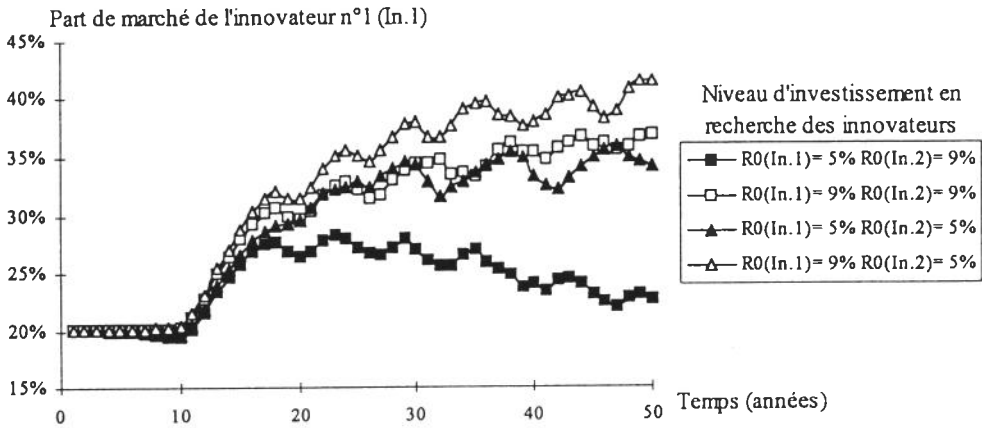
Graphique 1. Evolution de la structure « 1+4 » ($\sigma_{G0} = 1$)



⁽¹¹⁾ A l'équilibre, le nombre total de produits sur le marché varie entre 60 et 70.

Avec une structure « 2+3 » (2 innovateurs et 3 imitateurs; cf. graphique 2), le rythme d'évolution est sensiblement le même. Pourtant, deux états d'équilibre apparaissent alors, si les deux innovateurs investissent autant, ils se partagent équitablement 70 % du marché; si un innovateur investit nettement plus que l'autre, il atteint 40 % du marché contre 25 % à l'autre. Les interactions entre innovateurs sont donc nettement plus fortes que les interactions entre innovateurs et imitateurs. Si un innovateur n'investit que 5 %, l'autre innovateur pourra acquérir un certain pouvoir de marché en investissant fortement (40 % pour ce dernier contre 25 % au premier et 3 fois 10 % pour les imitateurs).

Graphique 2. Evolution de la structure « 2+3 » ($R_0(\text{Imit.}) = 5\%$; $\sigma_{G0} = 1$)



Des simulations supplémentaires ont été réalisées en attribuant initialement 8,5 % du marché aux innovateurs. L'équilibre reste le même dans une structure « 1+4 ». Par contre, dans une structure « 2+3 », un innovateur peut être éliminé du marché s'il investit moins que l'autre innovateur. Ainsi, lorsque $\sigma_{G0} = 1$, et avec des positions initiales quelconques, les incitations des innovateurs à investir en recherche sont plus fortes dans une structure « 2+3 ».

Incitations des entreprises en présence d'une recherche publique

La présence d'un FME modifie les équilibres de marché (tableau 1) par un effet de « dopage » des imitateurs. Avec les deux structures initiales, et si le FME n'investit pas trop, les innovateurs ne parviennent à dominer les imitateurs qu'avec de forts investissements en recherche. Ces incitations à investir en recherche se retrouvent en observant les profits des entreprises. En revanche, si le FME investit plus, les innovateurs ne peuvent jamais atteindre de position dominante, et les incitations redevennent faibles.

Tableau 1. Effets de la présence d'un FME sur la structure de marché à l'équilibre

Structure	Investissement de l'innovateur	Investissement du FME								
		0% (sans FME)		0,5 %		1,0 %		1,5 %		
« 1+4 »	5 %	38 %		15 %		19 %		19 %		
« 1+4 »	9 %	39 %		40 %		21 %		21 %		
	R0(In.1)	R0(In.2)								
« 2+3 »	5 %	5 %	35 %	35 %	20 %	20 %	19 %	19 %	19 %	19 %
« 2+3 »	9 %	9 %	36 %	36 %	36 %	36 %	21 %	21 %	21 %	21 %
« 2+3 »	5 %	9 %	23 %	40 %	22 %	39 %	17 %	21 %	19 %	21 %

$\sigma_{G0} = 1$. R0 (imitateurs) = 5%. La structure est décrite par la part de marché de l'innovateur (structure « 1+4 ») ou des innovateurs (respectivement « In.1 » et « In.2 » dans une structure « 2+3 »).

L'élargissement de la variabilité génétique ($\sigma_{G0} = 2$ au lieu de 1) aboutit aux résultats suivants: dans une structure « 1+4 », en investissant 9% l'innovateur peut éliminer les imitateurs du marché si ces derniers investissent peu; dans une structure « 2+3 », si un innovateur investit plus que l'autre, il atteint 50% du marché contre 15 % à l'autre. Par conséquent, l'élargissement des opportunités technologiques augmente les incitations des innovateurs en accentuant les pouvoirs de marché accessibles avec un fort investissement.

Ainsi, comme le résume le tableau 2, la recherche publique modifie les incitations des innovateurs en adoptant une stratégie de FME, ou en élargissant la variabilité génétique.

Tableau 2. Incitations des entreprises innovatrices à investir en recherche	Structure de marché	$\sigma_{G0} = 1$		$\sigma_{G0} = 2$
		Sans FME	Avec FME*	
	« 1+4 »	faibles	fortes	moyennes
	« 2+3 »	moyennes	fortes	fortes

* K1 = 0,5 %.

Recherche publique et surplus social

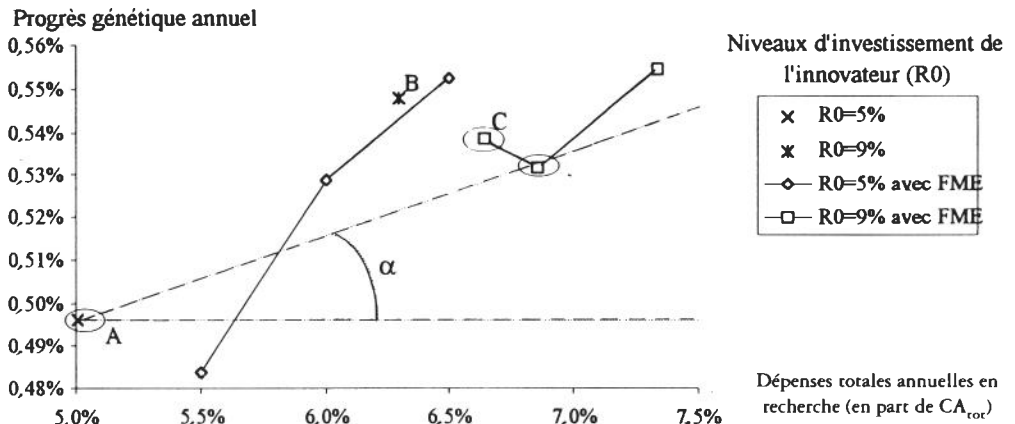
Pour comparer les différentes situations en terme d'intérêt social, deux résultats préliminaires ressortent.

1. L'investissement en recherche des imitateurs ne permet pas d'accroître le progrès génétique annuel, mesuré sur les hybrides commerciaux. Cet investissement leur permet simplement de se maintenir sur le marché en leur donnant la capacité de dupliquer assez rapidement les travaux des innovateurs. Le progrès génétique annuel est donc principalement déterminé par le niveau d'investissement de l'innovateur.

2. Lorsque les innovateurs investissent fortement en recherche (entraînant un progrès génétique élevé), le système se trouve dans une situation plus favorable. Le graphique 3 illustre cela dans le cas d'une configuration « 1+4 » : le point B (fort investissement de l'innovateur) se trouve au dessus de la droite passant par A (faible investissement de l'innovateur) et de pente $\alpha^{(12)}$. Bien qu'il semble trivial, ce résultat ne pouvait être donné a priori comme les rendements de la recherche sont décroissants (cf. formule 1), il existe un niveau d'investissement critique au delà duquel l'accroissement de la recette agricole lié à un progrès génétique supérieur ne compense pas les investissements supplémentaires en recherche. En paramétrant de façon assez réaliste le modèle et le critère de comparaison, nous montrons que les firmes se trouvent dans une zone où les rendements de la recherche sont encore assez importants.

En reprenant les conclusions sur les incitations des innovateurs, il apparaît donc qu'une structure « 2+3 » permet d'atteindre des situations efficaces sur le plan social, à l'inverse d'une structure « 1+4 ». Sur le graphique 3, cela signifie donc que le système va tendre vers le point A et non vers B. L'intérêt social des deux modalités d'intervention de la recherche publique peut ensuite être évalué.

Graphique 3. Effets de l'activité d'un FME sur le bénéfice social (« 1+4 » ; $\sigma_{G0} = 1$)



$R0$ (imitateurs) = 5 %. Pour les courbes « avec FME », les trois points correspondent à des niveaux d'investissement ($K1$) de 0,5 %, 1 % et 1,5 %. Les points entourés correspondent au niveau d'investissement que l'innovateur est incité à réaliser. α est déterminé en prenant $PC0 = 10\%$; $\lambda = 5 \Rightarrow \text{tg}(\alpha) = 2\%$.

⁽¹²⁾ La valeur prise pour α reflète un jugement assez sévère ($\lambda=5$) qui permet de se prémunir des biais liés aux hypothèses de calcul, discutés en fin d'annexe 2.

Si la recherche publique joue le rôle d'un FME, le défaut d'incitation lié à la structure « 1+4 » peut être corrigé pour des niveaux d'investissements particuliers ($K1 = 0,5\%$, convergence vers C). Dans ce cas, le supplément de progrès génétique compense le supplément d'investissement collectif, rendant l'ensemble plus efficace. Ce résultat est néanmoins assez sensible au comportement du FME: avec $K1 = 1\%$, aucune amélioration n'est observée. Assez paradoxalement, on retrouve une amélioration avec $K1 = 1,5\%$ car les innovateurs ne sont plus incités à investir en recherche. Ce paradoxe s'explique par un changement du rôle du FME: au lieu de corriger les incitations, il devient le seul à soutenir le progrès génétique. Cette dernière situation est très risquée car très peu flexible: un désengagement de la recherche publique provoquerait une chute à 0 du progrès génétique. Avec une structure « 2+3 », la stratégie de FME se justifie par contre beaucoup moins car les défauts d'incitations sont négligeables.

Si la recherche publique élargit la variabilité génétique (source d'opportunités technologique), le progrès génétique est doublé (1% par an au lieu de $0,5\%$ par an en passant de $\sigma_{G0} = 1$ à $\sigma_{G0} = 2$). Dans le cas d'une structure « 1+4 », cela s'accompagne d'un deuxième effet d'accroissement des incitations. Comme les coûts de la recherche publique n'ont pas été pris en compte, une borne a été calculée: tant que les dépenses totales en recherche ne dépassent pas 30% de la valeur totale du marché (CA_{tot}), l'accroissement du progrès génétique compense les investissements publics. A en juger par les budgets des différents instituts de recherche, il semble que l'on soit en dessous de cette valeur. La question porte donc autant sur l'estimation des coûts que sur l'évaluation du degré d'élargissement possible des opportunités dans la limite des budgets actuels.

LES EFFETS DE LA RECHERCHE PUBLIQUE EN RÉGIME D'APPRENTISSAGE

Nous envisageons à présent l'introduction d'une biotechnologie particulière (le marquage moléculaire) conduisant à une modification très nette de la base technologique de l'amélioration des plantes. La représentation se limite toujours à l'activité d'exploitation de la variabilité génétique, qui prend la forme d'une sélection assistée par marqueurs (ou SAM) lorsque les acteurs sont engagés. Dans le modèle, si les firmes sont contraintes à s'engager en SAM, elles ont à terme une efficacité supérieure en recherche, mais des problèmes d'information imparfaite et d'apprentissage peuvent bloquer l'engagement des firmes, pour des raisons de viabilité. La transformation industrielle est donc envisagée comme un processus endogène.

La structure complémentaire du modèle en régime d'apprentissage

Formulation du progrès génétique en SAM

L'utilisation du marquage moléculaire permet de diminuer le nombre de parcelles d'essai (n_{jK}) nécessaire pour réaliser un certain progrès génétique. Plus précisément, l'investissement en SAM sur le module K se décompose en un investissement en marquage ($IT_{jK}^{(M)}$) et un investissement sur les parcelles d'essai ($IT_{jK}^{(P)}$) selon la règle suivante :

$$IT_{jK} = IT_{jK}^{(P)} + IT_{jK}^{(M)} \quad \text{avec:} \quad \frac{IT_{jK}^{(P)}}{IT_{jK}^{(M)}} = \frac{n_{jK} \cdot CM_K^{(P)}}{CM^{(M)}} \quad (6)$$

$CM_K^{(P)}$: coût moyen des parcelles d'essai réalisées dans le module K

$CM^{(M)}$: coût moyen du marquage pour la firme j à la date t (défini plus loin)

Le progrès génétique en SAM est exprimé comme une pondération du progrès génétique en sélection classique ($\Delta G_K^{(SC)}$ détaillé à la formule 2) :

$$\Delta G_K^{(SAM)} = E(m^2) \cdot \Delta G_K^{(SC)} \left(IT_{jK}^{(P)} ; \phi_K \cdot \sigma_{G0} ; CM_K^{(P)} \right) \quad (7)$$

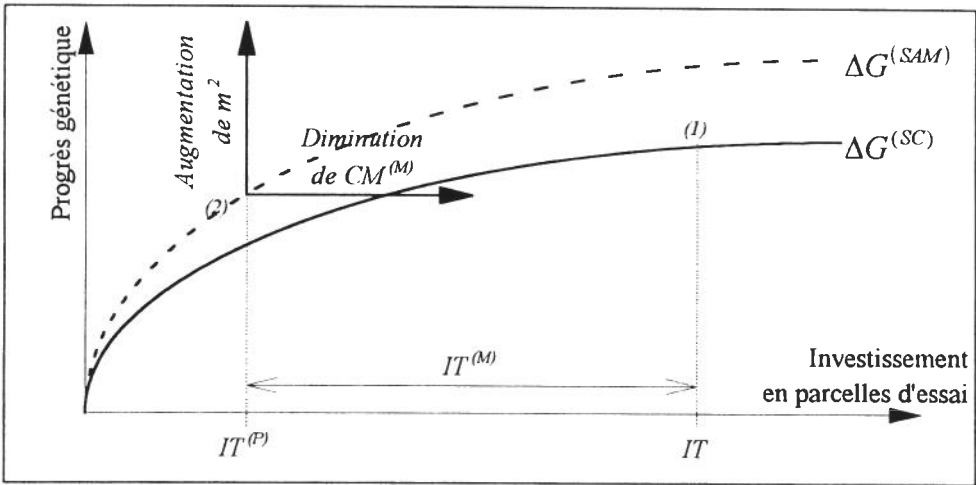
L'efficacité relative de la SAM ($E(.) > 1$) est une fonction croissante du niveau technologique du marquage ($m^2 \in [0,1]$). Une illustration graphique permet d'analyser les effets de $CM^{(M)}$ et m^2 sur le progrès génétique en SAM. Comme l'abscisse est l'investissement en parcelles d'essai, la courbe de progrès génétique en SAM est systématiquement au-dessus de la courbe de progrès génétique en sélection classique. Avec un investissement total donné (IT), la stratégie de sélection classique correspond au point (1) car tout l'investissement est consacré aux parcelles d'essai ; la stratégie de SAM correspond au point (2) qui se trouve à gauche de (1) car il faut décompter l'investissement en marquage pour obtenir l'investissement en parcelles d'essai.

Dans l'exemple de la figure 6, l'effet de l'investissement en marquage est tellement important que le progrès génétique en (2) est plus faible que le progrès génétique en (1). Ce résultat n'est pas systématique : si le coût moyen du marquage diminue, l'investissement en parcelles d'essai augmente (cf. formule 6), entraînant un décalage du point (2) vers la droite le long de la courbe $\Delta G^{(SAM)}$; si le niveau technologique du marquage augmente, l'ensemble de la courbe $\Delta G^{(SAM)}$ se décale vers le haut, entraînant avec elle le point (2).

Par la suite, nous montrons que les phénomènes d'apprentissage peuvent entraîner une diminution de $CM^{(M)}$ et une augmentation de m^2 , et

de ce fait une croissance du progrès génétique en SAM (pour un investissement donné).

Figure 6. Progrès génétique et investissement en sélection classique et en SAM



La forme des courbes est indicative

Apprentissage et diminution du coût moyen du marquage ($CM^{(M)}$)

Si aujourd'hui les équipes de recherche maîtrisent bien la technique de marquage moléculaire, il leur a fallu souvent plusieurs années pour réduire le coût moyen du marquage de l'ordre de la moitié ou des deux tiers. Les raisons de cet apprentissage apparaissent lorsqu'on analyse les facteurs nécessaires à la maîtrise de la nouvelle technique: (i) la mise au point d'un protocole expérimental, (ii) la capacité de diagnostic des sources d'erreurs lorsque le résultat est décevant, (iii) l'amélioration de la productivité par personne. Le protocole expérimental n'est généralement pas un facteur limitant, car il s'agit d'une connaissance codifiée dont l'absorption est aisée. En revanche, les deux autres facteurs nécessitent une expertise importante qui est le plus souvent le fruit d'expériences individuelles, car les connaissances sont difficilement codifiables.

Alors que le coût des parcelles d'essai est un paramètre fixe, le coût moyen du marquage peut être différent d'une entreprise à l'autre, suivant l'expérience de chacune. Cela peut être exprimé par un modèle de type « *learning by doing* » (Arrow, 1961).

$$CM_j^{(M)}(t) = CM_0^{(M)} + \Delta CM^{(M)} \cdot \text{MIN} \left(1 ; \frac{10^\eta}{N_j(t-1)} \right) \quad (8)$$

$CM_0^{(M)}$: coût moyen minimum

- $\Delta CM^{(M)}$: supplément de coût moyen lorsque le marquage n'est pas maîtrisé
 $N_j(t-1)$: nombre cumulé d'opérations réalisées par j depuis son engagement.
 η : difficulté d'apprentissage.

Apprentissage et augmentation du niveau technologique (m^2)

Le progrès génétique en SAM résulte de la combinaison de deux sources d'information, de nature très différente: le marquage indique le contenu moléculaire de la plante, les parcelles d'essai renseignent sur les caractères morphologiques. Bien que les expériences de SAM soient encore à leur début, on peut s'attendre à ce que les acteurs aient des compétences très différentes pour réaliser un progrès génétique à partir de ces deux sources d'information. Progressivement, de nouveaux schémas de sélection peuvent se montrer plus adaptés que les schémas classiques. La maîtrise de la quantité d'information générée par les programmes de SAM nécessite de nouveaux outils informatiques dont la mise en place est plus ou moins laborieuse. Enfin, la mise en place du marquage est généralement associée à la constitution de nouvelles équipes dont la coordination avec le reste de l'activité de recherche peut faire l'objet d'un certain apprentissage.

Par conséquent, le niveau technologique du marquage moléculaire n'est pas seulement un paramètre technique et doit être pondéré par le niveau des compétences des acteurs. Pour exprimer cela, m^2 est considéré comme une fonction croissante qui tend progressivement vers un niveau maximum (Δm^2) exprimant le potentiel technologique:

$$m^2(z_j(t)) = \frac{\Delta m^2}{1 - \exp(-\phi_1 - \phi_2 \cdot z_j(t))} \quad (9)$$

La somme des connaissances de chaque entreprise ($z_j(t)$) est en premier lieu déterminée par son investissement en marquage moléculaire. Néanmoins, une partie des connaissances peut être produite dans le cadre de contrats communs avec d'autres acteurs (notamment la recherche publique). Enfin, l'apprentissage de chaque acteur peut aussi être accéléré grâce à des connaissances produites par des programmes de recherche fondamentale. L'accumulation des connaissances est formulée en adoptant un modèle proche de celui de Cohen et Levinthal (1989)⁽¹³⁾:

⁽¹³⁾ Pour adapter le modèle statique originel, nous supposons que seules les firmes qui se trouvent en retard peuvent bénéficier des *spillovers* des firmes en avance. Le calcul de z_{pb} est légèrement différent car il fait intervenir le taux de *spillovers* des entreprises vers la recherche publique (noté θ_3).

$$z_j(t) = z_j(t-1) + (1-r^{(z)}) \cdot [M_j(t-1) + \gamma_j(t) \cdot M_{-j}(t-1)] \quad (10)$$

$r^{(z)} (\in [0,1])$: taux de redondance des connaissances

$M_u(t-1)$: dépenses en marquage moléculaire de l'acteur u au cours de la période $t-1$

$\gamma_j(t) (\in [0,1])$: capacité d'absorption de l'entreprise j à la période t

Les connaissances externes que la firme j peut absorber sont données par :

$$M_{-j}(t-1) = \theta_1 \sum_{\substack{u \neq pb \\ u \neq j}} M_u(t-1) + \theta_2 M_{pb}(t-1) + \theta_4 IT_{EA} \quad (10')$$

$\theta_1 (\in [0,1])$: taux de *spillovers* d'une entreprise vers un concurrent

$\theta_2 (\in [0,1])$: taux de *spillovers* de la recherche publique vers une entreprise

IT_{EA} : (paramètre exogène) investissements publics en recherche fondamentale

$\theta_4 (\in [0,1])$: taux de *spillovers* de la progression de l'état de l'art vers l'entreprise.

Plus l'entreprise est compétente et plus elle absorbe facilement les connaissances produites par les autres acteurs. La capacité d'absorption est définie de la façon suivante :

$$\gamma_j(t) = \text{MAX} \left(0; 1 - \beta / \log_{10} (z_j(t-1)) \right) \quad (11)$$

β : coefficient représentant la complexité des connaissances.

Les conditions d'engagement en SAM

Compte tenu des deux formes d'apprentissage qui viennent d'être décrites, l'acteur se trouve dans une situation d'information croissante sur la performance de la SAM. Un tel cadre le conduit à adopter des procédures de choix comportant plusieurs séquences, dont nous pouvons retenir les trois principales :

- L'acteur ne s'engage pas en SAM, mais il cherche à estimer la performance relative de la SAM par une activité de veille technologique.
- Si l'acteur s'engage, son apprentissage (sur $CM^{(M)}$ et m^2) débute et lui permet d'augmenter sa capacité à produire un certain progrès génétique. Au cours de ces premières périodes, l'acteur peut compenser la perte de progrès génétique par un surinvestissement en recherche, afin de maintenir sa part de marché.
- Passé un certain temps, l'acteur cesse de surinvestir et peut mesurer si son engagement est bénéfique. Dans le cas envisagé ici, les coûts

fixes irréversibles liés à l'engagement en SAM sont relativement faibles, et l'acteur peut donc assez facilement revenir vers les schémas de sélection classiques si la SAM n'est pas assez performante.

Au cours de la première séquence, l'acteur ne connaît pas le déterminisme de $E(.)$ (cf. formule 9). Il réalise des estimations, ajustées périodiquement en tenant compte de l'efficacité relative révélée par la recherche publique $E_{pb}(.)$, selon un processus similaire à un apprentissage bayésien :

$$\hat{E}_j(t) = (1/2) \cdot \hat{E}_j(t-1) + (1/2) \cdot E_{pb}(t-1) \quad (12)$$

Après avoir ajusté leur estimation, les entreprises non engagées mesurent si la SAM est plus intéressante que la sélection classique. Cela revient à calculer le rapport suivant :

$$\Gamma_{jK}(t) = \frac{\hat{E}_j(t) \cdot \Delta G^{(SC)} \left((1 + SI_j) \cdot IT_{jK}^{(P)}(t); \dots \right)}{\Delta G^{(SC)} \left(IT_{jK}(t); \dots \right)} \quad (13)$$

Le progrès génétique attendu en SAM (dénominateur) est le produit de l'estimation de l'efficacité relative par un progrès génétique en sélection classique. Ce calcul intègre le décompte de la part consacrée au marquage (cf. formule 8) et le surinvestissement (SI_j) que l'entreprise est prête à réaliser.

Si la moyenne des Γ_{jK} est supérieur à un, l'acteur s'engage en SAM. La séquence 2 commence et dure cinq années pendant lesquelles l'acteur maintient son surinvestissement. Débute ensuite la séquence 3 où l'acteur arbitre entre sélection classique et SAM suivant leur performance respective.

Résultats en régime d'apprentissage

Les résultats principaux sans recherche publique

Sans recherche publique, les entreprises n'ajustent pas leur estimation de l'efficacité relative de la SAM⁽¹⁴⁾. Cette simplification artificielle permet de montrer que l'engagement ne se produit que si l'estimation de l'entreprise et son niveau de surinvestissement dépassent un certain seuil. Ces deux paramètres interagissent (tableau 3) : plus l'estimation de l'entreprise est faible et plus celle-ci doit être prête à surinvestir fortement. En général, ces deux conditions sont antinomiques, les entreprises ne surinvestissent que si elles ont des anticipations suffisamment favo-

⁽¹⁴⁾ Seuls les résultats illustrant les effets de la recherche publique sont donnés ici. Un article spécifique (Lemarié, 1995b) exploite plus largement le modèle complémentaire.

rables. En prenant en compte ce lien implicite (non représenté dans le modèle), on peut conclure qu'une entreprise s'engage uniquement si son estimation dépasse un certain seuil.

L'interaction estimation-surinvestissement est influencée par le contexte. Si les opportunités technologiques (σ_{G0}) dans l'ancien paradigme de la sélection classique sont faibles, l'engagement est plus facile car le niveau de surinvestissement est plus faible pour une estimation donné. Enfin, plus l'entreprise investit déjà fortement en recherche, et plus l'engagement est facile.

Tableau 3.
Surinvestissement
minimum de
l'innovateur pour
s'engager en SAM

σ_{G0}	1,0		2,0	
R0	5 %	9 %	5 %	9 %
$\hat{E}(t = 0) = 1,1$	25 %	20 %	35 %	30 %
$\hat{E}(t = 0) = 1,3$	15 %	5 %	15 %	10 %

Ces premiers résultats définissent les conditions pour qu'une firme ait un comportement pionnier. Comme dans d'autres modèles évolutionnistes représentant le changement de paradigme comme un processus endogène (Silverberg *et al.*, 1988), le processus de transformation ne peut pas se déclencher tant qu'il n'y a pas de pionnier. Comme nous avons introduit une révision des choix après cinq ans, le processus peut aussi être bloqué si les entreprises abandonnent la SAM pour revenir à la sélection classique.

Les conditions de maintien de l'engagement ont été étudiées avec quatre régimes, définis en croisant deux valeurs du taux de redondance des connaissances ($r^{(z)} = 15\%$ ou 40%) et deux valeurs de potentiel technologique ($\Delta m^2 = 25\%$ ou 50%). Le tableau 4 présente les résultats avec une structure « 1+4 » dans laquelle l'innovateur est seul à s'engager. Les conclusions sont qualitativement les mêmes en prenant d'autres structures industrielles et lorsque plusieurs entreprises s'engagent.

Lorsque $\sigma_{G0} = 1$, le maintien de l'engagement est impossible si le taux de redondance des connaissances est élevé, mais il est presque systématique si ce taux est faible. Autrement dit, la vitesse d'apprentissage (exprimé ici par $r^{(z)}$) a une influence plus forte sur le maintien de l'engagement que le potentiel de la nouvelle technologie. Par contre, lorsque $\sigma_{G0} = 2$, le maintien de l'engagement est plus sensible au potentiel technologique.

Par ailleurs, quel que soit le régime envisagé, le maintien de l'entreprise en SAM est plus fréquent lorsque les opportunités technologiques en sélection classique sont faibles ($\sigma_{G0} = 1$). Ce résultat renforce l'observation, faite précédemment, d'une plus grande facilité d'engagement avec $\sigma_{G0} = 1$. On confirme ainsi l'idée déjà mise en avant par certains auteurs (Willinger et Zuscovitch, 1988), selon laquelle une nouvelle technologie vient d'abord s'implanter sur des niches où l'ancienne technologie a une efficacité limitée.

Tableau 4.
Effet du régime
technologique sur le
maintien de
l'engagement en SAM

$r^{(a)}$	Δm^2	$\sigma_{G0} = 1$			$\sigma_{G0} = 2$		
		AP	CL	CH	AP	CL	CH
15 %	25 %	A	M	M	A	A	M
15 %	50 %	M	M	M	A	M	M
40 %	25 %	A	A	A	A	A	A
40 %	50 %	A	A	A	A	M	M

Structure de monopole; $R0 = 9\%$, $SI = 20\%$. AP, CL et CH désignent les trois modules de recherche.

A = abandon / M = maintien de l'engagement en SAM.

Les effets de la recherche publique

Dans le modèle, la recherche publique a deux types d'effets sur l'apprentissage des firmes: avant l'engagement, elle influence la formation des anticipations (formule 12) après l'engagement, elle accélère l'accumulation des connaissances (formules 9 et 10). L'intérêt social de la transformation peut, en première approximation, être relié au potentiel de la nouvelle technologie. Or, le paragraphe précédent a montré que la transformation peut être bloquée à cause d'estimations défavorables ou d'une redondance élevée des connaissances, et indépendamment du potentiel technologique.

Lorsque la recherche publique s'engage en SAM, elle révèle des informations sur l'efficacité relative qui permettent aux acteurs d'ajuster leurs estimations. Les situations de blocage les plus graves où les anticipations des acteurs sont faibles malgré un potentiel technologique élevé peuvent alors être évitées.

Lorsque le budget de la recherche publique varie entre 0,5 % et 1,5 % de CA_{tot} , les effets de report sur la somme des connaissances des entreprises permettent à ces dernières d'accélérer nettement leur apprentissage. Le maintien de l'engagement des entreprises en SAM est alors souvent observé, même avec un fort taux de redondance des connaissances. Deux formes d'investissement public avaient été distinguées: un engagement direct en SAM, et des programmes de recherche fondamentales. Ces investissements apparaissent complémentaires car c'est le plus souvent avec une répartition (75 %; 25 %) que la durée d'apprentissage est la plus faible.

CONCLUSION

L'analyse qui vient d'être conduite a fait ressortir trois formes principales d'effets de la recherche publique sur la dynamique industrielle qui,

à chaque fois, présente un intérêt sur le plan social dans certains contextes.

- *L'élargissement des opportunités technologiques* profite à l'ensemble des entreprises concurrentes, et permet d'augmenter leur progrès technique avec des investissements comparables. On retrouve ici un résultat comparable à celui de Nelson et Winter (1982) qui étudient le lien entre régime technologique et efficacité dynamique. Dans le cas étudié ici, l'élargissement des opportunités technologiques se traduit par un accroissement de la variabilité génétique, tâche que les entreprises ne sont pas incitées à réaliser compte tenu des faibles moyens d'appropriation du matériel végétal. Sans le contexte de faible appropriabilité, les entreprises auraient sans doute tendance à plus investir dans cette voie, et l'intérêt de la recherche publique ne serait plus le même.

- *L'augmentation des incitations à investir en recherche* se justifie généralement bien, car la recherche a des rendements suffisamment importants qui permettent de compenser nettement le surcroît d'investissement par l'accroissement du surplus social. Ce rôle n'est cependant important que dans certaines structures industrielles où les innovateurs ne sont pas incités à investir en recherche. La recherche publique peut alors jouer un rôle d'aiguillon en accentuant le pouvoir concurrentiel des imitateurs. Ce résultat est obtenu dans une fourchette étroite de niveau d'investissement, en dehors de laquelle les incitations redeviennent faibles.

- *L'effet sur l'apprentissage des entreprises* présente deux dimensions : faciliter la formation d'anticipations par les acteurs, accélérer le développement de nouvelles compétences. Cet effet a une importance majeure car il facilite la transformation dans un contexte de changement de paradigme.

L'application du modèle au cas de l'industrie des semences (et notamment l'utilisation des travaux de génétique) confère une certaine validité à nos résultats. Cependant, la précision et la rigueur des raisonnements pourraient être améliorées dans deux directions principales.

Les incitations des entreprises sont analysées à partir d'une étude de sensibilité des équilibres aux niveaux des règles de décision. Certains modèles évolutionnistes récents ouvrent une voie plus directe en représentant explicitement des comportements adaptatifs (Silverberg et Verspagen, 1994; Dosi *et al.*, 1993). Une partie supplémentaire aurait permis de voir si ces deux méthodes aboutissent aux mêmes résultats.

La seconde partie du modèle (changement de paradigme) reste encore exploratoire. Plusieurs hypothèses *ad hoc* doivent être reprises en essayant de les fonder sur des analyses ou des modèles élémentaires. Par exemple, le taux de redondance des connaissances, dont les effets sont très importants, devrait être replacé dans le cadre des travaux sur l'apprentissage individuel, organisationnel ou collectif. Par ailleurs, la transformation industrielle est représentée de façon particulière, en l'associant à un

nombre limité de choix micro-économiques, et en négligeant l'importance des investissements en capital. Dans ces deux autres cas, il reste pourtant pertinent de poser le problème en terme d'analyse des effets de la recherche publique sur la viabilité des entreprises.

Enfin, cet article a focalisé l'attention sur les effets de la recherche publique, en reléguant au second plan la question de son financement. Dans un contexte de restriction de ces financements, ces deux questions ne sont pas indépendantes. Les contrats avec les partenaires industriels représentent aujourd'hui une part importante du budget des laboratoires publics. Un tel changement a des effets importants sur la production des laboratoires, et leur espace de diffusion, que le modèle présenté ici n'a pas pris en compte.

BIBLIOGRAPHIE

- AMENDOLA (M.), GAFFARD (J.-L.), 1988 — *La dynamique économique de l'innovation*, Paris, Economica, 161 p.
- ANDERSON (S.P.), DE PALMA (A.), THISSE (J.-F.), 1992 — *Discrete Choice Theory of Product Differentiation*, Cambridge, MIT Press, 423 p.
- ARROW (K.J.), 1961 — The economic implication of learning by doing, *Review of Economic Studies*, pp. 155-173.
- ARROW (K.J.), 1962 — Economic welfare and the allocation of resources for invention, in: *The Rate and Direction of Inventive activity* -NBER Conference, Princeton University Press, pp. 609-626.
- CHIAROMONTE (F.), DOSI (G.), 1992 — Les microfondements de la compétitivité et leurs conséquences macro-économiques, in: FORAY (D.), FREEMAN (C.), eds. 1992, *Technologie et richesse des nations*, Paris, Economica, pp. 121-161.
- COHEN (W.M.), LEVINTHAL (D.A.), 1989 — Innovation and learning: the two faces of R&D, *Economic Journal*, vol. 99, septembre, pp. 569-596.
- DASGUPTA (P.), DAVID (P.-A.), 1994 — Toward a new economics of science, *Research Policy*, vol. 23, n° 5, pp. 487-521.
- DERIEUX (M.), DARRIGRAND (M.), GALLAIS (A.), BARRIERE (Y.), BLOC (D.) et MONTALANT (Y.), 1987 — Estimation du progrès génétique réalisé chez le maïs grain en France entre 1950 et 1985, *Agronomie*, vol. 7, pp. 1-11.

- DOSI (G.), 1988 — Sources, procedures, and microeconomic effects of innovation, *Journal of Economic Literature*, vol. 26, pp. 1120-1171.
- DOSI (G.), MARENGO (L.), BASSANINI (A.), VALENTE (M.), 1993 — Norms as the emergent properties of adaptative learning: the case of economic routines, colloque « Les limites de la rationalité et la constitution du collectif », Cerisy (France), 5-12 juin, Rome, Université La Sapienza.
- DUVICK (D.-N.), 1984 — Genetic contribution to yield gains of US hybrid maize: 1930 to 1980, in: FEHR (W.R.), ed., *Genetic contributions to yield gains of five major crop plants*, Crop Science Society of America, special publication n° 7, pp. 15-47.
- ESTADES (J.), JOLY (P.-B.), LEMARIÉ (S.); DE LOOZE (M.-A.), MANGEMATIN (V.), 1995 — Recherche publique et recherche industrielle une analyse des relations de deux départements à l'INRA, Grenoble, INRA-SERD, 30 p. + annexes.
- GALLAIS (A.), 1989 — *Théorie de la sélection en amélioration des plantes*, Paris, Masson, 588 p.
- GIBBONS (M.), JOHNSTON (R.), 1974 — The roles of science in technological innovation, *Research Policy*, vol. 3, pp. 220-242.
- GUELLEC (D.), KABLA (I.), 1994 — Le brevet: un instrument d'appropriation des innovations technologiques, *Economie et Statistique*, n° 275-275, pp. 83-94.
- HUFFMAN (W.E.), EVENSON (R.E.), 1993 — *Science for agriculture a long term perspective*, Ames, Iowa State University Press, 268 p.
- JAFFE (A.B.), 1989 — Real effects of academic research, *American Economic Review*, vol. 79, n° 5, pp. 957-970.
- JOLY (P.-B.), DUCOS (C.), 1993 — *Les artifices du vivant. Stratégies d'innovation dans l'industrie des semences*, Paris, INRA Editions-Economica, 422 p.
- KLEVORICK (A.K.), LEVIN (R.C.), NELSON (R.R.), WINTER (S.G.), 1995 — On the sources and significance of interindustry differences in technological opportunities, *Research Policy*, vol. 24, n° 2, pp. 185-205.
- LEMARIÉ (S.), 1995a — Rationalité des choix en R&D dans le cadre de la théorie évolutionniste: une application à l'industrie des semences, Thèse de doctorat en économie appliquée, Grenoble, Université Pierre Mendès France, 326 p.
- LEMARIÉ (S.), 1995b — Changement de paradigme et apprentissage: un modèle évolutionniste appliqué au secteur des semences, Contri-

bution associée au XLIV^e Congrès annuel de l'AFSE, Paris ,Grenoble, INRA-SERD.

NELSON (R.R.), 1959 — The simple economic of basic research, *Journal of Political Economy*, vol. 67, pp. 297-306.

NELSON (R.R.), WINTER (S.G.), 1982 — *An Evolutionary Theory of Economic Change*, Cambridge, Harvard University Press, 437 p.

SILVERBERG (G.), DOSI (G.), ORSENIGO (L.), 1988 — Innovation, diversity and diffusion a self-organisation model, *Economic Journal*, vol. 98, décembre, pp. 1032-1054.

SILVERBERG (G.), VERSPAGEN (B.), 1994 — Learning, innovation and economic growth: a long-run model of industrial dynamics, *Industrial and Corporate Change*, vol. 3, n° 1, pp. 199-223.

WILLINGER (M.), ZUSCOVITCH (E.), 1988 — Towards the economics of information-intensive production systems: the case of advanced materials, in DOSI (G.) *et al.*, ed., *Technical Change and Economic Theory*, Londres, New-York , Pinter Publishers, pp. 239-255.

ANNEXE 1

Formules annexes, paramètres et variables du modèle

Le détail du calcul du progrès génétique n'est pas indiqué ici, mais peut être fourni dans un document détaillé au lecteur qui le souhaite.

En régime stable

Formule	Paramètres utilisés	Variables calculées
(1)	$\sigma_{GO} = 1 \text{ ou } 2$ $\phi_{AP} = 1,0$; $\phi_{CL} = 0,75$; $\phi_{CH} = 0,75$ $CM_{AP}^{(P)} = 200$; $CM_{CL}^{(P)} = 1000$; $CM_{CH}^{(P)} = 1000$	$G_{jp}(t)$; $G_{jl}(t)$; $G_{jb}(t)$: niveau génétique du matériel végétal
(2)	$CA_{tot} = 3,10^8$ $RO_j = 5\% \text{ ou } 9\%$ $j \text{ innovateur} \Rightarrow R4_j = 30\% ; R5_j = 50\%$ $j \text{ imitateur} \Rightarrow R4_j = 50\% ; R5_j = 0\%$	$ID_{jK}(t)$: investissements disponibles $IT_{jK}(t) = 3 \cdot \left(ID_{jK}(t) - \frac{IT_{jK}(t-1)}{3} - \frac{IT_{jK}(t-2)}{3} \right)$ $PM'_j(t) = (PM'_j(t-1) + PM_j(t))/2$ $PM_j(t) = \sum_{p \in \Omega_j(t)} PM_p(t)$
(3)	$a = 30,0$ $b_1 = -2,0$ $b_2 = +1,0$ $PM_0 = 0,5\%$ (seuil d'élimination)	$PM_p(t)$: part de marché du produit p $\Omega(t)$: ensemble des produits vendus en t $\Omega_j(t)$: ensemble des produits vendus par j en t $T'_p : x_p = G_{jb}(T_p - 1)$ si p est commercialisé par j $x_0(t)$: performance de référence en t $xr_p(t) = (x_p - x_0(t)) / x_0(t)$

En régime d'apprentissage

Formule	Paramètres utilisés	Variables calculées
(9)	$CM_0^{(M)} = 500$; $\Delta CM^{(M)} = 500$; $\eta = 2,8$	$CM_j^{(M)}(t)$: coût moyen du marquage
(10)	$\Delta m^2 = 25\% \text{ ou } 50\%$ $\phi_2 = 10^{-6}$ ϕ_1 tel que $m^2(0)/\Delta m^2 = 10\%$	$m_j^2(z_j)$: niveau technologique
(11)	$r^{(z)} = 15\% \text{ ou } 40\%$ $\theta_1 = 30\%$; $\theta_2 = 60\%$; $\theta_3 = 50\%$; $\theta_4 = 40\%$ $IT_{EA} = 0,25\%$ de CA_{tot}	$z_j(t)$: somme des connaissances
(12)	$\beta = 3$	$\gamma_j(t)$: capacité d'absorption
(13)	$\hat{E}_j^{(o)}$: différents selon les simulations	$\hat{E}_j^{(t)}$: estimation de l'efficacité relative de la SAM
(14)	SI_j : entre 0% et 30%	$\Gamma_{jK}(t)$: supplément de progrès génétique réalisé en SAM

ANNEXE 2

Passage de données cumulées à des données annuelles dans l'analyse du surplus social

Présentation des calculs

Les variables exprimant des variations (ou écarts) entre les deux situations comparées sont précédées du signe Δ .

Les écarts de dépenses totales en recherche actualisées à la date t peuvent être exprimés de la façon suivante :

$$\Delta DR(t) = \frac{CA_{\text{tot}}}{(1+r)^t} \cdot \Delta DR^{\%}(t) \text{ avec : } DR^{\%}(t) = K1 + \sum_j \left(\frac{CA_j \cdot R0_j}{CA_{\text{tot}}} \right) \quad (A1)$$

CA_{tot} : volume total du marché

r : taux d'actualisation

$DR^{\%}(t)$: dépenses totales en recherche (publiques et privées) exprimées en pourcentage du chiffre d'affaires total sur le marché envisagé.

Comme les acteurs adoptent des règles de décision stables, nous pouvons supposer que $DR^{\%}(t)$ est constant⁽¹⁵⁾. La somme des écarts sur un horizon de calcul de T périodes donne :

$$\Delta DR^c = CA_{\text{tot}} \cdot g(T) \cdot \Delta DR^{\%}$$

$$\text{avec : } g(T) = \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r)^t} = \frac{1 - (1+r)^{-T}}{r} \quad (A2)$$

La recette agricole actualisée à la date t peut être exprimée de la façon suivante :

$$RA(t) = \frac{1}{(1+r)^t} \cdot \sum_{p \in \Omega(t)} \left(x_p \cdot P_0 \cdot \frac{V_p(t)}{C_0} \right) = \frac{P_0 \cdot CA_{\text{tot}}}{C_0 \cdot (1+r)^t} \cdot \bar{x}(t) \quad (A3)$$

$\Omega(t)$: nombre de produits présents sur le marché en t .

x_p : performance du produit p (en quantité d'output par unité de surface).

⁽¹⁵⁾ Lorsque les entreprises ont des niveaux d'investissement différents, $DR^{\%}$ varie en fonction des parts de marché des entreprises. Dans ce cas, la valeur retenue pour $DR^{\%}$ est la valeur d'équilibre (moyenne sur les 5 dernières périodes de la simulation).

$V_p(t)$: ventes du produit p pendant l'année t .

P_0 : prix de l'output agricole.

C_0 : coût moyen des semences par unité de surface.

$\bar{x}(t)$: performance moyenne des produits du marché, pondérée par les ventes.

$\bar{x}(t)$ peut être exprimée en fonction du progrès génétique annuel, estimé à partir de l'évolution de la performance de référence (x_{ref}). Nous supposons pour cela que la performance moyenne sur l'ensemble des produits et la performance moyenne sur les trois produits de référence (les plus vendus) progressent au même rythme.

$$\bar{x}(t) \cong \bar{x}(0) + x_{ref}(t) - x_{ref}(0) = \bar{x}(0) - x_{ref}(0) + x_{ref}(0) \cdot (1 + \dot{x}_{ref})^t \quad (A4)$$

\dot{x}_{ref} : progrès génétique annuelle $\left(\dot{x}_{ref} = (x_{ref}(50)/x_{ref}(0))^{1/50}\right)$

En introduisant (A4) dans (A3), et après simplification, l'écart de recette agricole entre deux situations (notées (1) et (2)) est alors:

$$\Delta RA(t) = \frac{P_0 \cdot x_{ref}(0)}{C_0} \cdot CA_{tot} \cdot \left[\left(\frac{1 + \dot{x}_{ref}^{(2)}}{1 + r} \right)^t - \left(\frac{1 + \dot{x}_{ref}^{(1)}}{1 + r} \right)^t \right] \quad (A5)$$

La fraction au début de cette expression représente l'inverse de la part du coût de la semence dans la recette agricole par hectare ($PC_0 = C_0/(P_0 \cdot x_{ref}(0))$). Le rapport CA_{tot}/PC_0 représente la recette agricole dans les conditions initiales.

L'écart cumulé de recette agricole peut ensuite être calculé:

$$\Delta RA^c = \frac{CA_{tot}}{PC_0} \cdot \left[f(\dot{x}_{ref}^{(2)}) - f(\dot{x}_{ref}^{(1)}) \right] \quad (A6)$$

$$\text{avec:} \quad f(x) = \sum_{t=1}^T \left(\frac{1+x}{1+r} \right)^t = \left(\frac{1+x}{r+x} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{1+x}{1+r} \right)^T \right)$$

La fonction f est paramétrée par le taux d'actualisation (r et l'horizon de calcul du bénéfice social T). Lorsque x prend des valeurs proches de celles qui correspondent aux résultats du modèle, il est possible de montrer que les variations de $f(x)$ sont linéaires. La décomposition suivante est donc acceptable:

$$f(\dot{x}_{ref}^{(2)}) - f(\dot{x}_{ref}^{(1)}) \cong \lambda(r, T) \cdot g(T) \cdot (\dot{x}_{ref}^{(2)}) - f(\dot{x}_{ref}^{(1)}) \quad (A7)$$

λ est un coefficient multiplicateur qui reflète la nécessité de cumuler les écarts de progrès génétique sur plusieurs périodes pour rendre

compte des variations de recette agricole. λ est élevé pour des horizons de planification longs, et des taux d'actualisation faibles (tableau A.1.).

Tableau A.1.
Valeurs de λ en
fonction du taux
d'actualisation et de
l'horizon de calcul

Horizon de calcul (T)	Taux d'actualisation (r)			
	2%	6%	10%	20%
10 ans	5,50	5,17	4,86	4,18
30 ans	10,50	9,13	7,93	5,70

En introduisant (A7) dans (A6), on obtient finalement :

$$\Delta RA^c \equiv \frac{\lambda(r,T)}{PC_0} \cdot CA_{tot} \cdot g(T) \cdot \Delta \dot{x}_{ref} \quad (A8)$$

En reprenant (A2) et (A8), le rapport entre la variation des dépenses totales en recherche et la variation de recette agricole est donc :

$$\frac{\Delta RA^c}{\Delta DR^c} = \frac{\lambda(r,T)}{PC_0} \cdot \frac{\Delta \dot{x}_{ref}}{\Delta DR^{\%}} \quad (A9)$$

Discussion des principales hypothèses de simplification

Le calcul suppose que le marché des semences, proportionnel au marché aval du produit agricole, a une taille constante. Cette hypothèse est a priori discutable lorsqu'on se réfère par exemple au cas français. Le rapport entre les prix des produits agricoles, fixés par la Communauté européenne, a parfois été nettement modifié dans le but de favoriser le développement de certaines cultures (développement du tournesol dans les années 80 par exemple). De plus, certains sauts importants de performance, grâce notamment au progrès génétique, ont modifié l'intérêt relatif de différentes cultures (développement du marché des demi-précoces cornées-dentées à la suite après l'introduction de Déa créé par Pioneer).

En supposant une taille de marché constante, le calcul sous-estime le bénéfice social pour les marchés en essor et surestime le bénéfice social pour les marchés en déclin. Cependant, comme la surface agricole totale est toujours constante, il se produit un effet de substitution tel que ce qui est sous-estimé d'un côté est approximativement égal à ce qui est surestimé de l'autre côté. En d'autres termes, en envisageant un marché agrégé sur l'ensemble des produits agricoles, notre calcul reste valable.

Le calcul suppose aussi que le progrès génétique est sans effet sur les autres dépenses de l'agriculteur. Cette hypothèse est a priori discutable puisque les gains de productivité agricole réalisés depuis 40 ans ont été associés à un accroissement de l'usage des autres inputs agricoles (engrais, fongicides, insecticides, etc.). Il faut d'abord remarquer que le

modèle ne prend en compte que le gain de productivité réalisé grâce au progrès génétique, ce qui est généralement estimé comme la moitié des gains totaux de productivité agricole. Par exemple, l'augmentation de productivité réalisée grâce à un traitement fongicide supplémentaire n'est pas prise en compte dans les gains de productivités exprimés par \dot{x}_{ref} . Notre hypothèse est discutable seulement dans le cas où un progrès génétique entraîne une dépense supplémentaire sur un autre poste (ex : les gains de rendement sur le blé grâce à la diminution de la taille de la plante se traduisent par un accroissement des dépenses en engrais). On peut donc juger que notre calcul tend à surestimer le bénéfice social, et ainsi à surestimer la valeur de l'angle α .