

# Structure de la collaboration d'invention – le cas des inventeurs canadiens de nanotechnologie

Catherine Beaudry\* et Andrea Schiffauerova

École Polytechnique de Montréal

\*Département de mathématiques et de génie industriel, École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, succursale Centre-ville, Montréal (Québec) Canada, H3C 3A7, tél. +1 (514) 340-4711 poste 3357, Téléc. : +1 (514) 340-4173, courriel : [catherine.beaudry@polymtl.ca](mailto:catherine.beaudry@polymtl.ca)

## Résumé

La nanotechnologie a connu récemment une augmentation fulgurante du nombre d'innovations, d'articles scientifiques et de brevets dans la plupart des pays industrialisés. Le Canada n'échappe pas à cette tendance. Malgré son vaste territoire, le Canada est un petit pays au point de vue de sa population. La proximité des États-Unis fait en sorte que la collaboration de recherche se fait donc de part et d'autre de la frontière dans une proportion non négligeable. Du fait de cette situation, plusieurs questions se posent. Existe-t-il un réseau canadien de chercheurs et d'inventeurs de taille suffisante pour maintenir et développer l'innovation au Canada et qui soit dans une certaine mesure autosuffisant? Et si la production d'innovation en nanotechnologie s'accroît au fil du temps au Canada, qu'en est-il de l'organisation de la recherche appliquée dans ce domaine de pointe? Un réseau d'innovation très fragmenté signifierait probablement que les inventeurs canadiens travaillent avec des équipes étrangères plutôt qu'entre équipes canadiennes, et donc œuvrant en silo les uns par rapport aux autres au sein d'un même pays. Il est aussi possible que la conséquence de cette fragmentation soit la création de niches d'expertises très poussées qui ne bénéficient pas des fertilisations croisées entre elles. L'objectif de cet article est donc d'évaluer les caractéristiques des réseaux de collaboration et leur structure afin d'évaluer l'importance de la création de connaissance et d'innovation en nanotechnologie au Canada. Cet article étudie l'évolution des réseaux sociaux de co-invention des inventeurs canadiens de nanotechnologie à l'aide des données de brevets de l'USPTO. Deux grandes catégories d'indicateurs sont utilisées pour évaluer l'évolution des caractéristiques de la collaboration et des propriétés des réseaux pour la période 1989-2004, sous forme de moyenne mobile sur 5 ans.

Nous montrons que les inventeurs canadiens de nanotechnologie ont une tendance à établir des liens de collaboration avec un nombre de plus en plus élevé de partenaires et de collaborer avec ceux-ci de façon plus intensive que par le passé. Cette collaboration répétée avec le même partenaire indique la présence de confiance mutuelle et la création de relations de coopération de recherche plus étroites. Nous montrons que les inventeurs les plus prolifiques ne sont pas les scientifiques dont les articles sont les plus cités, il existe donc une division du travail claire entre la recherche fondamentale et son application. La collaboration avec ces inventeurs prolifiques augmente, en proportion des brevets octroyés, elle diminue toutefois. Ce qui est donc indicatif d'une certaine dispersion de l'innovation à travers le réseau et de l'émergence de nouvelles spécialisations. Cette dispersion de l'innovation est accompagnée d'une certaine fragmentation du réseau canadien d'inventeurs de nanotechnologie. Cette fragmentation accrue du réseau est probablement due à l'avènement de la multiplication des spécialisations en nanotechnologie. Nous voyons donc apparaître des branches spécialistes qui se dissocient tranquillement du noyau central et se regroupent en composantes plus petites. Bien que nous observions une augmentation de la fragmentation, les réseaux deviennent en revanche plus denses et cohésifs. Les inventeurs sont donc interconnectés entre eux et la probabilité des échanges de connaissance améliorée.

**Mots clés:** brevets, co-invention, réseaux de connaissance, réseaux sociaux, nanotechnologie

# Structure de la collaboration d'invention – le cas des inventeurs canadiens de nanotechnologie

## Résumé

La nanotechnologie a connu récemment une augmentation fulgurante du nombre d'innovations, d'articles scientifiques et de brevets dans la plupart des pays industrialisés. Le Canada n'échappe pas à cette tendance. Malgré son vaste territoire, le Canada est un petit pays au point de vue de sa population. La proximité des États-Unis fait en sorte que la collaboration de recherche se fait donc de part et d'autre de la frontière dans une proportion non négligeable. Du fait de cette situation, plusieurs questions se posent. Existe-t-il un réseau canadien de chercheurs et d'inventeurs de taille suffisante pour maintenir et développer l'innovation au Canada et qui soit dans une certaine mesure autosuffisant? Et si la production d'innovation en nanotechnologie s'accroît au fil du temps au Canada, qu'en est-il de l'organisation de la recherche appliquée dans ce domaine de pointe? Un réseau d'innovation très fragmenté signifierait probablement que les inventeurs canadiens travaillent avec des équipes étrangères plutôt qu'entre équipes canadiennes, et donc œuvrant en silo les uns par rapport aux autres au sein d'un même pays. Il est aussi possible que la conséquence de cette fragmentation soit la création de niches d'expertises très poussées qui ne bénéficient pas des fertilisations croisées entre elles. L'objectif de cet article est donc d'évaluer les caractéristiques des réseaux de collaboration et leur structure afin d'évaluer l'importance de la création de connaissance et d'innovation en nanotechnologie au Canada. Cet article étudie l'évolution des réseaux sociaux de co-invention des inventeurs canadiens de nanotechnologie à l'aide des données de brevets de l'USPTO. Deux grandes catégories d'indicateurs sont utilisées pour évaluer l'évolution des caractéristiques de la collaboration et des propriétés des réseaux pour la période 1989-2004, sous forme de moyenne mobile sur 5 ans.

Nous montrons que les inventeurs canadiens de nanotechnologie ont une tendance à établir des liens de collaboration avec un nombre de plus en plus élevé de partenaires et de collaborer avec ceux-ci de façon plus intensive que par le passé. Cette collaboration répétée avec le même partenaire indique la présence de confiance mutuelle et la création de relations de coopération de recherche plus étroites. Nous montrons que les inventeurs les plus prolifiques ne sont pas les scientifiques dont les articles sont les plus cités, il existe donc une division du travail claire entre la recherche fondamentale et son application. La collaboration avec ces inventeurs prolifiques augmente, en proportion des brevets octroyés, elle diminue toutefois. Ce qui est donc indicatif d'une certaine dispersion de l'innovation à travers le réseau et de l'émergence de nouvelles spécialisations. Cette dispersion de l'innovation est accompagnée d'une certaine fragmentation du réseau canadien d'inventeurs de nanotechnologie. Cette fragmentation accrue du réseau est probablement due à l'avènement de la multiplication des spécialisations en nanotechnologie. Nous voyons donc apparaître des branches spécialistes qui se dissocient tranquillement du noyau central et se regroupent en composantes plus petites. Bien que nous observions une augmentation de la fragmentation, les réseaux deviennent en revanche plus denses et cohésifs. Les inventeurs sont donc interconnectés entre eux et la probabilité des échanges de connaissance améliorée.

**Mots clés:** brevets, co-invention, réseaux de connaissance, réseaux sociaux, nanotechnologie

## 1. INTRODUCTION

Comme alternative aux trois endroits typiques où est générée l'innovation (institutions à but non lucratif, entreprises et inventeurs), Allen (1983) a élaboré le concept de l'invention collective. Le concept s'appuie sur l'échange et la libre circulation de la connaissance et de l'information au sein de groupes d'agents socialement liés (mais souvent aussi compétiteurs) plutôt que sur l'effort d'invention d'entreprises ou d'individus particuliers. Le libre partage d'information résulte alors en une accumulation rapide de la connaissance et un taux élevé de développement des inventions. Pensons par exemple au vaste réseau d'échange de la connaissance entre ingénieurs de mini-usines compétitrices au sein de l'industrie de l'acier aux États-Unis (von Hippel, 1987; Shrader, 1991), au partage de la connaissance au sein de grappes industrielles de communication sans fil au Danemark (Dahl et Pedersen, 2004), ou à la très célèbre Silicon Valley avec sa culture de partage ouvert de la connaissance tel que décrit par Saxenian (1994).<sup>1</sup>

Le concept de l'invention collective convient à la description de la diffusion dynamique de la connaissance à travers divers réseaux. Le réseau d'innovateurs est un réseau interpersonnel d'individus qui collaborent et échangent de l'information dans le but de produire des innovations et de la connaissance scientifique. Ces inventeurs et scientifiques travaillent à l'université, dans des centres de recherche ou des départements de recherche-développement (R-D) industriels. L'analyse par réseaux sociaux a été utilisée par le passé pour analyser la façon dont ces innovateurs sont reliés. Au sein de la communauté scientifique qui étudie les réseaux d'innovation, il est généralement présumé que les inventeurs ayant travaillé sur au moins un article scientifique ou sur un brevet, demeureront en contact par la suite afin d'échanger d'autres informations ou partager des connaissances. Les documents de brevet et les données bibliométriques peuvent donc être exploités de façon à cartographier les relations sociales entre les inventeurs et ainsi construire les réseaux d'innovation.

De la même façon que la biotechnologie depuis les années 1980, la nanotechnologie a connu récemment une augmentation fulgurante du nombre d'innovations, d'articles scientifiques et de brevets dans la plupart des pays industrialisés (Zucker et Darby, 2005). Le Canada n'échappe pas à cette tendance. Malgré son vaste territoire, le Canada est un pays de taille modeste au point de vue de sa population (environ un dixième de celle de son voisin du sud). La proximité des États-Unis fait en sorte que la collaboration de recherche se fait donc

---

<sup>1</sup> D'autres exemples d'invention collective sont décrits par Lamoreaux et Sokoloff (1997).

de part et d'autre de la frontière dans une proportion non négligeable (environ 30 % de la collaboration). Du fait de cette situation, plusieurs questions se posent. Existe-t-il un réseau canadien de chercheurs et d'inventeurs de taille suffisante pour maintenir et développer l'innovation au Canada et qui soit dans une certaine mesure autosuffisant? Et si la production d'innovation en nanotechnologie s'accroît au fil du temps au Canada, qu'en est-il de l'organisation de la recherche appliquée dans ce domaine de pointe? Un réseau d'innovation très fragmenté signifierait probablement que les inventeurs canadiens travaillent avec des équipes étrangères plutôt qu'entre équipes canadiennes, et donc œuvrant en silo les uns par rapport aux autres au sein d'un même pays. Il est aussi possible que la conséquence de cette fragmentation soit la création de niches d'expertises très poussées qui ne bénéficient pas de fertilisations croisées (*spillovers*) entre elles.

L'objectif de cet article est donc d'évaluer les caractéristiques des réseaux de collaboration et leur structure afin d'évaluer l'importance de la création de connaissance et d'innovation en nanotechnologie au Canada. Pour ce faire, nous analyserons un certain nombre d'indicateurs sur le comportement de collaboration des inventeurs canadiens de nanotechnologie de même que des mesures sur les caractéristiques des réseaux de coopération. La suite de l'article est organisée de la façon suivante : la deuxième section fait la recension de la littérature pertinente et du cadre conceptuel de l'article, la troisième section présente les données utilisées et la méthodologie, la section 4 présente les résultats de l'analyse de la collaboration par paire d'inventeurs, la section 5 construit le réseau résultant de la collaboration entre tous les co-inventeurs et en analyse les caractéristiques inhérentes, finalement la section 6 discute les résultats et conclut.

## **2. LITTÉRATURE PERTINENTE**

Le réseau de scientifiques construit à partir des co-auteurs d'articles scientifiques est possiblement le réseau social le plus étendu ayant été étudié (Newman, 2001a). À notre connaissance, Newman est le premier à utiliser quatre bases de données d'articles scientifiques en physique, recherche biomédicale et informatique pour construire les réseaux de collaboration entre les scientifiques de chaque discipline afin d'en étudier les propriétés et de décrire leur structure. Newman (2001b et 2001d) explore un certain nombre de propriétés et mesures de réseaux non locaux. Par la suite, Newman (2001d) examine de façon empirique l'évolution des réseaux de collaboration scientifique en physique et en biologie. Breschi et Lissoni (2003 et 2004) et Balconi *et al.* (2004) construisent le réseau de collaboration des inventeurs italiens à l'aide de données sur les co-inventeurs de brevet de l'Office européen

des brevets (OEB). À l'aide d'un graphe bipartite des inventeurs et demandeurs de brevet, ils calculent des mesures de proximité sociale entre les brevets cités et citant. Cantner et Graf (2006) proposent de construire les réseaux d'innovateurs à partir des chevauchements technologiques, soit une mesure de ressemblance des domaines technologiques des scientifiques, de façon à décrire l'évolution du réseau d'innovateurs et de la mobilité scientifique à Jena en Allemagne. À l'aide de données sur les brevets, Singh (2005) déduit les liens de collaboration entre individus avec des graphes de proximité sociale. Bon nombre de chercheurs<sup>2</sup> ont adopté la co-invention comme outil approprié à la cartographie des relations sociales entre inventeurs et à la modélisation de leurs réseaux. En s'appuyant sur des entrevues avec les inventeurs, Fleming *et al.* (2006) montrent que les liens de co-invention diffèrent de façon significative de par leur intensité et capacité de transfert de l'information. Alors que certains liens s'effritent au fil des ans, d'autres en revanche demeurent actifs même lorsque la relation n'existe plus (n'est plus mesurable par la co-invention).

Les résultats mentionnés précédemment révèlent d'intéressantes propriétés des réseaux d'innovation. Les caractéristiques des structures de réseau diffèrent selon qu'ils incluent uniquement des chercheurs industriels et/ou des chercheurs universitaires. D'une part, Balconi *et al.* (2004) observent que les réseaux d'inventeurs industriels sont très fragmentés. D'autre part, les réseaux de scientifiques universitaires de Newman (2001a) sont beaucoup plus en grappe (*clustered*). En effet, Newman (2001b) montre que pour la plupart des auteurs d'articles scientifiques, la majorité des chemins entre individus passent par un ou deux de leurs collaborateurs. Balconi *et al.* supportent aussi cet argument puisqu'ils démontrent que les inventeurs universitaires qui participent aux réseaux de recherche industrielle ont des positions plus centrales que les chercheurs industriels, échantent des informations avec un plus grand nombre d'individus, par l'intermédiaire d'un plus grand nombre d'organisations, et jouent ainsi un rôle clé de connexion entre les individus et les composantes du réseau. Ils montrent aussi que les chercheurs universitaires travaillent au sein d'équipes plus nombreuses et pour un plus vaste nombre de demandeurs de brevet.

Newman (2001c) montre que la probabilité qu'une paire de scientifiques collabore augmente avec le nombre de leurs collaborateurs communs et que la probabilité qu'un scientifique développe un nouveau lien de collaboration augmente avec le nombre de collaborateurs qu'il a eu dans le passé. En revanche, Cantner et Graf (2006) ne trouvent pas cette relation entre la collaboration passée et présente avec les mêmes partenaires, suggérant

---

<sup>2</sup> Par exemple Mariani (2000), Ejermo et Karlsson (2006); Gauvin (1995) et Fleming *et al.* (2006).

ainsi que la collaboration à Jena n'est pas persistante. La collaboration passée semble toutefois avoir un impact sur la productivité future (Fleming *et al.*, 2006) et sur la probabilité du succès de la collaboration (Cowan *et al.*, 2005).

Dans un autre ordre d'idées, certains auteurs ont utilisé la simulation afin de modéliser la diffusion de la connaissance à travers les réseaux. Cowan et Jonard (2003) développent un modèle de diffusion de la connaissance pour étudier la relation entre la structure du réseau et la puissance de la distribution du système d'innovation. Dans la même veine, Cowan *et al.* (2004) comparent la croissance moyenne de la connaissance au sein de différentes structures : de cliques régionales très fermées à des structures sans beaucoup d'intégration spatiale, la première générant plus de croissance à long terme. Afin de bien saisir la notion d'échange informel de connaissance proposé par von Hippel (1987) et Shrader (1991), Cowan et Jonard (2004) modélisent la diffusion de la connaissance comme un troc mutuellement profitable. Ils examinent la relation entre l'architecture du réseau, caractérisée par différentes longueurs de chemin et d'effet de clique (*cliquishness*), et la performance de la diffusion. Ayant identifié certaines limitations du modèle de Cowan et Jonard, Morone et Taylor (2004) l'améliorent en introduisant une structure de réseau qui change à la suite des interactions de façon à modéliser le dynamique de la diffusion de la connaissance et la formation de réseaux. Finalement, Cowan *et al.* (2007) modélisent la formation des réseaux d'innovation qui émergent sous différentes structure de connaissance et d'information. Une des conclusions les plus importantes de ces études est l'existence de structures de réseaux qui peuvent influencer la croissance à long terme. Dans cet article, nous chercherons donc à évaluer la structure du réseau de co-invention de nanotechnologie au Canada de façon à comprendre son effet potentiel sur la diffusion de la connaissance et le potentiel d'innovation du réseau.

### **3. DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE**

Nous avons construit le réseau des inventeurs canadiens de nanotechnologie à l'aide des informations sur les brevets incluses dans la banque de données Nanobank. Cette banque de données comprend des bases de données sur les brevets, articles et subventions de la National Science Foundation (NSF) de même que sur les entreprises œuvrant dans le domaine de la nanotechnologie. Les informations sur les brevets sont tirées de l'United States Patents and Trademark Office (USPTO). À notre connaissance, cette dernière est la seule base de données qui donne l'adresse de chaque inventeur. L'utilisation des données de l'USPTO plutôt que celles de l'Office de la propriété intellectuelle du Canada (OPIC) peut potentiellement causer un biais dans nos données. Nous considérons ce biais très faible puisque la plupart des

inventions canadiennes sont aussi brevetées auprès de l'USPTO, à cause de l'attraction du marché États-Unien pour les inventeurs canadiens.

De Nanobank, nous avons extrait les brevets pour lesquels au moins un des inventeurs avait une adresse au Canada (5067 brevets). En employant des filtres additionnels<sup>3</sup> de façon à restreindre aux applications strictement reliées à la nanotechnologie, nous avons créé une base de données de 1443 brevets et de 1968 inventeurs. Une analyse par réseaux sociaux à l'aide du logiciel Pajek nous a permis de construire le réseau de liens direct et indirects entre les co-inventeurs et ainsi d'analyser l'architecture du réseau et le comportement de collaboration des inventeurs canadiens.

Afin de suivre l'évolution de la collaboration et des propriétés du réseau au fil des ans, nous avons créé 11 sous-réseaux correspondant à des fenêtres de 5 années consécutives, de 1989 à 2004 (voir la Figure 1). Étant donné que les brevets étaient plutôt sporadiques avant 1989, cette année marque le moment où au moins 20 brevets de nanotechnologie ont été accordés. Nous n'incluons pas non plus l'année 2005 puisqu'elle n'est couverte que partiellement par Nanobank. La construction de réseaux annuels ne reflète pas la réalité en ne tenant pas compte des relations développées avant l'obtention d'un brevet et maintenu par la suite, et par conséquent modifie énormément la connectivité des réseaux. Phelps (2003) démontre que la durée moyenne des alliances des entreprises de biotech dure en moyenne trois ans. Schilling et Phelps (2007) adoptent aussi cette durée. D'autres chercheurs adoptent des durées variant de 1 à 5 ans (Gulati et Gargiulo, 1999; Stuart, 2000). En prenant pour acquis que les relations entre les individus sont plus durables, nous pouvons postuler que celles-ci se poursuivront une ou deux années supplémentaires, elles représentent les relations informelles (hors alliance) entre les individus. Il est aussi possible de postuler que la recherche menant au brevet nécessite deux à trois de travail et que par la suite, l'obtention du brevet nécessite aussi deux à trois ans d'attente, des fenêtres de 5 ans sont donc plausibles et plus réalistes que les trois ans que durent les alliances officielles. La Figure 1 illustre la taille (nombre d'inventeurs et nombre de brevets) des 11 sous-réseaux ainsi définis. Certains inventeurs poursuivent leur collaboration pour chacune des périodes, d'autres se retrouvent seulement au tout début (en fin de carrière?) d'autre seulement à la fin de la période.

Les deux sections suivantes décrivent deux types d'indicateurs permettant de caractériser les relations de collaboration dans le domaine de la nanotechnologie au Canada. La première ne considère que les paires de co-inventeurs pris individuellement (indicateurs de

---

<sup>3</sup> Pour une description exacte de la méthodologie de sélection, voir Schiffauerova et Beaudry (2008).

collaboration), la seconde va plus loin et prend en considération les collaborateurs des collaborateurs, et donc le réseau des coopérations directes et indirectes.

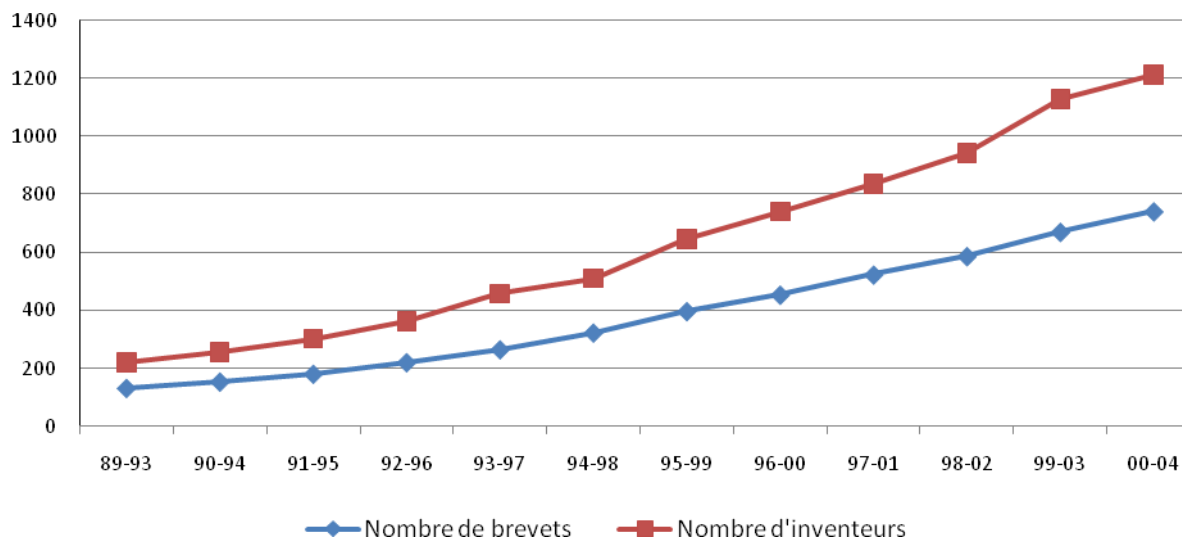


Figure 1: Nombre d'inventeurs et de brevets par sous-réseau

#### 4. RÉSULTATS – INDICATEURS DE COLLABORATION

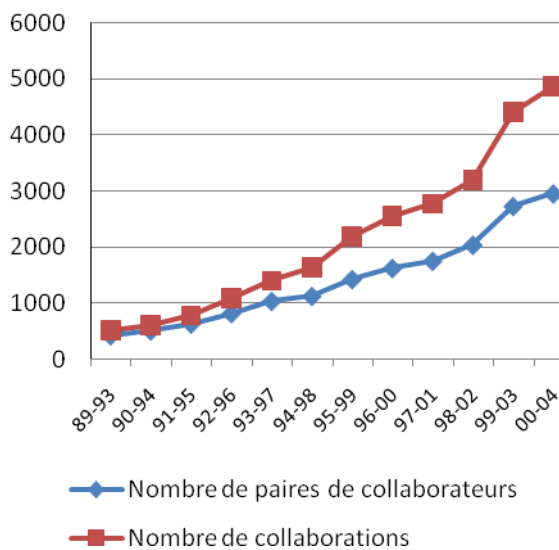
L'étude des flux de connaissance consiste ici en la caractérisation des liens de collaboration entre les inventeurs. Le réseau des inventeurs canadiens de nanotechnologie comprend 4920 liens de collaboration. Il est important de distinguer les liens de collaboration, qui représentent une ou plusieurs instances de collaboration entre deux inventeurs, et la collaboration qui ne représente que la coopération menant à un seul brevet. Par exemple lorsque deux inventeurs ont collaboré à trois brevets, ils n'ont qu'un seul lien de collaboration, mais trois collaborations. Un collaborateur est alors défini comme un co-inventeur pour l'octroi d'au moins un brevet auprès de l'USPTO. Les indicateurs suivants sont basés sur les liens de collaboration, les collaborations et les collaborateurs.

##### 4.1 INTENSITÉ DE LA COLLABORATION

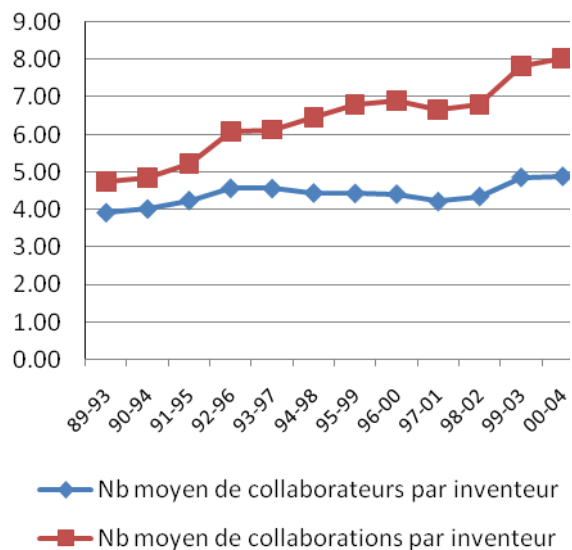
La Figure 2 illustre le nombre de liens (ou paires) de collaboration de même que le nombre total de collaborations ayant eu lieu entre ces individus par sous-réseau. Le fait que le nombre de collaborations augmente plus rapidement que le nombre de paires de collaborateurs indique que l'activité de coopération d'innovation en nanotechnologie s'intensifie au fil des ans au Canada. La Figure 3 représente les moyennes de ces deux indicateurs et confirme ce fait. Le nombre moyen de collaborateurs augmente de 4 à presque 5 pendant la période examinée alors que le nombre moyen de collaborations passe de moins de



5 à 8. D'après les réseaux de Balconi *et al.* (2004, p. 139, Tableau 5), nous estimons que les inventeurs ont en moyenne 2,09 collaborateurs, la différence avec nos résultats étant due à l'échantillon de brevets choisis : un petit échantillon (la nanotechnologie) ici et un échantillon beaucoup plus vaste dans le leur. En revanche, Newman (2001a) observe des nombres moyens de collaborateurs beaucoup plus élevé, plus particulièrement dans les disciplines expérimentales comme la physique de l'énergie (le scientifique moyen a 173 collaborateurs sur une période de 5 ans!). Il n'est toutefois pas surprenant que les réseaux de co-auteurs d'articles scientifiques soient plus nombreux que ceux construits à partir de co-inventeurs qui pourraient avoir droit à une partie des revenus de commercialisation de la propriété intellectuelle. Certains inventeurs ont un nombre beaucoup plus élevé de collaborateurs que la moyenne. Au début de l'échantillon, le nombre le plus élevé est de 17 collaborateurs pour un seul inventeur pendant une période de 5 ans, pour atteindre un maximum de 54 collaborateurs vers la fin de la période. La plupart des inventeurs ont un (12 %), deux (19 %), trois (13 %) ou quatre (13 %) collaborateurs. Seul un faible nombre d'inventeurs (4 %) ne collaborent pas du tout, ou ont plus de 10 partenaires de collaboration (8 %).



**Figure 2: Nombre de collaborations et de paires de collaboration par sous-réseau**

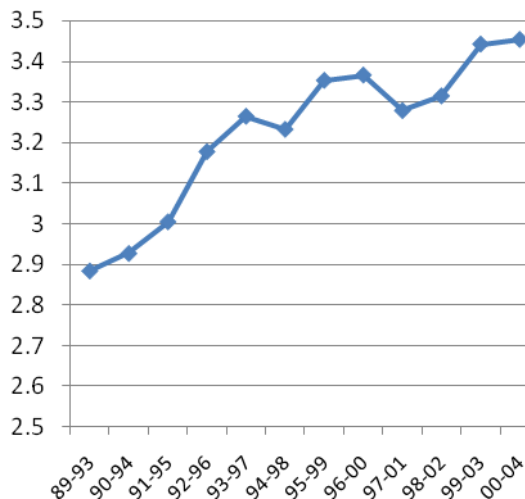


**Figure 3: Nombre moyen de collaborateurs et de collaborations par inventeur par sous-réseau**

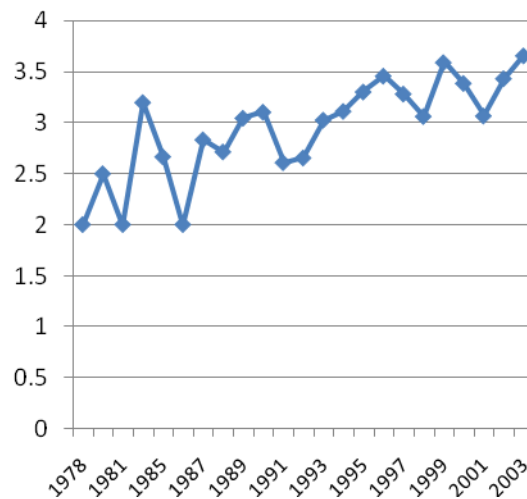
## 4.2 TAILLE DES ÉQUIPES DE COLLABORATION

Le nombre moyen de collaborateurs par brevet mesure la taille des équipes de collaboration (voir la Figure 4). En moyenne, pour la période de 15 ans allant de 1989 à 2004, chaque brevet comporte 3,34 inventeurs, de 2,8 (1989-1994) à 3,4 (1999-2004) inventeurs par brevet. La collaboration tend donc à augmenter légèrement. On peut postuler que la

complexité de la technologie nécessite des équipes de plus en plus grandes. Mariani (2000) suggère plutôt que la délocalisation des équipes en augmente la taille. À titre d'indication, la Figure 5 représente les valeurs annuelles plutôt que sur une période de 5 ans. La progression en dent de scie vient des valeurs annuelles (la Figure 4 représente une moyenne mobile sur 5 ans). Nous avons inclus dans cette figure les brevets octroyés avant 1989. Étant donné leur faible nombre, les valeurs présentées doivent être considérées en conséquence. La tendance à l'accroissement de la taille des équipes y est d'ailleurs aussi évidente.



**Figure 4: Nombre moyen de co-inventeurs par brevet par sous-période**



**Figure 5: Nombre moyen de co-inventeurs par brevet par année (année de l'octroi)**

À deux occasions, des brevets de nanotechnologie ont nécessité des équipes de 24 inventeurs. En comparaison, Newman (2001a) a recensé un article avec 1681 co-auteurs, soit 188 fois la taille moyenne des équipes de co-auteurs typiques en physique de l'énergie. Traditionnellement, les articles sont publiés par un plus grand nombre d'auteurs que les brevets parce que la co-rédaction reflète parfois autre chose que l'échange d'information ou la collaboration de recherche.<sup>4</sup> Alors que les exigences légales pour la co-rédaction et la co-invention sont officiellement très similaires, le nombre de co-auteurs d'un article est en moyenne beaucoup plus élevé que le nombre de co-inventeurs d'un brevet associés à une même innovation. Ducor (2000) a d'ailleurs montré que le nombre de co-auteurs est en moyenne trois fois plus élevé que le nombre d'inventeurs du brevet correspondant.

<sup>4</sup> Cockburn et Henderson (1998) suggèrent que le fait d'être co-auteur d'un article peut être le résultat d'un échange d'information ou de ressources données, être un moyen de résolution de conflit à propos de priorités, être une reconnaissance pour une dette intellectuelle, peut tout simplement représenter une liste des directeurs des laboratoires ou d'autres directeurs de projets ou peut représenter un effort pour gagner une certaine légitimité, ou l'admission à un réseau d'autres chercheurs.

### 4.3 COLLABORATION RÉPÉTÉE

Environ 34 % des relations de collaboration entre paires d'inventeurs sont répétitives. Dans certains cas, ces relations sont très prolifiques : un couple d'inventeurs a d'ailleurs collaboré 50 fois sur autant de brevets. La Figure 6 illustre le nombre maximal de collaborations répétées avec le même partenaire au fil des 11 périodes examinées. Le nombre maximal atteint 35 co-inventions pour une période de 5 ans. La plupart des relations de collaboration entre une paire donnée d'inventeurs est unique, c'est-à-dire qu'elles n'ont résulté qu'en un seul brevet au cours de la période. La proportion des collaborations répétées a cependant augmenté de façon graduelle au cours des 15 ans examinés, de moins de 15 % de toutes les collaborations à plus de 35 % tout récemment (voir la Figure 7). La collaboration répétée avec le même partenaire encourage la confiance mutuelle et la création de relations de coopération de recherche plus étroites. Par conséquent, cette augmentation de la collaboration répétée signale probablement aussi l'échange d'informations de meilleure qualité de même que la transmission d'une plus grande quantité de connaissances scientifique de valeur.

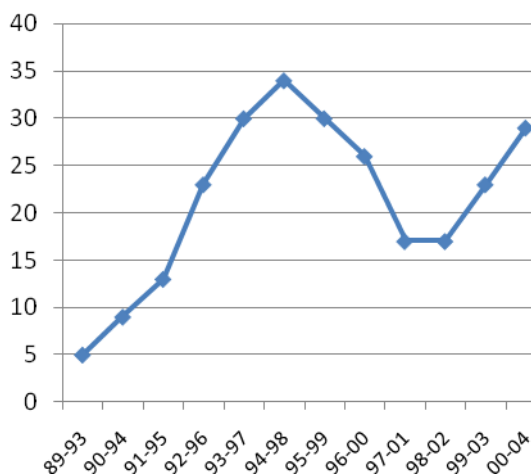


Figure 6: Nombre maximum de collaborations avec le même partenaire par sous-réseau

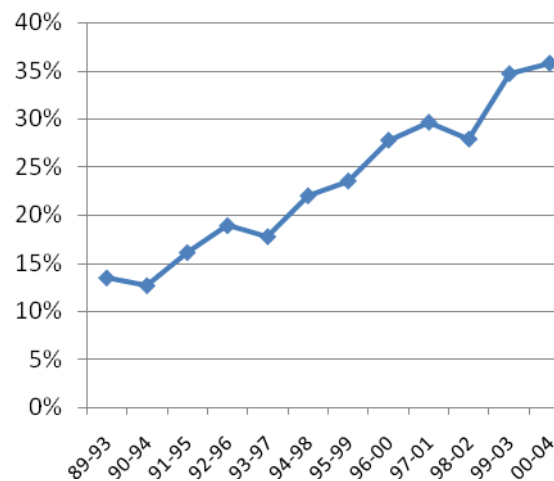


Figure 7: Proportion des collaborations répétées avec le même partenaire par sous-réseau

### 4.4 COLLABORATION AVEC DES INVENTEURS ÉTOILE

La plupart de l'innovation en nanotechnologies est générée par une faible proportion d'inventeurs prolifiques. Ces inventeurs sont généralement dénommés scientifiques étoiles et leur rôle a été discuté longuement dans la littérature<sup>5</sup>. Nous avons défini ces chercheurs selon

<sup>5</sup> Zucker et Darby (1996), Zucker *et al.* (1996), Zucker *et al.* (1998a) et Zucker *et al.* (1998b) démontrent l'importance des scientifiques étoiles dans le domaine de la biotechnologie et mettent l'emphase sur leur effet

la quantité de leurs brevets, selon la quantité et la qualité de ces brevets et selon le nombre de citations obtenues pour leurs articles scientifiques. En utilisant notre premier critère, nous avons identifié 40 inventeurs prolifiques (ayant plus de 15 brevets), dont 23 sont des étoiles (ayant plus de 20 brevets) et 4 étant des superstars (ayant plus de 50 brevets à leur actif). L'inventeur le plus prolifique a participé à 87 brevets de nanotechnologie à l'USPTO, ce qui est considérablement plus que la moyenne des chercheurs du groupe. Est-ce le directeur du laboratoire? Notre second critère incorpore la qualité du brevet à la quantité mesurée par inventeur en un index de quantité et de qualité (IQQ) qui prend en considération le nombre de brevets et la valeur moyenne du brevet<sup>6</sup>. Cet indicateur modifie le nombre de brevets d'un inventeur selon le nombre moyen de revendications des brevets de ce dernier par rapport à la moyenne des inventeurs de notre base de données. D'après cet index, 37 inventeurs ont été catégorisés IQQ-prolifiques (ayant un index supérieur à 20), dont 18 sont des IQQ-étoiles (ayant un index supérieur à 30) et 3 sont des IQQ-superstars (ayant un index supérieur à 50).

Le troisième indicateur représente la capacité d'un scientifique à contribuer au développement de la connaissance et est mesuré par le nombre de citations qu'un chercheur obtient pour ses articles. *ISI Web of Knowledge*<sup>SM</sup> donne une liste des individus (moins de 0,5 % des auteurs de cette base de données) ayant une contribution fondamentale à l'avancement de la science dans les dernières décennies. De notre liste d'inventeurs, nous en avons identifié 12 ayant une contribution extraordinaire du côté des articles scientifiques. Aucun de ces auteurs n'a cependant produit un nombre tout aussi extraordinaire de brevets. Pour la plupart, ces scientifiques n'ont participé qu'à un seul brevet. En outre, le fait que seulement 12 scientifiques aient été identifiés comme inventeurs est un indicateur de la division qui existe dans ce domaine entre la science fondamentale et son application. Dans les milieux universitaires, la performance académique est plus prisée que le nombre de brevets détenus. Les scientifiques détenant un nombre impressionnant de publications négligent souvent les opportunités de mise en application par l'obtention de brevets, préférant publier.

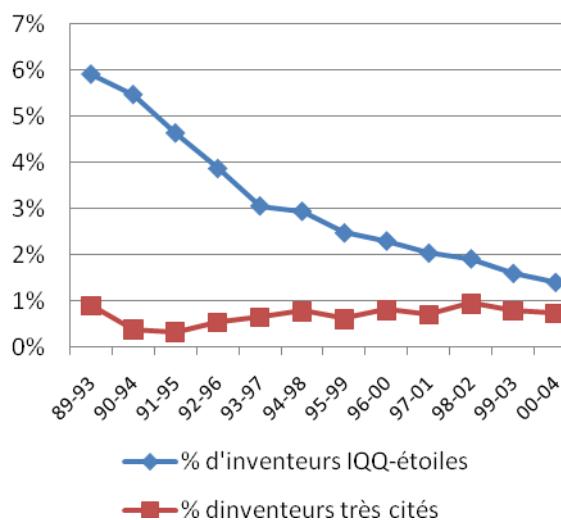
---

positif quant à la performance des entreprises avec qui ils collaborent. De plus, Zucker *et al.* (1998b) et Prevezer (1997) indiquent que dans ce domaine, les scientifiques étoiles tentent de générer des bénéfices de leur connaissance à travers des entreprises dérivées.

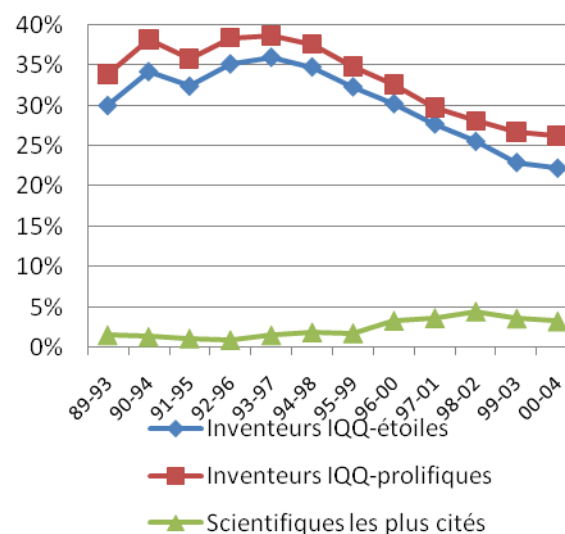
<sup>6</sup> Index de quantité et qualité (IQQ):  $IQQ_i = \frac{N_i * C_i^{moy}}{C^{moy}}$ , où

- $IQQ_i$  Valeur de l'index de quantité et de qualité pour l'inventeur  $i$
- $N_i$  Nombre de brevets inventés ou co-inventés (octroyés par l'USPTO) par l'inventeur  $i$
- $C_i^{moy}$  Nombre moyen de revendications des brevets octroyés par l'USPTO de l'inventeur  $i$
- $C^{moy}$  Nombre moyen de revendications des brevets de tous les inventeurs dans notre base de données

Cette méthodologie nous a donc permis d'identifier 60 inventeurs importants, dont 48 sont des inventeurs prolifiques ou IQQ-prolifiques parmi lesquels, 29 inventeurs sont prolifiques et IQQ-prolifiques. Les 12 autres sont des scientifiques très cités. Alors que le nombre d'inventeurs étoiles a augmenté graduellement de 1989 à 2004, leur proportion a diminué considérablement au fil des ans (de 6 % des inventeurs à près de 1 %) comme le montre la Figure 8. Nous avons par la suite établi les liens de collaboration de ces inventeurs / scientifiques étoiles quant aux brevets de nanotechnologie. Premièrement, nous avons calculé la proportion des brevets créés en collaboration avec des IQQ-étoiles (voir la Figure 9). Cette proportion a augmenté (de 30 % à 36 %) jusque vers le milieu des années 1990 pour ensuite décroître de façon graduelle pour atteindre 22 % à la fin de la période. Bien qu'il y ait plus que le double d'inventeurs IQQ-prolifiques (37) par rapport aux IQQ-étoiles (18), la proportion des brevets octroyés à des équipes comprenant un inventeur IQQ-prolifique n'est que légèrement supérieure. Leur contribution à la diffusion de la connaissance, bien que moindre, n'est tout de même pas négligeable. En revanche, la contribution des scientifiques très cités a augmenté en proportion au fil des ans, suggérant ainsi que la recherche fondamentale commence à générer des applications.



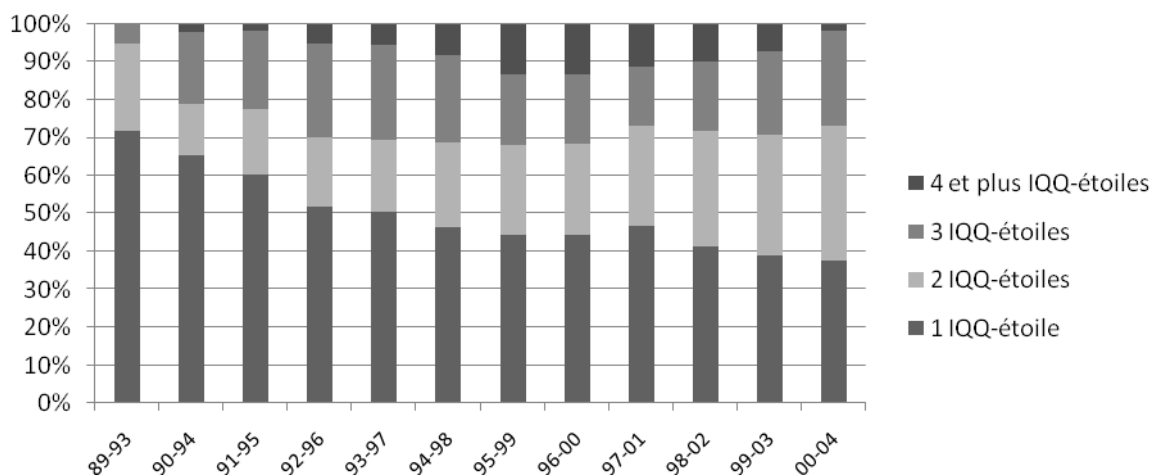
**Figure 8: Proportion des inventeurs qui sont des IQQ-étoiles ou des scientifiques très cités**



**Figure 9: Proportion des brevets créés en collaboration avec au moins un inventeur IQQ-prolifique, IQQ-étoile ou un scientifique très cité**

Nous avons ensuite examiné à quel point les inventeurs de renom collaborent entre eux. De tous les brevets octroyés à des équipes en collaboration avec des inventeurs IQQ-étoiles (de 20 à 35 % des brevets), la proportion de brevets inventés par des équipes comprenant 2 ou 3 de ces inventeurs n'a cessé d'augmenter alors que la collaboration d'un seul ou de plus de 3 inventeurs a diminué (voir la Figure 10). Au final, bien que le nombre de collaborations

avec des inventeurs IQQ-étoiles augmente avec le temps, la proportion de ces collaborations diminue à cause du nombre d'inventeurs participants à un faible nombre de brevets allant en augmentant.



**Figure 10: Proportion des brevets créés en collaboration avec 1, 2, 3 ou 4 et plus d'inventeurs IQQ-étoiles**

## 5. RÉSULTATS – INDICATEURS DE RÉSEAUX

L'approche par réseau utilisée dans cette section a l'avantage de considérer les collaborateurs des collaborateurs et non seulement les paires de collaborateurs. Les indicateurs de réseau calculés permettent donc d'évaluer la capacité de transmission d'une structure de réseau donnée et donc la diffusion de la connaissance entre inventeurs au sein du réseau. Les sections subséquentes présentent les indicateurs utilisés pour caractériser le réseau d'innovation de nanotechnologie.

### 5.1 FRAGMENTATION DU RÉSEAU

Afin de comprendre l'importance de la fragmentation du réseau de collaboration, nous devons introduire le concept de composante de réseau, qui est définie comme le sous-réseau maximal où les nœuds (les individus) sont directement ou indirectement connectés (Wasserman et Faust, 1994). Dans un réseau, il y a donc un certain nombre de composantes qui sont complètement indépendantes les unes des autres. Dans chaque composante, tous les individus contribuent collectivement au développement de l'innovation. La Figure 11 illustre deux exemples de composantes d'un même réseau.

Pour la durée totale de notre échantillon, le réseau canadien de nanotechnologie compte 407 composantes. Sous la forme d'une moyenne mobile de 5 ans, telle qu'utilisée jusqu'à présent, le nombre de composantes augmente de 48 à près de 265 (voir la Figure 12). Le

nombre de composantes d'un réseau n'est cependant pas une bonne mesure de fragmentation puisque certains réseaux importants sont composés d'un plus grand nombre de composantes tout en étant moins fragmentés. La taille moyenne des composantes est donc une mesure complémentaire indiquant le nombre moyen d'inventeurs pouvant échanger des informations à travers des liens de coopération directs et indirects. En moyenne, la Figure 13 montre que la taille des composantes oscille entre 4,3 et 4,7 inventeurs, la tendance étant à la baisse, cela signifie que la fragmentation augmente avec le temps.

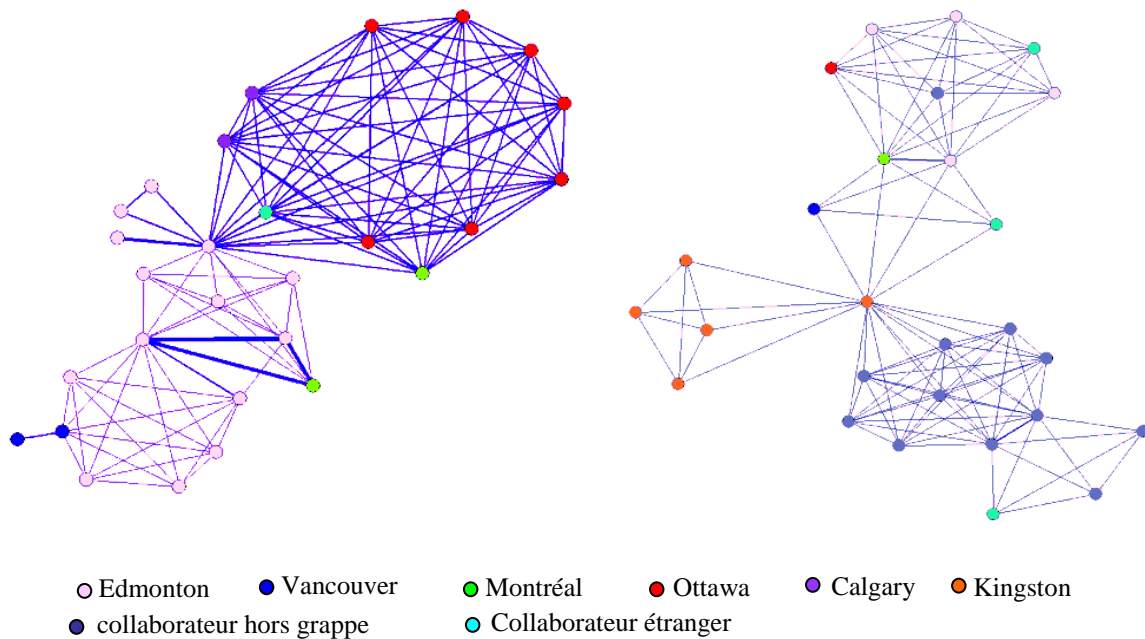


Figure 11: Exemples de composantes du réseau

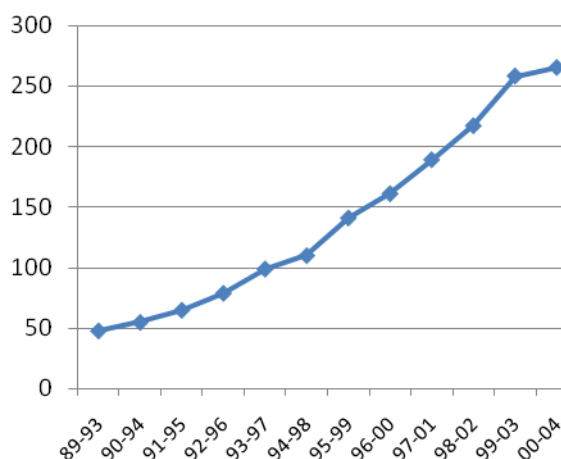


Figure 12: Nombre de composantes par sous-réseau

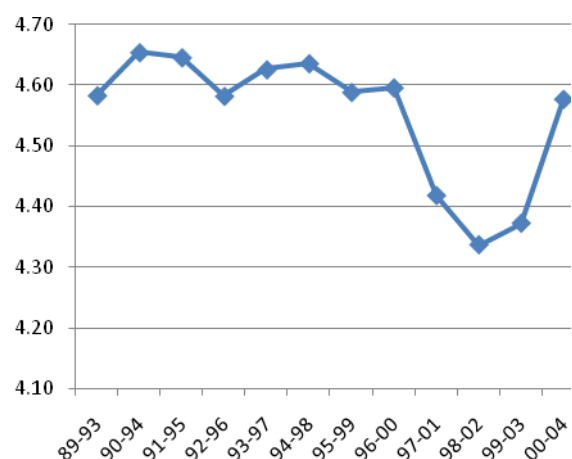
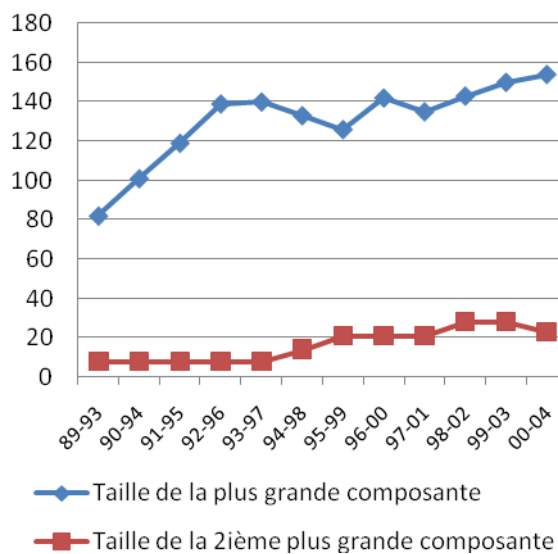


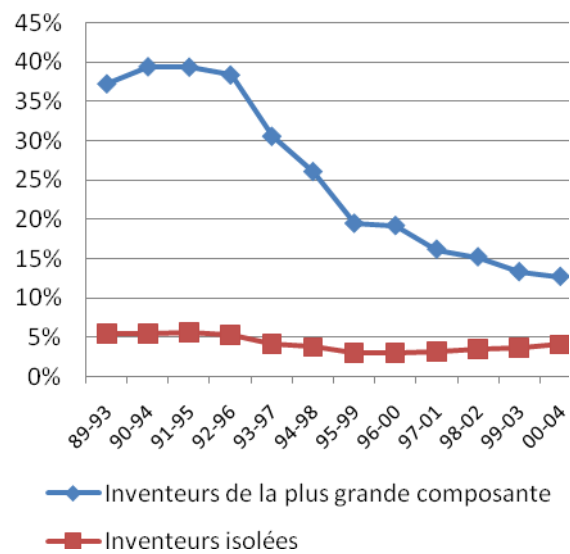
Figure 13: Taille moyenne des composantes par sous-réseau

Il existe cependant de vastes différences quant à la taille des composantes. L'existence d'une composante de large taille est une caractéristique commune des sous-réseaux de 5 ans examinés ici. La taille de la composante la plus grande est donc une caractéristique importante du réseau puisqu'elle représente le noyau principal de l'activité d'innovation où les inventeurs peuvent partager la connaissance plus aisément. La Figure 14 montre que la taille des composantes les plus peuplées a presque doublé au fil des ans, de 82 à 154 inventeurs interreliés. La taille de la seconde plus grande composante a triplé, mais sa taille est loin derrière celle de la plus grande composante.

Bien que la taille des plus grandes composantes augmente avec le temps, les inventeurs œuvrant au sein de celles-ci ne représentent plus qu'une faible proportion des inventeurs des sous-réseaux (voir la Figure 15), de 38 % en 1989-1994 à 13 % en 1999-2004. A priori, ce résultat peut sembler surprenant. Cette fragmentation des sous-réseaux est caractéristique d'une technologie qui se spécialise en différentes applications. Les nanotechnologies sont de ces technologies ayant de vastes applications, en nanoélectronique, nanobiotechnologie, nanomédecine, nanomatériaux, pour ne nommer que ceux-ci.



**Figure 14: Taille des deux plus grandes composantes par sous-réseau**



**Figure 15: Proportion des inventeurs qui composent la plus grande composante du réseau et des inventeurs isolés**

Pour tous les réseaux qu'il a examinés, Newman (2001a) observe une composante géante regroupant 90 % des scientifiques. Ses réseaux sont aussi construits sur des périodes de 5 ans, mais sont basés sur les co-auteurs d'articles scientifiques dont la majorité sont des universitaires. Ce type de réseau de co-auteurs a généralement une structure différente de ceux bâtis à partir de co-inventeurs. Balconi *et al.* (2004) ont construit leurs réseaux à partir



de la base de données de l'OEB et observent que la plus grande composante regroupe près de 60 % des inventeurs non-isolés. La seconde plus grande composante a une taille 50 fois plus petite que celle de la plus grande composante, alors que les nôtres ne sont que 11 fois plus petites que les plus grandes composantes. Balconi *et al.* n'ont par ailleurs pas noté la présence de cette composante géante dans tous les sous-secteurs étudiés. Dans certains des leurs réseaux de taille similaire au nôtre, seuls 2-3 % des inventeurs contribuent à l'activité d'innovation de la plus grande composante et la seconde plus grande composante n'est souvent que la moitié de la taille de la plus grande. Putsch (2006) confirme la présence d'une composante géante alors que Fleming *et al.* (2006) révèlent l'émergence et la disparition de ces composantes géantes des réseaux de collaboration de co-brevets. Ils notent à Silicon Valley la présence d'une telle composante dont la taille a augmenté de façon spectaculaire, mais n'observent pas un tel phénomène du côté de la Route 128 près de Boston.

Le cas des inventeurs isolés, dont la présence est due à un seul brevet pour lequel ils sont le seul inventeur, est aussi une mesure de fragmentation en soi. Ces inventeurs n'ont donc pas collaboré avec qui que ce soit. La présence de ces inventeurs est relativement stable (de 4 % à 5 % des inventeurs) au fil des ans avec une tendance légèrement à la baisse comme le montre la Figure 15. Notre réseau ne démontre pas d'augmentation de la fragmentation de ce côté.

## **5.2 DENSITÉ DU RÉSEAU**

La cohésion structurelle d'un réseau fait référence au degré d'interconnexion des nœuds (individus) parmi eux. La plus commune des mesures de cohésion est sans doute la densité du réseau qui mesure la proportion du nombre de liens existants dans le réseau par rapport au nombre maximal de liens possibles (si tous les individus étaient directement liés entre eux). Cet indicateur souffre par contre d'un effet de taille important, ce qui nous empêche de comparer les réseaux entre eux. Une alternative à cet indicateur consiste à mesurer le degré moyen d'un réseau par le nombre moyen de liens directs de chaque nœud (le degré de chaque nœud). Cet indicateur mesure donc le nombre moyen de collaborateurs d'un inventeur. Plus le nombre de collaborateurs directs de chaque inventeur est élevé, plus la structure du réseau est interreliée. Le ratio liens/nœuds, soit le nombre de liens de collaboration du réseau divisé par le nombre d'inventeurs (nœuds), permet aussi de mesurer la cohésion du réseau. Ces deux indicateurs montrent la même augmentation de la cohésion du réseau au fil des années, comme l'illustre la Figure 16. Pour les inventeurs, l'accès à la connaissance augmente donc légèrement puisque dans les réseaux plus denses, ces derniers peuvent avoir accès directement ou indirectement à de plus grandes quantités de connaissance et à un plus grand nombre

d'inventeurs. Il est donc plus facile pour deux inventeurs d'entrer en contact l'un avec l'autre par l'intermédiaire d'une chaîne de co-inventeurs communs ou qui se connaissent.

La combinaison de l'analyse de la fragmentation et du degré de cohésion semble indiquer que divers sous-domaines de la nanotechnologie émergent et créent des niches où les inventeurs collaborent entre eux de façon très étroite, délaissant la coopération sur les projets plus génériques pour ceux dont le domaine d'application est plus spécialisé. D'une part, les réseaux sont de plus en plus fragmentés, d'autre part, la cohésion au sein des composantes augmente légèrement.

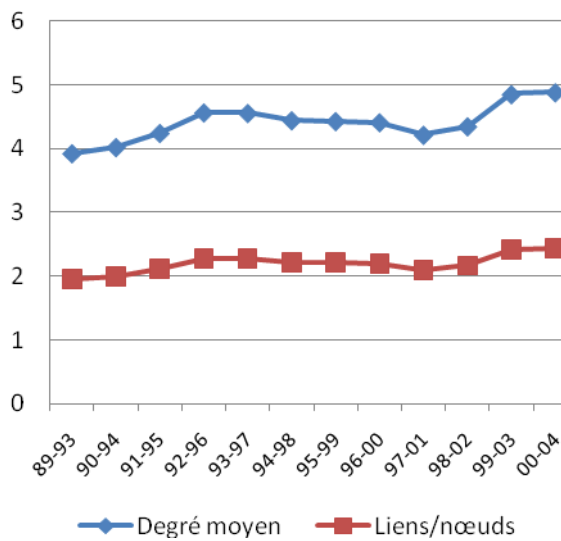


Figure 16: Indicateurs de densité par sous-réseau

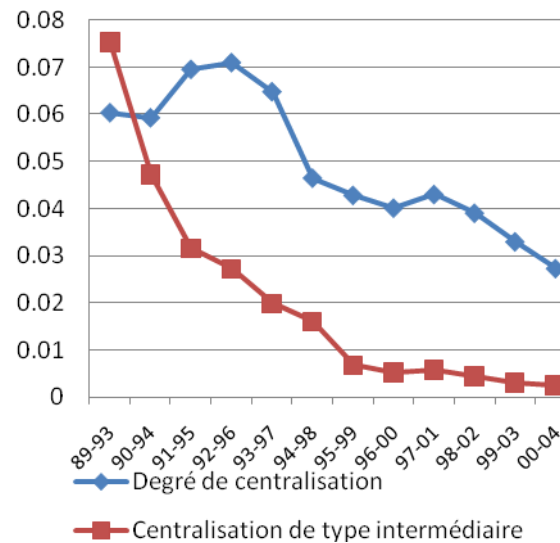


Figure 17: Indicateurs de centralisation par sous-réseau

### 5.3 CENTRALISATION DU RÉSEAU

Un réseau dont la structure est très centralisée possède une frontière bien délimitée entre son centre et sa périphérie. Lorsque le centre d'un réseau est très centralisé, la transmission de l'information à travers le réseau se fait plus aisément. La centralisation d'un réseau est définie par la variation du degré de centralité des nœuds (individus) divisée par la variation du degré maximal dans un réseau de taille similaire (de Nooy *et al.*, 2004). Il existe deux indicateurs principaux de centralisation d'un réseau qui peuvent être mesurés pour des réseaux disjoints (ayant plus d'une composante) : le degré de centralisation et la centralisation de type intermédiaire (*betweenness*). Le premier indicateur mesure la variation du degré de centralité d'un nœud tel que décrit plus haut. Le degré de centralité d'un nœud est en fait le nombre de collaborateurs directs de chaque nœud décrit dans la section précédente. Les inventeurs dont le degré de centralité est élevé occupent donc des positions centrales dans le réseau du fait

qu'ils ont beaucoup de collaborateurs directs. Ils ont par conséquent accès à plusieurs sources potentielles de connaissance et possèdent de meilleures opportunités de transmission de l'information à travers le réseau, ce qui augmente leur importance quant à la diffusion de la connaissance. De façon analogue au degré de centralisation, la centralisation de type intermédiaire mesure la variation de la centralité de type intermédiaire de chaque individu (nœud) du réseau. Selon de Nooy *et al.* (2004), la centralité de type intermédiaire représente la proportion de toutes les distances les plus courtes entre chaque paire de nœuds qui comprenne un nœud en particulier. Ce nœud sert donc en quelque sorte d'intermédiaire dans un chemin donné. Un inventeur aura donc une position plus centrale en tant qu'intermédiaire si un grand nombre de chemins les plus courts passent par cet individu. Cet indicateur mesure en quelque sorte l'importance d'un inventeur en tant qu'intermédiaire et mesure le contrôle que ce dernier exerce sur les interactions entre différents inventeurs et par conséquent sur les flux de connaissance au sein du réseau. La Figure 17 illustre ces deux mesures de centralisation au sein des sous-réseaux correspondant à chaque moyenne mobile sur 5 ans. Même si le degré de centralisation fluctue légèrement, la tendance des deux indicateurs est à la baisse. L'accroissement de la spécialisation de la nanotechnologie est sans doute le phénomène le plus plausible expliquant cette décroissance. Les rares inventeurs occupant des positions centrales disparaissent progressivement à mesure que les nombreuses spécialisations de la nanotechnologie apparaissent. Par conséquent, la communication au sein du réseau de nanotechnologie canadien s'effrite de même que l'habileté à transmettre la connaissance à travers le réseau.

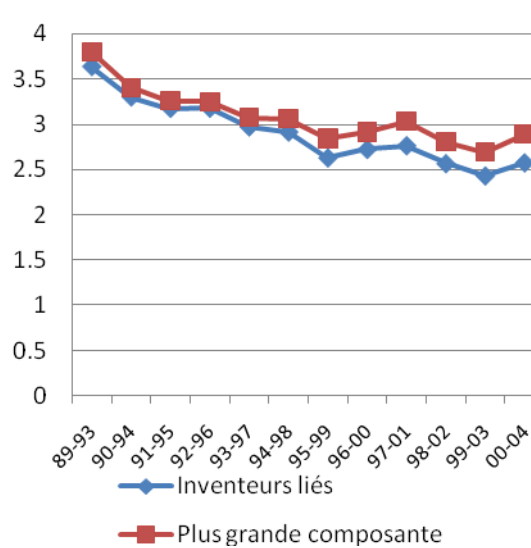
En conséquence, les opportunités de fertilisations croisées entre sous-domaines de la nanotechnologie semblent disparaître ou du moins les flux de connaissance semblent utiliser d'autres médias. Les canaux de communication peuvent avoir tout simplement migré vers un autre médium. Il devient donc impératif d'examiner les citations des articles et des brevets afin de déterminer l'influence de ces types de flux indirects de connaissance sur l'innovation en nanotechnologie et de voir s'ils remplacent la collaboration directe en tant que mécanisme de transmission de la connaissance. Ceci dépasse malheureusement le cadre de cet article, mais constitue une voie que nous examinerons dans le futur.

#### **5.4 DISTANCES GÉODÉSIQUES**

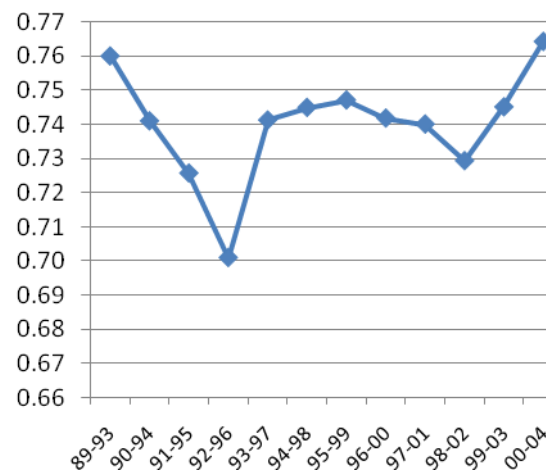
La distance géodésique correspond au chemin le plus court entre deux nœuds, et mesure la longueur du chemin par le nombre d'intermédiaires nécessaires pour qu'un inventeur rejoigne un autre inventeur au sein d'une composante. Un chemin plus court dans un réseau

d'innovation devrait en théorie améliorer la production et la diffusion de connaissances (Cowan et Jonard, 2004; Fleming *et al.*, 2004) puisque la connaissance peut voyager vers différentes parties d'une composante plus rapidement et donc atteindre les inventeurs éloignés plus rapidement. En outre, comme le suggèrent Cowan et Jonard, un chemin plus court entraîne une moins grande détérioration de la connaissance tout en apportant de nouvelles sources d'idées et de perspectives des régions les plus éloignées du réseau d'inventeurs.

Étant donné que la distance géodésique ne peut être calculée qu'au sein d'une même composante, afin d'obtenir la distance géodésique moyenne d'un réseau, il nous faut donc exclure les liens qui n'existent pas (entre différentes composantes). La Figure 18 illustre donc la distance géodésique moyenne de chaque sous-réseau et de la plus grande composante de chaque sous-réseau. Le fait d'avoir un sous-réseau comprenant un grand nombre de composantes de faible taille contribue à diminuer la distance moyenne et introduit donc un léger biais dans nos mesures. C'est la raison pour laquelle nous comparons nos résultats par sous-réseau à ceux obtenus pour la plus grande composante par sous-réseau.



**Figure 18: Distance géodésique moyenne par sous-réseau**



**Figure 19: Indicateur de l'esprit de clique par sous-réseau**

Pour ces deux variantes, les résultats indiquent que la connaissance voyage de plus en plus rapidement au sein des sous-réseaux entre les inventeurs qui sont directement ou indirectement connectés, il y a moins d'intermédiaires. À la Figure 14, nous avons montré que la taille de la plus grande composante a presque doublé du début à la fin de notre échantillon. Nous pourrions sans doute croire que cette augmentation de taille aurait été accompagnée d'une distance géodésique moyenne plus grande. Le fait que cette distance ait diminué implique que le réseau ne s'est pas développé en longueur (ne s'est pas étiré), mais a plutôt

permis une meilleure intégration des flux de connaissance en introduisant des intermédiaires supplémentaires contribuant à la réduction des chemins que l'information a à parcourir. La transmission de l'information se fait donc plus facilement avec le temps au sein de composantes plus peuplées.

## **5.5 ESPRIT DE CLIQUE DU RÉSEAU**

L'esprit de clique (*cliquishness* ou *clustering*) d'un réseau fait référence à la vraisemblance que deux nœuds qui sont connectés à un troisième nœud soient aussi connectés entre eux. Les réseaux où l'esprit de clique est très fort sont en général des environnements très denses où les individus sont mieux interconnectés les uns aux autres. De tels environnements démontrent une forte capacité de transmission puisqu'une grande quantité de connaissance peut-être diffusée rapidement (Burt, 2001). En outre, un fort esprit de clique au sein d'un réseau d'innovation supporte l'amitié et la confiance et par conséquent facilite la collaboration entre les inventeurs. Uzzi et Spiro (2004) de même que Schilling et Phelps (2007) suggèrent qu'un fort esprit de clique rehausse la performance d'un système et améliore la diffusion de la connaissance. Cowan et Jonard (2003) mentionnent toutefois l'existence d'effets négatifs reliés à l'effet de clique émanant des pertes dues à la répétition, puisque l'information échangée au sein de cet environnement est souvent redondante. Les résultats empiriques de Fleming *et al.* (2006) confirment cet effet négatif de l'effet de clique sur la productivité d'innovation. Ils suggèrent alors que l'effet de clique optimal dépend d'un certain nombre de facteurs.

Afin de mesurer l'effet de clique, nous avons calculé de degré de l'effet de clique de chaque nœud par la densité égocentrique du nœud. La densité égocentrique d'un nœud représente la fraction de toutes les paires de l'environnement immédiat du nœud qui sont aussi connectés entre eux. Par la suite, nous avons calculé la moyenne pour chaque sous-réseau. La Figure 19 montre que l'esprit de clique varie au fil du temps sans toutefois démontrer de tendance claire. Son rôle n'est donc pas tout à fait clair sur la transmission de l'information, et nous travaillons présentement à élucider cette question.

## **6. DISCUSSION ET CONCLUSIONS**

Le but de cet article était d'étudier l'évolution des réseaux sociaux de co-invention des inventeurs canadiens de nanotechnologie à l'aide des données de brevets de l'USPTO. Deux grandes catégories d'indicateurs, ont été utilisées pour évaluer l'évolution des caractéristiques de la collaboration et des propriétés des réseaux pour la période 1989-2004, sous forme de

moyenne mobile sur 5 ans. Ces indicateurs nous permettent de mesurer le potentiel de collaboration d'innovation et d'induire l'efficacité de la diffusion de la connaissance au sein du réseau. Nous montrons que les inventeurs canadiens de nanotechnologie ont une tendance à établir des liens de collaboration avec un nombre de plus en plus élevé de partenaires et de collaborer avec ceux-ci de façon plus intensive que par le passé. La taille des équipes de coopération menant à des brevets de nanotechnologie a aussi augmenté au fil des ans. Ces indicateurs suggèrent que les inventeurs peuvent diffuser une plus grande quantité de connaissance à un nombre plus élevé d'inventeurs et ainsi bénéficier des fertilisations croisées de la connaissance. Les nouvelles connaissances provenant d'environnements distincts de recherche favorisent les opportunités de recombinaison innovatrice de la connaissance et donc la créativité future des inventeurs. En outre, les inventeurs travaillent de plus en plus au sein des mêmes équipes à la production d'innovations menant à des brevets. La collaboration répétée avec le même partenaire encourage la confiance mutuelle et la création de relations de coopération de recherche plus étroites. Par conséquent, cette augmentation de la collaboration répétée signale probablement aussi l'échange d'informations de meilleure qualité de même que la transmission d'une plus grande quantité de connaissances scientifiques de valeur (plus rare ou divulguée à un faible nombre d'élus). En revanche, Chen et Wang (2008) suggère que le développement de la confiance au sein d'une équipe se fait au détriment des relations de collaboration extérieures à l'équipe et peut éventuellement diminuer sa capacité d'innovation. L'augmentation de la fragmentation du réseau semble pousser en ce sens.

Prenant en considération la quantité et la qualité des brevets, nous avons identifié les inventeurs les plus prolifiques selon un nouvel indicateur. Nous avons montré que ces inventeurs prolifiques ne sont pas les scientifiques dont les articles sont les plus cités. Il existe donc une division du travail claire entre la recherche fondamentale et son application, ce qui n'est sans doute pas surprenant compte tenu des différences entre les systèmes de récompense des deux milieux (industriel et universitaire). Nous avons remarqué que la collaboration mutuelle avec 2 ou 3 inventeurs étoiles est de plus en plus fréquente. La collaboration avec ces inventeurs prolifiques a augmenté durant la période examinée, en proportion des brevets octroyés, elle a toutefois diminué. Ce qui est donc indicatif d'une certaine dispersion de l'innovation à travers le réseau et de l'émergence de nouvelles spécialisations. Zucker *et al.* (1998b) croient que les universités et leurs scientifiques étoiles ont joué un rôle clé dans le déploiement de l'industrie de la biotechnologie. La mesure que nous avons utilisée dans l'article pour évaluer les scientifiques étoiles (ceux qui sont les plus cités), n'est sans doute pas la plus appropriée pour déterminer ceux qui vraisemblablement seront les piliers d'une

industrie basée sur la connaissance en nanotechnologie. Nous discuterons de la mise en commun des bases de données d'articles et de brevets un peu plus loin.

Cette dispersion de l'innovation est elle accompagnée d'une certaine fragmentation du réseau canadien d'inventeurs de nanotechnologie? Il semble que oui. En effet, bien que la taille du noyau central du réseau (la plus grande composante) s'accroisse au fil du temps, la proportion des inventeurs du réseau qu'elle regroupe est de plus en plus faible. Le déclin de cette proportion implique que certains inventeurs des parties reculées du réseau ne peuvent plus avoir accès à la diffusion de la connaissance par des liens direct ou indirects. La structure du réseau permet donc de moins en moins la réception d'informations distantes. Les composantes de plus faible taille ont cependant bénéficié d'une croissance plus rapide, ce qui fait que la taille moyenne des composantes du réseau est demeurée relativement stable. De surcroît, la proportion des inventeurs isolés a légèrement diminué pendant les 15 années examinées. Cette fragmentation accrue du réseau est probablement due à l'avènement de la multiplication des spécialisations en nanotechnologie. Nous voyons donc apparaître des branches spécialistes qui se dissocient tranquillement du noyau central et se regroupent en composantes plus petites. Il est donc possible que les opportunités de fertilisations croisées (dues à la collaboration directe et aux liens indirects) diminuent, voire disparaissent dans ce domaine en émergence.

Quatre autres indicateurs de réseau ont été utilisés afin de faire la lumière sur le phénomène observé. Il s'agit de la densité, de la distance moyenne, de la centralisation et de l'esprit de clique. Bien que nous observions une augmentation de la fragmentation, les réseaux deviennent en revanche plus denses et cohésifs. Les inventeurs sont donc interconnectés entre eux et la probabilité des échanges de connaissance améliorée. Les résultats sur la distance géodésique moyenne abondent dans le même sens, celle-ci étant plus courte, l'information peut être diffusée à travers un nombre plus restreint d'intermédiaires. En revanche, la structure du réseau devient de moins en moins centralisée, ce qui appuie notre argument de spécialisation de la nanotechnologie mentionné plus haut. En général, la connaissance se diffuse plus facilement par l'intermédiaire d'un noyau central d'inventeurs. La disparition de ce noyau central a pour conséquence de freiner la transmission de la connaissance au sein du réseau. L'analyse de l'esprit de clique ne permet toutefois pas de se prononcer en ce sens. Doit-on s'inquiéter de cet effritement du noyau central au Canada?

Ce premier pas a permis d'observer un changement dans les caractéristiques du réseau a donc soulevé plusieurs hypothèses quant aux phénomènes sous-jacents à la collaboration au Canada. Bien que nous n'ayons pas mesuré dans cet article la distance géographique entre les

divers inventeurs d'une composante, comme Ejermo et Karlsson (2006) le suggèrent, la distance et le temps nécessaire au transport ont une influence sur la constitution des réseaux. Il est beaucoup plus facile de faire la liaison Montréal-Boston que Montréal-Vancouver. Dans l'introduction de l'article, nous avons identifié qu'une des craintes au Canada est que le réseau d'invention ne soit pas autosuffisant. Cantner et Graf (2004) indiquent d'ailleurs qu'une masse critique d'inventeurs est nécessaire pour qu'une technologie spécifique survive dans un système d'innovation local. Nos recherches ont démontré que la taille des équipes de recherche a augmenté au fil des ans. Mariani (2000) démontre que les brevets d'équipes délocalisées listent un plus grand nombre d'inventeurs que les brevets d'équipes co-localisées. Il est donc possible que l'augmentation de la fragmentation observée et de la taille des équipes d'inventeurs soient attribuables à la délocalisation de l'activité d'innovation. Dans la suite de ce projet de recherche, nous examinerons donc en détail les relations de collaboration transfrontalières et entre provinces au Canada. De cette façon, nous pourrions établir s'il y a migration de la structure de collaboration due à l'internationalisation de la collaboration en nanotechnologie.

Dans nos recherches, nous avons montré que le réseau se fragmente, mais qu'une certaine cohésion se forme malgré cela au sein du réseau fragmenté. La spécialisation dans certains sous-domaines de la nanotechnologie nous semble une explication logique à ce phénomène. Nous visons donc à construire une cartographie des nanotechnologies et à établir la proximité technologie de chaque sous-domaine. Lors de recherches futures, nous examinerons aussi un autre type de migration, celui du mécanisme de transfert de la connaissance, afin de déterminer si les flux de connaissances sont maintenus par l'intermédiaire de citations plutôt que par la collaboration directe alors que de nouvelles spécialisations de nanotechnologie voient le jour. Nous ajouterons aux données sur les brevets, les co-auteurs d'articles scientifiques afin de faire le pont entre la recherche fondamentale et son application.

Finalement, l'impact de la structure du réseau sur la capacité à transmettre la connaissance à travers le réseau de même que la relation entre certaines propriétés des réseaux et l'innovation ont été étudiés par certains auteurs sans toutefois obtenir de consensus général. Le rôle de l'architecture du réseau dans la création de connaissances et plus particulièrement dans la génération d'innovations n'est toujours pas déterminé avec précision. Nous travaillons présentement à l'élaboration d'un modèle économétrique qui vise à expliquer la relation qui existe entre la structure du réseau et la propension à l'innovation.



## 7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allen, R.C. (1983). Collective invention. *Journal of Economic Behaviour and Organization*, 4, 1-24.
- Balconi, M., Breschi, S., Lissoni, F. (2004). Networks of inventors and the role of academia: An exploration of Italian patent data. *Research Policy*, 33, 127-145.
- Breschi, S., Lissoni, F. (2003). Mobility and social networks: localized knowledge spillovers revisited. CESPRI Working Papers, 142.
- Breschi, S., Lissoni, F. (2004). Knowledge networks from patent data: Methodological issues and research targets. CESPRI Working Papers, 150.
- Burt, R. (2001). Bandwidth and echo: Trust, information, and gossip in social networks. In: A. Casella, J.E. Rauch (Eds.), *Networks and Markets: Contributions from Economics and Sociology* New York: Russel Sage Foundation.
- Cantner, U., Graf, H. (2006). The network of innovators in Jena: An application of social network analysis. *Research Policy*, 35, 463-480.
- Chen, M.-H., Wang, M.-C. (2008). Social networks and a new venture's innovative capability: the role of trust within entrepreneurial teams, *R&D Management* 38(3), 253-264
- Cockburn, I.M., Henderson, R.M. (1998). Absorptive capacity, coauthoring behavior, and the organization of research in drug discovery. *The Journal of Industrial Economics*, 46(2), 157-182.
- Cowan, R., Jonard, N. (2003). The dynamics of collective invention. *Journal of Economic Behaviour and Organization*, 52, 513-532.
- Cowan, R., Jonard, N. (2004). Network structure and the diffusion of knowledge. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 28, 1557-1575.
- Cowan, R., Jonard, N., Ozman, M. (2004). Knowledge dynamics in a network industry. *Technological Forecasting and Social Change*, 71, 469-484
- Cowan, R., Jonard, N., Zimmermann, J.-B. (2007). Bilateral collaboration and the emergence of innovation networks. *Management Science*, 53, 7, 1051-1067
- CREA, (2005). Creative capabilities and the promotion of highly innovative research in Europe and the United States, European Commission, Project Reference 511889 (NEST).
- Dahl, M.S., Pedersen, C.O.R. (2004). Knowledge flows through informal contacts in industrial clusters: myth or reality? *Research Policy*, 33, 1673-1686.

- de Nooy, W., Mrvar, A., Batagelj, A. (2005). *Exploratory Social Network Analysis with Pajek*. Cambridge: Cambridge University Press
- Ducor, P. (2000). Intellectual property: Coauthorship and coinventorship. *Science*, 289(5481), 873-875.
- Ejermo, O., Karlsson, C. (2006). Interregional inventor networks as studied by patent coinventorships. *Research Policy*, 35, 412-430.
- Fleming, L., King, C.IV., Juda, A. (2006). Small worlds and innovation. SSRN Working Papers.
- Gauvin, S. (1995). Networks of innovators: Evidence from Canadian patents. *Group Decision and Negotiation*, 4, 411-428.
- Gulati, R., Gargiulo, M. (1999). Where do interorganizational networks come from? *American Journal of Sociology* 104, 1439-1493.
- Krebs, Valdis. (2006). *Social network analysis*. Available on-line: <http://www.orgnet.com/sna.html>
- Lamoreaux, N.R. and , Sokoloff, K.I. (1997). Location and technological change in the American glass industry during the late nineteenth and early twentieth century. NBER Working Papers, 5938.
- Mariani, M. (2000). Networks of inventors in the chemical industry. MERIT Research Memorandum.
- Morone, P., Taylor, R. (2004). Knowledge diffusion dynamics and network properties of face-to-face interactions. *Journal of Evolutionary Economics*, 14, 327-351.
- Newman, M.E.J. (2001a). Scientific collaboration networks. I. Network construction and fundamental results. *Physical Review*, 64, 016131.
- Newman, M.E.J. (2001b). Scientific collaboration networks. II. Shortest paths, weighted networks, and centrality. *Physical Review*, 64, 016131.
- Newman, M.E.J. (2001c). Clustering and preferential attachment in growing networks. *Physical Review*, 64, 025102.
- Newman, M.E.J. (2001d). The structure of scientific collaboration networks. *Proceedings of National Academy of Sciences*, 98(2), 404-409.
- Newman, M.E.J., Watts, D.J., and , Strogatz, S.H. (2002). Random graph models of social networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99, 2566-2572.
- Phelps, C. (2003). Technological exploration: A longitudinal study of the role of recombinatory search and social capital in alliance networks. Unpublished dissertation, New York University, New York.

- Putsch, F. (2006). Analysis and modeling of science collaboration networks. Working Paper.
- Saxenian, A. (1994). *Regional Advantage: Culture and Competition in Silicon Valley and Route 128*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Schiffauerova, A. and Beaudry, C. (2008). "Geographical Aspects of Collaboration in Canadian Nanotechnology Innovation", *NanoBank Conference*, Boston, MA, May 3
- Schilling, M.A., Phelps, C.C. (2007). The impact of large-scale network structure on firm innovation. *Management Science*, 53, 7, 1113-1126
- Schrader, S. (1991). Informal technology transfer between firms: Cooperation through information trading. *Research Policy*, 20, 153-170.
- Singh, J. (2005). Collaborative networks as determinants of knowledge diffusion. *Management Science*, 51(5), 756-770.
- Stuart, T. E. (2000). Interorganizational alliances and the performance of firms: A study of growth and innovation rates in a high technology industry. *Strategic Management Journal*, 21, 791-812.
- Uzzi, B., Spiro, J. (2005). Collaboration and creativity: The small world problem. *American Journal of Sociology*, 111 (2), 447-504.
- von Hippel, E. (1987). Cooperation between rivals: Informal know-how trading. *Research Policy*, 16, 291-302.
- Wasserman, S., Faust, K. (1994). *Social network analysis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Zucker, L.G., Darby, M.R. (1996) Star scientists and institutional transformation: Patterns of invention and innovation in the formation of the biotechnology industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93, 12709-12716. 1996.
- Zucker, L.G., Darby, M.R., Brewer, M.B. (1996). Collaboration Structure and Innovation Dilemmas in Biotechnology. In: R.M.T.T.R. Kramer (Ed.), *Trust in Organizations* (pp. 90-113). Thousand Oaks, California: Sage.
- Zucker, L.G., Darby, M.R., Armstrong, J. (1998a). Geographically localized knowledge: Spillovers or markets? *Economic Inquiry*, 36(1), 65-86.
- Zucker, L.G., Darby, M.R., Brewer, M. (1998b). Intellectual human capital and the birth of US biotechnology enterprises. *American Economic Review*, 88, 290-306.
- Zucker, L.G., Darby, M.R. (2005). Socio-economic impact of nanoscale science: Initial results and Nanobank, NBER Working Paper #11181.