

NOTE DE RECHERCHE

Dynamiques d'innovation et politiques de financement en biotechnologie

**Catherine Beaudry
et Ruby Farcy**

2008-04

Adresse postale

CIRST
Université du Québec à Montréal
C.P. 8888, Succursale Centre-ville
Montréal (Québec)
Canada, H3C 3P8

Adresse civique

CIRST
Université du Québec à Montréal
Pavillon Thérèse-Casgrain, 3e étage
455, boul. René-Lévesque Est, Bureau
W-3042
Montréal (Québec) Canada
H2L 4Y2

Pour nous joindre

Téléphone : (514) 987-4018
Télécopieur : (514) 987-7726
Courrier électronique : cirst@uqam.ca
Site Internet : www.cirst.uqam.ca

Conception graphique : Marie-Andrée Desgagnés

ISBN 978-2-923333-38-0

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2008

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2008

Table des matières

Résumé	1
1. Introduction	2
2. Méthodologie.....	5
2.1 Méthodologie générale	5
2.2 Processus d'innovation en biotechnologie	6
3. Le modèle en dynamique des systèmes.....	8
3.1 Activités de recherche fondamentale et appliquée	8
3.2 Réussite des activités de recherche.....	9
3.3 Expérience accumulée en recherche.....	11
3.4 Décisions d'investissement	13
3.5 Inventions en recherche fondamentale et création des firmes.....	14
3.6 Expansion de la firme par les collaborations.....	17
3.7 Développement de produits sur le marché	21
4. Simulation des dynamiques	23
4.1 Dynamiques en recherche fondamentale.....	23
4.2 Dynamiques en recherche appliquée	25
4.3 Dynamiques de collaboration	27
4.4 Dynamiques de développement de produits.....	29
5. Évaluation des politiques publiques	31
5.1 Politiques de financement de la recherche fondamentale.....	31
5.2 Politiques de financement des firmes	37
5.3 Les politiques de financement d'infrastructure	45
6. Discussion et conclusion	51
6.1 Notre apport.....	51
6.2 Perspectives de recherche.....	52
Références	54

Ce projet de recherche a été financé par le Fonds québécois de recherche sur la nature et les technologies ainsi que par la Fondation de l'École Polytechnique. Nous tenons à remercier Nathalie de Marcellis-Warin et Patrick Cohendet pour leurs commentaires ainsi que les membres de l'équipe InnoVaRisQ pour leur support tout au long de ce projet. Toutes les erreurs qui demeurent sont évidemment les nôtres.

Résumé

Cette recherche s'appuie sur une approche évolutionniste et propose un modèle de simulation en dynamique des systèmes afin d'analyser diverses politiques de financement de la biotechnologie. Notre modèle intègre la génération de technologies dans les universités et les laboratoires publics, le perfectionnement des technologies par les firmes de biotechnologie, le développement de produits en collaboration, et la maturité des firmes de biotechnologie. Dans notre modèle, les projets de recherche fondamentale ou appliquée sont en particulier contraints par les ressources financières via les décisions stratégiques d'investissement ou les négociations des collaborations. Les premiers résultats montrent que répartir le financement de la recherche fondamentale en biotechnologie sur plus de laboratoires permet à court terme d'accélérer le processus de découvertes en multipliant les opportunités technologiques. Il permet à long terme d'augmenter le nombre d'inventions, puis le nombre de produits sur le marché en fin de processus. Nos résultats montrent que les politiques de développement du capital-risque ne doivent pas tendre à augmenter le financement par firme, mais à mieux répartir le financement et surtout à soutenir un financement par étapes.

Mots clés : biotechnologie, dynamique des systèmes, politiques publiques, financement

1. Introduction

Les biotechnologies sont aujourd'hui une source cruciale de développement pour les entreprises multinationales et une source recherchée de croissance économique par les gouvernements occidentaux. Elles rencontrent néanmoins des difficultés d'accès au financement. La littérature exprime alors clairement que le financement en innovation évoluera dynamiquement avec la firme et les projets.

La première réflexion porte sur le niveau de R-D financé. La firme finance et entreprend de la R-D seulement si son revenu espéré est supérieur au coût de la recherche (Nelson, 1959; Hall, 2002). Mais ce niveau de R-D privé n'est souvent pas socialement optimal. Un certain niveau, potentiellement supérieur, est désirable, dépendamment de l'impact de la R-D privée sur la société, sur le reste de l'économie et sur la R-D des autres agents par la présence d'externalités.

Les théorèmes de Miller et Modigliani (1958, 1963) se concentrent sur le choix d'une structure financière optimale pour les firmes. Ainsi, dans certaines conditions, il est moins cher de lever de la dette plutôt que des actions grâce à des économies d'impôts réalisées sur les intérêts de la dette. Cependant, les coûts de la nouvelle dette avec le taux d'intérêt augmentent car la dette apporte un risque de faillite.

Selon le formalisme de l'agence, des asymétries d'information existent entre un agent, l'entrepreneur, et un principal, l'investisseur. Un coût supplémentaire, appelé rente d'agence, permet certes de garantir l'incitation à l'effort de l'agent malgré l'absence d'information, mais il s'ajoute sur le compte de l'investisseur (Hart, 2001; Hall, 2002). Il constitue alors un obstacle au financement externe. Le financement dépendra de l'existence d'une relation dynamique de confiance entre l'investisseur et l'entrepreneur (Aghion et Bolton, 1992).

En outre, le risque est à l'origine notamment de problèmes d'accès au financement des PME innovantes (St-Pierre et Beaudoin, 2003). Le risque varie selon le type d'innovation, la phase du projet et l'intensité de l'activité d'innovation. Les actifs du projet en innovation, très souvent immatériels, constituent une mauvaise garantie pour les créanciers qui évaluent le risque dépendamment de la probabilité d'échec, mais aussi du nantissement qu'ils pourront recouvrer en cas de faillite (Baldwin, Gaudreault, et Gellatly, 2002).

Du fait de ces nombreuses contraintes, aucune forme classique de financement ne peut être adaptée. Dans ces conditions, toute la dynamique de l'innovation est pénalisée, affaiblissant la croissance de la firme et de l'industrie. Le capital de risque s'érige comme une source externe de financement qui permet de résoudre certaines lacunes sur le marché de financement à travers un financement par étapes (Gompers et Lerner, 2004 ; Allen et Percival, 2000 ; Mantell, 2005), mais il ne les comble pas toutes, son importance restant limitée quantitativement et qualitativement, et il crée même de nouvelles lacunes (McGlue, 2002 ; Martin *et al.*, 2005).

Par conséquent, l'État, qui sur le plan théorique veut atteindre le niveau de R-D socialement optimal, doit développer des politiques publiques pour pallier ces contraintes. La diversité des contraintes et la complexité de la dynamique d'innovation amènent de

nouvelles questions concrètes : Dans quelle mesure l'État doit-il s'impliquer ? Comment financer la R-D pour atteindre le niveau souhaité ?

Concevoir concrètement une stratégie de développement de la biotechnologie n'est en fait pas aussi simple que l'on pense. De nombreuses politiques gouvernementales peuvent potentiellement aider à développer l'innovation et la R-D. Les politiques publiques peuvent par exemple intervenir sur les contraintes financières, les faiblesses du management, les imperfections du marché et l'accès à la technologie (Murray et Marriott, 1998). Par rapport aux firmes, une politique publique peut s'appuyer sur des instruments directs comme le soutien personnel aux firmes, ou indirects en jouant sur les infrastructures et l'environnement légal (Murray et Marriott, 1998). La stratégie de la politique peut être horizontale ou verticale, ciblée ou non ciblée (Niosi et Teubal, 2005). Les crédits d'impôts sont horizontaux et non ciblés, car disponibles à toutes les entreprises selon des critères. Une subvention est verticale, car elle nécessite une sélection des dossiers et n'est pas valable pour tous les agents d'une catégorie. Elle peut être aussi ciblée sur un secteur ou une technologie spécifique.

Le cas des politiques de financement direct et des politiques fiscales a été très largement traité dans la littérature. Le financement public direct, c'est-à-dire via les contrats et les subventions, permet de canaliser les fonds publics vers les projets prometteurs, en recherche publique ou privée, qui n'auraient pas été entrepris autrement. Il n'y a donc pas d'effet d'aubaine : les projets sont sélectionnés pour leur fort retour social (Hall et van Reenen, 1999). Mais un problème majeur réside, car l'État ne dispose pas de toutes les informations pour « bien » sélectionner les projets : sa rationalité est limitée quand à la valeur de projets d'innovation et de R-D. Au contraire, les incitations fiscales laissent la décision de la R-D à l'entrepreneur qui connaît mieux les marchés et les innovations (Dagenais *et al.*, 2004), mais elle ne peut pas remplacer la recherche publique subventionnée. Elles concernent plutôt les firmes qui recherchent leur propre retour sur investissement et non le retour social (Hall et van Reenen, 1999). Dans ce cas, des effets d'aubaine peuvent exister : du financement public peut abusivement être apporté à des projets qui ont un faible retour social ou qui rencontrent de faibles contraintes financières.

Le Canada a ainsi adopté une riche stratégie pour la biotechnologie qui a évolué depuis deux décennies¹. Les politiques provinciales agissent sur des aspects similaires aux politiques fédérales, mais dans le cadre restreint de leur juridiction. Un premier ensemble de politiques concerne le financement direct de la R-D à travers les organismes de recherche et les universités. Le Conseil National de Recherches du Canada (CNRC),

¹ Nous ne présenterons pas ici toutes les politiques chiffrées. Elles sont disponibles dans le mémoire de Farcy (2008), ainsi que dans des documents publics :

Initiatives du gouvernement du Canada pour l'essor de la biotechnologie – 2003
([http://biotech.gc.ca/epic/site/cbsscb.nsf/vwapj/initiatives_de_la_biotechnologie.pdf/\\$FILE/initiatives_de_la_biotechnologie.pdf](http://biotech.gc.ca/epic/site/cbsscb.nsf/vwapj/initiatives_de_la_biotechnologie.pdf/$FILE/initiatives_de_la_biotechnologie.pdf), en date du 15 Octobre 2007)

et Financement de la biotechnologie
([http://innovation.gc.ca/gol/innovation/site.nsf/vDownload/BioBook/\\$file/6_hai2003_investir.pdf](http://innovation.gc.ca/gol/innovation/site.nsf/vDownload/BioBook/$file/6_hai2003_investir.pdf), en date du 15 Octobre 2007)

Génome Canada, les treize Instituts de Recherche en Santé du Canada (IRSC) soutiennent de grands laboratoires publics à la fine pointe de la biotechnologie. Le Conseil de Recherches en Sciences naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) finance aussi, après sélection, des projets et des chercheurs en biotechnologie. La Fondation Canadienne pour l'Innovation (FCI) est une société créée par le gouvernement pour se charger des investissements en innovation dans les universités en particulier du point de vue de l'infrastructure.

Le financement des entreprises passe par une politique de développement du capital-risque. La Banque de Développement du Canada (BDC) comporte ainsi une division de capital-risque. En outre, le Canada a fiscalement favorisé les Sociétés à Capital de Risque de Travailleurs (SCRT) qui sont des fonds commandités par un syndicat dans lequel des particuliers regroupent leur contribution afin d'investir dans de petites entreprises. La politique de soutien peut aussi être une aide financière directe telle qu'offerte par Partenariat Technologique Canada (PTC). Le Programme d'Aide à la Recherche Industrielle (PARI) du CNRC fournit une aide au financement afin de permettre aux PME de saisir des opportunités prometteuses. La politique fiscale qui touche la biotechnologie est également très riche, notamment à travers le programme d'encouragement fiscal à la Recherche Scientifique et au Développement Expérimental (RSetDE).

Tout ce soutien financier est réduit à néant si la diffusion de l'information sur ce soutien performe mal. Le Programme d'Aide à la Recherche Industrielle (PARI) fournit des conseils et l'expertise commerciale et technique du CNRC à des entreprises. L'accès à la technologie peut aussi être renforcé par le financement des moyens de collaborations et de réseaux. Par exemple, la création des Réseaux de Centres d'Excellence (RCE) permet d'établir et renforcer le lien, à l'échelle du Canada, entre les travaux de recherche faits au gouvernement, dans les universités et dans les entreprises, dans certains domaines cruciaux et ciblés. Dans ce cadre de la R-D collaborative, les aspects de régulation sont essentiels, en délimitant par exemple les activités permises et la propriété des inventions. L'ensemble des ministères concernés par des activités de biotechnologie, notamment Santé Canada, s'occupe naturellement de la réglementation quant aux activités et aux produits.

Concevoir une stratégie de développement de la biotechnologie est donc un travail de long terme. Nous avons vu qu'au Canada les interventions possibles sont variées et chaque politique induit une certaine logique et un objectif propre. Ainsi, l'impact des politiques sur les dynamiques sera complexe et ne pourra être déterminé de manière immédiate. Pourtant, il est essentiel de vérifier si ces politiques ont un impact sur le développement de la biotechnologie afin d'optimiser le financement.

La théorie peut apporter des réponses générales sur ces questions d'évaluation, mais les analyses économétriques sont souvent limitées puisqu'il manque toujours des preuves du retour social des politiques. Il faudrait en particulier prendre en compte les externalités interindustrielles (Dagenais *et al.*, 2004). L'évaluation devrait aussi être restreinte à l'économie de la biotechnologie, car les politiques auront sûrement des impacts spécifiques en fonction du contexte industriel. Ensuite l'aspect dynamique des processus de financement et de l'innovation est précieux pour comprendre l'impact dynamique des politiques et permettre ensuite de corriger les politiques si besoin. Or ceci exige l'examen

de la causalité et non seulement de vérifier des corrélations. Un intérêt particulier serait de pouvoir concevoir ou d'évaluer *a priori* des politiques.

Toutes ces raisons nous conduisent à poser le principal objectif de recherche de cet article : analyser les dynamiques d'innovation et de financement en biotechnologie par la construction d'un modèle dynamique, afin d'évaluer ensuite les politiques de financement. La perspective technique de notre travail est le développement de nouveaux outils d'analyse en financement de l'innovation. L'impact des politiques doit être examiné dans l'économie restreinte à la biotechnologie. En effet on s'attend à ce que les politiques aient des impacts propres à la biotechnologie du fait des spécificités de celle-ci. De plus, nous avons observé l'importance des aspects dynamique et évolutif des processus de financement et de l'innovation. Or ceci exige l'examen de la causalité et non uniquement de la corrélation. Enfin, nous souhaitons initier un outil permettant de concevoir des politiques ou d'évaluer *a priori* des politiques corrigées. L'idée est alors de simuler les politiques dans des modèles de mini-monde.

L'article est organisé comme suit : La partie 2 justifiera la méthodologie en dynamique des systèmes et le processus général que nous avons considéré pour construire nos modèles de l'innovation en biotechnologie. La partie 3 proposera les hypothèses dynamiques sur lesquelles repose notre modèle. Du fait de l'étendue de notre modèle, nous nous concentrerons sur les points majeurs de ce modèle. La partie 4 présentera quelques résultats des dynamiques simulées. La partie 5 proposera l'analyse de quelques politiques majeures. Enfin, la section 6 fera le bilan de l'analyse et discutera des perspectives de recherche.

2. Méthodologie

2.1 Méthodologie générale

La modélisation qui nous permet de simuler les politiques repose sur les théories évolutionnistes permettant de mieux rendre compte le contexte d'innovation et de recherche-développement. En effet, Nelson et Winter (1982) critiquent la théorie traditionnelle mécanistique. Celle-ci étant déterministe et normative, elle est donc mal adaptée à un raisonnement qui doit intégrer des systèmes complexes et incertains ainsi qu'une nature changeante et évolutive (Arthur, 1999) induite par le contexte d'innovation. Notre modélisation doit privilégier la coordination plutôt que l'équilibre (Metcalfé, 2001). Nelson et Winter (1982) proposent d'étudier chez les firmes les routines et les comportements acquis par l'expérience et la pratique. Les firmes adoptent alors des démarches d'essai et erreur, d'imitation, de mutation et de sélection (Arthur, 1999; Hodgson et Knudsen, 2004). L'innovation est exprimée avec son caractère graduel et cumulatif, les réseaux et les interactions (Nelson et Winter, 1982).

La littérature fournit un certain nombre de modèles évolutionnistes. Kwasnicki et Kwasnicka (1992) et Yildizoglu (2002) utilisent des fonctions au format assez classique, mais introduisent un cadre multi-agent ou une structure darwiniste (mutation, sélection, etc.). Ils introduisent dans leur fonction de production un modèle probabiliste en 2 étapes sur le facteur technique représentant la R-D : la probabilité de réussite ou non de l'activité de R-D est tout d'abord définie en fonction de l'investissement en R-D ; l'ampleur du résultat effectif est ensuite définie par un processus purement stochastique. Des

modélisations, qualifiées de *history-friendly* car elles apprécient les évolutions historiques, furent aussi adoptées pour analyser l'industrie informatique (Malerba, Nelson, Orsenigo, et Winter, 1999, 2001) ou pharmaceutique (Malerba et Orsenigo, 2001; 2002). Cependant, ces modèles ne sont pas transparents sur l'évolution des contraintes financières de la firme et des budgets. Ils introduisent directement la production, la demande de produit, la compétitivité par le prix, etc. ce qui est prématuré dans notre cas. L'enjeu des firmes de biotechnologie, nous le verrons plus tard, est de perfectionner une technologie permettant ensuite seulement de participer au développement de produits. La variété et l'évolution dynamique des modes de financement, du processus d'innovation, et des politiques publiques imposent aussi un peu plus de souplesse sur la formulation. Les fonctions de production ne sont donc peut-être pas la meilleure solution pour formaliser le modèle.

Même si ces modèles nous apporteront certains éléments, la modélisation générale doit davantage expliciter certaines décisions managériales, les processus de l'innovation et les dynamiques internes des firmes, afin de comprendre plus tard l'impact des politiques publiques en lien avec le financement. La dynamique des systèmes permet techniquement de répondre à ce besoin.

Forrester (1961) et Sterman (2000, 2001) présentent les points fondamentaux d'un modèle en dynamique des systèmes : la dynamique des systèmes permet de mettre en évidence l'interdépendance entre les éléments ; elle repose sur des processus de flux, stocks, d'accumulation et de dispersion de ressources. Nous pouvons donc créer des entités autonomes et hétérogènes, puis spécifier les relations entre les agents. Grossmann (2003) utilise cette technique pour modéliser les enjeux stratégiques d'entrepreneurship en biotechnologie. Le modèle précise les relations de causalité dans la dynamique d'innovation et respecte l'évolution de la firme. Nous proposons donc d'utiliser concrètement la dynamique des systèmes et les travaux de Grossmann pour nos modélisations.

Notre méthodologie se traduit alors de la façon suivante. Nous avons identifié les problèmes de financement de l'innovation en général. Nous allons maintenant identifier les processus du financement et de l'innovation en biotechnologie afin de bien particulariser notre simulation au système d'innovation en biotechnologie. Nous allons développer des hypothèses dynamiques de modélisation autour de ces processus d'innovation et construire grâce au logiciel Stella®² un modèle de simulation en dynamique des systèmes. Nous allons tester le modèle pour en observer la cohérence. Nous en tirerons des enseignements utiles pour analyser les politiques publiques.

2.2 Processus d'innovation en biotechnologie

Notre modèle doit s'inscrire dans un système d'innovation intégré, d'autant plus que notre objectif ultime est le développement économique. Le modèle proposé considère donc les dynamiques de la génération des technologies dans les laboratoires publics jusqu'au développement de produits. Techniquement nous avons donc créé un modèle vectoriel où évoluent plusieurs laboratoires de recherche et plusieurs firmes parallèlement. Malheureusement, des considérations techniques du logiciel, comme la taille limite

² Logiciel de dynamique des systèmes

admissible du modèle, nous ont conduits à scinder physiquement le modèle en deux parties (recherche fondamentale d'un côté et les firmes de l'autre) et à limiter en partie le modèle vectoriel des firmes au profit d'un modèle d'une firme unique.

Le processus d'innovation démarre en général dans les universités ou les centres de recherche publique, que nous appellerons les « laboratoires ». Les « laboratoires » sont des unités de recherche fondamentale de « taille significative ». Un bon travail de recherche fondamentale par une équipe du laboratoire ne mènera peut-être pas à un brevet ou une nouvelle technologie, mais permettra peut-être à une autre équipe de le faire. Les laboratoires articulent leurs activités de façon cohérente autour d'une stratégie de recherche. Ceci nous permettra de décrire une relation entre la capacité matérielle ou humaine pour faire de la recherche, et des résultats en technologie. Les laboratoires correspondront donc à une certaine catégorie de technologie. Les laboratoires ne changent pas de domaine d'étude facilement, car les investissements en apprentissage et en infrastructure sont coûteux. Leur activité de recherche fondamentale est par définition une quête de savoir. Or l'expérience et l'accumulation des connaissances dans un domaine technologique particulier sont logiquement limitées par la capacité humaine ou technique de compréhension des phénomènes.

Les firmes de biotechnologie sont créées à partir des inventions des universités et effectuent la recherche appliquée. Cette recherche appliquée est essentielle, car les technologies développées en recherche fondamentale sont encore « pures ». Elles sont insuffisantes d'un point de vue qualitatif et quantitatif pour développer des produits. Les firmes de biotechnologie auront pour objectif de faire passer ces technologies à un niveau performant qualitativement et quantitativement de façon à développer des produits dans un marché précis (Grossmann, 2003). Cette partie du modèle sera donc adaptée de celui de Grossmann.

Ensuite, les firmes peuvent suivre différents modèles d'affaires que décrivent Nosella *et al.* (2005) et Hache (2005) et qui évolueront avec le développement de la firme. Nous considérons que les firmes commencent généralement par vendre des résultats de recherche sous forme de contrats à de grands partenaires industriels intéressés par la technologie. Ces derniers s'appuieront sur les firmes de biotechnologie pour réaliser ensuite eux-mêmes le développement et la commercialisation des produits. Les alliances et des partenariats sont en effet des moteurs de progrès dans le développement de produits (Woiceshyn et Hartel, 1996). Après cette phase d'alliances, les firmes pourraient intégrer peu à peu le processus complet de développement de produits avec leur croissance et la maturité (Robbins-Roth, 2001).

La dynamique d'innovation est en relation avec la dynamique de financement. L'université, qui est au début du processus de R-D, est soutenue financièrement par les subventions à la recherche et les contrats. Le passage en commercialisation de la technologie sous la forme d'un brevet puis d'une entreprise va faire intervenir d'autres fonds spécifiques et privés.

À la création de l'entreprise innovante, la dette est impossible faute de garantie, et l'autofinancement est trop faible par le manque de capital personnel. Il faut donc faire appel à des investisseurs extérieurs et prioritairement sous la forme de fonds propres. Nous avons

choisi de ne pas entrer dans le détail des étapes de création et d'amorçage de la firme, avec l'apport de fonds par les anges et le capital personnel. Nous considérons que le projet d'entreprise est avancé et que la jeune entreprise va s'appuyer sur un capital de risque initial pour perfectionner la technologie. Les investisseurs-collaborateurs, plus avertis au risque, attendent l'atteinte d'une bonne performance technologique avant d'intervenir. Ils apportent alors des fonds à travers le remboursement des frais, les primes pour récompenser certaines avancées ou les royautés sur les produits atteignant le marché. Ces fonds permettent de financer l'expansion des firmes. La firme pourra éventuellement être cotée en bourse après avoir atteint une taille critique afin d'achever son projet d'entreprise.

3. Le modèle en dynamique des systèmes

La création des modèles exige des hypothèses sur les relations de causalité, justifiées et chiffrées. Grossmann (2003) a ainsi travaillé sur ses modèles en les documentant d'études économétriques mais surtout d'entrevues réalisées auprès de professionnels de la biotechnologie. Il est donc opportun de s'appuyer sur son modèle pour composer le nôtre. Nous traiterons parallèlement la recherche fondamentale et appliquée, car notre modèle de la recherche fondamentale est extrapolé de son modèle de recherche appliquée. Considérant le nombre très important d'équations et de relations du modèle en système dynamique, nous ne pourrons présenter en détails tous les éléments du modèle dans cet article, mais nous insisterons sur les points essentiels, sur le sens de notre modélisation et sur les modifications majeures que nous apportons au modèle de Grossmann.

3.1 Activités de recherche fondamentale et appliquée

La recherche qu'elle soit fondamentale ou appliquée s'articule autour de travaux de recherche. Les travaux s'accumulent et peuvent se traduire en réussite ou en erreur, comme le suggère l'encadrement évolutionniste. Le choix d'une unité d'activités de recherche est important, car il implique le développement et le chiffrage des hypothèses autour de cette unité. Grossmann (2003) ayant développé le modèle appliqué de la recherche, nous présenterons les variations nécessaires à notre adaptation à la recherche fondamentale. Par conséquent, dans ce qui suit, le modèle de recherche appliquée sera celui de Grossmann et le modèle de la recherche fondamentale sera le nôtre. Grossmann avait choisi un essai pratique de la technologie comme unité de base de la recherche appliquée. Dans le cadre de la recherche fondamentale, nous proposons le projet, c'est-à-dire l'ensemble des tentatives et des travaux réunis autour d'un objectif précis de recherche. La Figure 1 présente de façon simplifiée notre modélisation des activités de recherche.

Notre modélisation des activités débute par la dynamique de planification des projets³. Le laboratoire ajuste alors le nombre de projets à réaliser selon la capacité matérielle de recherche annuelle du laboratoire. Mais la productivité des chercheurs, qui multipliée au nombre de chercheurs détermine cette capacité, était de 1 essai par année en recherche appliquée selon Grossman (2003) : elle sera de 0,3 projets par année en recherche fondamentale, c'est-à-dire qu'un chercheur mettra un peu plus de trois ans pour achever son projet, la durée moyenne d'un gros projet de maîtrise ou un petit projet de doctorat. La

³ Pour les aspects techniques de modélisation, nous nous référons au modèle dynamique équivalent de Grossmann (2003).

planification en recherche appliquée de Grossmann est comprise comme opérationnelle et est caractérisée par un temps moyen très faible de 0,1 année. Dans notre adaptation en recherche fondamentale, la planification est davantage comprise comme générale et stratégique. Le temps de planification sera alors 6 mois : il faut organiser les projets, gérer le personnel du laboratoire dans les projets, affecter les nouveaux étudiants aux activités.

Ensuite les activités sont réalisées durant l'année. Si le nombre de projets planifiés est finalement très faible par rapport à la capacité de recherche, pour des raisons diverses, il faudra tout de même 1 trimestre pour développer les projets à terme (temps minimal de développement des projets). Mais en général si la planification est bonne, la réalisation des projets restera limitée par la capacité de recherche.

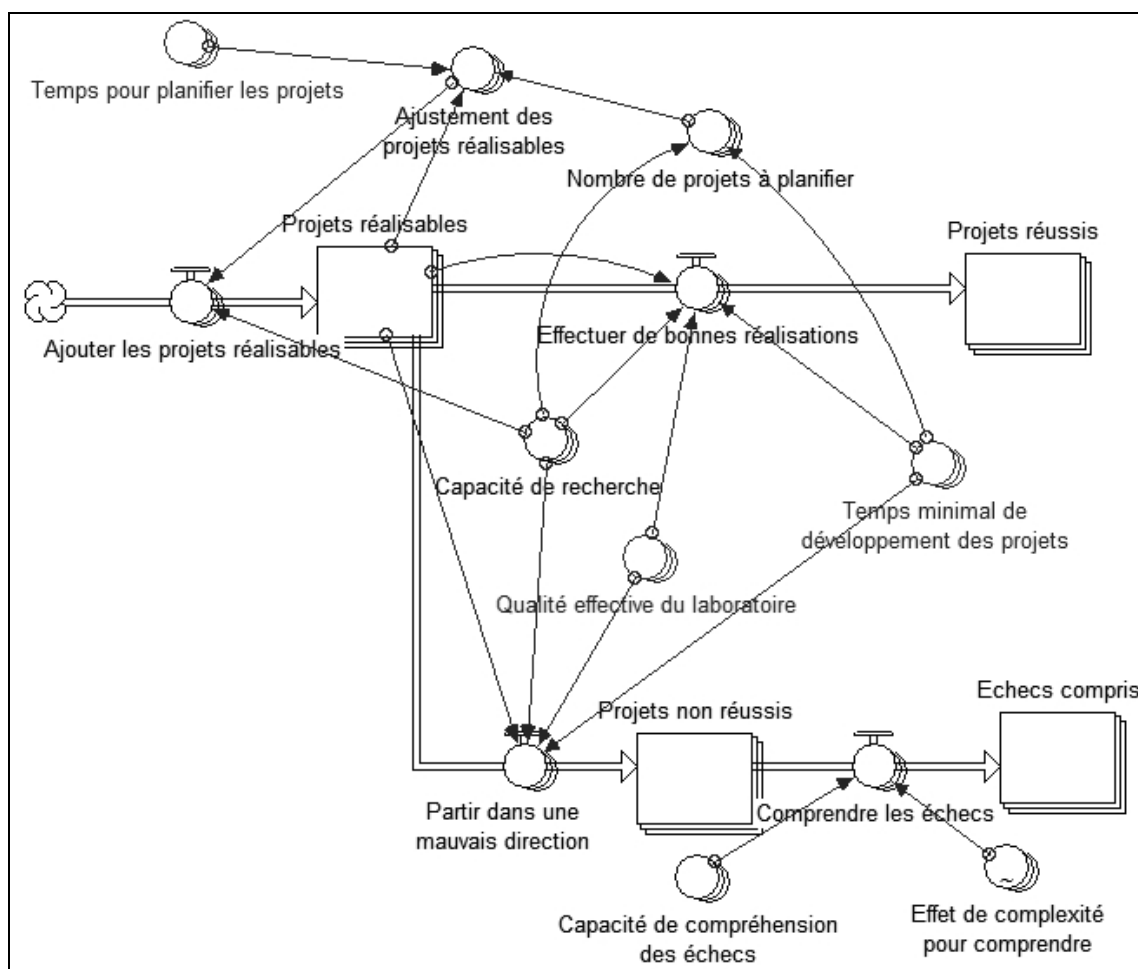


Figure 1 – Schéma simplifié de la dynamique des activités de recherche

3.2 Réussite des activités de recherche

Le cœur de la dynamique d'innovation est le processus permettant de définir les résultats des activités. Pour l'instant, nous ne considérons pas le résultat en innovation ou

invention, mais seulement en termes de réussites ou d'échec/erreur, c'est-dire en termes d'atteindre ou non de l'objectif de recherche fixé. Ce résultat dépendra d'une notion agrégée que nous nommons « la qualité effective du laboratoire », assimilable à une mesure de probabilité de la réussite. Cette notion joue le rôle du « degré de perfectionnement de la technologie » dans le modèle de Grossmann (2003) en recherche appliquée. Plus la qualité du laboratoire est élevée, plus les activités sont des succès, les chercheurs réussissant par exemple à montrer l'existence d'un mécanisme biologique ou à vérifier la propriété d'un agent biologique. De façon formelle dans le cas de la recherche fondamentale, en notant PR le nombre accumulé de projets réussis, E le flux de bons projets effectués, Q la qualité effective du laboratoire, CR la capacité de recherche, P le nombre de projets réalisables, Td le temps minimal de développement des projets en cas de surcapacité du laboratoire, nous obtenons le taux de réussite des projets :

$$\frac{dPR}{dt} = E = Q * \min(CR, \frac{P}{Td})$$

La qualité du laboratoire, comme le degré de perfectionnement de la technologie, paraît complexe à modéliser, car subjective. Malerba et Orsenigo (2002) exprimaient un peu cette notion en recherche appliquée pharmaceutique en générant le processus selon lequel les firmes augmentaient leur probabilité de trouver des molécules prometteuses en fructifiant un portefeuille consultable de molécules à chaque période. En évolutionnisme et dans le cadre de la recherche fondamentale, ceci se traduit par le fait que le laboratoire, pour faire fructifier la recherche future, est dépendant de son histoire, à travers la façon de réussir les projets et en termes d'expérience des chercheurs. Selon le modèle de Grossmann (2003), trois effets multiplicatifs distincts définissent donc formellement le degré de perfectionnement. Dans notre adaptation en recherche fondamentale, la qualité attendue (Qa) du laboratoire: l'effet l'expérience des chercheurs (Ee), l'effet de la diversité des chercheurs (Ed), et l'effet de la qualité actuelle de la recherche (Eq) :

$$Qa = Ee * Ed * Eq$$

L'idée essentielle du facteur « expérience » est que des chercheurs expérimentés ont une plus grande chance de réussir leur projet connaissant les techniques, les erreurs à ne pas commettre, les difficultés et les « astuces » pour bien mener le projet. L'expérience des chercheurs a alors des effets non linéaires que présente Grossmann (2003) et qui se renforcent en approchant un niveau d'expertise limite que nous verrons en section 4.3. Ce niveau d'expertise est de 1 essai en recherche appliquée selon Grossmann (2003). Il est donc assez faible puisqu'il s'agit essentiellement de répéter des manipulations et des procédures permettant la réussite des essais. En recherche fondamentale, nous proposons une expérience limite de 1,5 projet. Il s'agit par exemple de l'expertise acquise pendant 5 ans de recherche. Nous voulons ici exprimer que l'expérience essentielle en recherche fondamentale est moins réduite à des connaissances techniques sur les activités, mais englobe aussi des connaissances générales plus importantes ainsi qu'un certain bagage de connaissances tacites.

Le laboratoire va aussi recruter des chercheurs aux expériences et qualifications diverses. Lorsque le nombre de chercheurs augmente, la diversité augmente de même. Cette

diversité est une source de qualité, car elle augmente les chances d'engager les projets dans la bonne direction parmi les innombrables voies possibles. De même que pour l'expertise, l'effet de la diversité des chercheurs est non linéaire. Un laboratoire de recherche comportant par exemple plus de 40 chercheurs atteint la limite en gain effectif dû à la diversité. Au-delà, les profils des chercheurs se répètent. En recherche appliquée, la limite en nombre de chercheurs est de 4 personnes. En effet, la firme se concentre sur sa technologie et a besoin d'une diversité de profil plus spécialisée que dans la recherche fondamentale.

La qualité du laboratoire (Qa), comme le degré de technologie en recherche appliquée, dépend également de l'état de la recherche du laboratoire. En effet, les succès et les échecs compris sont un indicateur de la performance du laboratoire, mais permettent également de maximiser les chances de succès pour les prochains projets, car le laboratoire connaît et utilise les techniques qui ont par exemple du succès.

Nous reprenons également l'idée de Grossmann (2003) et le principe évolutionniste selon lesquels les erreurs et échecs compris (EC) influenceront sur l'apprentissage du laboratoire. Comprendre les échecs (C) va dépendre logiquement de la capacité matérielle en effort de recherche pour comprendre les erreurs (CCE), et l'effet induit par la complexité intrinsèque des échecs (ECC) :

$$\frac{dEC}{dt} = C = CCE * ECC$$

L'effort total que le laboratoire peut fournir pour résoudre les échecs est de façon logique le nombre de chercheurs du laboratoire multiplié par l'effort moyen pour résoudre un échec. Cet effort est estimé à 2 chercheurs pendant 3 ans pour un projet de recherche fondamentale alors qu'elle est de 2 personnes pendant un an en recherche appliquée (Grossmann, 2003). Notre raisonnement est que les chercheurs effectueront en parallèle de leurs nouveaux travaux de recherche, l'effort de résoudre leur échec précédent, aidé d'un confrère (en valeur personnelle par année). L'effet de la complexité pour comprendre les échecs se révèle, selon Grossmann, non linéaire. C'est un facteur multiplicatif qui limite la compréhension effective des échecs. Pour les premiers échecs, les chances de comprendre sont faibles et augmentent peu (facteur presque nul). Elles augmentent peu à peu avec les nouveaux échecs accumulés et au-dessus de 10 projets non réussis⁴, les chercheurs réussiront toujours à comprendre certains échecs parmi l'ensemble des échecs (facteur égal à 1). Ce seuil de 10 projets correspond en recherche appliquée à seulement 3 essais, car la portée de l'échec en recherche fondamentale peut être non seulement technologique, mais aussi beaucoup plus conceptuelle.

3.3 Expérience accumulée en recherche

L'expérience totale accumulée par le laboratoire en recherche fondamentale sera un facteur majeur de la qualité du laboratoire pour réussir ses activités. Nous considérons d'ailleurs la même unité pour les activités et l'expérience (projets en recherche

⁴ Ce nombre sera à vérifier à l'aide d'entrevues avec les chercheurs dans le domaine.

fondamentale ou essais en recherche appliquée). Le flux d'expérience (EX) que la firme développe chaque année est alors constitué de plusieurs sources distinctes, mais communes aux deux types de recherche: l'expérience amenée par les nouveaux chercheurs (Er), l'expérience acquise par l'apprentissage durant les activités de recherche (A), l'expérience acquise par absorption de connaissances extérieures (AC). Mais le flux d'expérience est aussi nuancé par un effet de saturation (Es) qui limite l'expérience effectivement acquise :

$$EX = (Er + A + AC) * Es$$

Sans entrer dans tous les détails techniques de la modélisation de ces différentes sources, nous conservons pour le modèle de « base » l'hypothèse de Grossmann (2003) selon laquelle les recrutés vont amener 0,25 unité d'expérience lors de leur recrutement. Ce chiffre est faible, car les connaissances précédentes ne contribuent qu'à l'initiation des projets et l'objectif de la recherche est bien de s'engager dans l'inconnu. À l'inverse, le départ de chercheurs fera perdre de l'expérience totale au laboratoire, en le privant de l'équivalent d'une unité d'expérience moyenne par chercheur.

L'apprentissage se réalise à travers les activités effectuées, mais inégalement selon le résultat de réussite. En particulier, les échecs compris seront très valorisés et apporteront dans notre modèle 75 % de leur contenu à l'apprentissage, contre 60% pour les projets réussis et seulement 5 % pour les échecs. Cet apprentissage sera également nuancé par un effet multiplicatif basé sur l'expérience, procurant au modèle une dynamique cyclique expérience-apprentissage : plus les chercheurs acquièrent de l'expérience dans leur domaine d'étude, mieux ils savent tirer les enseignements des travaux de recherche.

La troisième source d'expérience se réalise via les connaissances externes absorbées. La modélisation de cette source est riche et n'ayant que peu modifié le modèle de Grossmann (2003) nous n'insisterons pas sur ses aspects. Le point essentiel du modèle est que la quantité de connaissances externes absorbées va dépendre de nombreux facteurs : le montant alloué pour engager des activités permettant d'acquérir ses connaissances (colloques, réseaux de connaissances divers), le coût exogène pour absorber cette connaissance (Grossmann propose alors un proxy pour le déterminer de façon endogène), l'habileté à identifier les connaissances à absorber, et enfin l'habileté à intégrer effectivement ces connaissances dans l'expérience du laboratoire. Par exemple, une différence entre le modèle de recherche appliquée et de recherche fondamentale peut s'illustrer à travers l'habileté à intégrer les connaissances. Nous supposons que les chercheurs de la firme sont très avides et encouragés à intégrer les nouvelles avancées techniques et les meilleurs pratiques des concurrents, car ils sont encore loin d'une performance compétitive. L'habileté pour intégrer est alors un indice de 0,8 selon Grossmann (2003). Dans le cas de la recherche fondamentale, l'unité d'activité étant conceptuellement définie comme moins technique dans notre modèle, nous devons prendre en compte une plus grande complexité à intégrer les connaissances en réduisant l'habileté à 0,5.

Finalement, l'effet de saturation (Es) limite l'expérience effectivement acquise. Ce type de limite est important, car il empêche le modèle d'atteindre des niveaux irréalistes. Nous avons aussi déjà évoqué cette limite d'expertise évaluée à 1,5 projet en recherche fondamentale. On peut penser qu'au-delà de cette limite, les chercheurs se heurtent à leur

propre limite cognitive. Mais ce niveau peut aussi se comprendre comme le niveau au-delà duquel l'expérience n'apporte plus suffisamment de plus-value aux chercheurs dans leurs travaux actuels de recherche. Les nouveaux travaux permettent néanmoins de se mettre à jour, donc de remplacer éventuellement l'ancienne expérience oubliée et obsolète.

3.4 Décisions d'investissement

L'objectif en personnel et les dépenses autorisées en connaissances externes sont des piliers de notre modélisation de la dynamique. Nous avons déjà évoqué les dépenses autorisées pour définir l'absorption de connaissance comme source d'expérience. L'objectif en personnel est quant à lui inscrit dans une dynamique de gestion, de recrutement et de remplacement du personnel (Figure 2). Cet objectif est crucial, car il définira entre autres le nombre total de chercheurs et conséquemment l'expérience totale accumulée par le laboratoire.

Selon cet objectif en personnel, le laboratoire peut accueillir des chercheurs. La dynamique va dépendre du temps pour décider des profils à rechercher, trouver puis accueillir ces chercheurs. Ce temps est en moyenne de 1 an en recherche fondamentale et 3 mois en recherche appliquée dans les firmes (Grossmann, 2003). En ce qui concerne le départ des chercheurs, nous considérons que les chercheurs en recherche fondamentale vont obtenir en moyenne une place pendant 4 ans de façon à effectuer leur recherche dans de bonnes conditions, avant de changer de poste pour de multiples raisons. Le taux de départ moyen est alors de 25 % par an. Mais ce départ est progressif, le chercheur effectuant les recherches et les applications pendant un an et demi pour trouver d'autres opportunités ailleurs. En revanche les dynamiques de gestion du personnel dans la firme sont animées selon Grossmann par la confiance entrepreneuriale. Sans entrer dans les détails de son modèle, cet indice de confiance dépend des conditions financières de la firme et renferme toute la motivation et la confiance (ou au contraire la prudence et la méfiance) dans la nouvelle technologie et dans la jeune firme. Il mesure la propension des entrepreneurs à investir, mais aussi à licencier, à recruter ou à démissionner.

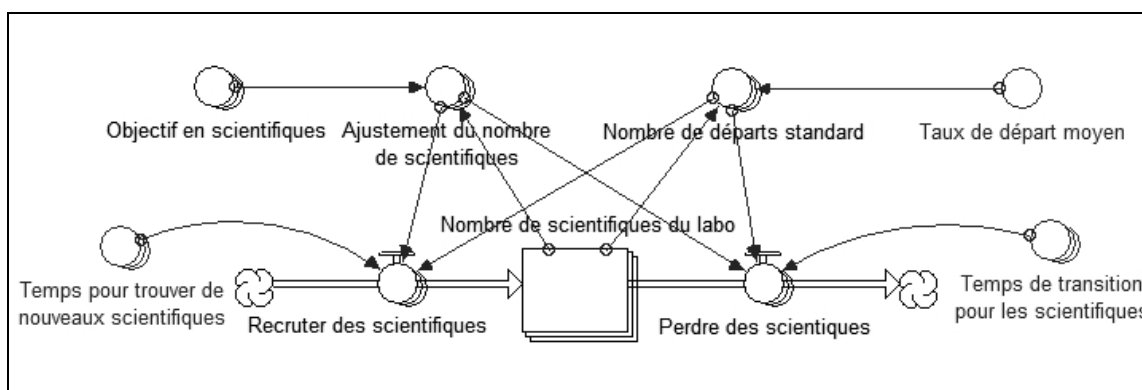


Figure 2 – Schéma simplifié de la dynamique de gestion du personnel

Les moyens financiers vont alors définir les décisions d'investissement du laboratoire ou de la firme en termes d'objectifs en chercheurs ou en dépenses pour les activités externes. Nous voulons en fait traduire plus explicitement pourquoi le montant de

l'investissement en R-D dans les modèles de Malerba et Orsenigo (2002) et Yildizoglu (2002) déterminait en partie les résultats de l'innovation. Or modéliser les décisions d'investissements est particulièrement complexe du fait de la diversité des facteurs entrant en jeu. Le laboratoire n'a notamment pas un profil généralisable sur le plan de l'investissement puisque les chercheurs ont chacun un profil différent face aux décisions d'investissement. Nous proposons d'externaliser l'hétérogénéité des profils hors du laboratoire. Ceci veut dire que l'on va considérer dans un premier temps que les chercheurs ont tous le même profil vis-à-vis de l'investissement du laboratoire : les décisions sont prises au niveau du laboratoire, mais non au niveau des personnes particulières⁵. Par contre, les politiques vont pouvoir différencier (ou non) les traitements de financement selon certains facteurs : opportunités économiques, productivité de la recherche, réputation du personnel en moyenne, etc.

En fonction du budget du laboratoire de recherche fondamentale, un nouvel objectif en termes de scientifiques est budgété. Cet objectif est le nombre de chercheurs que le laboratoire peut financer étant donné le budget qui lui a été alloué et les coûts budgétés. En recherche appliquée, l'objectif en chercheurs est plus complexe à obtenir, car les ressources financières évoluent plus rapidement. La firme actualise constamment son budget en fonction des fonds obtenus et de la confiance qu'elle a. Plus les managers sont confiants, plus ils investissent rapidement les fonds obtenus, car ils pensent que la firme va réussir ses projets et qu'elle obtiendra d'autres fonds.

Le montant autorisé en activités externes par scientifiques varie aussi selon les conditions financières. Une certaine propension du laboratoire à effectuer des activités externes nuance alors un montant maximal admissible pour les activités externes. Dans un premier temps, on estime cette propension à 0,8 en recherche fondamentale. En recherche appliquée, cette propension est directement l'indice de confiance réel. Nous pouvons finalement noter qu'une adaptation importante du modèle de Grossmann pour la recherche fondamentale consiste à prendre en compte la plus grande stabilité financière de cette dernière. Ceci conduit à une gestion du personnel et à une politique d'investissement en activités externes plus continues.

3.5 Inventions en recherche fondamentale et création des firmes

Nous supposons qu'à partir de la dynamique des activités de recherche, des biotechnologies sont générées du fait de découvertes puis d'inventions. Le point délicat de la modélisation est alors de savoir comment les activités de recherche vont se concrétiser en découvertes technologiques et en inventions. Ce passage est crucial si l'on veut poursuivre la modélisation en intégrant la recherche fondamentale et appliquée. Grossmann (2003) n'a naturellement pas modélisé ce passage puisque son modèle de la firme ne l'exigeait pas. Nous proposons donc un modèle original⁶ s'inspirant de la logique proposée par Yildizoglu (2002). Le modèle de Yildizoglu d'innovation à deux étapes définit tout d'abord la

⁵ Étant donné qu'une part importante des subventions obtenues par les chercheurs le sont par des équipes, cette hypothèse de travail n'est pas loin de la réalité.

⁶ Rappelons que le lecteur pourra se reporter au mémoire de Farcy (2008), pour plus de détails techniques sur la modélisation.

probabilité de réussite de l'activité de R-D en fonction de l'investissement, puis l'ampleur du résultat effectif par un processus stochastique.

Dans notre modèle, la capacité de recherche en termes de chercheurs, qui est une conséquence des décisions d'investissement, définit le nombre de projets réalisés. La qualité du laboratoire, reposant aussi par la dynamique sur les décisions d'investissement passées et actuelles, a défini la probabilité de réussite des projets. Ainsi, les aspects matériels et qualitatifs du laboratoire ont été pris en compte pour définir la probabilité de réussite globale des activités de recherche, comme le suggère la première étape du modèle de Yildizoglu (2002).

Notre proposition repose ensuite sur le fait que les laboratoires articulent leurs projets de façon cohérente autour d'une stratégie de recherche. Les activités réussies sont alors autant de chances supplémentaires pour inventer une nouvelle technologie autour de cette stratégie de recherche. Dans ce cas, une seule invention collective est permise par année et par laboratoire. Le fait de « découvrir » puis d' « inventer » ne dépend pas directement de la qualité de la recherche ou de la capacité matérielle puisque ces facteurs ont déjà défini le nombre de réussites annuelles. Il s'agit d'une chance de tomber sur une découverte intéressante ou sur un élément qui n'avait pas encore été pensé comme à l'origine d'une invention. Nous avons donc ici un processus probabiliste qui se fait l'écho de la deuxième étape du modèle de Yildizoglu (2002). Le processus dépend aussi éventuellement de la qualité du laboratoire pour identifier les inventions possibles à partir de ses réussites, donc de « l'esprit d'invention » du laboratoire. Cette propension à inventer est un aspect très subjectif du laboratoire et du personnel du laboratoire. Nous considérerons cette propension identique à tous les laboratoires, mais il est possible de développer le modèle sur cet aspect, comme examiner comment des politiques ou des formations peuvent influencer sur cette propension à inventer.

Nous devons donc développer le modèle probabiliste de l'invention. Nous proposons un raisonnement logique. Tout d'abord, nous considérons que le laboratoire va évaluer chaque année la cohérence de ses projets. Comme nous l'avons mentionné précédemment, les projets sont centrés dans le même domaine technologique et ont naturellement une certaine cohérence dictée par une stratégie de recherche. Les résultats des projets sont progressivement connus. Nous supposons alors que, chaque année, le fait d'inventer suit une loi de probabilité.

Soit n , le nombre de projets réussis de l'année.

Soit E_i l'événement « le $i^{\text{ème}}$ projet réussi conduit à une invention ».

Soit E_i' l'événement « le $i^{\text{ème}}$ projet réussi ne conduit pas à une invention ».

Soit E l'événement « le laboratoire réalise une invention en technologie dans l'année ». Cette probabilité signifie qu'au moins un projet a conduit à une invention, car l'invention est collective dans notre contexte. Les événements E_i , de même que E_i' , ne sont pas indépendants du fait de la stratégie générale de recherche.

Soit $p(E_i)$ la probabilité de E_i . Soit $p(E_i/E_j)$ la probabilité de E_i sachant E_j

La probabilité élémentaire de l'événement E_i est p et celle de E_i' est $q=1-p$ pour tout i . En effet les événements E_i pour tous les projets i ont la même probabilité puisque les projets ne sont pas différenciés à la base, lors de leur conception dans notre modèle.

Pour n projets réussis, le calcul de la probabilité donne, selon les règles en probabilité:

$$p(E) = 1 - p\left(\bigcap_i E_i'\right)$$

$$p\left(\bigcap_i E_i'\right) = p(E_1')p(E_2'/E_1')p(E_3'/E_2'\cap E_1')\dots p(E_n'/E_1'\cap\dots\cap E_{n-1}')$$

Il faut déterminer un modèle pour calculer $p(E_n'/E_1'\cap\dots\cap E_{n-1}')$. Nous supposons tout d'abord que cette probabilité doit tendre vers 1 à l'infini. En effet sachant que les projets au fur et à mesure se montrent non concluants, soit en terme de découvertes, soit en terme d'opportunités d'invention, les chances qu'un projet additionnel soit concluant se réduisent très rapidement, car les faits montrent que la stratégie générale de recherche n'est pas la bonne. La limite à l'infini est 1 car à l'infini il est certain que la stratégie est mauvaise. On peut alors imaginer une loi telle que la probabilité de E_i' augmente vers 1 très rapidement à chaque condition connue E_j' supplémentaire. Par exemple :

$$p(E_1') = q$$

$$p(E_2'/E_1') = q^w$$

$$p(E_3'/E_2'\cap E_1') = (q^w)^w, \text{ avec } 0 < w < 1.$$

$$p(E_n'/E_1'\cap\dots\cap E_{n-1}') = q^w w^{(n-1)}$$

Le modèle est simple ensuite à spécifier si l'on dispose de certaines estimations. En effet, on obtient :

$$p(E) = 1 - p(E_1')p(E_2'/E_1')p(E_3'/E_2'\cap E_1')\dots p(E_n'/E_1'\cap\dots\cap E_{n-1}')$$

$$p(E) = 1 - q^w \left(\sum_{k=0}^{n-1} w^k\right)$$

$$\text{Or } \sum_{k=0}^{n-1} w^k = \frac{1-w^n}{1-w} \text{ d'où } p(E) = 1 - q^w \left(\frac{1-w^n}{1-w}\right).$$

$$\text{À l'infini on obtient } p_\infty(E) = 1 - q^w \left(\frac{1}{1-w}\right).$$

De ce fait si on réussit à estimer la probabilité élémentaire p qu'un projet réussi conduise à une invention, et la probabilité $p_\infty(E)$ que le laboratoire invente une technologie en disposant des moyens pour le faire, on pourra spécifier parfaitement le modèle. Nous ne possédons malheureusement pas de données précises. Une évaluation économétrique pourrait être imaginée. Mais pour avancer dans le modèle, nous estimerons qualitativement à 1% la probabilité p qu'un projet isolé réussi conduise à poser une invention. La probabilité limite $p_\infty(E)$ est estimée à 0,5 pour prendre en compte le fait qu'avec même tous les moyens possibles, le laboratoire n'obtient pas obligatoirement d'invention si l'orientation générale du laboratoire n'est pas concluante. Ainsi, nous obtenons $w = 0,9855$ par calcul numérique.

Nous calculons donc la probabilité d'invention du laboratoire et simulons un résultat par une fonction qui suivra cette probabilité en donnant 1 dans $p(E)*100$ % des cas et 0 dans $(1-p(E))*100$ % des cas.

L'invention sera brevetée et permettra la création d'une firme de biotechnologie reposant directement sur ce brevet. La firme aura alors l'objectif de faire passer la nouvelle technologie à un niveau performant quantitativement et qualitativement de façon à développer des produits par la suite (Grossmann, 2003). Il faudra être prudent avec le modèle de l'invention, car les chercheurs insistent souvent que c'est la liberté de chercheur qui permet de passer éventuellement du statut de chercheur à celui de découvreur ou d'inventeur. Notre proposition permettra néanmoins, tout en considérant le sens des hypothèses, d'avancer dans la modélisation, notamment en intégrant la recherche fondamentale et la recherche appliquée. Comme le souligne Grossmann (2003), un bon passage de la technologie du milieu universitaire vers le milieu industriel dépendra de nombreux facteurs dont la chance, une solide fondation scientifique des membres fondateurs, une bonne organisation, un bon équipement, etc. Ces facteurs pourront être discutés par la suite en faisant varier les conditions initiales telles que l'expérience des chercheurs fondateurs.

Sur le plan technique de modélisation à partir du logiciel, un passage entre les deux modèles, celui de la recherche fondamentale et celui de la recherche appliquée, est réalisé en considérant une relation directe entre l'invention brevetée et la création d'une firme. Les firmes créées seront dans le même domaine d'étude que le laboratoire d'origine. Nous avons donc ici adopté un modèle restrictif du type « chercheur entrepreneur » car il existe de trop nombreux modèles de passage : chercheur entrepreneur créant son entreprise à la suite de son invention, prise en charge de l'invention par des entrepreneurs plus professionnels, etc. Notre débat ne portant pas sur cette question très riche, notre première proposition de modèle présentée ici ne se dispersera pas sur des facteurs exogènes, mais bien sur les problématiques de financement. Les firmes sont alors créées à partir des inventions brevetées en recherche fondamentale. Les firmes sont caractérisées par le domaine d'étude du laboratoire d'origine.

3.6 Expansion de la firme par les collaborations

Passons aux dynamiques propres à la firme. Le financement initial de la firme procure la capacité d'investissement qui permet éventuellement d'atteindre un bon degré de perfectionnement. Nous suivons ici le modèle de Grossmann (2003) selon lequel la performance technologique est mesurée par les investisseurs-collaborateurs à travers le taux de réussite des essais. La firme peut influencer sur l'intérêt que les investisseurs ont de sa technologie en agissant sur la disponibilité de l'information. En effet, elle doit avant tout s'engager dans un réseau d'investissement, c'est-à-dire selon notre modèle annoncer sa performance et ses résultats en vue d'obtenir des fonds de collaboration. Selon sa stratégie, la firme initie son réseau seulement après un certain seuil de performance et émet des rapports de performance de plus en plus souvent à mesure que les progrès s'intensifient. Nous conservons cette dernière hypothèse dans notre modèle.

Ensuite nous allons présenter plus précisément le modèle concernant les contrats de collaboration, car nous avons techniquement assez modifié le modèle de Grossmann

(2003). Nous proposons le schéma de collaboration en figure 3 : la firme négocie pendant 3 mois un contrat ; puis elle va effectuer les activités prévues dans le contrat après un délai moyen de 3 mois supplémentaire pour organiser les activités et mettre en place les équipes ; nous retenons l'hypothèse de Grossmann selon laquelle les collaborations durent 3 ans ; la dernière année peut se prolonger un peu, le temps de terminer les projets malgré les retards éventuels.

Ainsi, la firme va ajuster le nombre de collaborations qu'elle effectue C_t (« collaborations totales » sur la Figure 3) pour atteindre le niveau opérable. Le nombre de collaborations opérables (C_o) est défini par l'habituelle capacité de travail annuelle, divisée par l'effort annuel pour une collaboration qui est de 10 essais (Grossmann, 2003). Ensuite le nombre de nouvelles collaborations effectivement engagées (O) (« Organiser des collaborations ») sera certes limité par le délai pour organiser la collaboration (T_c), mais aussi par le nombre de collaborations négociées (C_n), la firme ne peut logiquement pas effectuer plus de nouvelles collaborations que de collaborations négociées. En notant (A_c) le nombre de collaborations à ajuster, nous obtenons :

$$O = \frac{\min(A_c, C_n)}{T_c} \text{ avec } A_c = C_o - C_t$$

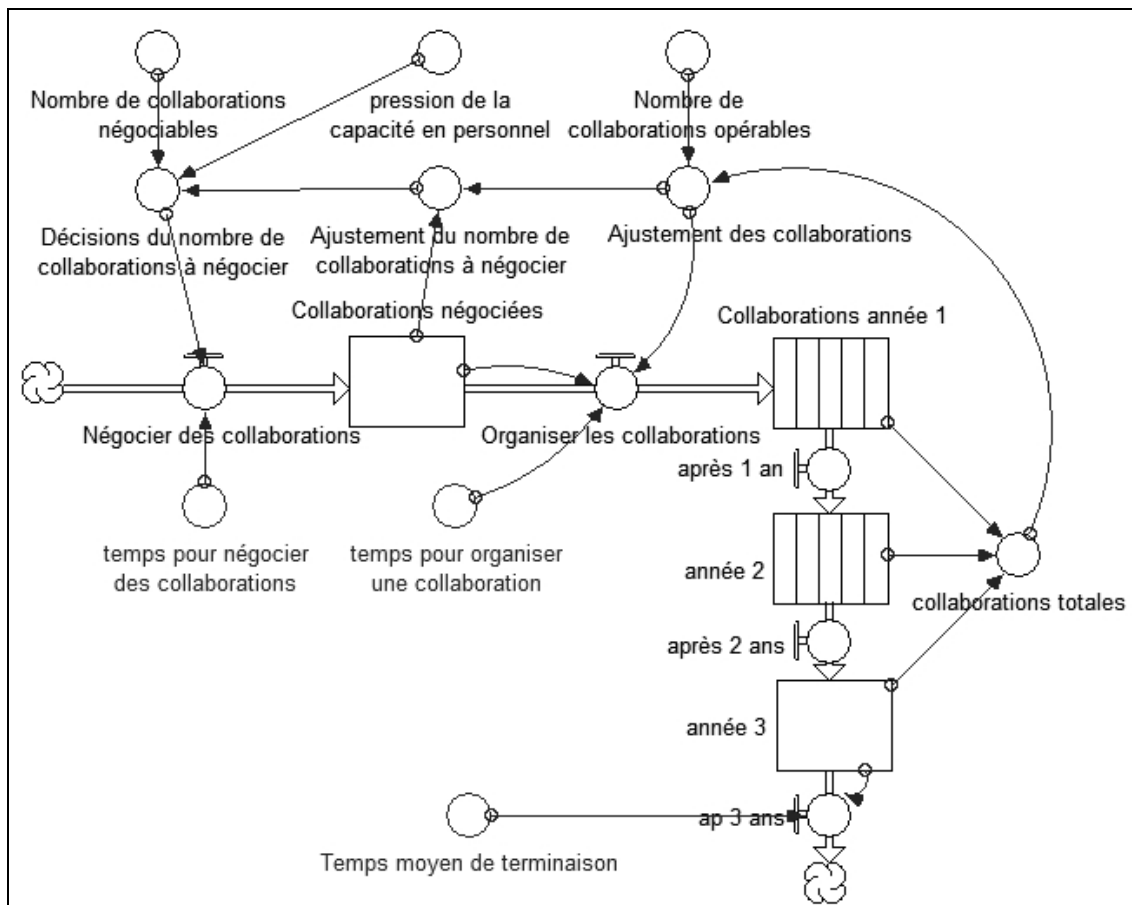


Figure 3 – Dynamique de négociation de contrats et de collaboration de la firme (adapté de Grossmann, 2003)

La négociation est donc le nouvel élément critique. La firme doit ainsi définir le nombre de collaboration à négocier (C_{an}) et ajuster le nombre actuel de négociations (C_n) pour atteindre cet objectif. D'une part, elle prend en compte le nombre de collaborations (A_c) qu'elle devrait nouvellement organiser par rapport au nombre opérable de collaborations. Par rapport à ce nombre, elle vérifie si elle a négocié suffisamment de collaborations (C_n). Sinon elle estime l'ajustement à effectuer (A_{cn}) (« ajustement du nombre de collaborations à négocier ») :

$$A_{cn} = A_c - C_n$$

D'autre part, la firme sera limitée par « le nombre de collaborations négociables » (C_{ne}), c'est-à-dire le nombre de collaborations qu'elle peut négocier compte tenu de sa capacité à attirer les investisseurs-collaborateurs sur son marché technologique. Le nombre total de collaboration du marché technologique dépend de la demande par les collaborateurs d'un certain type de technologie et est fixé à 10 collaborations dans notre modèle. La part de marché de la firme s'obtient en comparant l'attractivité de la firme avec celle de ses concurrents. Nous reprenons ici le modèle de l'attractivité proposé par Grossmann (2003) : l'attractivité de la firme dépend de deux effets, la performance technologique et le nombre

de collaborations. Si nous ne travaillons que sur une firme unique, l'attractivité des concurrents peut être représentée par une fonction exponentielle, pour reprendre le modèle de Grossmann.

Si la firme attire beaucoup les investisseurs, elle peut se reposer sur son pouvoir d'attraction par les alliances pour grandir et se développer ! Dans ce cas, le « nombre de collaborations négociables » (Cne) n'est plus la limite, mais le moteur du nombre de négociations à effectuer. Pour arbitrer entre ces deux idées, Grossmann (2003) introduit la « pression de la capacité en personnel » (Pc). Si cette pression est faible, la firme sera limitée surtout par sa capacité à attirer des investisseurs-collaborateurs, car elle veut bien accepter toutes les collaborations. Si la pression de la capacité du personnel est forte, la firme sera en plus limitée par la capacité matérielle à travailler sur les collaborations. Cette pression est définie à la suite de la prise en compte des nouveaux besoins en personnel par la firme. Grossmann énonce alors à partir de ses enquêtes que la firme va limiter la taille du laboratoire pour éviter la dilution de l'expertise. En effet, le nouveau personnel sera sous la supervision des chercheurs-clés qui ont rejoint la firme depuis le début et qui ont développé la technologie. Accroître la taille de la firme va mettre en danger la qualité du travail : les superviseurs ne pourront pas bien effectuer leur tâche. De plus, une structure de petite taille favorise les échanges et la communication.

Finalement, le nombre de collaboration à négocier est défini par l'équation :

$$Can = (1 - Pc) * Cne + Pc * \min(Cne, Acn)$$

Notons qu'en outre la collaboration fait perdre de l'expérience à la firme. Selon Grossmann (2003) une expérience minimale n'est cependant pas sujette à ces pertes : il s'agit de l'expérience correspondant à du savoir général de base. Une fraction de l'expérience devient obsolète chaque année du fait de l'évolution technologique. L'expérience accumulée jusqu'alors peut aussi ne pas être pertinente par rapport aux nouveaux contrats de recherche.

Les alliances fournissent du financement aux firmes de biotechnologie. Un premier type de financement est une rémunération basée sur le travail réalisé ou le temps passé. Nous reprenons ici le modèle de Grossmann (2003). Sans aller dans les descriptions techniques, les investisseurs-collaborateurs remboursent les frais de collaboration sous une forme de marge bénéficiaire sur le prix de revient (*cost plus*) du travail accompli, c'est-à-dire en ajoutant une contribution supplémentaire proportionnelle au coût direct des chercheurs. Néanmoins, ce financement ne permet pas à la firme de grandir et d'anticiper les collaborations futures en embauchant des chercheurs ou en agrandissant ses espaces de travail. Les collaborateurs doivent donc apporter des fonds supplémentaires avant même le commencement du travail. Des primes peuvent aussi récompenser les avancées. Grossmann propose dans le cas général en pharmaceutique de considérer deux primes. Une première prime de 1 million \$ récompense la firme de biotechnologie pour le passage avec succès d'un produit de la phase préclinique dans le cas de la pharmaceutique. Une deuxième prime de 5 millions \$ récompense le produit approuvé par des autorités de régulation. Enfin, il est possible de céder des licences sur des produits futurs en échange de royautés. Grossmann définit le cas général où la firme de biotechnologie obtient 3 % des revenus des produits sur le marché.

3.7 Développement de produits sur le marché

Malerba et Orsenigo (2002) proposent dans leur modèle évolutionniste un développement des produits pharmaceutiques par étape. Chaque étape ayant un coût, la firme peut développer le produit pendant un certain nombre de périodes, en fonction d'un budget donné initialement et dépendamment de la vitesse de développement qui la caractérise. Le nombre d'étapes dépend de la valeur du produit. Par conséquent, des produits de qualité trop élevée peuvent ne pas aboutir si le budget n'est pas suffisant. Ce raisonnement ne peut pas être appliqué à notre cas. Dans notre modèle, chaque étape a également un coût, lié directement aux activités de la firme (coûts de collaboration). Le budget n'est pas défini à l'avance, car la firme de biotechnologie reçoit des récompenses et des royautés en fonction de l'avancée des produits dans sa filière. Ainsi, des projets réussis ou en voie de réussite seront davantage financés et récompensés. L'échec d'une étape ne sera pas imputé à une question de trop grande qualité du produit par rapport à un budget (notre modèle considère de toute façon la qualité comme exogène). La réussite sera déterminée de manière plus statistique : dans un temps donné, l'étape a une certaine probabilité de réussir ou d'échouer. Nous reprenons les données de Grossmann (2003) pour définir ces éléments.

De manière à être suffisamment concrets et précis, nous avons considéré, comme Grossmann (2003), une filière de produits de la firme de biotechnologie dont le processus de développement est celui de l'industrie pharmaceutique. La relation entre les produits qui vont entrer dans la filière et les travaux de recherche appliquée est définie par les réussites : 10 essais réussis en recherche appliquée vont conduire à l'entrée d'un nouveau produit dans la filière.

La valeur actuelle nette de la firme peut être calculée en additionnant les flux financiers pondérés par leur facteur de décompte. Le capital-risque peut ainsi calculer son réel retour sur investissement. Néanmoins, en pratique, on ne connaît pas les futurs flux financiers. Si l'investisseur veut estimer la valeur économique de la firme, il doit aussi prendre en compte les royautés futures et espérées, générées par la filière actuelle, puis les actualiser. Selon Grossmann (2003), le taux d'escompte annuel et continu est alors de 9 %, calculé d'après la technique financière du Modèle d'Évaluation des Actifs Financiers (MEDAF).

En outre, les collaborations peuvent ne pas suffire à créer suffisamment de richesse pour permettre l'expansion de la firme et aussi le bon retour sur investissement du capital de risque. L'accès au marché public n'est pas automatique, mais peut se révéler salvateur. La firme de biotechnologie doit alors attirer des investisseurs potentiels pour lever suffisamment de fonds. Selon Warner (2004) une filière de produit forte et assez large pour supporter les échecs favorise l'accès au marché public. Les marchés financiers reconnaissent la valeur des produits dans les étapes de développement, car ils s'attendent à ce que les activités deviennent des produits sur le marché (Rzakhanov, 2004). Ils récompensent fortement les firmes dont les produits dépassent les phases cliniques et l'approbation des organismes de régulation (Robbins-Roth, 2001).

Ainsi, Grossmann (2003) modélise l'attractivité de la firme vis-à-vis des investisseurs en additionnant deux indices distincts. Le premier prend en compte ce que nous venons de décrire c'est-à-dire les résultats des activités de recherche. Le deuxième indice de

l'attractivité reflète la valeur que représente la firme de biotechnologie selon une perspective d'option réelle. La valeur de la firme est sous-évaluée si les investisseurs ne s'intéressent qu'aux résultats tangibles et intangibles. En effet la firme de biotechnologie offre une valeur d'option, car elle offre une plateforme technologique sur laquelle les collaborateurs peuvent se reposer ou s'inspirer dans l'avenir. Les investisseurs peuvent donc percevoir une partie de la valeur de la firme de biotechnologie à travers le nombre de collaborations qu'elle suscite.

Les investisseurs sont aussi de moins en moins attirés par la firme s'ils n'obtiennent pas de retour sur investissement. Ils vont donc faire pression pour obtenir ce retour. D'après le modèle de Grossmann (2003), cette pression aura plusieurs conséquences dont une directe qui est l'affaiblissement de l'attractivité de la firme vis-à-vis d'autres investisseurs, les nouveaux investisseurs craignant de ne pas obtenir de bons retours sur investissement. Une autre conséquence sera des difficultés supplémentaires pour lever des fonds, même faibles.

La levée de fonds est finalement caractérisée dans le modèle par deux éléments : le volume de fonds levés et l'événement de levée de fonds en tant que tel. Tout d'abord, le volume de fonds levés ne peut pas être en dessous d'un certain seuil, défini par 10 millions \$ selon Grossmann (2003), car la levée de fonds n'est pas un événement anodin. La levée de fonds a aussi statistiquement un plafond limite en biotechnologie, défini par 60 millions \$ (Grossmann, 2003). Le volume de fonds levés dans les conditions normales est finalement défini par le produit de l'indice d'attraction total et la valeur économique nette de la firme créée par les succès de R-D. Cette valeur est estimée par les ressources financières totales et accumulées de la firme (revenus divers, financement par les alliances, royautés, etc.), plus la valeur intangible liée aux futurs produits de la filière, mais moins les fonds en actions déjà levés (Grossmann, 2003).

L'événement de la levée de fonds est la rencontre de la nécessité pour la firme d'obtenir des fonds, et de l'accueil positif par les marchés publics. La nécessité pour la firme d'obtenir des fonds est reprise du modèle de Grossmann (2003): la firme exprime le besoin de capital si elle n'a pas les ressources financières actuelles suffisantes pour effectuer pendant 2,5 années les investissements au taux annuel actuel. Pour modéliser l'accueil du marché, nous avons considéré tout d'abord que 4 ans sont nécessaires entre deux levées de fonds. Ensuite la pression des investisseurs contraint l'accès au marché. Elle contraignait déjà le volume des fonds levés, et même l'accès au financement si le volume de fond espéré tombait en dessous du seuil minimal de 10 millions \$. Mais elle contraint aussi la date de la levée de fonds par des retards liés aux réticences du marché. La probabilité par an de réussir à organiser une levée de fonds baisse alors lorsque la pression des investisseurs augmente.

Dans cette section, nous avons ainsi exposé le modèle suivant ses grandes lignes. Les détails du modèle sont disponibles dans l'ouvrage de Grossmann (2003) et le mémoire de Farcy (2008).

4. Simulation des dynamiques

Chacune des simulations se déroulera selon un intervalle de calcul dt de 0.015625 année (moins de 6 jours) pour réaliser des simulations lissées et mettre bien en évidence les dynamiques de court terme. Nous présentons ici les résultats principaux des simulations.

4.1 Dynamiques en recherche fondamentale

Nous simulons le modèle de génération des technologies. Le financement proposé est une répartition d'un financement total de 200 millions \$ entre 20 laboratoires, sans distinction. Il s'agira du cas de référence, sans politique particulière.

La qualité du laboratoire et l'expérience moyenne des scientifiques, résultantes de nombreux facteurs, évoluent finalement selon une courbe en S (voir Figure 4). La qualité atteint son maximum (0,93) en approchant la dizaine d'années d'existence. L'expérience moyenne atteint son maximum (1,29) également peu avant les 10 ans. Les courbes obtenues montrent bien la montée en puissance de l'expérience et de la qualité du laboratoire, puis les effets de saturation en expertise. L'effet de diversité sur la qualité du laboratoire est rapidement acquis alors que les effets de qualité de la recherche et l'expérience du laboratoire sont de long terme. C'est d'ailleurs essentiellement l'effet de l'expérience qui façonne la qualité effective du laboratoire.

L'expérience est acquise par le recrutement de chercheurs expérimentés les deux premières années (Figure 5) mais dès la deuxième année, c'est bien l'apprentissage par les activités de recherche qui domine l'accumulation d'expérience. L'absorption de connaissance est aussi une source non négligeable d'expérience, notamment après 8 ans. Au bout de 10 ans, le laboratoire connaît la limite de l'acquisition d'expérience. Mais cette limite ne signifie pas que les niveaux des sources d'expérience sont réduits à 0. Ils sont justes limités pour satisfaire les besoins de renouvellement des connaissances.

Concrètement, les dynamiques se traduisent pour l'ensemble des laboratoires par de premières inventions dès 5 ans et donc selon notre modèle par les premières firmes de biotechnologie dans notre économie (Figure 6). Au bout de 10 ans, 15 inventions ont été déposées sous la forme de brevet et au bout de 20 ans, 57.

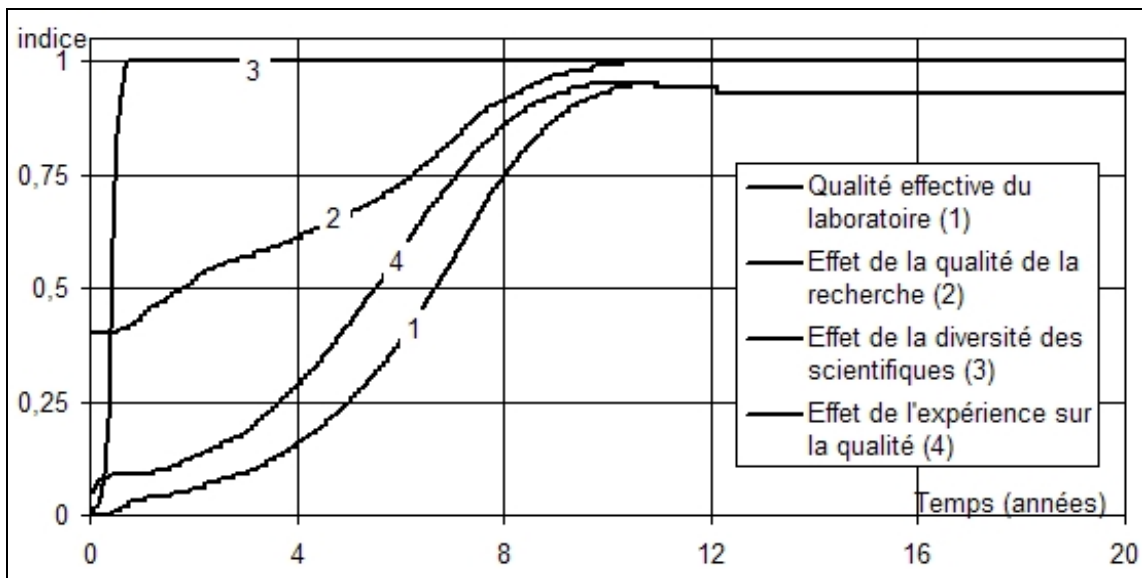


Figure 4 – Évolution des effets conduisant à la qualité du laboratoire public, cas général

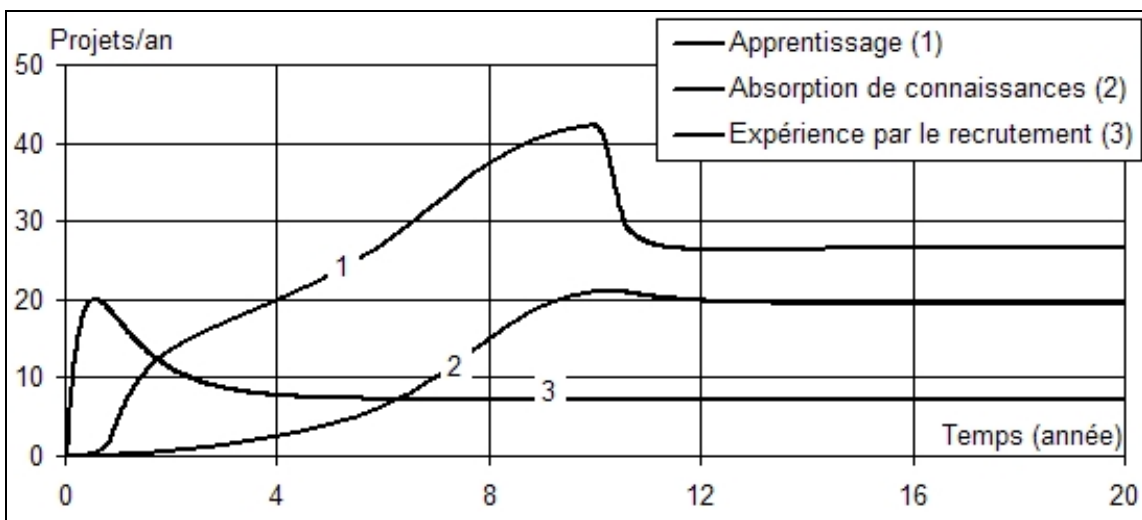


Figure 5 – Évolution des sources d'expérience du laboratoire public, cas général

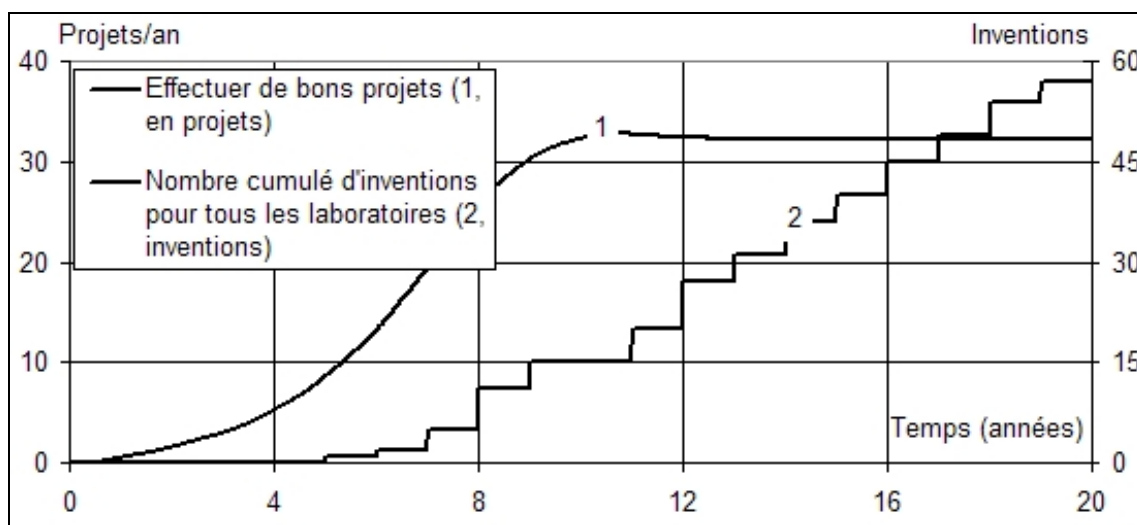


Figure 6 – Évolution de la réalisation de bons projets et inventions en recherche fondamentale, cas général

4.2 Dynamiques en recherche appliquée

Nous reprenons ici les conditions initiales du modèle de Grossmann (2003). En particulier, les fondateurs initiaux sont au nombre de 3, le capital initial est de 3 millions \$. À court terme, le degré de perfectionnement de la firme de biotechnologie est marqué profondément par l'effet de l'expérience de recherche (Figure 7). L'effet de la diversité des chercheurs est immédiat et l'effet de qualité de la recherche est de long terme. La première année, le degré de perfectionnement de la technologie est en fait en régression, car les fondateurs ont recruté des chercheurs ne possédant pas suffisamment d'expérience de recherche. Ainsi même si la firme au total accumule de l'expérience, l'expérience moyenne des chercheurs régresse la première demi-année et fait reculer les avancées de la firme.

En approchant la fin de la première année d'existence, la taille de la firme se stabilise à 17 personnes, c'est-à-dire vers l'objectif en chercheurs que la firme s'est fixé (Figure 8). À mesure que les ressources financières s'amenuisent, la confiance dans la firme décroît à partir du second trimestre (Figure 9). La conséquence est la décision de réduire les dépenses en activités externes pour économiser des fonds. La deuxième conséquence visible est la nécessité d'accentuer le recrutement, non pas pour l'expansion de la firme, mais pour compenser les pertes en personnel dues au départ de chercheurs qui ont changé de firme (Figure 8).

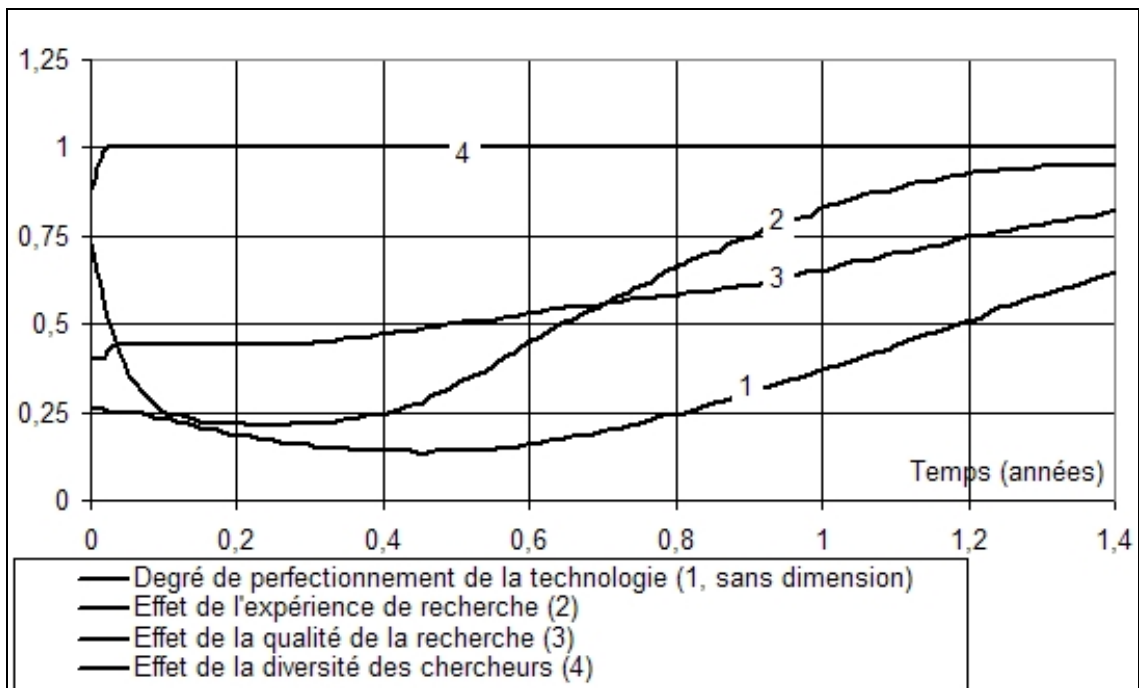


Figure 7 – Évolution à court terme des effets conduisant au perfectionnement de la technologie dans la firme de biotechnologie, cas général

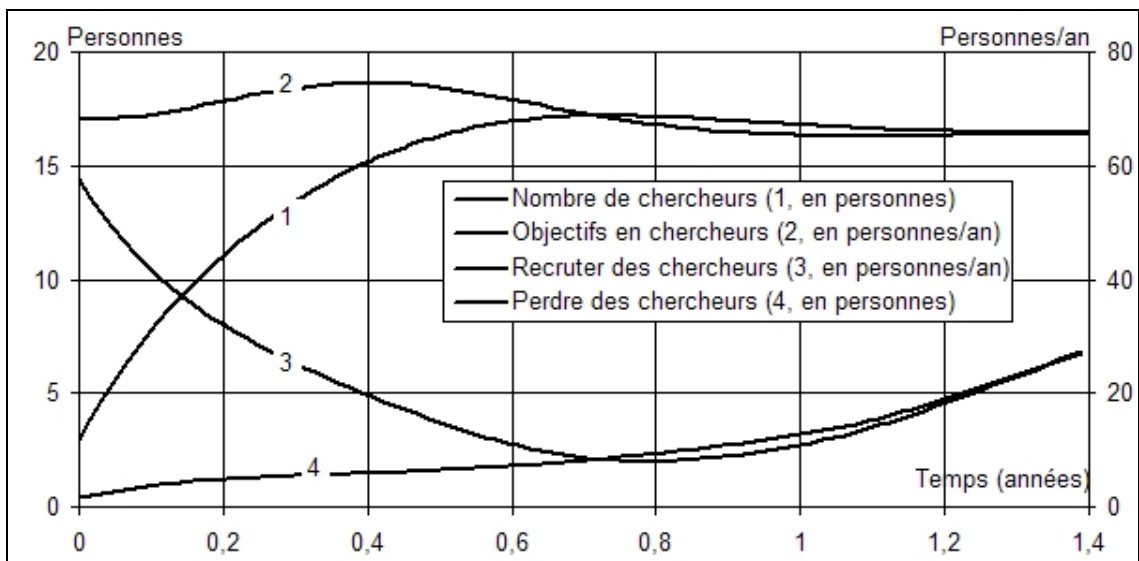


Figure 8 – Évolution à court terme des décisions en personnel (objectifs, recrutement) dans la firme de biotechnologie, cas général

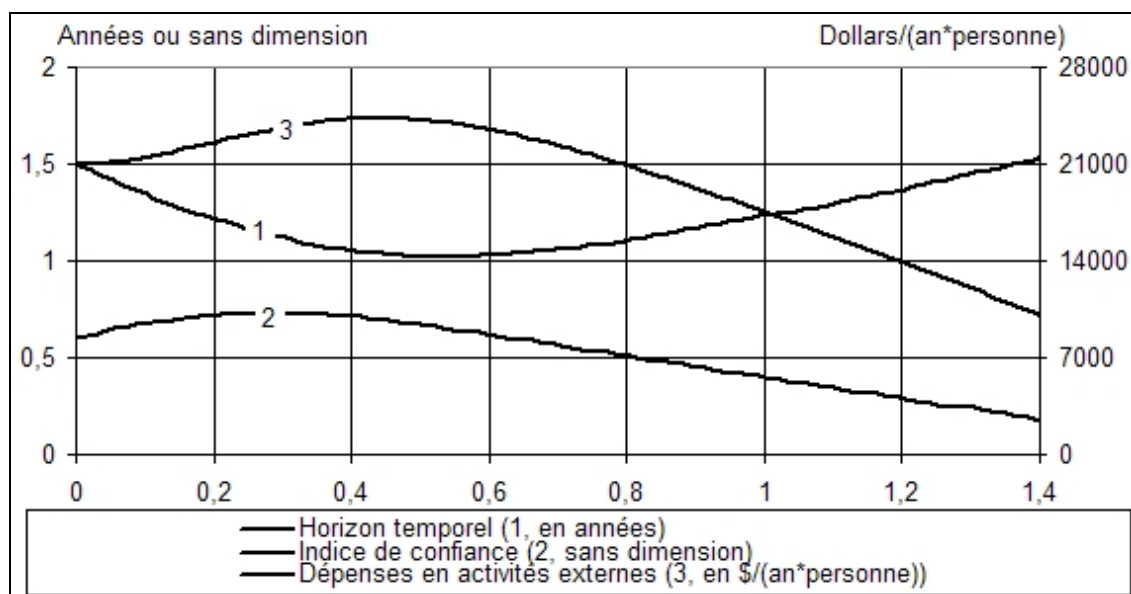


Figure 9 – Évolution à court terme de la confiance et des conséquences en dépenses d'activités externes dans la firme de biotechnologie, cas général

4.3 Dynamiques de collaboration

L'enjeu pour la firme est d'atteindre un degré de perfectionnement suffisant et informer les investisseurs de ses performances pour attirer des investisseurs-collaborateurs. Dans notre cas général, la firme réussit à intéresser les investisseurs. À mesure que la firme développe des collaborations et améliore les performances de sa technologie, son attractivité pour d'autres collaborations augmente (Figure 10). Elle va participer à environ 6 ou 7 collaborations par an dont le rythme de croisière s'effectuera vers la 5^{ème} année. Après 12 ans, l'attractivité décline conjointement au nombre de collaborations. Les explications de ces effets sont multiples.

Tout d'abord, un facteur interne entre en jeu. Nous avons énoncé en partie 4.6 une hypothèse apportée par Grossmann à partir de ses enquêtes selon laquelle la firme va limiter la taille du laboratoire pour éviter la dilution de l'expertise. En effet, accroître la taille de la firme va mettre en danger la qualité du travail : les superviseurs ne pourront pas bien effectuer leur tâche. De plus, une structure de petite taille favorise les échanges et la communication. Ainsi même si son attractivité vis-à-vis des collaborateurs augmente fortement jusque l'année 11, la firme ne négociera pas plus de collaborations que la limite fixée. Au niveau des négociations de contrats, la Figure 11 révèle deux vagues pendant les 5 premières années. Ces vagues sont soutenues par les collaborations négociables. Après 5 ans, la pression de la capacité en personnel se fait de plus en plus forte.

Ensuite un deuxième facteur, externe cette fois-ci, va nuancer la dynamique après 15 ans : la prise en compte de la concurrence sur le marché de collaboration. Nous avons en effet repris l'hypothèse de concurrence de Grossmann (2003), avec une attractivité concurrentielle exponentielle qui va faire décliner la part de marché de la firme sur son marché de collaboration.

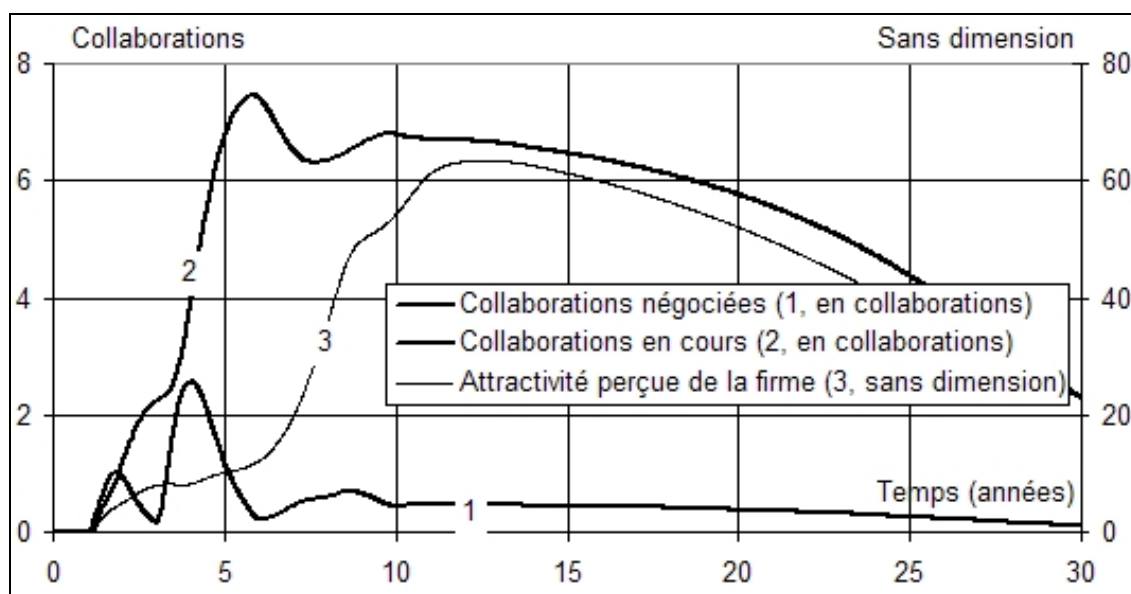


Figure 10 – Évolution à long terme du degré de perfectionnement de la technologie et de l'expérience moyenne de la firme, cas général

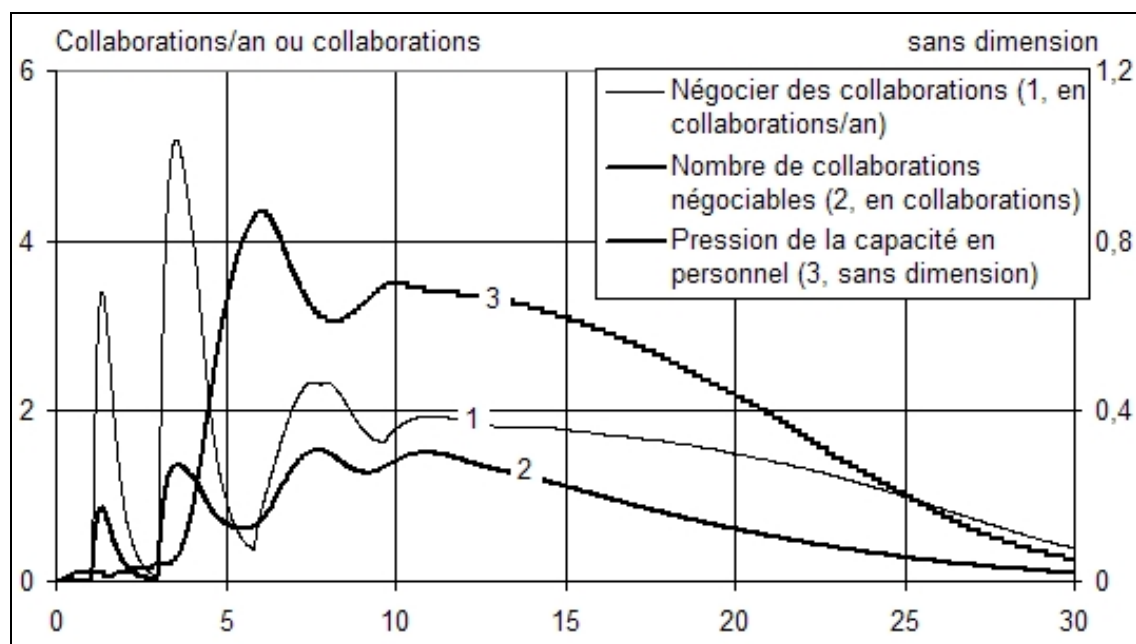


Figure 11 – Évolution à long terme des négociations de collaborations, cas général

Point de vue financement, nous pouvons déjà noter que les fonds de collaborations attribués dépassent les 10 millions \$/an pendant la grande phase de collaboration (Figure 12). Ensuite, le financement additionnel cédé par les collaborateurs pour l'expansion est non négligeable, car il anticipe bien le recrutement (deux vagues précollaborations). Finalement, lorsque les ressources financières se portent bien, le financement complémentaire pour l'expansion n'est plus nécessaire.

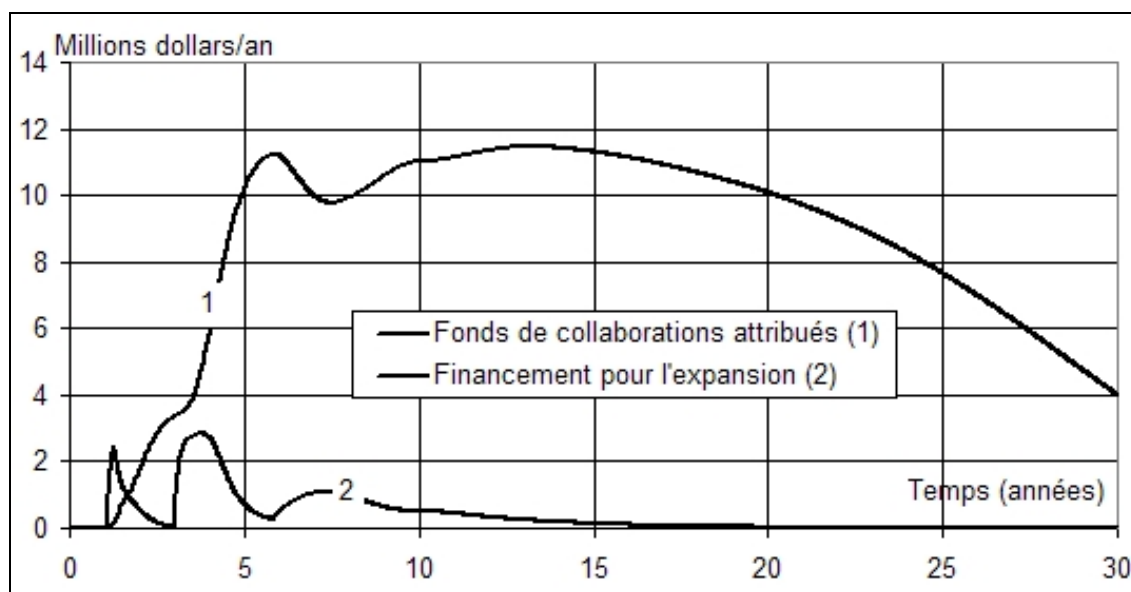


Figure 12 – Évolution à long terme du financement de la firme de biotechnologie via les fonds de collaboration, cas général

4.4 Dynamiques de développement de produits

Les produits sont développés en collaboration et parcourent les différentes étapes de R-D. Les avancées dans la filière sont rémunérées par les primes (Figure 13). Le passage en phase clinique est récompensé jusqu'à 4 millions \$/an vers la 15^{ème} année. Les produits approuvés par la FDA amènent également une récompense atteignant 5 millions \$/an vers la 23^{ème} année. Les produits sur le marché fournissent finalement des royalties s'élevant déjà à 10 millions \$/an vers la 15^{ème} année d'existence de la firme.

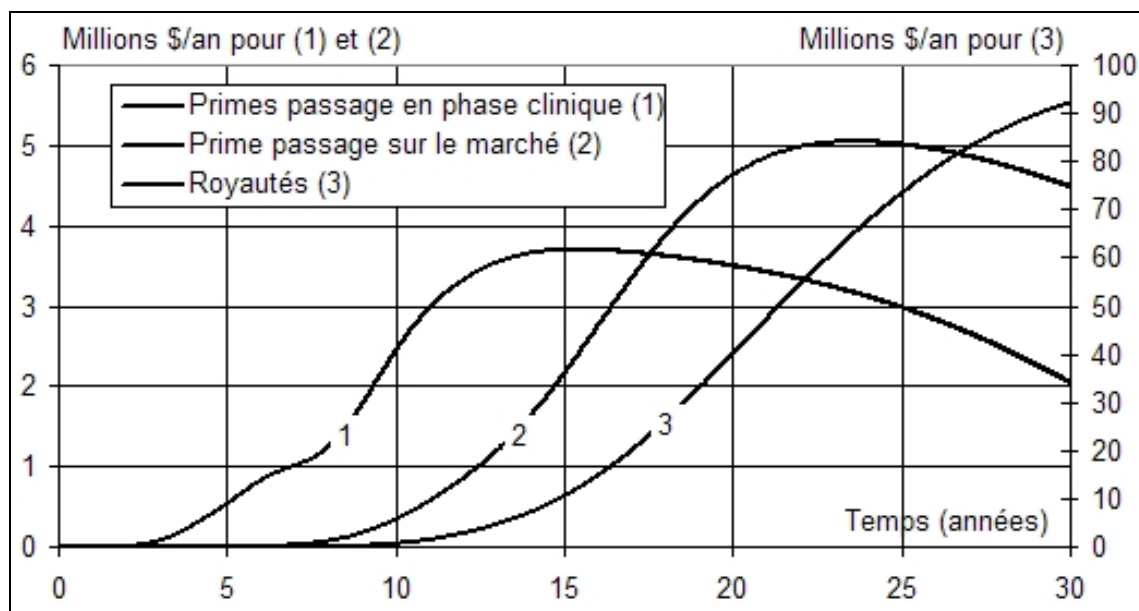


Figure 13 – Évolution à long terme des revenus provenant des produits de la filière, cas général

Les produits ont aussi une valeur espérée selon les revenus futurs sur le marché. La filière obtient une valeur maximale espérée de plus de 300 millions \$ après 20 ans (Figure 14). En effet, la firme a beaucoup collaboré et les produits entrent peu à peu dans les phases proches du marché.

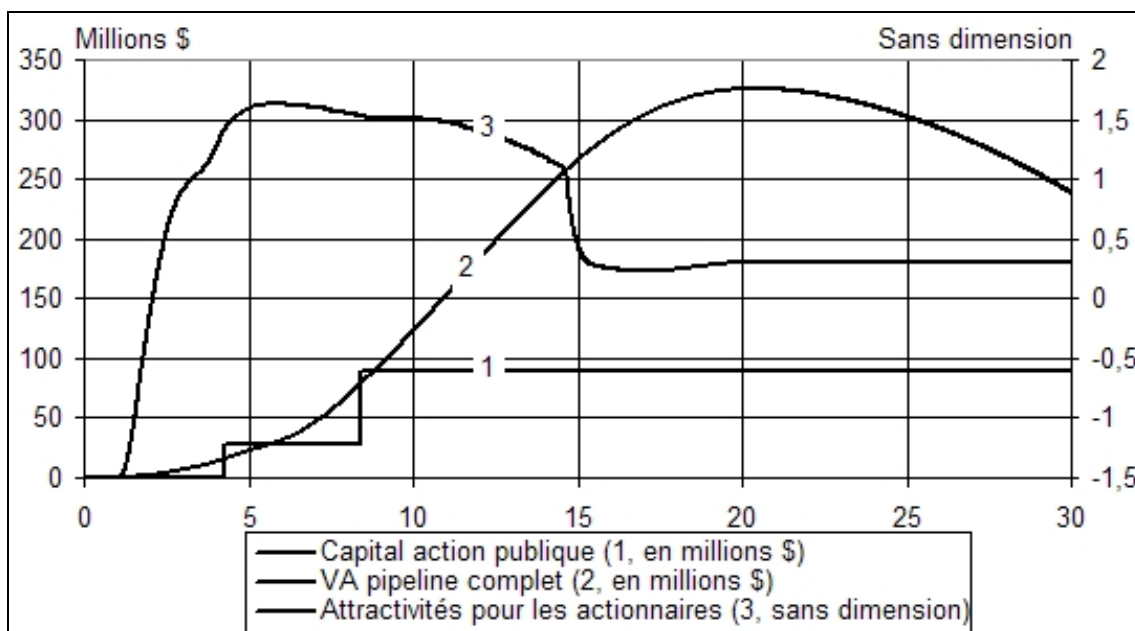


Figure 14 – Évolution à long terme de la valeur espérée de la filière de produits, de l'attractivité de la firme vis-à-vis des actionnaires et des capitaux levés sur les marchés publics, cas général

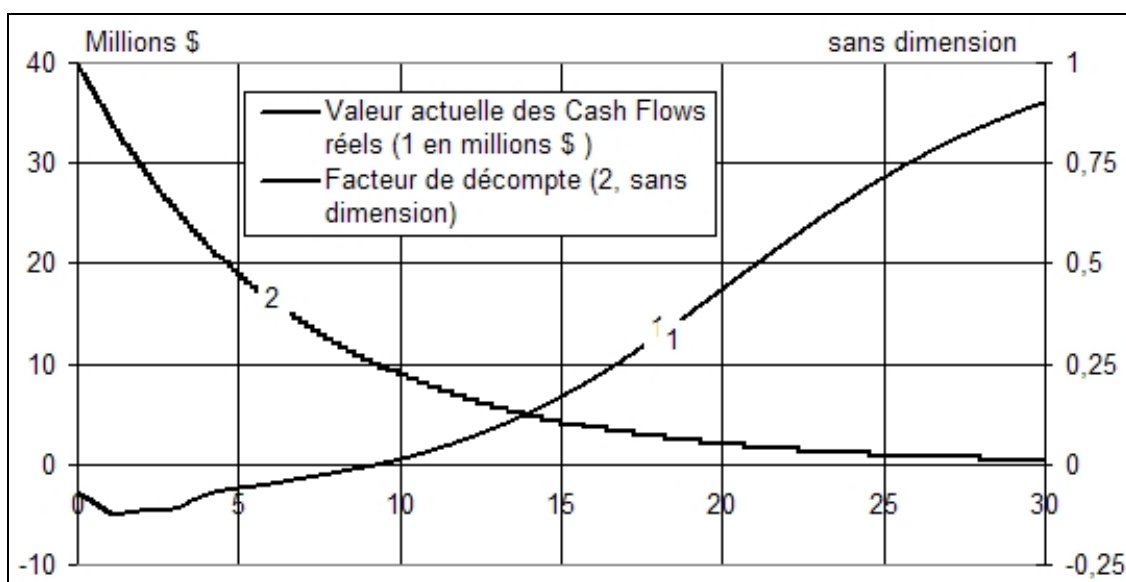


Figure 15 – Évolution sous le long terme de la valeur actuelle des flux financiers de la firme avec les collaborations, cas général

finalement les collaborations et le développement de produits amènent des revenus permettant d'accroître la valeur de la firme avec les flux financiers. La valeur actuelle nette

des flux financiers, en considérant le capital de départ à rentabiliser, devient positive après un peu plus de 9 années (Figure 15). Le capital de risque initial recherche de nouveaux capitaux pour obtenir un retour sur investissement plus rapidement. La firme doit attirer des investisseurs sur des marchés publics. Les investisseurs vont donc évaluer la firme selon les résultats obtenus et les options (Figure 14). La firme est capable d'attirer des investisseurs après 2,5 ans (l'attractivité est alors positive) et principalement avant la 15^{ième} année. Deux levées de fonds sont effectuées, en année 4 et 8 environ, pour des valeurs respectives de 26 et 60 millions \$.

5. Évaluation des politiques publiques

Analysons maintenant les politiques canadiennes à partir du modèle que nous avons créé. Nous verrons les politiques de financement de la recherche fondamentale, des firmes et des infrastructures. Cette première évaluation aura une portée assez générale. Par exemple, nous examinerons les problématiques suivantes en recherche fondamentale: Quel est l'effet de l'augmentation ou de la baisse du financement total ? Comment cibler le financement ou mieux le répartir ?

5.1 Politiques de financement de la recherche fondamentale

Augmenter le financement total en recherche fondamentale

Commençons tout d'abord par examiner l'effet de l'augmentation du financement total accordé aux laboratoires existants et répartis entre ces laboratoires équitablement. Nous avons ainsi simulé dans notre modèle le financement de base égal à 200 millions \$ réparti équitablement entre les laboratoires, puis un financement total de 140 millions \$ (30% inférieur) et enfin un financement total de 300 millions \$ (soit 50 % supérieur au financement de base). L'augmentation du financement total conduit très logiquement à l'augmentation du financement par laboratoire. Notons que notre modèle prend en compte 20 laboratoires autonomes. Nous examinons alors les dynamiques obtenues selon ces paramètres du modèle. Il apparaît que la qualité du laboratoire n'est que légèrement modifiée par des changements du financement (Figure 16). Les laboratoires utilisent essentiellement le financement pour s'agrandir, mais le financement en lui-même n'induit pas de conséquence particulière, selon notre modèle, au niveau de la qualité de l'expérience des recrutés, de la qualité d'apprentissage des scientifiques, etc.

Néanmoins, pour chaque laboratoire, un nombre supérieur de scientifiques permet de réaliser plus de projets de recherche autour de la stratégie de recherche. Par conséquent, le nombre absolu de réussites sera augmenté. Notons qu'il s'agit de nombre absolu et non de la proportion des activités réussies, car la probabilité qu'une activité réussisse dépend, dans notre modèle, de l'expérience moyenne des chercheurs, de la diversité des chercheurs, ou de la réussite des activités précédentes. Ainsi selon notre modèle, augmenter le financement par laboratoire va conduire à des chances plus importantes de trouver des inventions du fait de l'augmentation du nombre absolu de réussites. Nous pouvons naïvement observer que le nombre d'inventions sur le long terme est supérieur et qu'il est surtout possible d'obtenir des inventions plus rapidement en augmentant le volume de financement. Ainsi le financement de base augmenté de 50 %, permet d'accélérer d'une année, l'obtention de la première invention (Figure 17).

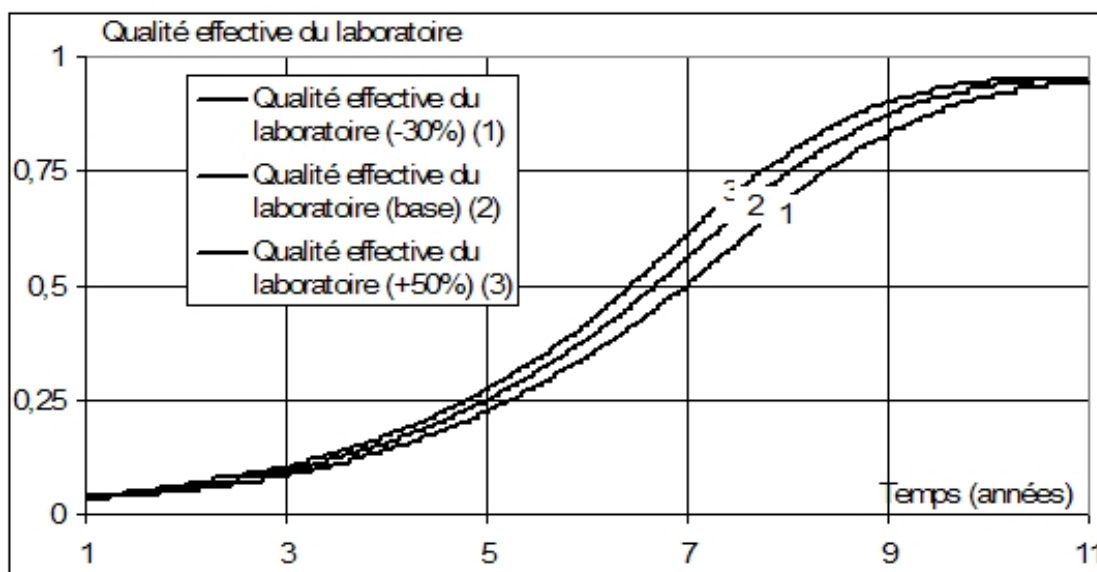


Figure 16 – Évolution à moyen terme de la qualité des laboratoires selon les trois volumes de financement total

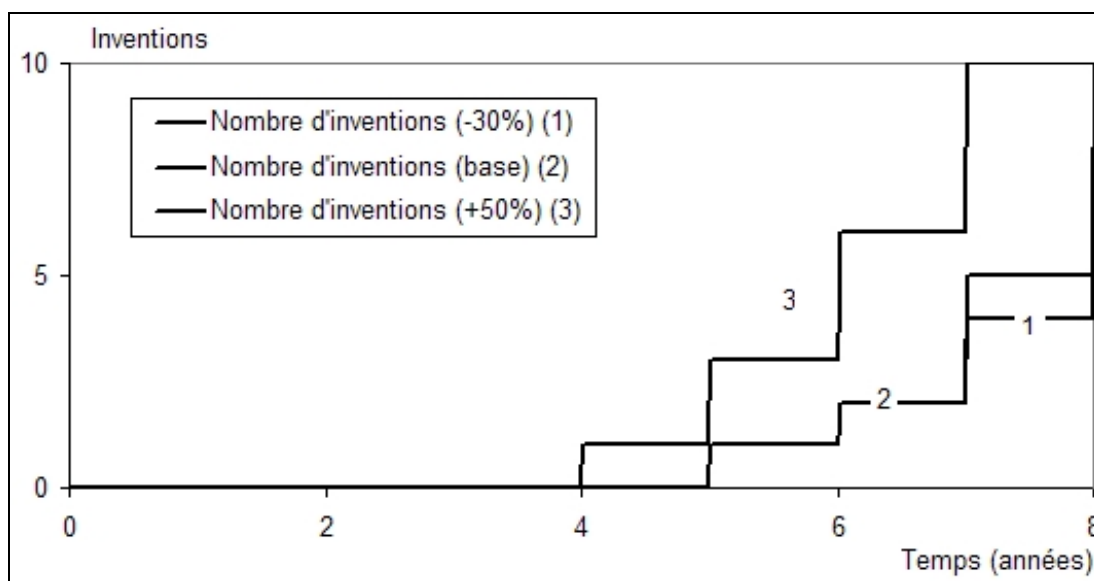


Figure 17 – Évolution à moyen terme du nombre total d'inventions par les laboratoires selon les trois volumes de financement total

Cibler les financements sur des technologies ou des investissements

Étant donné l'intérêt incontesté d'augmenter le volume de financement total, la vraie question se pose finalement sur la manière de mieux répartir le financement. Le gouvernement ne va pas financer aveuglément les laboratoires sans distinction dans une situation de financement limité. Certains domaines technologiques ont une valeur particulière car ils sont prioritaires sur le plan de la stratégie industrielle du pays. Notons qu'au Canada, les domaines généraux de la santé et de l'agriculture en biotechnologie sont

particulièrement soutenus. Mais les laboratoires du Conseil National de Recherches du Canada (CNRC) sont eux-mêmes ciblés sur des domaines de recherche précis : le bio-diagnostic à Winnipeg, la biotechnologie des plantes à Saskatoon, etc. Nous ne prenons pas ici en compte les aspects qualitatifs sur la valeur du domaine scientifique mais nous suggérons simplement l'idée que certains domaines technologiques sont à privilégier.

Nous simulons le cas d'un financement total égal au financement de base (200 millions \$) moins 30 % soit 140 millions \$. Du point de vue des laboratoires individuellement, la qualité n'était pas grandement modifiée par la baisse du budget de 30 %. En revanche les chances d'inventer sont diminuées. Ce financement sera soit réparti sur les 20 laboratoires (cas de « grande répartition »), soit ciblé sur 14 laboratoires (cas de « politique ciblée ») pour qu'ils obtiennent le financement original de base. Si l'on considère l'ensemble des inventions des laboratoires, il apparaît de faibles différences à long terme, mais la répartition sur les 20 laboratoires permet d'avancer d'une année l'apparition de la première invention (Figure 18).

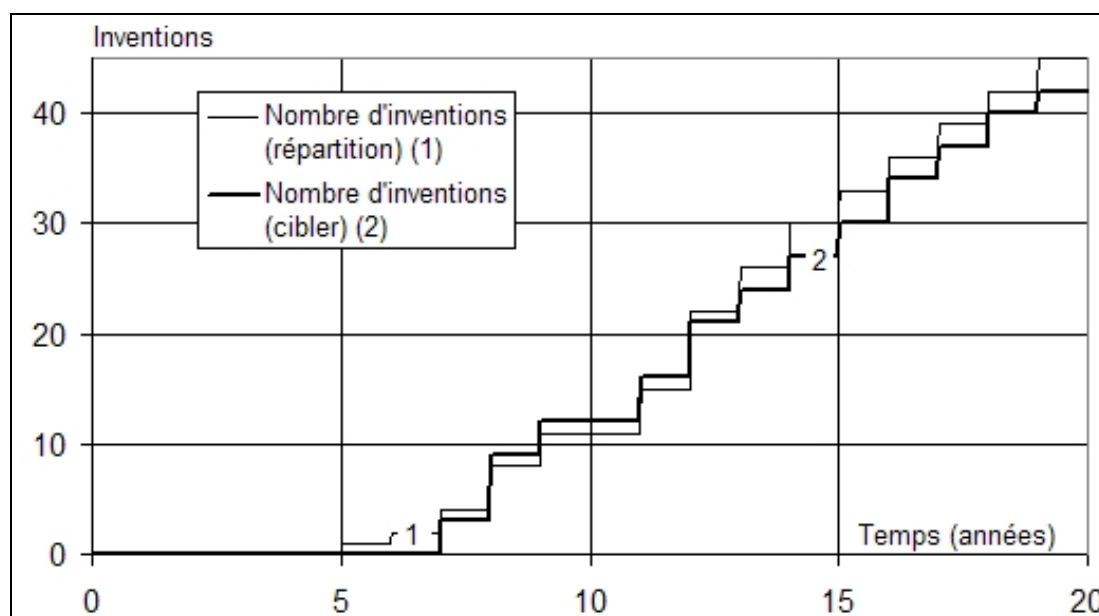


Figure 18 – Évolution à long terme du nombre total d'inventions par les laboratoires selon deux politiques de financement

Une deuxième série de simulations accentue la différence de financement en considérant un financement total de 80 millions \$ réparti sur 20 laboratoires (« répartition ») ou seulement 5 laboratoires (« politique ciblée »). La qualité des laboratoires financés dans le cas de la « répartition » est bien plus faible que celle bénéficiant de la « politique ciblée ». Un retard de 2 ans est même visible entre les deux types de laboratoire sur le plan de la qualité (Figure 19). Pour analyser ces résultats, revenons sur les hypothèses du modèle. Les effets du financement sur la qualité sont en général faibles comme nous l'avons mentionné ci-dessus. Néanmoins, une politique très marquée, comme dans les dernières simulations, induit des gains en qualité, car le coût de

l'infrastructure, ici considéré comme constant, pénalise moins le budget au profit du financement de chercheurs et d'absorption de connaissances.

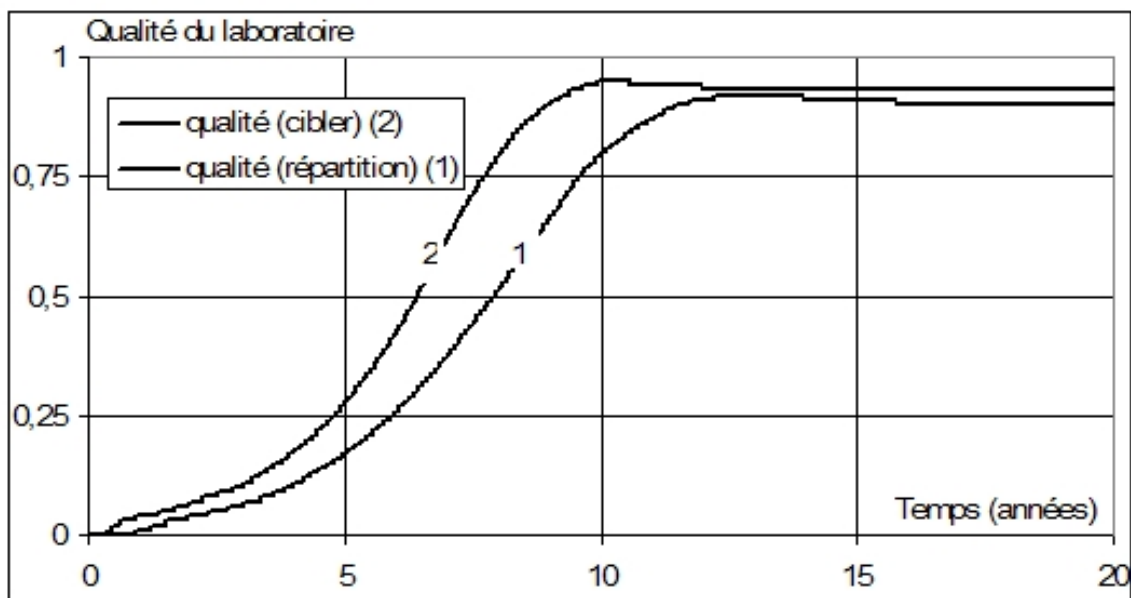


Figure 19 – Évolution à long terme de la qualité des laboratoires selon deux politiques de financement

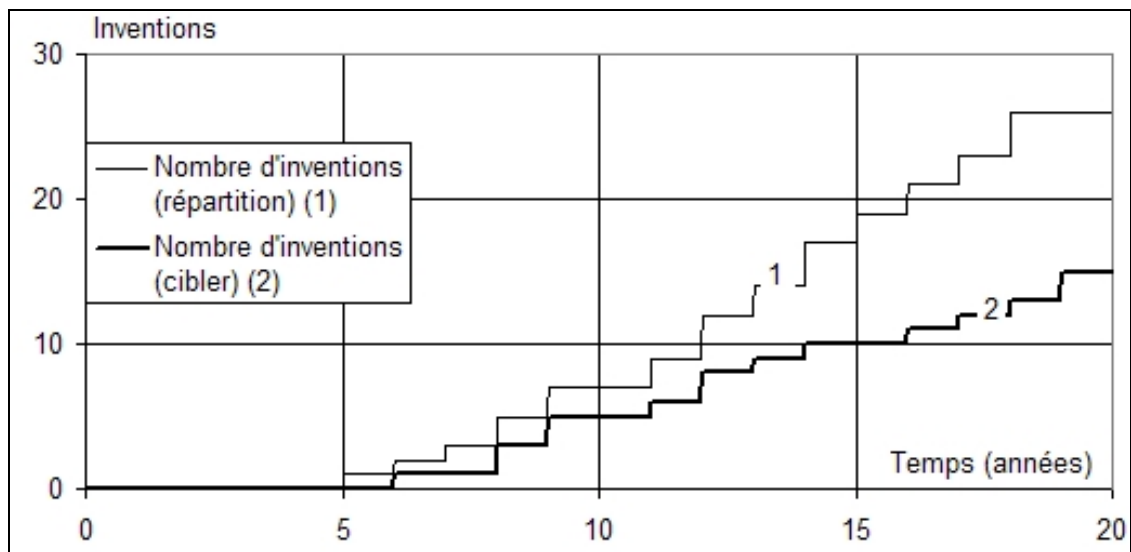


Figure 20 – Évolution à moyen terme du nombre total d'inventions par les laboratoires selon la politique de répartition ou la politique ciblée

Néanmoins, les résultats en termes d'inventions montrent un net avantage à long terme et à court terme de la répartition (avec l'obtention d'une invention plus rapidement) comme l'illustre la Figure 20. Nous avons en effet considéré que le laboratoire évaluait chaque année une stratégie générale et unique. Le laboratoire ne pouvait obtenir plus d'une invention par an, car elle est collective. Le laboratoire doit donc être compris comme une « unité de recherche tournée vers une stratégie commune ». Répartir le financement entre

différents laboratoires multiplie à long terme les opportunités technologiques et les plateformes, augmentant les chances d'obtenir des inventions. Il permet aussi à court terme de trouver une première invention plus facilement parmi les opportunités créées.

Finalement, nous pouvons ici comprendre le rôle des organismes subventionnaires, tel le Conseil de Recherches en Sciences naturelles et en Génie du Canada (CRSNG), comme le moyen de multiplier les opportunités prometteuses, tout en sélectionnant les meilleures opportunités pour ne pas négliger l'effet négatif de la baisse du financement. Des études plus précises et complémentaires seraient nécessaires pour estimer quantitativement l'arbitrage à mettre en œuvre entre l'effet négatif de la baisse du financement du laboratoire, et l'accroissement des opportunités par la répartition.

Notons que le soutien financier pour des technologies précises peut passer par le financement de certains investissements privilégiés. Une aide au financement de chercheurs est la politique la plus courante, mais notons également le rôle de la Fondation canadienne pour l'innovation (FCI) qui subventionne des infrastructures d'innovation. Des politiques particulières pourraient aussi aider les laboratoires dans leurs dépenses d'activités externes.

Dans la formalisation du modèle que nous avons adopté, prendre en compte les différents soutiens financiers, comme le financement des chercheurs ou de l'infrastructure, est en fait peu différent d'une hausse du financement total du laboratoire. Techniquement pour nous, financer l'infrastructure permet de transférer des fonds pour les chercheurs et réciproquement. En revanche si l'on considère par exemple que la politique ne finance que des activités externes complémentaires non prévues initialement dans le budget, il est possible de constater un impact sur l'accumulation d'expérience. En effet, l'absorption de connaissances sera supérieure, permettant d'acquérir de l'expérience plus rapidement. Mais notre modèle prend également en compte un effet cyclique de l'expérience sur l'apprentissage : plus les chercheurs ont de l'expérience, plus l'apprentissage est efficace, renforçant l'accumulation d'expérience, etc.

Répartir le financement selon des critères

Dès lors, nous avons vu l'intérêt de multiplier les opportunités technologiques par le financement de différentes formes d'investissement. Les organismes subventionnaires comme le CRNSG jouent également un rôle de sélection des meilleures opportunités, car financer une mauvaise opportunité fait perdre du volume de financement pour les autres opportunités. Les organismes évaluent alors les demandes de subvention selon différents critères : la valeur technologique du domaine de recherche, la valeur économique des perspectives technologiques, l'originalité de la technologie, la qualité des travaux, etc. Le modèle ne prend pas en compte la qualité intrinsèque des technologies. En revanche nous pouvons imaginer un financement suivant le critère économique et la qualité du laboratoire sur le plan de la réussite des projets.

Favoriser certains domaines technologiques conduit à favoriser certains marchés potentiellement impactés. L'impact ne sera pas tant sur le nombre d'inventions en lui-même, mais plus sur le potentiel économique des futures firmes qui pourraient être issues des technologies. Ces firmes fourniront alors des produits dans les marchés les plus lucratifs. Mais il peut aussi s'agir de fournir des produits les plus urgents d'un point de vue

social, comme en santé par exemple. Nous pourrions également discuter de la question de cibler le financement selon la stratégie industrielle du pays. Dans tous les cas, le problème reste celui de cibler le financement sur des laboratoires comme l'illustre la section précédente.

Le critère de la qualité du laboratoire est intéressant, car il intervient dans le processus dynamique du laboratoire. Rappelons que notre critère de qualité signifie le taux de réussite des travaux et non pas la valeur technologique des travaux. Ce critère pose alors plusieurs problématiques, sans considérer les biais de mesure ou les fausses informations. En effet, nous voyons en Figure 21 que le laboratoire met près de 10 ans dans notre modèle avant d'atteindre sa qualité maximale. Si les laboratoires n'ont pas tous atteint leur limite d'expertise ou s'ils n'ont pas tous la même histoire, leur comparaison n'est pas possible. Ce critère peut même mettre en péril certains laboratoires dont la qualité est encore faible, mais dont le domaine technologique se révélerait intéressant à l'avenir.

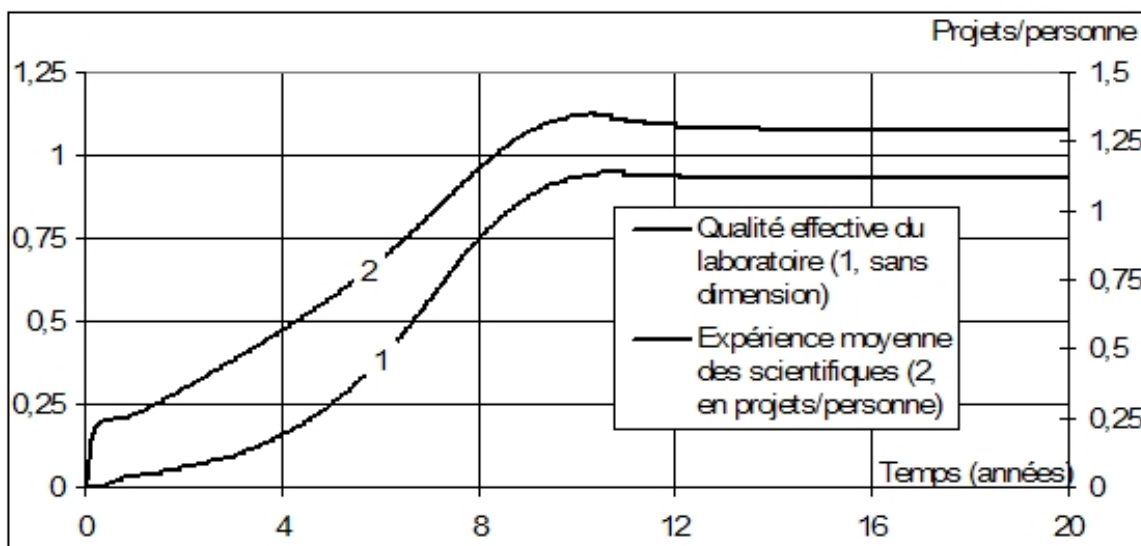


Figure 21 – Évolution de la qualité effective et expérience moyenne dans le cas de référence

Notre modèle de génération de technologie n'est encore qu'un premier prototype. Mais il nous a permis de discuter certains impacts des politiques de financement. D'autres politiques pourraient être discutées concernant l'influence de la limite d'expertise des chercheurs, de l'expérience des recrutés, de la politique de dépenses en activités externes, etc. Retenons, en tant que premiers enseignements, que l'augmentation du financement total permet certes de croître le nombre des inventions sur le long terme, mais aussi vraisemblablement d'accélérer l'obtention des premières inventions. Cibler les laboratoires plutôt que de répartir le financement permet d'améliorer à moyen terme la qualité des laboratoires, mais prive à long terme de nombreuses inventions, car il ne crée pas autant d'opportunités technologiques. Cibler le financement sur des investissements peut avoir un effet non négligeable sur la dynamique d'expérience si le financement supplémentaire ne remplace pas le financement initial.

5.2 Politiques de financement des firmes

Développer le capital-risque

L'enjeu des politiques canadiennes concernant le capital-risque est d'augmenter le volume de financement pour les premières phases des firmes. Nous pourrions par exemple examiner la politique de développement des Sociétés à Capital de Risque de Travailleurs (SCRT). Cette politique est indirecte vis-à-vis des firmes, car elle favorise une entité autonome qui agit ensuite sur les firmes. Par conséquent pour examiner la dynamique et les mécanismes de la politique, il faudrait élargir le modèle que nous proposons avec des extensions sur les SCRT. Notre objectif étant dans un premier temps une évaluation d'ensemble, nous nous contenterons pour l'instant de considérations portant plus sur la manière de financer les premières étapes de vie de la firme.

Notons que, dans notre modèle, le capital initial permet ici de mettre en place l'équipe de R-D et de trouver des locaux. Les phases d'incubation et d'amorçage sont cruciales, mais exigeraient encore un nouveau développement du modèle autour de ces processus, entre la génération des technologies et le perfectionnement des technologies. Le financement qui entre alors en jeu porte sur le développement d'incubateurs ou de fonds d'amorçage.

Concentrons-nous sur le processus de « perfectionnement de la technologie » dans les jeunes firmes de biotechnologie. Il est clair qu'augmenter le volume de financement initial va permettre d'augmenter le nombre de firmes financées, si le financement par firme reste le même. Or il pourrait sembler souhaitable d'augmenter ce financement également d'un point de vue individuel, c'est-à-dire pour chaque firme, afin de garantir une meilleure survie des firmes. Nous avons donc simulé 4 volumes de financements initiaux : 1,5 million \$, 2 millions \$, 3 millions \$ et 4 millions \$. Nous avons simulé l'intérêt perçu par les collaborateurs tout en observant la date de « mort » de la firme si cet intérêt ne se concrétise pas en collaboration. Signalons naïvement que des financements croissants permettent à la firme d'engager plus de personnel. Mais la date de « mort » est presque identique à 1,4 an pour chaque politique de financement. Curieusement, l'intérêt perçu pour les plus petits financements commence même plus rapidement et est supérieur (Figure 22). Ceci résulte de la conséquence des hypothèses de modélisation.

La firme de biotechnologie développe dans notre modèle son réseau d'investisseurs-collaborateurs pour une performance mesurée de 0,2⁷. Or elle atteint cette valeur plus rapidement pour des financements initiaux faibles (Figure 23). En effet, les recrutés apportent une expérience initiale faible par rapport aux fondateurs et par conséquent l'expérience moyenne des scientifiques baisse avec le nombre de recrutés qui croît lui-même avec le financement. Ensuite, après un an, la tendance s'inverse et la performance augmente avec le financement. Ceci induit des conséquences sur le plan du financement initial. Trop financer initialement peu faire perdre du perfectionnement technologique et

⁷ La performance technologique ne peut être mesurée directement par les investisseurs-collaborateurs. Ces derniers reportent donc, après un délai matériel incompressible, le taux de réussite des essais sur la capacité de travail, pour évaluer une certaine performance en fonction des coûts engagés. Les investisseurs comparent cet indice, le proxy de la performance, avec leur propre exigence en performance.

donc de l'intérêt, car les fondateurs seront incités à engager des chercheurs qu'il faudra former et qui ralentiront la progression de la firme. Un petit financement pourrait être suffisant pour perfectionner la technologie et intéresser de futurs collaborateurs. Dans notre modèle, une performance de 0,3 était nécessaire pour intéresser les investisseurs-collaborateurs (intérêt perçu égal alors à 1). Mais la Figure 23 montre aussi que si la performance demandée par les collaborateurs est supérieure à 0,6 le financement initial de 1,5 millions \$ ne sera au contraire pas suffisant pour atteindre cette valeur pendant le temps de survie de la firme de 1,4 an, permis par le capital initial.

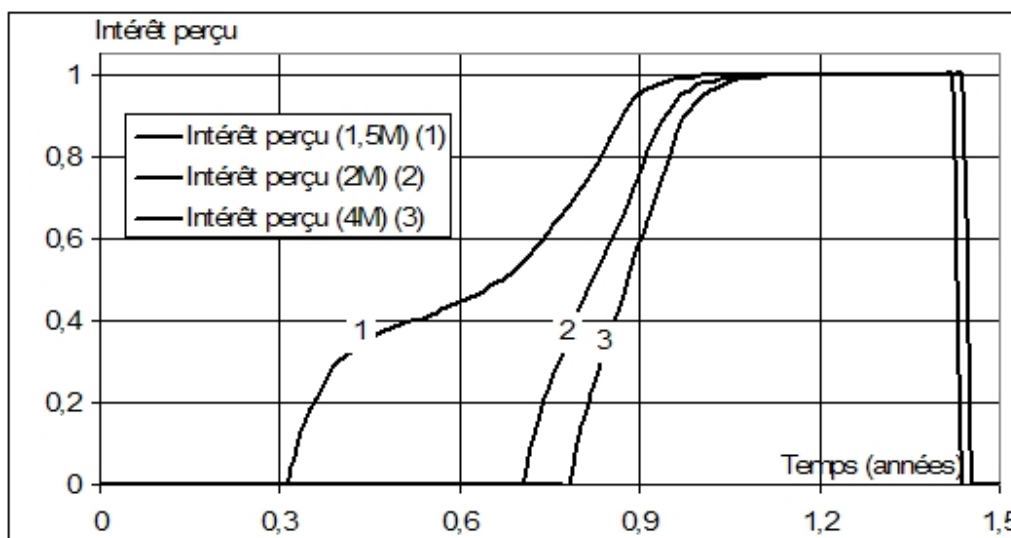


Figure 22 – Évolution de court terme de l'intérêt de la firme de biotechnologie perçu par les collaborateurs selon 3 volumes de financement initiaux

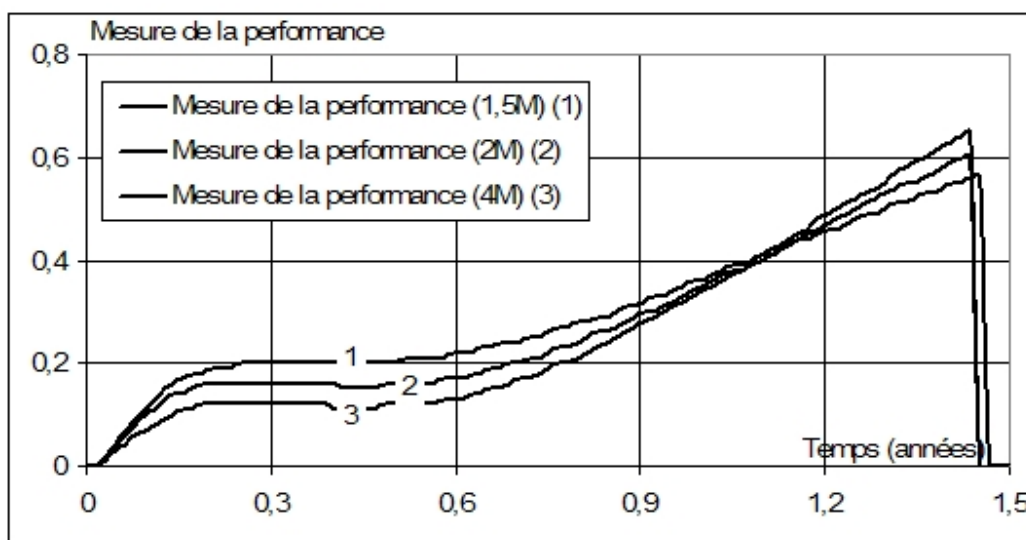


Figure 23 – Évolution à court terme de la performance technologique mesurée par les collaborateurs selon 3 volumes de financement initiaux

Le capital-risque par « étapes » apparaît comme le meilleur moyen de mesurer les fonds versés tout en permettant à la firme de se développer. Nous avons par exemple simulé deux financements, le premier de 3 millions \$ dès le début (3M), le second de 2 millions \$ au début puis 1 million après un an (2+1M). La Figure 24 montre très bien le double avantage du financement par étapes. Tout d'abord, il permet de gagner en performance au début du processus, sans perdre des fonds inutilement par une expansion démesurée. Puis il garantit l'atteinte d'une meilleure performance en retardant la mort annoncée de la firme sans collaboration.

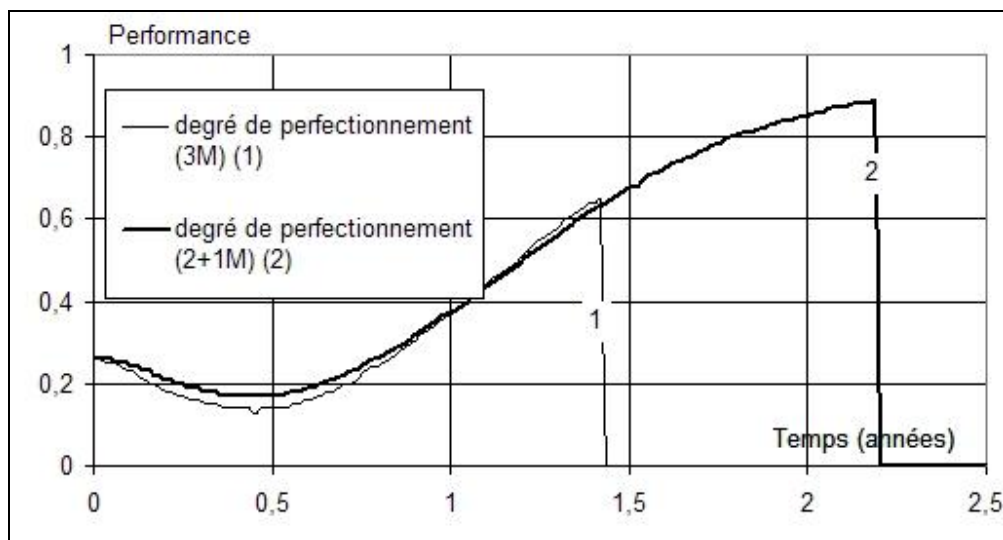


Figure 24 – Évolution à court terme de la performance technologique mesurée de la firme selon un financement complet en début de vie ou un financement par étapes

Financer directement les entreprises de biotechnologie

Dans notre modèle, les investisseurs-collaborateurs fournissent du financement additionnel avant d'engager les collaborations. Si les collaborateurs ne veulent pas trop investir dans le développement de la firme de biotechnologie, les fonds de politiques publiques particulières pourraient être essentiels. Examinons tout d'abord les cas où la firme reçoit 100 % des fonds additionnels de la part des collaborateurs, 0 % des fonds, ou 25 % des fonds (Figure 25).

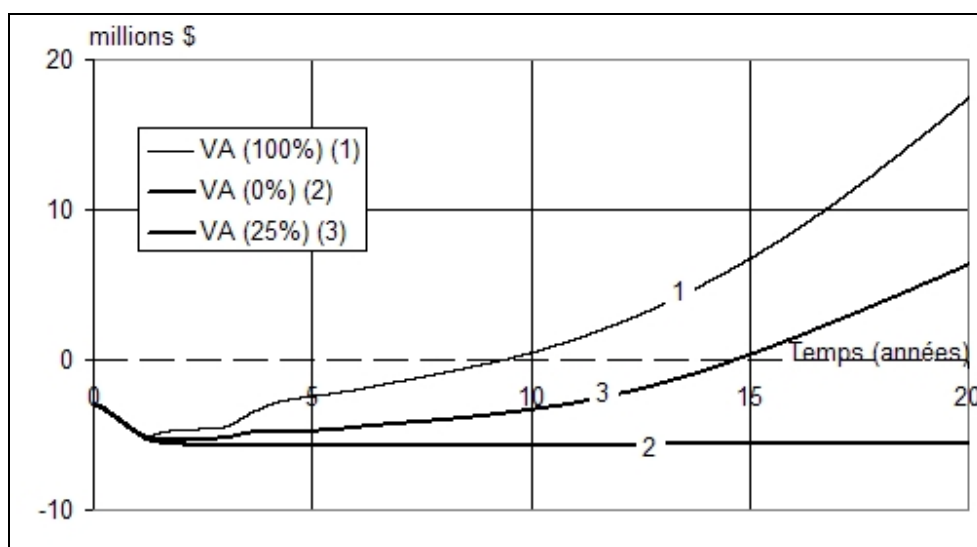


Figure 25 – Évolution à long terme de la valeur actuelle nette des flux financiers de la firme (sans capitaux des marchés publics) selon le financement additionnel pour l'expansion

La simulation de référence (courbe 1 de la Figure 25) montre que même avec des collaborations, la firme n'atteint une valeur actuelle nette (« VA ») de l'investissement initial en capital risque qu'après 9 ans d'existence. Seuls les capitaux apportés dans une levée de fonds permettent alors de soulager les capitaux-risqueurs puisque la durée dépasse le temps admis pour l'investissement. Des politiques de financement offrent des prêts à remboursement conditionnel comme le Partenariat Technologique Canada (PTC). Cette politique est complexe et peut prendre des formes variées, en fonction du moment où le prêt est engagé, et des conditions particulières de la firme. L'arrivée de dettes n'est habituellement pas la bienvenue pour les actionnaires dont les dividendes ne sont pas prioritaires sur la dette, d'autant plus que la firme est encore loin d'être capable de rembourser celles-ci. Néanmoins, les prêts offerts par les politiques publiques offrent davantage de flexibilité de remboursement, ce qui limite grandement le poids de la dette sur le moral des actionnaires. Ces prêts sont alors considérés comme des subventions directes dans notre modèle.

Il apparaît en outre que sans fonds additionnels, la firme n'est pas capable de se développer et elle meurt (courbe 2 de la Figure 25). Alors qu'avec même un peu de fonds additionnels elle arrive à bien approcher sa dynamique normale de collaboration présentée en courbe 3 de la Figure 26. Cette dynamique⁸ s'illustre par une hausse du nombre de collaboration pendant 5 ans, puis une stagnation de nombre pour des raisons liées à des limites structurelles de sa capacité de recherche, puis une baisse du fait de nouvelles technologies concurrentes gagnant des parts de marché sur le marché des collaborations de son domaine d'activité. Les fonds additionnels sont donc cruciaux afin de créer à long terme de nouvelles opportunités de produits.

⁸ Le lecteur pourra retrouver les explications des dynamiques « normales » dans le mémoire de Farcy (2008).

Ces subventions peuvent être notamment utiles lorsque la firme va effectuer en collaboration avec des grandes firmes pharmaceutiques de la R-D sur les produits. En effet, la firme de biotechnologie a alors besoin de fonds pour se développer, engager de nouveaux chercheurs ou agrandir les locaux.

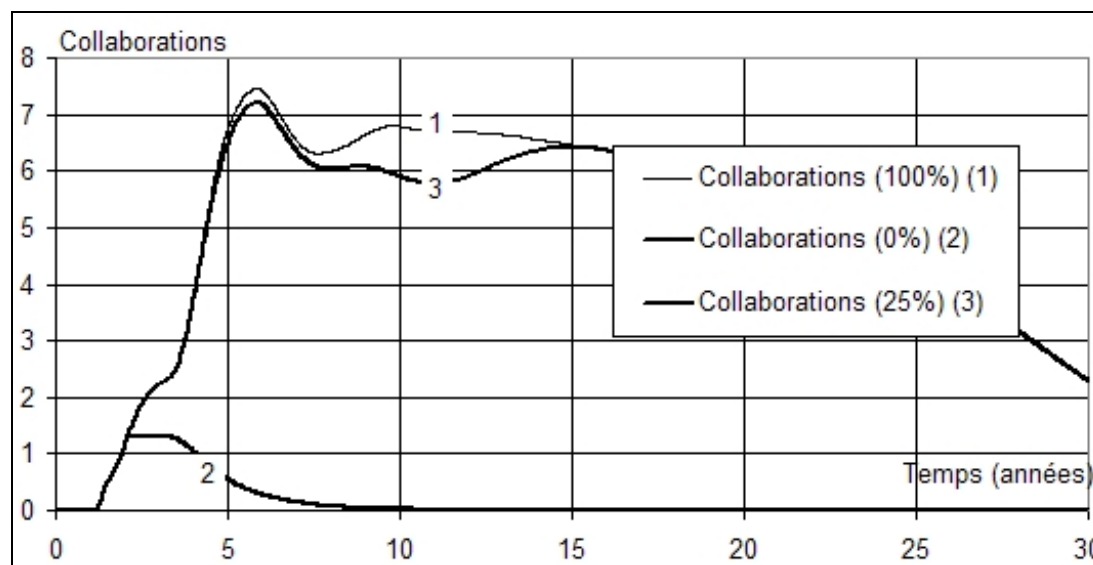


Figure 26 – Évolution à long terme des collaborations des firmes selon un financement additionnel pour l'expansion

La baisse du financement additionnel (25%) va conduire à plusieurs conséquences dynamiques que nous allons seulement évoquer : elle va faire chuter la confiance du personnel ; le recrutement devra être plus intense pour pallier ce départ anticipé de chercheurs pour finalement atteindre un niveau de collaboration souhaitable⁹ ; l'attractivité perçue de la firme par les investisseurs-collaborateurs va baisser ou sera retardée ; l'apprentissage sera retardé ou nul si la firme ne survit pas... Notons également la dynamique du degré de perfectionnement de la technologie qui sera réduit (Figure 27).

Au final, la valeur actuelle nette des flux financiers de la firme en collaboration sera réduite (Figure 25). Elle ne devient positive qu'après 15 ans et non plus 9 ans. Ceci peut être préjudiciable pour le capital de risque qui attend son retour sur investissement, et renforce l'importance de lever des fonds sur les marchés publics.

⁹ Le modèle de Grossmann (2003) repris par Farcy (2008) propose un niveau de collaboration souhaitable défini par divers facteurs : limite du nombre de collaboration opérable par le manque de personnel de recherche ou encore limite recherchée de la taille du laboratoire pour éviter la dilution de l'expertise.

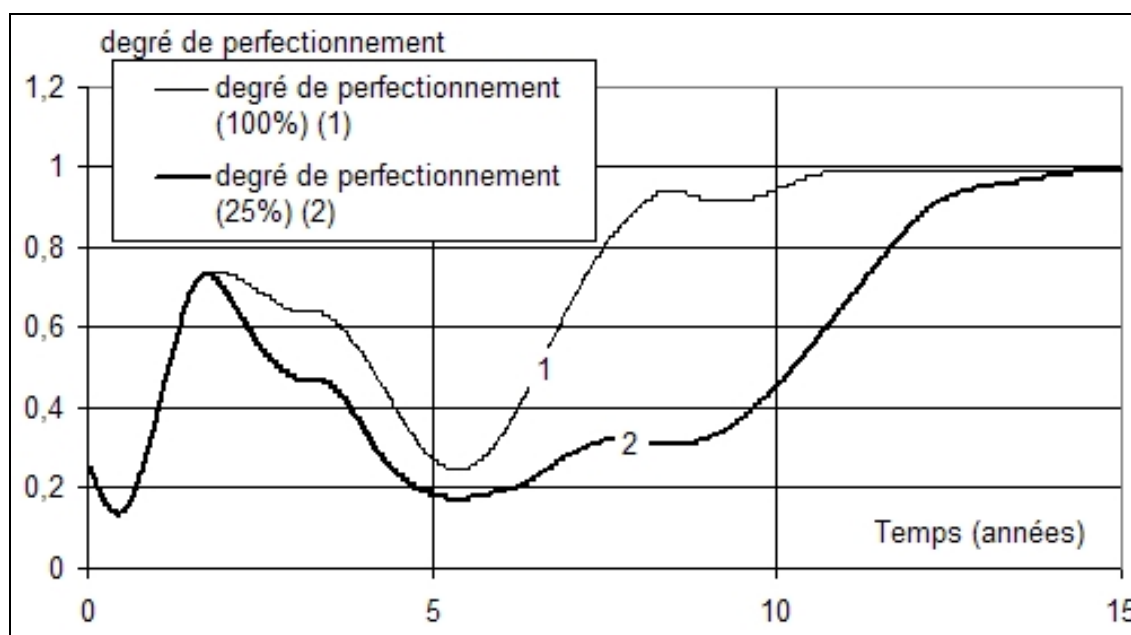


Figure 27 – Évolution à long terme de degré de perfectionnement technologique des firmes selon un financement additionnel pour l'expansion

Soutenir fiscalement les firmes de biotechnologie

Les politiques fiscales visant le capital-risque ou les investisseurs exigent des extensions du modèle. Elles sont centrées sur le comportement de l'investisseur par rapport à un choix de portefeuille d'investissement. En ce qui concerne l'imposition des firmes de biotechnologie, il faut préciser un modèle de comptabilité précis de la firme comportant les revenus imposables, les dépenses déductibles, les amortissements réalisables, etc.

Néanmoins, nous pouvons déjà noter que les premiers revenus viennent avec les premières collaborations dans notre modèle, c'est-à-dire après deux ans. L'impact sur la phase « perfectionnement de la technologie » se fait donc plus sur l'évaluation *a priori* des coûts futurs de R-D. Au Canada, le report des pertes ou de crédits d'impôts reportables sur les vingt années subséquentes permet alors d'alléger ces coûts ou d'augmenter les profits. Ceci peut rassurer le capital-risqueur dans son investissement initial avec l'espoir d'un retour plus rapide et quantitatif sur son investissement. Les crédits d'impôts remboursables sur les dépenses de R-D du Québec sont même encore plus intéressants pour les firmes de biotechnologie dans les premiers temps que les crédits non remboursables du gouvernement fédéral, puisque les firmes ne réalisent des profits que tardivement.

Ainsi, la politique fiscale touche plus les firmes à un stade avancé. Comme les crédits d'impôts sont proportionnels d'une façon générale aux coûts des dépenses en R-D, nous proposons de simuler pendant les collaborations une baisse des coûts salariaux et généraux de la recherche de 30% pour la firme de biotechnologie (cas « fisc »). Il apparaît que le nombre de collaborations n'évolue pas avec la politique fiscale. En revanche le degré de perfectionnement est supérieur, car davantage de fonds sont disponibles pour les activités externes et que les managers sont prêts à financer davantage ces activités (Figure 28).

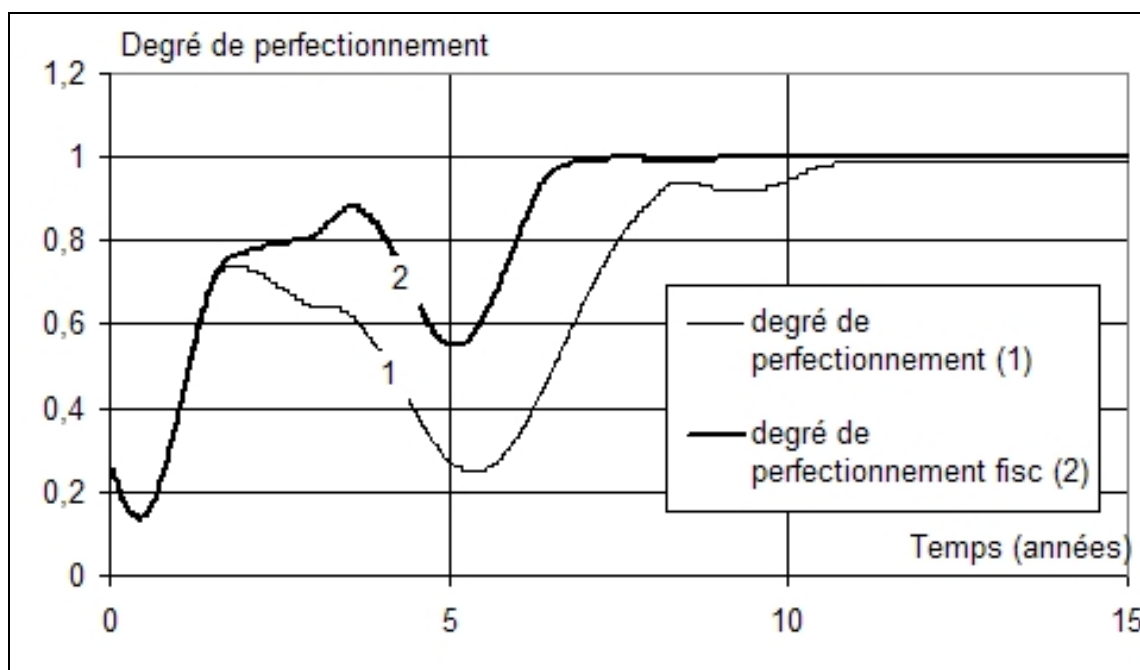


Figure 28 – Évolution à long terme du degré de perfectionnement de la technologie des firmes selon l'existence ou non d'une politique de baisse des coûts de R-D par fiscalité

La valeur actuelle nette de la firme en collaboration (sans les marchés publics) est grandement améliorée par la politique fiscale : elle devient positive après 5 ans et non plus 9 ans dans le cas normal (Figure 29). Ainsi en cas d'absence des marchés publics, la politique fiscale a un rôle positif à jouer envers le capital-risque car ce dernier peut espérer un retour sur investissement plus rapide. D'ailleurs si en remarquant que les firmes de biotechnologie s'engagent encore plus dans le financement par les alliances si le financement par les marchés publics est limité (Lerner, Shane, et Tsai, 2003), la politique fiscale devient encore plus importante pour le développement de la firme de biotechnologie.

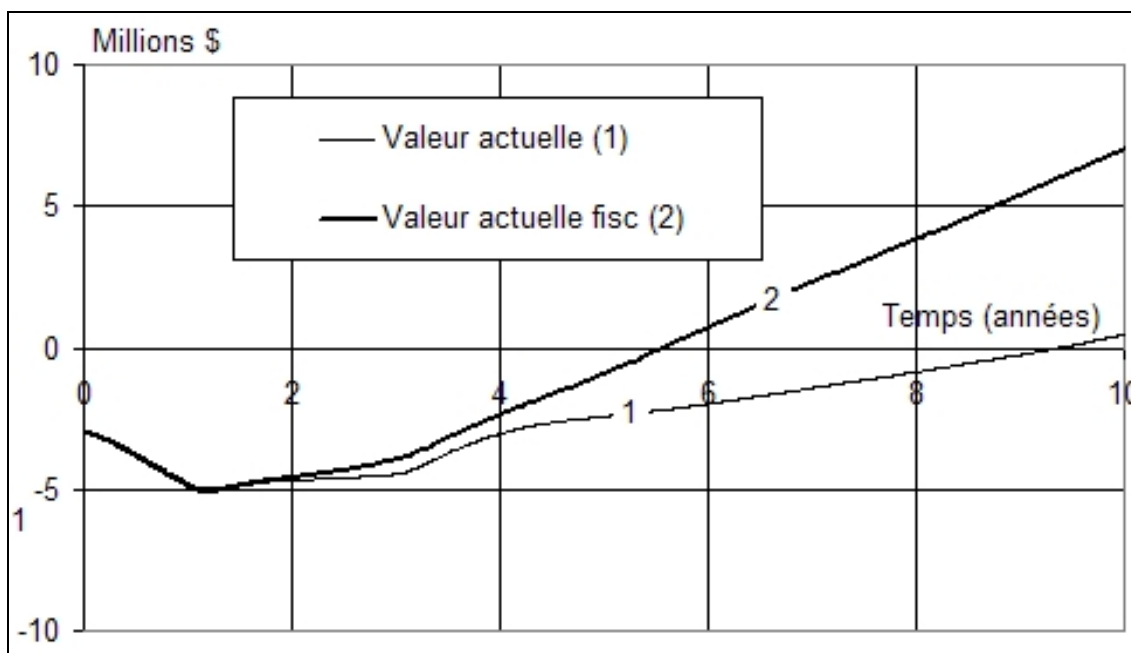


Figure 29 – Évolution à long terme de la valeur actuelle nette des flux financiers de la firme (sans capitaux des marchés publics) selon l’existence ou non d’une politique de baisse des coûts de R-D par fiscalité

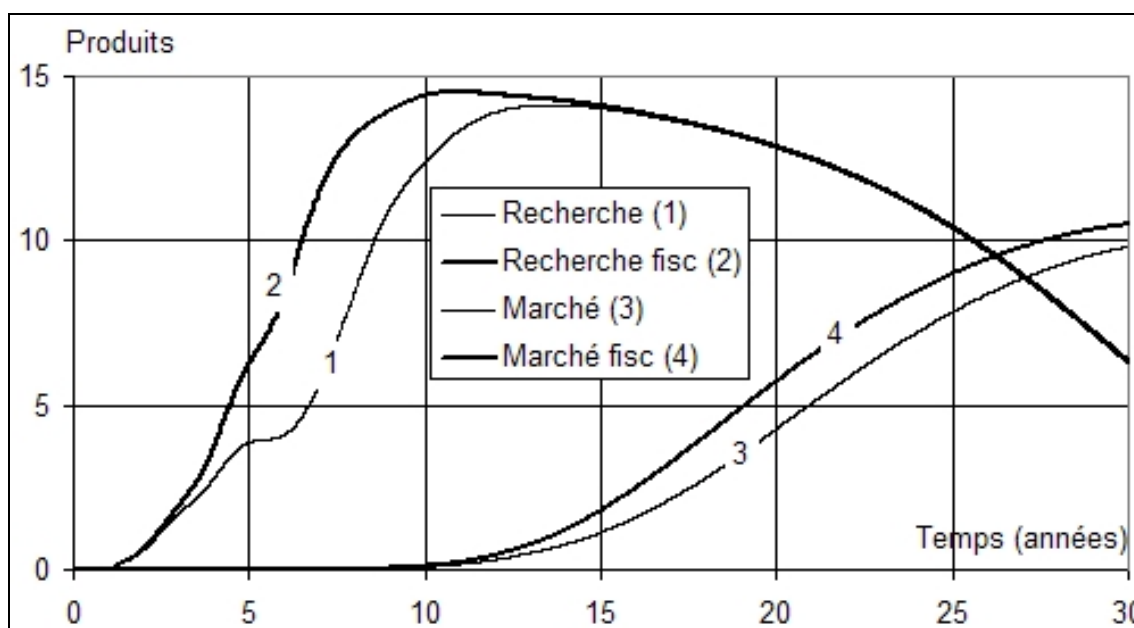


Figure 30 – Évolution à long terme des produits de la firme selon l’existence ou non d’une politique de baisse des coûts de R-D par fiscalité

Pour conclure cette partie sur les politiques de financement des firmes, nous voyons que le financement direct, pour le capital initial ou pour le financement de l’expansion de la firme, crée des opportunités en permettant la survie des firmes lors du perfectionnement de la technologie et de la phase antérieure aux collaborations. Les politiques fiscales

permettent quant à elles de réduire les coûts de R-D, mais le niveau de R-D atteint (à travers le nombre de collaborations) n'est pas grandement modifié : le soutien fiscal sert dans notre modèle à financer de la R-D qui aurait été effectuée de toute façon. Ceci est dû à l'hypothèse de la limite voulue et souhaitée de la taille de la firme par les managers. Cependant, la politique fiscale permet d'accélérer les projets. La Figure 30 montre ainsi une avance de l'entrée des produits dans le pipeline (courbes « Recherche ») ou sur le marché (courbes « Marché ») de presque 2 ans à certains moments.

5.3 Les politiques de financement d'infrastructure

Financer les infrastructures d'information

Nous avons dans notre modèle pris en compte un certain nombre de paramètres liés au temps. En effet, aucune action, mesure ou décision ne peut être immédiate. Toutes les initiatives sur la diffusion de l'information peuvent alors avoir un impact positif sur la dynamique. Nous avons par exemple remarqué que, dans le cas de référence, notre modèle laissait 1,4 année à la firme pour trouver des collaborateurs. Ce temps est très court et favoriser l'accès à l'information pour les investisseurs-collaborateurs a naturellement un grand intérêt pour la survie de la firme. Un aspect que nous n'avons pas évoqué dans l'évaluation des politiques est l'information sur les marchés financiers. En faisant passer le « temps pour prendre en compte les collaborations » de 0,25 à 0,1 année et le « temps pour prendre en compte les changements de création de valeur » de 0,5 à 0,2 année, l'attractivité de la firme vis-à-vis des investisseurs est améliorée ce qui provoque une levée de fonds supérieure de 1,7 million \$ (voir la Figure 31). L'impact du temps de diffusion de l'information n'est donc pas négligeable.

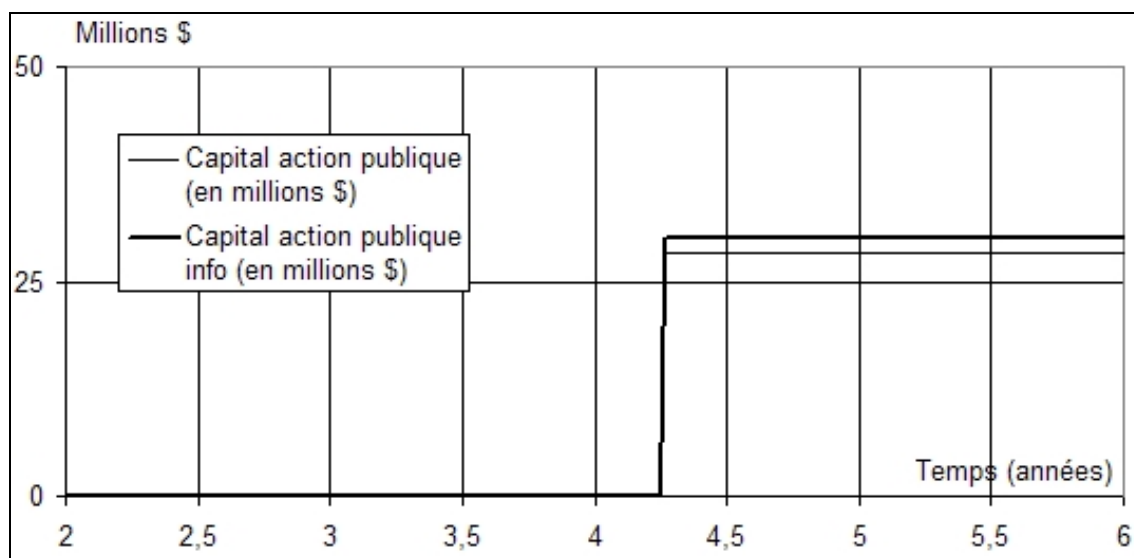


Figure 31 – Première levée de fonds de la firme sur les marchés publics selon l'existence ou non d'une politique de diffusion de l'information

Le gouvernement canadien finance et organise des infrastructures communiquant les possibilités de financements et d'investissement (Partenaires pour l'Investissement au Canada), sur la réglementation (Bureau Virtuel de la Réglementation de la Biotechnologie)

ou sur les technologies (Programme d'Aide à la Recherche Industrielle). Ces politiques interviennent donc sur des aspects d'information très variés. Des extensions du modèle sont ici nécessaires pour examiner les mécanismes des politiques. Nous préférons nous concentrer sur l'information communiquée via les réseaux de collaboration financés par les politiques publiques.

Financer les infrastructures de réseaux et de collaborations

De nombreuses initiatives gouvernementales soutiennent les réseaux de collaborations. Ici encore, la particularité de chaque politique nécessiterait des extensions du modèle. Les collaborations organisées sur certains domaines ciblés, comme dans les Réseaux de Centres d'Excellence, peuvent être considérées comme des objets d'études autonomes. Néanmoins, des répercussions sur les entreprises pourraient être proposées en considérant les objectifs des politiques. Supposons par exemple qu'une entreprise se crée à partir d'une collaboration avec des universités. L'impact sur la firme peut se situer sur le temps pour recruter du personnel qui sera réduit du fait de la proximité avec les étudiants de l'université, et du niveau d'expérience si les étudiants travaillaient sur un domaine proche de la technologie développée. Nous simulons donc dans le cas du perfectionnement de la technologie l'impact de la diminution du temps de recrutement de 0,25 à 0,1 année (« temps recrutement ») puis l'impact de l'expérience des recrutés passant de 0,25 à 0,5 essais (« exp recrutement »).¹⁰

Il apparaît que réduire le temps de recrutement permet d'atteindre un niveau de perfectionnement supérieur plus rapidement, que nous présentons en Figure 32 à travers la mesure de la performance par les investisseurs-collaborateurs et l'intérêt de ces derniers. Cet avantage est assez faible, mais pourrait être intéressant dans certains cas. Cependant, recruter plus vite veut dire aussi dépenser plus vite en salaires des chercheurs, ce qui pourrait réduire inutilement les fonds initiaux à cause des décisions de recrutement hâtives. Ces décisions pourraient ne pas nettement améliorer les performances de la technologie alors qu'elles feraient prendre des risques financiers à la firme.

En revanche, le recrutement de chercheurs plus expérimentés permet par des liens étroits entre les activités de l'université et la technologie de la firme permet logiquement, sans changer le taux de recrutement, d'acquérir une expertise plus rapidement. Ceci conduit à une meilleure performance de la technologie comme l'illustre la Figure 33. D'après nos hypothèses de référence, ce recrutement particulier permet d'intéresser les collaborateurs de l'ordre de 5 mois en avance par rapport au cas de référence (le niveau de l'intérêt pour les investisseurs-collaborateurs doit alors être 1). Notons aussi que sur les dynamiques de court terme ou de long terme, le recrutement de personnels plus expérimentés dans la technologie favorise logiquement l'apprentissage et l'absorption de connaissances par l'effet cyclique « expérience-apprentissage ». Une politique permettant ce recrutement augmente donc les chances de succès de la firme, notamment car elle n'influe pas sur le taux d'investissement (en dollars) mais sur la qualité de l'investissement.

¹⁰ Pour plus de détails sur ces variables, le modèle de Grossmann (2003) et Farcy (2008) en présente les caractéristiques.

D'autres études sur les collaborations entre firmes de biotechnologie et grandes multinationales pourraient être présentées. Par exemple, une meilleure proximité entre firmes et investisseurs-collaborateurs potentiels permettrait de réduire le temps de report des succès des essais pendant le perfectionnement de la technologie, ou réduire le temps nécessaire pour percevoir les changements d'attractivité de la firme. Ces éléments conduiraient encore à augmenter les chances de survie en réduisant le temps entre décisions ou changements d'une part et perception des effets d'autre part.

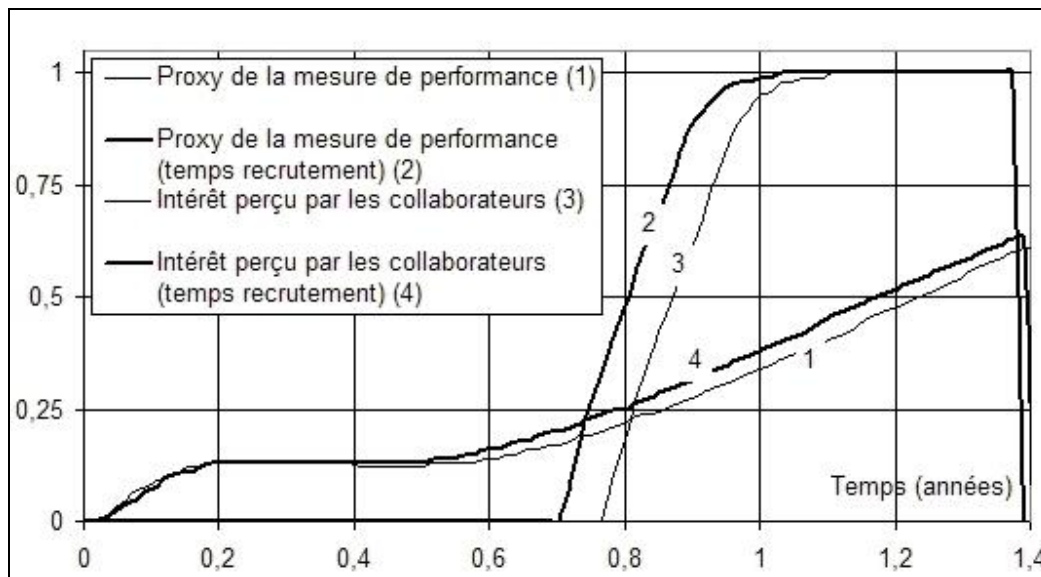


Figure 32 – Évolution à court terme de la performance technologique mesurée et de l'intérêt de la firme selon le temps de recrutement

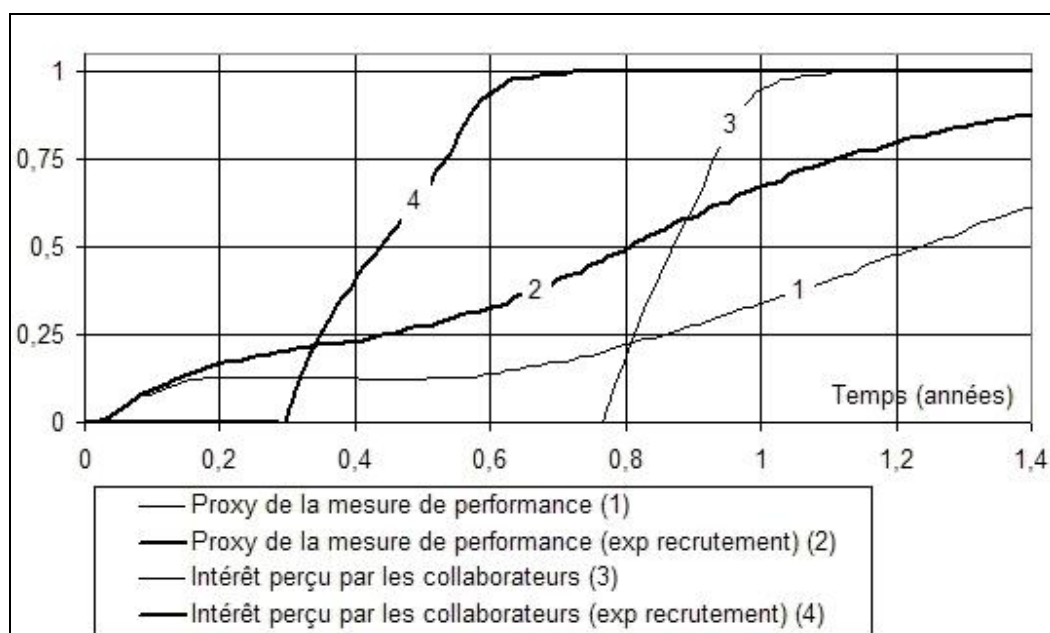


Figure 33 – Évolution à court terme de la performance technologique mesurée et de l'intérêt de la firme selon le niveau d'expertise dans la technologie des recrutés.

Au niveau de l'expérience, les coûts d'absorption de connaissances peuvent être réduits et la fraction des connaissances absorbables peut être augmentée, si la firme et ses sources externes de connaissances sont proches de façons spatiale et technologique. Tous ces éléments sont impliqués dans des politiques de développement de réseaux et de collaboration.

Importance des politiques de régulation

Nous achevons ce tour d'horizon de l'évaluation générale des politiques publiques par les politiques de régulation. Il ne s'agit pas de politiques de financement de la recherche publique ni d'aide au financement des entreprises. Néanmoins, ces politiques peuvent induire de fortes conséquences financières. Prenons par exemple le cas de la réglementation des produits par les ministères. Dans notre modèle, la réglementation peut conduire à un changement du taux de réussite de la phase préclinique et de la phase de réglementation dans le processus de l'industrie pharmaceutique.

Nous simulons donc deux politiques de régulation. La première fait passer le taux de réussite de la phase préclinique en pharmaceutique de 0,75 à 0,5 (« préclinique renforcée »). La deuxième fait passer le taux de réussite de la phase de régulation de 0,85 à 0,5 (« régulation renforcée »). Il se déduit naturellement que des politiques plus strictes de régulation vont conduire à une baisse des revenus tirés des primes de passage entre les phases du développement de produits ainsi que des royautés sur le marché. En effet une politique plus stricte va diminuer le nombre de produits dans le pipeline et conséquemment sur le marché. Sur le long terme, la valeur actuelle des flux financiers de la firme est donc grandement réduite. En ce qui concerne la valeur intangible de la firme, la valeur actuelle du pipeline est également bien réduite (Figure 34). Ceci peut induire des levées de fonds

plus faibles sur les marchés publics, du fait de résultats tangibles et intangibles estimés plus faibles (Figure 35).

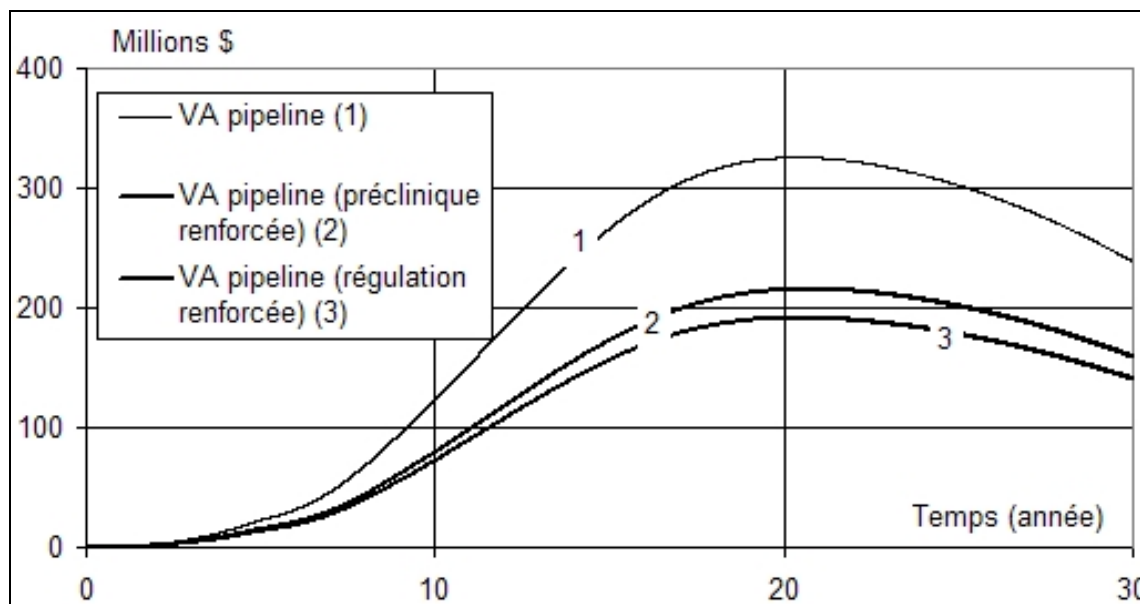


Figure 34 – Évolution à long terme de la valeur actuelle du pipeline de la firme selon le niveau de la politique de renforcement des réglementations.

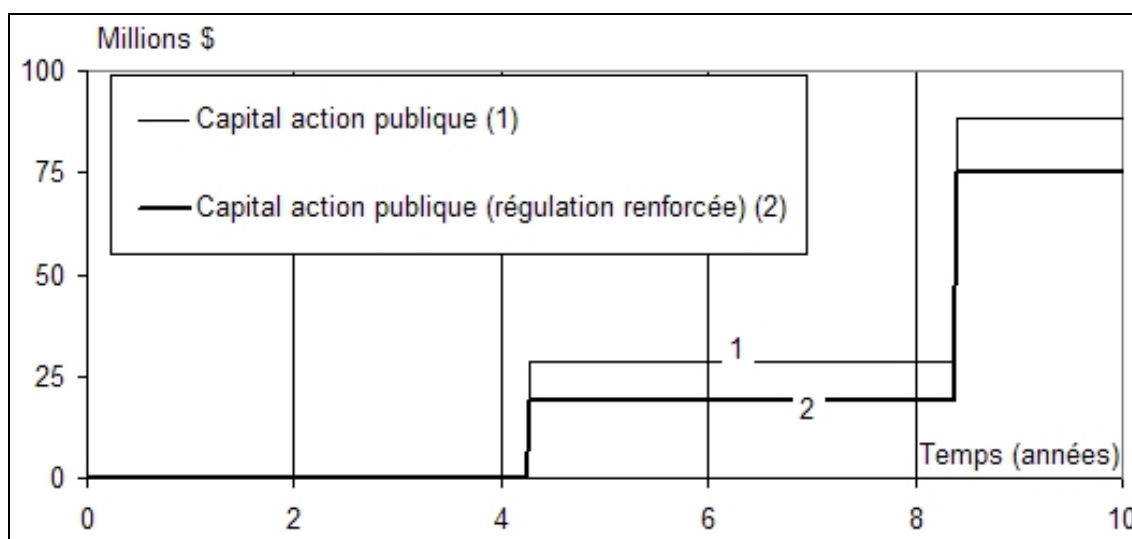


Figure 35 – Levée de fonds de la firme sur les marchés publics selon le niveau la politique de renforcement des réglementations.

D'autres études pourraient porter sur le temps du brevet. Allonger la durée du brevet permet de garantir des revenus sur une plus grande période, ce qui fait augmenter la valeur actuelle du pipeline. Nous pourrions également évoquer la régulation de prix des médicaments qui limiteront les revenus.

Les enseignements de l'évaluation

Nous avons réalisé une première analyse des politiques. Cette analyse a permis d'identifier des impacts de court terme et long terme. En recherche fondamentale, nous avons vu que répartir le financement de la recherche en biotechnologie sur plus de laboratoires permet à court terme d'accélérer le processus de découverte en multipliant les opportunités technologiques. Il permet à long terme d'augmenter le nombre d'inventions, puis le nombre de produits sur le marché en fin de processus. Mais des effets négatifs par la baisse de financement individuel pour chaque laboratoire exigent tout de même de cibler les financements sur des technologies ou des investissements particuliers. Ainsi, la politique de répartition du financement est surtout nuancée par la stratégie technologique établie par le Canada. L'utilisation potentielle de critères de sélection, comme la qualité des résultats, par les organismes subventionnaires peut alors être fautive, car les laboratoires ne se trouvent pas tous au même endroit dans leur processus d'expérience. L'arbitrage entre multiplication d'opportunités technologiques et développement d'une stratégie technologique précise nécessite donc une bonne coordination des politiques publiques.

En ce qui concerne les firmes, les politiques consistant à augmenter le volume de capital-risque disponible sont intéressantes, mais ne doivent pas tendre à augmenter le financement par firme, mais à mieux répartir le financement et surtout à soutenir un financement par étapes. En effet, un financement trop rapide et important induit une dilution de l'expérience des fondateurs vers les chercheurs recrutés, mettant en péril le processus pour intéresser les investisseurs-collaborateurs. Les fonds publics de capital-risque ont ainsi un véritable travail d'étude à réaliser sur les firmes afin de mieux accompagner la naissance de ces firmes.

Les financements directs par subvention sont coûteux en étude des dossiers. Mais ils sont intéressants, voire essentiels, pendant la phase d'expansion de la firme, si les collaborateurs ne veulent pas investir en dehors des collaborations en elles-mêmes. Ils permettent alors de créer de nouvelles opportunités en termes de firmes puis de produits sur le marché. Dans ce cas, l'État peut se retrouver financièrement s'il avait fourni un prêt, car les firmes ont de meilleures possibilités de remboursement avec les revenus de collaborations. Ce type de politique pourrait s'accompagner d'une aide d'ordre stratégique au développement de collaborations afin de renforcer la firme dans son expansion.

Les politiques fiscales semblent ne pas affecter le niveau de R-D entrepris, car les firmes limitent volontairement leur taille dans certains processus. En revanche, elles permettent d'accélérer les projets et l'arrivée des produits selon nos simulations. Ce sont également de bonnes incitations pour les capitaux-risqueurs et les collaborations. Ainsi si les marchés publics envers les firmes canadiennes de biotechnologie ne se développent pas plus, les politiques fiscales demeurent des éléments essentiels de la stratégie générale canadienne en biotechnologie.

Enfin, toute politique de diffusion de l'information peut être intéressante voir cruciale. En particulier, le financement d'infrastructures de réseaux peut accélérer l'atteinte d'une performance technologique. Un avantage majeur pour les entreprises réside dans la possibilité de recrutement de personnel plus expérimenté dans la technologie développée par la firme, facilitant ainsi sa survie à la suite d'un processus dynamique. Dans ce cas, les

politiques publiques n'influent plus sur la quantité des investissements des firmes, mais sur la qualité des investissements. Ainsi, un arbitrage, entre d'une part répartition de financement pour augmenter les opportunités et d'autre part stratégie technologique, doit être au cœur de la politique de financement d'infrastructure de réseau. Les réseaux de centres d'excellence semblent être de bonnes approches en la matière.

6. Discussion et conclusion

6.1 Notre apport

Partant des problématiques fondamentales du financement de l'innovation, l'implication de l'État nous apparaît importante pour pallier certaines contraintes financières des firmes de biotechnologie ou pour tenter d'atteindre un niveau de R-D socialement optimal. Concevoir une stratégie de développement de la biotechnologie n'est toutefois pas aisé. Nous avons vu qu'au Canada les interventions sont variées et chaque politique induit une certaine logique propre. L'impact des politiques sur les dynamiques d'innovation et de financement est complexe, mais évaluer ces politiques est d'un grand intérêt afin d'optimiser les actions à mener.

Nous avons alors proposé que les politiques puissent être analysées de façon originale en examinant davantage leurs aspects dynamiques. C'est pourquoi nous avons développé dans cet article l'objectif d'analyser les dynamiques d'innovation et de financement en biotechnologie à travers la construction d'un modèle dynamique. Notre modèle repose sur les principes évolutionnistes, et est construit sous une formalisation en dynamique des systèmes. Il intègre les dynamiques d'innovation et du financement en biotechnologie, de la recherche fondamentale jusqu'à la mise sur le marché des produits. L'intérêt est de pouvoir discuter les dynamiques aussi bien sur le court terme que sur le long terme, aussi bien de courte distance, que de longue distance, aussi bien sur la recherche fondamentale publique, que sur la recherche appliquée privée.

Concrètement nous avons adapté et modifié le modèle de la recherche appliquée et des firmes de Grossmann (2003). En particulier nous l'avons extrapolé à la recherche fondamentale. Nous avons créé une typologie du système d'innovation. Nous avons proposé un modèle probabiliste original pour traduire en termes d'inventions la réussite des activités de recherche fondamentale. L'intégration des modèles de recherche appliquée et de recherche fondamentale nous a également conduits à proposer et concevoir un passage entre ces deux éléments. La collaboration des firmes de biotechnologie avec de plus grandes firmes a également été modifiée par rapport au modèle de Grossmann (2003).

Finalement, notre objectif est globalement atteint, car le modèle nous a permis d'identifier certaines dynamiques de court et de long terme en biotechnologie. Il ne nous a pas été permis d'exposer toutes les dynamiques dans cet article, mais l'échantillon que nous avons proposé semble montrer que cet outil d'analyse permet de bien retracer les dynamiques en biotechnologie. Les résultats des dynamiques sont cohérents. Par exemple, les laboratoires et les firmes acquièrent de l'expérience, ce qui détermine ensuite leur propre performance. Cette performance dans le cas des firmes est déterminante pour attirer des investisseurs. Les ordres de grandeurs sont aussi raisonnables. Les dynamiques de notre cas de référence peuvent donc servir de référence pour des études ultérieures. En effet,

comme nous l'avons vu en introduction, la perspective ultime est l'analyse des politiques de financement en biotechnologie.

Sur le plan des politiques, il nous est ainsi apparu que les politiques de financement ne dispensent pas d'une vraie politique stratégique technologique, mais au contraire que les impacts les plus positifs sont issus de la bonne coordination des différentes politiques. Par exemple, en recherche fondamentale, nous avons insisté sur l'arbitrage entre multiplication d'opportunités technologiques et le développement d'une stratégie technologique. L'utilisation potentielle de critères de sélection, comme la qualité des résultats, par les organismes subventionnaires peut aussi être fautive si on ne considère par l'histoire des laboratoires et leur position dans leur processus d'expérience.

En ce qui concerne les firmes, l'accent doit surtout être mis sur le contrôle par étapes du financement en capital-risque et non seulement sur la répartition d'un financement total plus important. Les fonds publics de capital-risque ont ainsi un véritable travail d'étude à réaliser sur les firmes afin de mieux les accompagner financièrement. Les financements par subvention sont coûteux en étude des dossiers. Mais ils sont importants pour la survie de la firme pendant la phase d'expansion, surtout s'ils s'accompagnent d'une aide d'ordre stratégique pour négocier des collaborations. Les politiques fiscales semblent ne pas affecter le niveau de R-D entrepris. En revanche, elles accélèrent le développement des produits, car ce sont de bonnes incitations pour les capitaux-risqueurs et les collaborateurs, surtout en l'absence des marchés publics.

Enfin, le financement d'infrastructure est vraiment la combinaison d'une stratégie de financement et d'une stratégie technologique. Ces politiques publiques n'influent pas sur la quantité des investissements, mais plutôt sur la qualité des investissements. Les réseaux de centres d'excellence semblent être de bonnes approches en la matière.

6.2 Perspectives de recherche

L'outil et la méthodologie que nous proposons sont prometteurs. Il faut néanmoins bien accepter les limites de la méthodologie. Les conclusions apportées sont issues des hypothèses de modélisation. Par conséquent, une perspective de recherche est de repréciser les hypothèses afin d'évaluer plus précisément les politiques. Il faudrait sélectionner au préalable des politiques, développer des hypothèses restreintes à ces politiques et ainsi les extensions du modèle autour de ces mécanismes. Ce travail exigerait la réalisation d'enquêtes autour de ces enjeux. Nous pourrions par exemple développer le modèle « comptable » de la firme afin de mieux évaluer les politiques fiscales. Mais le point délicat est surtout la traduction des activités de recherche en termes d'inventions. De cette traduction dépend la cohérence de l'intégration de la recherche fondamentale et appliquée. Une enquête auprès de laboratoires de recherche publics permettrait de repréciser les valeurs dans les relations et éclairer le modèle sur de nouveaux facteurs.

Un des points forts est également de viser le développement économique. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle nous voulions intégrer les dynamiques d'innovation et concevoir un système d'innovation complet. Cependant, les limites techniques du logiciel (limite en mémoire et en calcul) contraignent l'étendue de l'intégration des modèles sur un même programme informatique, ainsi que l'utilisation de vecteurs pour représenter différents agents d'une même catégorie comme les firmes. C'est pourquoi nous avons

limité les relations interindustrielles et les interactions entre la recherche publique et la recherche appliquée. Pour mieux évaluer les impacts sur le développement économique, il faudrait surpasser ces difficultés techniques et mieux rendre compte des différentes interactions entre les agents.

Si ces difficultés techniques sont surpassées, une perspective intéressante pourrait être la modélisation autour des enjeux de collaboration entre les centres de recherche publics et les firmes de biotechnologie. Mieux expliciter les collaborations recherche publique/firme dans le modèle impliquerait des extensions du modèle assez riches du point de vue de la firme et du point de vue des laboratoires.

Du point de vue de la firme, le modèle n'explique pas directement la collaboration recherche publique/firme, au même titre que la collaboration firme/firme. En effet, la collaboration recherche publique/firme n'influe pas directement sur le financement de la firme. Sa prise en compte impliquerait de différencier les autres sources d'information et de connaissances pour la firme. Il serait en effet tendancieux de particulariser les connaissances externes à celles issues des collaborations avec les universités sans prendre en compte les autres types de connaissances. Une enquête sur la manière dont les firmes de biotechnologie gèrent leurs connaissances externes et leurs sources de connaissances serait utile pour tracer les dynamiques en jeu. La collaboration université/firme induirait aussi des extensions particulières à travers les nouvelles opportunités de recrutement en personnel qualifié. Voir l'influence de ces opportunités signifierait ici encore expliciter les pools de recrutement qui sont variés et nécessiteraient une étude approfondie.

Du point de vue de l'université, la prise en compte des collaborations recherche publique/firme impliquerait des extensions sur les différentes sources de connaissances et sur les différents types d'activités de R-D. Mais les ressources financières seraient également touchées à travers les revenus de prestations offertes par l'université ou les centres de recherche.

Notons que le passage entre l'université et la firme pourrait être explicité dans le modèle, l'hypothèse actuelle étant simplement que les inventions vont se concrétiser en firmes. Une extension importante du modèle consisterait alors à expliciter les différentes créations des firmes, en particulier via les relations de collaborations, et non pas seulement prendre en compte le «chercheur entrepreneur». Ici encore, une enquête et une étude approfondie sont nécessaires pour considérer tout cet aspect riche et complexe. La création des firmes au sein de la recherche publique dépasse le cadre strict du financement que nous nous étions fixé, en ouvrant davantage le débat sur les politiques favorisant l'entrepreneurship dans la recherche publique.

Références

- AGHION, P., et BOLTON, P. (1992). An Incomplete Contracts Approach to Financial Contracting. *The Review of Economic Studies*, 59(3), 473-494.
- ALLEN, K., et PERCIVAL, J. (2000). Financing strategies and venture capital. In G. S. D. a. P. J. H. SCHOEMAKER (Ed.), *Wharton on Managing Emerging Technologies*.
- ARTHUR, W. B. (1999). Complexity and the economy. *Science*, 284, 107-109.
- BALDWIN, J. R., GAUDREAU, V., et GELLATLY, G. (2002). Financement de l'innovation dans les nouvelles petites entreprises : Nouveaux éléments probants provenant du Canada. *Statistics Canada*, N°11F0019MIF-190.
- BEAUDOIN, R., et ST-PIERRE, J. (1999). *Financement de l'innovation dans les PME: Une recension récente de la littérature: Développement économique Canada*.
- DAGENAIS, M., MOHNEN, P., et THERRIEN, P. (2004). Les firmes canadiennes répondent-elles aux incitations fiscales à la recherche-développement ? *L'actualité économique, Revue d'analyse économique*, 80(2-3).
- FORRESTER, J. W. (1961). *Industrial dynamics*. [Cambridge, Mass.]: M.I.T. Press.
- GOMPERS, P., et LERNER, J. (2004). *The venture capital cycle* (2e ed.). Boston: MIT press.
- GROSSMANN, M. (2003). *Entrepreneurship in biotechnology : managing for growth from start-up to initial public offering*. Heidelberg ; New York: Physica-Verlag.
- HACHE, J. (2005). *Les enjeux des biotechnologies : complexité et interactions*. Colombelles, [France]: Éditions EMS.
- HALL, B. H. (2002). The Financing of Research and Development. *Oxford Review of Economic Policy*, 18(1), 35-51.
- HALL, B. H., et VAN REENEN, J. (1999). How Effective are Fiscal Incentives for RetD ? *BNBER Working Paper*, N° 7098.
- HART, O. (2001). Financial Contracting. *Journal of economic Literature*, 39(4), 1079-1100.
- HART, O. (2001). Financial Contracting. *Journal of economic Literature*, 39(4), 1079-1100.
- HODGSON, G. M., et KNUDSEN, T. (2004). The firm as an interactor: firms as vehicles
- KWASNICKI, W., et KWASNICKA, H. (1992). Market, innovation, competition: An evolutionary model of industrial dynamics. *Journal of Economic Behavior et Organization*, 19(3), 343-368.
- LERNER, J., SHANE, H., et TSAI, A. (2003). Do equity financing cycles matter ? evidence from biotechnology alliances. *Journal of Financial Economics*, 67, 441-446.
- MALERBA, F., NELSON, R. R., ORSENIGO, L., et WINTER, S. G. (1999). 'History-friendly' models of industry evolution: the computer industry. *Ind Corp Change*, 8(1), 3-40.

- MALERBA, F., NELSON, R. R., ORSENIGO, L., et WINTER, S. G. (2001). Competition and industrial policies in a 'history friendly' model of the evolution of the computer industry. *International Journal of Industrial Organization*, 19(5), 635-664.
- MALERBA, F., et ORSENIGO, L. (2001). Towards a history-friendly model of innovation, market structure and regulation in the dynamics of the pharmaceutical industry: the age of random screening. *CESPRI working paper*.
- MALERBA, F., et ORSENIGO, L. (2002). Innovation and market structure in the dynamics of the pharmaceutical industry and biotechnology: towards a history-friendly model. *Ind Corp Change*, 11(4), 667-703.
- MANTELL, E. H. (2005). An ergodic theory of venture capital solicitation. *International Review of Economics et Finance*, 14(2), 149-168.
- MARTIN, R., CHRISTIAN, B., KLAGGE, B., et SUNLEY, P. (2005). Spatial proximity effects and regional equity gaps in the venture capital market: evidence from Germany and the United Kingdom. *Environnement and Planning A*, 37, 1207-1231.
- MCGLUE, D. (2002). The funding of venture capital in Europe: issues for public policy. *Venture Capital - An international journal of entrepreneurial finance*, 4(1), 45 - 58.
- METCALFE, J. S. (2001). Institutions and progress. *Industrial and Corporate Change*, 10(3), 561-586.
- MODIGLIANI, F., et MILLER, M. H. (1958). The Cost of Capital, Corporation Finance and the Theory of Investment. *The American Economic Review*, 48(3), 261-297.
- MODIGLIANI, F., et MILLER, M. H. (1963). Corporate Income Taxes and the Cost of Capital: A Correction. *The American Economic Review*, 53(3), 433-443.
- MURRAY, G. C., et MARRIOTT, R. (1998). Why has the investment performance of technology-specialist, European venture capital funds been so poor? *Research Policy*, 27(9), 947-976.
- NELSON, R. R. (1959). The simple economics of basic scientific research. *Journal of finance*, 49(3), 1015-1040.
- NELSON, R. R., et WINTER, S. G. (1982). *An evolutionary theory of economic change*. Cambridge, MA.: Belknap Press of Harvard University Press.
- NIOSI, J., et TEUBAL, M. (2005, June). *Creation of public policy for innovation: Venture capital policies in Canada and Israel*. Paper presented at the DRUID tenth annual conference.
- NOSELLA, A., PETRONI, G., et VERBANO, C. (2005). Characteristics of the Italian biotechnology industry and new business models: The initial results of an empirical study. *Technovation*, 25(8), 841-855.
- ROBBINS-ROTH, C. (2001). *Le business des biotechnologies : [révolution biotech, business models, investissements et profits]*. Paris: Dunod.

- RZAKHANOV, Z. (2004). Innovation, product development and market value: evidence from the biotechnology industry. *Economics of Innovation and New Technology*, 13(8), 747 - 760.
- ST-PIERRE, J., et BEAUDOIN, R. (2003). *Les décisions d'investissement dans les PME: comment évaluer la rentabilité financière*. Sainte-Foy: Presses de l'Université du Québec.
- STERMAN, J. D. (2000). *Business dynamics : systems thinking and modeling for a complex world*. Boston: Irwin/McGraw-Hill.
- STERMAN, J. D. (2001). System dynamics modeling: Tools for learning in a complex world. *California Management Review*, 43(4), 8-+.
- VAN MOORSEL, D., CRANFIELD, J. A. L., et SPARLING, D. (2006). Facteurs influant sur l'innovation en biotechnologie au Canada: analyse des données de l'Enquête sur l'utilisation et le développement de la biotechnologie de 2001. *Statistics Canada*, 21-601-MIF(n°078).
- WARNER, S. (2004). Biotech financing freed. *The Scientist*, 18(2), 42-43.
- WOICESHYN, J., ET HARTEL, D. (1996). Predicting value-added progress of biotechnology firms: an exploratory study. *Journal of Engineering and Technology Management - JET-M*, 13(2), 163-187.
- YILDIZOGLU, M. (2002). Competing R and D strategies in an evolutionary industry model. *Computational Economics*, 19(1), 51-65.

Titres parus

- 08-03 **Hanel, Petr**, Productivity and Innovation: An Overview of the Issues
- 08-02 **Hanel, Petr**, Skills Required for Innovation : A Review of the Literature
- 08-01 Monchatre, Sylvie, «L'approche par compétence», technologie de rationalisation pédagogique. Le cas de la formation professionnelle au Québec
- 07-07 **Gentzoglani, Anastasios**, «Technological and Regulatory Changes in the Financial Industry in the MENA Region: Competitiveness and Growth
- 07-06 **Larivière, Vincent**, Alesia Zuccala et **Éric Archambault**, «The Declining Scientific Impact of Theses : Implications for Electronic Thesis and Dissertation Repositories and Graduate Studies»
- 07-05 **Doray, Pierre**, Lucia **Mason** et Paul Bélanger, «L'art de vaincre l'adversité : le retour aux études des adultes dans l'enseignement technique»
- 07-04 **Chenard, Pierre**, **Éric Francoeur** et **Pierre Doray**, «Les transitions scolaires dans l'enseignement postsecondaire : formes et impacts sur les carrières étudiantes»
- 07-03 **Proulx, Serge**, **Julien Rueff** et **Nicolas Lecomte**, «Une appropriation communautaire des technologies numériques de l'information»
- 07-02 **Gentzoglani, Anastassios**, «International Competitiveness in the Telecommunications and ICT Sectors : A Cross Country comparison»
- 07-01 **Gentzoglani, Anastassios**, «Innovation, réglementation et choix organisationnels au niveau du marché électrique : le cas des pays en Afrique»
- 06-06 **Prud'homme, Julien**, «Histoire de l'école d'orthophonie et d'audiologie de l'Université de Montréal, 1956-2002. Des luttes professionnelles à l'épanouissement disciplinaire»
- 06-05 **Banik, Marc**, «Regulating the Risks of Dietary Supplements: An Economic analysis of Qualified Health Claims and Efficacy Statement Disclaimers»
- 06-04 **Leonard, Robert**, «From Chess to Catastrophe: Psychology, Politics and the Genesis of von Neumann's Game Theory»
- 06-03 **Leonard, Robert**, «From Austro-liberalism to Anschluss: Oskar Morgenstern and the Viennese Economists in the 1930's»
- 06-02 **Banik, Marc**, «Reappraising the Efficiency of Probabilistic Patents and Prescriptions for Patent Policy Reform»
- 06-01 **Proulx, Serge**, **Nicolas Lecomte** et **Julien Rueff** «Portrait d'une organisation québécoise orientée vers l'appropriation sociale des technologies de l'information et de la communication en milieu communautaire»
- 05-06 **Castonguay, Stéphane**, «La dynamique du changement scientifique en contexte d'application : la fondamentalisation de l'entomologie économique aux États-Unis au 20^e siècle»
- 05-05 **Larivière, Vincent**, **Éric Archambault**, **Yves Gingras** et **Étienne Vignola-Gagné**, «The Place of Serials in Referencing Practices: Comparing Natural Sciences and Engineering with Social Sciences and Humanities»
- 05-04 **Gemme, Brigitte** et **Yves Gingras**, «La formation à la recherche dans le cadre des collaborations université-milieu : analyse comparative des différents modes d'encadrement»
- 05-03 **Doray, Pierre** et **Christian Maroy**, «Le travail de rapprochements entre économie et éducation : analyse de quatre expériences de formation en alternance»

www.cirst.uqam.ca

CIRST

Centre interuniversitaire de recherche
sur la science et la technologie

Le CIRST est, au Canada, le principal regroupement de chercheurs dont les travaux sont consacrés à l'étude des multiples dimensions de l'activité scientifique et technologique. La production régulière de travaux de recherche ainsi que la formation de nouveaux chercheurs contribuent à éclairer les débats et à informer les décideurs sur les enjeux actuels des sciences et des technologies. Ces recherches s'ordonnent autour de trois grands axes : l'analyse du développement scientifique et technologique, l'analyse socioéconomique et la gestion des technologies et enfin, l'analyse sociopolitique des usages et des incidences des technologies.



Créé en 1986, le CIRST est reconnu par trois universités : l'Université du Québec à Montréal, l'Université de Montréal et l'Université de Sherbrooke. Il rassemble une quarantaine de chercheurs en provenance d'une douzaine d'institutions et des disciplines suivantes : histoire, sociologie, science politique, philosophie, sciences économiques, sciences administratives et communications. Le CIRST fournit un milieu de formation par la recherche à de nombreux étudiants aux cycles supérieurs dans les domaines de recherche de ses membres.

