



HAL
open science

Les relations entre sciences, technologies et territoires au cœur de la souveraineté nationale : une approche structurale sur longue période

Gabriel Vernhes

► To cite this version:

Gabriel Vernhes. Les relations entre sciences, technologies et territoires au cœur de la souveraineté nationale : une approche structurale sur longue période. Economies et finances. Institut Polytechnique de Paris, 2024. Français. NNT : 2024IPPAE002 . tel-04731706

HAL Id: tel-04731706

<https://theses.hal.science/tel-04731706v1>

Submitted on 11 Oct 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



INSTITUT
POLYTECHNIQUE
DE PARIS

NINT : 2024IPPAE002

Thèse de doctorat



Les relations entre sciences, technologies et territoires au cœur de la souveraineté nationale : une approche structurale sur longue période.

Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Paris
préparée à l'École nationale supérieure de techniques avancées
(ENSTA Paris)

École doctorale n°626
Ecole doctorale de l'Institut Polytechnique de Paris (ED IP Paris)
Spécialité de doctorat : Sciences économiques

Thèse présentée et soutenue à Palaiseau, le 23 mai 2024, par

Gabriel Vernhes

Composition du Jury :

Alessandro Riboni

Professeur, École polytechnique

Président

Béatrice Dumont

Professeure, Université Sorbonne Paris Nord

Rapporteuse

Jean Belin

Maître de conférences, Université de Bordeaux

Rapporteur

Anne Plunket

Professeure, Université Paris-Saclay

Examinatrice

Didier Lebert

Professeur, ENSTA Paris

Directeur de thèse

Richard Le Goff

Professeur, ENSTA Paris

Co-Directeur de thèse

Thèse de doctorat
en science économique

Gabriel Vernhes
ENSTA Paris
Institut Polytechnique de Paris

Les relations entre sciences, technologies et territoires au cœur
de la souveraineté nationale :
une approche structurale sur longue période

Thèse co-dirigée par Didier Lebert
Et Richard Le Goff

Membres du Jury :

Rapporteuse	Béatrice Dumont	Université Sorbonne Paris Nord
Rapporteur	Jean Belin	Université de Bordeaux
Examinatrice	Anne Plunket	Université Paris-Saclay
Président	Alessandro Riboni	École Polytechnique
Directeur de thèse	Didier Lebert	ENSTA Paris
Co-Directeur de thèse	Richard Le Goff	ENSTA Paris

À ma famille, mes amis.

Remerciements

Je tiens avant tout à exprimer ma profonde gratitude envers Richard Le Goff, dont la confiance et le soutien ont été déterminants dans le progrès de ma formation depuis le Master jusqu'à cette dernière année de thèse. Qu'il soit ici chaleureusement remercié.

Je tiens à remercier avec une égale intensité Didier Lebert, dont les enseignements et la disponibilité m'ont permis de faire miennes les connaissances nécessaires à l'accomplissement de ce travail de thèse. Je souhaite à tout doctorant de pouvoir profiter un jour de ses inspirations.

Je remercie ensuite les membres de mon jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail et de me faire le grand honneur de manifester leur intérêt pour ma recherche en assistant à ma soutenance. Je tiens tout particulièrement à remercier Béatrice Dumont, qui suit l'avancée de mes travaux depuis plus de deux ans.

Je tiens également à remercier mes collègues et camarades du laboratoire d'économie appliquée, qui, par leurs innombrables conseils, m'ont permis de surmonter les obstacles tant techniques, qu'administratifs, se dressant sur la quête de mon doctorat. Leur camaraderie a été un précieux allié dans cet exercice solitaire. Aussi, je tiens à remercier Dorgyles Kouakou, Eva Szego, Cécile Fauconnet, François-Xavier Meunier et Clément Sternberger.

Ce travail n'aurait pu aboutir sans le concours du personnel de l'ENSTA qui permet de maintenir jour après jour un environnement de recherche fiable et stimulant. Je remercie en particulier Annie Joncquais dont la bienveillance et la disponibilité ont été des atouts précieux pour le traitement de la multitude d'affaires courantes ayant jalonné ces trois dernières années.

Il convient également de rendre hommage aux rencontres qu'il m'a été permis de faire lors de conférences internationales. Ces échanges ont joué un rôle important dans la motivation et la qualité de mes travaux. Plus particulièrement, je tiens à remercier Josselin Droff, Julien Malizard, Renaud Bellais, Yaniv Proselkov, Giulio Prevedello et Matteo Straccamore. En espérant ardemment que l'avenir nous permette à nouveau d'échanger et de collaborer.

Ces remerciements ne pourraient être complets sans nommer expressément les enseignants dont la dévotion et l'éloquence ont largement inspiré mon intérêt pour les sciences économiques. Ainsi, je rends hommage à Julien Milanesi et à Gabriel Colletis. La qualité de leur enseignement et de leur implication sont des atouts précieux pour les universités toulousaines.

Sur le plan personnel, je tiens à remercier l'ensemble de mon entourage, famille et amis, pour avoir eu le courage de s'intéresser à mon sujet de thèse. Qu'ils me pardonnent mes longues explications ennuyantes, mes démonstrations exaltées et mes absences récurrentes. La thèse est un exercice édifiant, qui laisse une large place au doute, l'attention et l'écoute dont ils m'ont entouré ont été indispensables à l'aboutissement de ce manuscrit.

Plus particulièrement, je tiens à remercier ma mère, Geneviève, pour ses innombrables efforts, mon père, Damien, pour ses enseignements et ma sœur Emma, pour son exemple.

Je remercie également Angy, Erwan, Mathieu, Eugénie, Mathilde, Adrien F., Bibox, Fabien, Clovis et toutes mes Crapules, mais également Victor, Lucas, Adrien M., Léna, Lise, Pédro et toute l'équipe Moontrip. Je tiens enfin à remercier Bob Marley et Ben & Jerry's pour m'avoir apporté réconfort et sérénité dans les moments difficiles.

Résumé

L'activité scientifique, en tant qu'activité de création de connaissances universelles, est depuis longtemps reconnue comme un moteur de progrès technique au sein de nos sociétés. Au sortir de la Seconde Guerre mondiale, Bush (1945) a souligné l'importance cruciale de la science pour l'issue de la guerre et son rôle futur dans le développement et la prospérité des États-Unis. Bien que la littérature académique actuelle reconnaisse l'importance des avancées scientifiques pour le développement technologique, cette dimension demeure sous-documentée dans le contexte spécifique de l'industrie de la défense. L'innovation générée par cette industrie est vitale pour la protection de la souveraineté et des intérêts nationaux, et constitue également un vecteur significatif de développement territorial en termes d'emplois et de retombées technologiques.

Ce travail de thèse emploie une large gamme de méthodologies quantitatives afin d'étudier les interactions entre la science et la technologie dans les domaines stratégiques d'innovation. Ces interactions sont examinées dans le cadre théorique des systèmes d'innovation, au niveau sectoriel, national et international.

Ce manuscrit s'organise autour de deux chapitres théoriques permettant de définir précisément les contours de notre cadre conceptuel ainsi que les spécificités entourant l'étude des innovations de défense. Ainsi notre premier chapitre détaille la dichotomie existant dans la nature de la connaissance et comment celle-ci affecte sa diffusion géographique. Nous détaillons également la notion de territoire et son importance dans l'étude de l'innovation au travers du concept de système d'innovation.

Notre second chapitre préliminaire définit le secteur de la défense, son évolution et la conceptualisation de l'innovation en matière de défense dans le cadre d'un système d'innovation de défense. Nous détaillons les méthodes d'identification des flux de connaissances technologiques et scientifiques utilisées en économie de la défense et la limite liée au secret dans la collecte de nos échantillons de données.

Notre troisième chapitre présente nos premiers résultats empiriques. Ceux-ci utilisent les citations scientifiques présentes dans les brevets identifiés comme ayant une application militaire ou aérospatiale afin d'identifier un réseau de connaissance scientifique intéressant la défense. Nous mobilisons la théorie des graphes afin de décrire les évolutions dans la structure de ce réseau depuis de la fin de la guerre froide. Nous étudions également le réseau de

connaissances technologiques sur la même période. Nos résultats soulignent l'influence de nouveaux acteurs qui ont transformé la dynamique de diffusion des connaissances. Nous observons également une dichotomie dans la structure des échanges de connaissances scientifiques et technologiques, illustrée par l'existence de clusters d'échanges de connaissances bien plus marquée au sein du réseau de connaissances technologiques.

Le quatrième chapitre explore la complémentarité des relations explicites et implicites liant la science et la technologie. Pour cela, nous comparons l'impact des réseaux de citations avec celui de la proximité sémantique dans le cas d'usage d'une innovation duale, l'impression 3D. Il est démontré que les références scientifiques présentes dans les inventions sont guidées par deux phénomènes parallèles, mais distincts. D'une part, le réseau de références exerce une influence déterministe, où les pratiques de référencement antérieures influencent les citations futures, plaçant l'innovation sur un schéma linéaire de long terme. D'autre part, la proximité sémantique explique le référencement par le degré d'association d'une production scientifique à la communauté épistémique qui applique ces connaissances. Cette dernière révèle un processus de référencement plus instantané, motivé par la résolution de problèmes communs et l'utilisation de concepts familiers.

Dans notre dernier chapitre, nous analysons les mesures d'autonomie stratégique scientifique et technologique afin d'évaluer l'influence de la maîtrise des connaissances scientifiques par un territoire sur l'accroissement de son autonomie stratégique en matière d'innovation de défense. Nos résultats révèlent une corrélation forte et significative entre le contrôle territorial des connaissances scientifiques, en particulier dans les domaines des sciences physiques et l'augmentation de l'autonomie stratégique en matière d'innovation. Nous interprétons ces résultats comme relevant d'une dimension tacite dans les échanges scientifiques, qui permet aux nations de bénéficier localement du développement de la recherche scientifique, malgré son caractère codifié et largement international.

En conclusion, nous avançons que l'innovation de défense se construit dans un réseau globalisé de connaissances scientifiques et technologiques, où les avancées théoriques et leurs applications techniques entretiennent des interactions fortes. La colocalisation de ces deux types d'activité sur un même territoire est un vecteur d'accroissement de la qualité et de la quantité des innovations à usage militaire et aérospatial. Cependant, la productivité du système d'innovation de défense reste soumise à une diversité de facteurs clefs situés dans l'environnement politique, institutionnel et économique du territoire concerné.

Table des matières

Remerciements	7
Résumé	9
Table des matières	11
Introduction générale.....	15
Chapitre 1 : La connaissance et le territoire.....	29
Introduction.....	30
1 La connaissance dans l'économie	31
1.1 Les différentes formes de connaissances.....	32
1.1.1 La connaissance codifiée.....	32
1.1.2 La connaissance tacite.....	35
1.1.3 La diffusion des connaissances	37
1.2 Les activités productrices de connaissances.....	40
1.2.1 La Science.....	41
1.2.2 La Technologie.....	43
1.2.3 Le lien entre science et technologie dans le processus d'innovation.....	45
2 L'autonomie des territoires	50
2.1 La notion de territoire en économie.....	50
2.1.1 Le territoire	50
2.1.2 La proximité entre acteurs.....	52
2.1.3 Les modèles territoriaux de production.....	53
2.1.4 Les systèmes d'innovation territoriaux	55
2.2 La question de la souveraineté	60
2.2.1 L'autonomie stratégique comme composante de la souveraineté nationale.....	62
2.2.2 L'autonomie stratégique par l'innovation	64
Conclusion	68
Chapitre 2 : L'innovation de défense	69
Introduction.....	70
1 Qu'est-ce que la défense ?.....	71
1.1 Le Complexe Militaro-Industriel.....	71
1.2 La Base Industrielle et Technologique de Défense	73
1.3 Les Systèmes d'Innovation de Défense.....	75

2	La fin de la guerre froide, un tournant pour l'innovation de défense.....	78
2.1	Privatisation et internationalisation	78
2.2	Des innovations complexes, dépendantes des avancées scientifiques.....	80
3	L'identification des connaissances intéressant l'innovation de défense	84
3.1	Les technologies de défense	84
3.2	La science de défense	88
3.3	Les bases de données.....	89
4	La limite du secret	94
4.1	Historique de la pratique de mise au secret des inventions	94
4.2	Processus de mise au secret.....	96
4.3	Quantification.....	97
	Conclusion	100

Chapitre 3 : La Diffusion Internationale des Connaissances intéressant la Défense : une approche structurale des évolutions marquant la période post-guerre froide 103

	Résumé.....	104
	Introduction.....	105
1	Contexte théorique	108
1.1	Évolution du secteur de la défense	108
1.2	L'internationalisation des systèmes d'innovation	112
1.3	La Science et la Technologie en matière de défense	115
1.3.1	La Science et la Technologie	115
1.3.2	L'identification des connaissances intéressant la défense.	119
1.4	L'autonomie stratégique.....	122
1.4.1	Origine et définition	122
1.4.2	Précédentes études	123
2	Méthodologie et Données.....	125
2.1	Données.....	125
2.2	Calcul des indicateurs.....	127
2.2.1	Matrice de flux et matrice de Ghosh	127
2.2.2	Indicateur d'autonomie stratégique	130
2.2.3	Clustering des relations d'interdépendances	131
3	Résultats	133
3.1	Matrice du flux	133
3.1.1	Réseau de connaissances technologiques.....	133
3.1.2	Réseau de connaissances scientifiques.....	136
3.2	Clusters d'interdépendance	138
3.2.1	Réseau technologique.....	138
3.2.2	Réseau scientifique.....	141
3.3	Autonomie stratégique	143

3.3.1	Hiérarchies technologiques	143
3.3.2	Hiérarchies scientifiques	145
4	Interprétation	147
4.1	Evolution post guerre froide.....	147
4.2	Interprétations théoriques	155
	Conclusion	158
	Annexes.....	160

Chapter 4 : Tacit Influence in the Science-Technology Relationship: A Comparison of Citation- and Semantic-Based Indicators in Identifying Technologically Relevant Papers 163

	Abstract	164
	Introduction.....	165
1	Literature review	168
2	Methodology and data	175
2.1	Case study: 3D printing.....	175
2.2	Definitions of indicators.....	176
2.2.1	Citations-based indicator: co-references between focal papers and patents.....	177
2.2.2	Semantic-based indicator: mean similarity between documents contents.....	178
2.3	Data	180
2.4	Econometric strategy	184
2.4.1	Main model	184
2.4.2	Robustness	186
3	Results	188
3.1	Main Results.....	188
3.2	Robustness results	193
4	Theoretical implications.....	197
	Conclusion	199
	Appendix.....	200

Chapitre 5 : Le rôle de la Science pour l'Autonomie des Nations dans l'innovation stratégique : étude économétrique des flux de connaissances intéressant la défense ... 211

	Résumé.....	212
	Introduction.....	213
1	Cadre théorique	217
1.1	La relation science-technologie dans l'industrie de la défense.....	217
1.1.1	La science et la technologie	217
1.1.2	Les spécificités de l'industrie de défense	221

1.2	L'autonomie des systèmes d'innovation de défense	223
1.2.1	Les Systèmes d'Innovation de Défense.....	223
1.2.2	L'autonomie des systèmes	226
2	Méthodologie et Données.....	230
2.1	Données.....	230
2.2	Calcul des indicateurs d'autonomie stratégique	231
2.3	Construction du panel.....	233
2.3.1	Variables de contrôle.....	233
2.3.2	Imputation des données.....	235
2.3.3	Statistiques descriptives	237
2.4	Stratégie économétrique.....	238
2.4.1	Test causalité au sens de Granger.....	240
2.4.2	Méthode par Entropy Balancing.....	241
3	Résultats	245
3.1	Résultats descriptifs.....	245
3.2	Résultats économétriques	249
3.2.1	Granger-causalité	249
3.2.2	<i>Entropy Balancing</i>	251
3.3	Robustesse.....	253
3.3.1	Variables de contrôle additionnelles	254
3.3.2	Modèle à effet fixe avec variables instrumentales.....	254
3.3.3	Échantillons restreints du panel.....	257
3.3.4	Mesure alternative de l'autonomie stratégique scientifique.....	259
4	Interprétation et Discussion.....	261
	Conclusion	263
	Annexes.....	264
	Conclusion générale	273
	Bibliographie.....	279
	Table des figures	313
	Liste des tableaux	314

Introduction générale

L'invasion de l'Ukraine par la Russie en 2022 a ravivé les tensions internationales à un niveau inédit depuis la fin de la guerre froide. Cette situation a entraîné une hausse substantielle des budgets gouvernementaux accordés à la défense. Le Japon, historiquement pacifiste depuis la Seconde Guerre mondiale, a même annoncé son intention de dépasser la limite auto-imposée de 1% de son PIB consacré à la défense, en réponse à l'agressivité croissante de la Chine¹. La perspective d'une nouvelle opposition bipolaire entre les membres de l'OTAN, la Russie et la Chine, laisse présager un maintien des tensions à un niveau élevé sur la prochaine décennie. Les tensions géopolitiques mondiales sont un facteur d'accroissement de la « course à l'armement » entre puissances. Cette dynamique, prédominante durant la guerre froide, se caractérise par son aspect en partie auto-entretenu, le développement d'une nouvelle technologie par l'adversaire constituant une nouvelle menace qui relève la nécessité de développer une technologie pour y faire face (Collier et Hoeffler 2002; Bellais 2013). Dans ce contexte, l'innovation de défense joue un rôle clef pour les pouvoirs publics à travers trois vecteurs principaux. Tout d'abord, elle permet à une nation de surpasser un adversaire via un avantage tactique ou matériel, une supériorité technologique agissant comme un mécanisme de dissuasion (Sempere 2015). Ensuite, elle est un vecteur d'activité économique permettant des créations d'emplois et des gains de compétitivité (Edquist 1997). Enfin, l'innovation de défense permet un nombre important de retombées technologiques vers le domaine civil ou *spin-off* (Alic, Branscomb, et Brooks 1992). Internet, le GPS ou l'aviation civile constituent des exemples courants de ces retombées.

L'innovation de défense est un enjeu complexe, qui intéresse les sphères politiques, industrielles, académiques, militaires et bien entendu économiques. Ce sujet s'étend à de nombreux domaines, allant du commerce international des armes aux politiques publiques en matière de Recherche et Développement (R&D). En conséquence, ce sujet bénéficie d'une large attention de la part des pouvoirs publics et profite de contributions importantes dans de nombreux domaines de la science économique, comme en économie industrielle, en économie publique, ou en économie internationale.

¹ P. Mesmer, « Le Japon prêt à doubler ses dépenses de défense », *Le Monde*, 26 nov. 2021.

Ce travail de thèse se situe à l'intersection des études en économie de l'innovation, en économie de la connaissance et en économie de défense. Il se concentre, en premier lieu, sur le lien entre la connaissance et l'innovation.

Le rôle central que jouent la production et la diffusion des connaissances dans le développement économique a engendré une littérature académique considérable. Déjà présentes dans la théorie de la division du travail d'Adam Smith et dans les derniers travaux de Joseph Schumpeter (Forest et Serrate 2011), l'importance de la connaissance dans l'économie a été l'objet d'une série importante de travaux depuis le début des années 1990. Ce courant, désigné sous les termes « économie de la connaissance », « économie de l'apprentissage » ou « économie basée sur la connaissance », renvoie à des écoles de pensée parallèles, en partie superposées, qui reflètent l'évolution de l'économie contemporaine vers des industries au sein desquelles la création, la diffusion et l'application de la connaissance sont au cœur de la croissance économique et du développement (Leydesdorff 2006). Cette évolution est notamment rendue possible par le développement des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC). Ces technologies, en réduisant le coût d'accès à la connaissance, favorisent une diffusion plus large de celle-ci. Une plus grande disponibilité permet alors d'accroître le stock de connaissances par individu et leur capacité à être combinées de manière innovante, en vertu du caractère co-relationnel de la production de connaissance : l'élaboration de nouvelles connaissances augmente les combinaisons et recombinaisons possibles entre ces connaissances (Fleming et Sorenson 2004).

Au sein de ce cadre général, cette thèse se concentre sur l'étude des connaissances scientifiques et technologiques. L'étude de ces connaissances et de leurs interactions nous place dans une longue évolution de la conceptualisation du rôle de ces deux entités dans le processus d'innovation. Longtemps considérées comme exogène, les activités scientifiques et technologiques étaient confondues dans une « boîte noire », dont la production était indépendante du champ d'analyse économique (Rosenberg 1990). La relation entre ces activités a été ensuite considérée comme linéaire et hiérarchique, la science étant vue comme la source du développement technologique et l'étape obligée pour toute forme d'innovation. Le modèle rétroactif a donné ensuite à la science un rôle plus transversal permettant d'alimenter en connaissance chaque étape du processus de conception des innovations et d'inclure des phénomènes de rétroaction sur l'activité scientifique (Kline et Rosenberg 1986). Enfin, le développement de la théorie des systèmes d'innovation a permis de tenir compte de la nature des acteurs impliqués dans la création et la diffusion des connaissances. L'innovation est

aujourd'hui considérée comme le produit d'un réseau d'acteurs en interaction, influencés par la nature de leur proximité. Les systèmes d'innovation permettent d'intégrer l'environnement institutionnel des acteurs et la dimension territoriale au cœur de l'analyse de l'innovation (Lundvall 1992; Amable 2001).

Ce travail de thèse se place dans la perspective de la théorie des systèmes d'innovation appliquée à la défense afin de pouvoir intégrer une notion ayant une importance croissante pour les acteurs de la défense et qui a trait à son caractère crucial pour la protection de la souveraineté nationale : l'autonomie stratégique.

Dans la littérature récente, l'Autonomie Stratégique (AS) renvoie à un concept évoqué à l'échelle de l'Union européenne dans la construction d'une alternative à l'OTAN pour défendre les intérêts collectifs des nations. Cette autonomie stratégique va au-delà d'une simple capacité de défense, mais englobe également un ensemble de systèmes permettant à l'Union d'être autonome dans la fourniture d'équipements militaires, dans l'innovation technologique de pointe et dans l'accès aux matières premières stratégiques. L'autonomie stratégique se déploie ainsi sur les dimensions politiques, opérationnelles et industrielles (Kempin 2017). Sur sa dimension opérationnelle, elle peut être conçue comme un « outil militaire permettant d'agir seul », associé à des « capacités d'entraînement permettant de ne pas le rester » (Charillon 2013, p.1). Sur sa dimension industrielle, et plus précisément sur l'innovation industrielle, l'autonomie stratégique s'interprète comme la capacité des nations à placer sous leur contrôle les systèmes scientifiques et techniques leur permettant de pourvoir en innovation leur Base Industrielle et Technologique de Défense (BITD).

La notion d'AS est logiquement liée à celle de territoire. Une nation autonome concentrera sur son territoire les acteurs et les systèmes d'interactions capables de produire et de diffuser les connaissances nécessaires à une innovation de défense soutenue. L'ancrage territorial de la connaissance tient à une dichotomie dans la nature profonde du concept de connaissance. Cette dernière se distingue en ce qu'elle relève plus ou moins d'une dimension codifiable, explicite et universelle, ou au contraire tacite et strictement personnelle. Michael Polanyi est le premier à avoir relevé l'importance de la connaissance tacite au sein de nos sociétés (Polanyi 1958). Selon lui, chaque nouvelle connaissance est en partie codifiable, son auteur peut faire l'effort d'explicitier son savoir au travers d'un support. La reproduction de cette connaissance est ensuite intimement liée à la reproduction de son support, dont le coût est généralement nul ou considéré comme tel. Cependant, le processus de codification est présenté

comme nécessairement limité, une partie de la connaissance demeure incarnée par son auteur. Cette partie de la connaissance est tacite et profondément ancrée dans l'action, l'engagement, l'expérience personnelle et les contextes spécifiques à chaque individu. De plus, cette connaissance peut ne pas être conscientisée, la rendant plus difficile à formaliser (Castillo 2002).

Bien que les connaissances codifiées puissent être communiquées à distance à un coût quasi-nul, la présence d'une dimension tacite limite la diffusion de certaines connaissances à une échelle géographique restreinte. Cette distinction est, par exemple, au cœur de l'opposition entre connaissances locales « collantes » et connaissances globales « omniprésentes » conceptualisée par Asheim et Isaksen (2002). Cette distinction fait reposer le processus d'innovation sur deux niveaux géographiques distincts. Le premier est local et nécessite une proximité physique entre acteurs pour permettre la diffusion et l'enrichissement des connaissances tacites au travers d'interactions sociales au sein d'un réseau interpersonnel. Le second est national, voire international, et dépend de l'intégration de connaissances globales plus codifiées et génériques en circulation entre les territoires.

Cette dynamique est étayée par les recherches visant à évaluer l'ampleur de ce que Marshall (1919) avait appelé « atmosphère », confirmant l'hypothèse que les externalités de connaissances sont limitées spatialement (Feldman 1994; Mouhoud 2006). En optimisant leur localisation pour profiter au maximum des externalités technologiques, les acteurs stimulent la production de connaissances par le biais d'interactions multiples et d'échanges d'informations (Jaffe, Trajtenberg, et Henderson 1993). Ces travaux ont donc contribué à l'émergence de l'idée selon laquelle la proximité géographique constitue un vecteur positif pour l'innovation.

Ce « dogme » est cependant rapidement remis en question par les travaux de l'École française de la Proximité, qui relativise l'importance de la proximité géographique entre acteurs face à d'autres formes de proximité, notamment relationnelle, organisationnelle, institutionnelle ou cognitive (Boschma 2005). Chaque territoire est ainsi doté d'une base singulière de connaissances, composée de connaissances explicites principalement incarnées dans des ouvrages et de connaissances tacites incarnées dans les individus. Cette base de connaissances est couplée à des capacités de création, de diffusion et d'absorption de connaissances fortement dépendante du niveau de proximité entre les acteurs présents sur le territoire.

Le développement récent du cadre conceptuel des Systèmes d'Innovation de Défense (SID, James 2009 ; Cheung 2021) offre une approche pertinente pour comprendre l'innovation dans le domaine de la défense, soulignant les interactions entre les acteurs étatiques et

industriels dans le développement de technologies militaires. Le SID permet de mettre en évidence le rôle central de l'État comme principal financeur et acquéreur des technologies de défense, influençant ainsi directement les orientations de l'innovation. Ce cadre conceptuel permet également de souligner les facteurs clefs influençant l'innovation dans ce secteur. Ceux-ci sont notamment le soutien politique de haut niveau, le niveau de menace externe, les transferts de technologie, le capital humain, ainsi que la qualité des structures institutionnelles et organisationnelles. Ces éléments façonnent l'environnement dans lequel les entreprises du secteur de la défense opèrent, agissant en tant que maîtres d'œuvre pour fournir les équipements essentiels à la protection des intérêts et de la souveraineté de l'État.

L'étude des capacités des territoires à produire des connaissances stratégiques est d'autant plus nécessaire que ces trois dernières décennies ont été marquées par des changements profonds ayant transformé le rapport entre le territoire et l'innovation de défense.

En effet, la chute de l'Union soviétique a marqué un changement de paradigme dans l'industrie de la défense, signalant la fin de la guerre froide et ouvrant une ère de détente internationale. Cette période a été caractérisée par une baisse notable des dépenses militaires des pays développés. Cette réduction des dépenses militaires a permis de réorienter des ressources considérables vers les secteurs civils, contribuant ainsi à la diminution des déficits publics et stimulant les investissements dans des domaines vitaux tels que la santé et l'éducation. Cette période, souvent désignée comme celle des « dividendes de la paix », a représenté un moment significatif de réévaluation des priorités nationales. Cependant, le début des années 2000 a vu un revirement de situation. Un contexte géopolitique en mutation, marqué par un changement politique en Russie, la montée en puissance de la Chine et les répercussions des attentats du 11 septembre 2001, a entraîné une recrudescence des tensions internationales. Ces nouvelles dynamiques ont provoqué une reprise des investissements dans la défense, à l'exception notable des puissances européennes qui ont maintenu une approche plus mesurée.

Parallèlement à ces évolutions macroéconomiques, l'industrie de la défense a connu des transformations structurelles profondes, notamment en Europe et en Amérique du Nord. Historiquement dominé par un contrôle étatique direct ou indirect, le secteur a été marqué par une vague de privatisation des moyens de production. Cette privatisation a été motivée par deux objectifs principaux : améliorer l'efficacité des entreprises de défense, notamment en termes de gestion de programmes et de stratégies, et répondre à la contraction des budgets de défense en consolidant la base industrielle, en particulier à l'échelle européenne. En conséquence, de grandes entreprises d'armement ont commencé à diversifier leurs activités vers des marchés

civils, notamment dans des domaines tels que la cybersécurité et la protection d'infrastructures critiques.

La privatisation s'est accompagnée d'une internationalisation dans la production d'armes. Peu après la fin de la guerre froide, la littérature observait déjà une tendance à la production multinationale d'armements, avec des collaborations sur des systèmes d'armes individuels et des liens interentreprises au sein de l'industrie internationale de l'armement (Bitzinger 1994). Cette globalisation de la production de défense s'est accompagnée d'une internationalisation du processus d'innovation.

Pour Hérault (2018), l'internationalisation des chaînes de valeur dans l'industrie de la défense est influencée par plusieurs facteurs. La demande mondiale en armement ayant dépassé les zones de production traditionnelles a stimulé les échanges internationaux. De plus, la complexité technique croissante des systèmes de défense et les contraintes budgétaires des États ont encouragé une spécialisation accrue des acteurs et l'intégration de composants civils moins coûteux. La dualité des chaînes de valeur, avec l'intégration de technologies civiles dans les systèmes militaires, a également renforcé l'internationalisation des approvisionnements. La libéralisation des échanges internationaux d'armement a facilité les transferts d'armes, tandis que les stratégies d'indigénisation adoptées par les États importateurs, impliquant des transferts de technologies et l'intégration de fournisseurs locaux, ont joué un rôle significatif dans l'internationalisation des chaînes de valeur. Enfin, les mouvements capitalistiques, notamment les fusions-acquisitions, ont conduit à l'émergence de groupes de défense transnationaux, favorisant une internationalisation accrue.

Parallèlement, la science joue un rôle croissant dans le développement des innovations de défense. Ces dernières apparaissent comme le produit d'une base de connaissances analytiques, où la création de connaissances repose principalement sur des processus cognitifs et rationnels. Les organisations de défense s'appuient à la fois sur leurs propres services de R&D et sur les résultats de la recherche universitaire. En conséquence, l'industrie de défense peut être associée à un mode d'apprentissage caractérisé par l'utilisation et le développement de connaissances explicites et globales pour résoudre des problèmes locaux et produire des connaissances potentiellement universelles. Ce mode d'apprentissage se distingue d'un mode d'apprentissage basé sur des connaissances tacites et localisées acquises sur le terrain (Jensen 2007).

Le projet Manhattan est un exemple éloquent de l'impact de la science sur la supériorité militaire. Son succès a été un facteur clef dans la formulation d'une doctrine de défense axée sur le progrès scientifique. Le développement des canons électro-magnétiques constitue un

exemple moderne de la corrélation étroite entre les innovations scientifiques et les stratégies de défense nationale. Cette relation entre science et technologie de défense pousse certains auteurs à considérer la course mondiale aux armements comme essentiellement une course à la science (Paarlberg 2004). La mondialisation joue un rôle dans la diffusion des connaissances scientifiques, permettant aux pays moins développés de potentiellement bénéficier des avancées réalisées ailleurs. Ceci relève l'intérêt stratégique de comprendre l'incorporation des avancées scientifiques dans le développement technologique en matière de défense. Certains travaux universitaires montrent pour cela une propension importante de l'industrie de défense à intégrer des sources scientifiques (Fauconnet 2019). Cependant, certains auteurs, tels que Bellais (2005), soutiennent que l'industrie de défense sous-exploite les percées théoriques de la recherche scientifique, appelant à un rapprochement plus étroit entre la défense et la science.

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons d'approfondir l'exploration de la relation entre science et défense, en analysant spécifiquement comment les avancées scientifiques influencent le développement des technologies militaires et aérospatiales. L'objectif principal est de déterminer les sources scientifiques qui alimentent l'innovation dans le secteur de la défense et d'identifier les dynamiques territoriales qui en résultent. Cette approche vise à éclairer la manière dont les connaissances scientifiques sont susceptibles d'influencer les stratégies de défense nationale et contribuent à la compétition internationale, dans un contexte marqué par la mondialisation et une complexification technologique accrue. En outre, cette thèse se concentre sur l'évaluation des capacités des SID à produire et diffuser des connaissances de manière autonome. L'autonomie d'un territoire en termes de connaissances est influencée par la présence de connaissances tacites au sein de celui-ci. Ces dernières, en raison de leur nature difficilement reproductible, sont moins aisément assimilables par d'autres territoires. Nos travaux empiriques prennent en compte cette dimension implicite, bien que difficilement mesurable, car elle demeure centrale pour la compréhension des dynamiques territoriales relatives processus d'innovation stratégique.

Dans la poursuite de cet objectif, nous effectuons trois choix méthodologiques majeurs.

Premièrement, nous nous concentrons sur les interactions entre science et technologie. Ce champ d'étude permet de mieux comprendre les déterminants qui lient les connaissances théoriques, fortement codifiées et à portée universelle, de la science, avec les connaissances appliquées, plus tacites et à usage privé, de la technologie (Cozzens et al. 2005). Il s'agit ici de « remonter » la linéarité du processus d'innovation jusqu'aux sources scientifiques afin de

documenter l'interdépendance de ces deux activités. Pour cela, nous mobilisons tout d'abord les bases de données d'articles scientifiques dans le but d'approximer la quantité et la direction de la recherche scientifique sur les différents territoires. Nous mobilisons, parallèlement, des données de brevets d'invention qui sont un *proxy* fiable et reconnu pour suivre le développement technologique (Jaffe 1989; Griliches 1990). Cette méthode possède cependant certaines limites que nous prendrons soin de détailler. Nous mobilisons enfin une donnée centrale pour le reste de cette thèse : la *Non-Patent Literature* (NPL). Celle-ci regroupe l'état de l'art non-technologique renseigné dans les brevets d'invention. La NPL est principalement composée de références scientifiques (van Raan 2017) qui permettent de construire un pont entre découvertes scientifiques et développements technologiques. Cette méthode comporte également des limites que nous éclairerons en la comparant avec une méthode alternative : la proximité sémantique.

Deuxièmement, nous centrons notre attention sur les systèmes d'innovation territoriaux de défense afin d'analyser les processus d'innovation intra et interterritoriaux. Ce choix se distingue des approches micro-économiques centrées sur les entreprises de défense. Ces approches enrichissent l'analyse de l'innovation de défense en se concentrant sur les firmes. Elles étudient la gestion de la recherche et développement (R&D), les interactions entre firmes, et la réponse aux politiques publiques (Mowery 2010), l'adoption technologique et le lancement de nouveaux produits (Hartley 2012) ou la particularité des bases de connaissances des entreprises de défense (Fauconnet 2019). Cette thèse adopte une approche complémentaire en ralliant les approches institutionnalistes. Ce courant met en avant le rôle des institutions dans l'innovation, et les interactions entre acteurs au sein de l'environnement au travers des notions de complexe militaro-industriel (Adams 1968; Dunne et Sköns 2009), de méso-système d'armement (Mampaey et Serfati 2004; Serfati 2008) ou de système dual d'innovation (Meunier 2017). Notre approche complète modestement ces travaux en exploitant les différentes échelles macro-économiques permises par la théorie de systèmes d'innovation : régionale, nationale et globale. Tout d'abord, l'étude des systèmes nationaux d'innovation profite d'une littérature déjà fournie en économie de défense (Bellais et Guichard 2006; Walsh et Francis 2011; Cheung 2021) sur laquelle nous allons nous appuyer. L'approche régionale, elle, profite d'une littérature importante (Fritsch 2001; David Doloreux 2004; Asheim 2007), mais son application à l'innovation de défense reste encore relativement peu documentée. Nous pouvons cependant nous appuyer sur les premières avancées significatives faites par Lebert et Meunier (2017; 2020). L'approche globale est également bien documentée en dehors du domaine de la défense (Niosi et Bellon 1994; Spencer 2003; Binz et Truffer 2017). Nous nous plaçons sur ce point

dans la droite ligne du concept de Réseau Global de Recherche et Développement (RGRD) orienté « défense » développé par Lebert et Meunier (2020). L'approfondissement des travaux en théorie des systèmes d'innovation à la dimension régionale et globale dans le domaine de la défense représente en cela l'un des apports de cette thèse.

Troisièmement, nous poursuivons l'objectif de comparer les territoires dans leurs capacités à générer et à diffuser des connaissances de manière autonome. Pour cela, nous mobilisons les apports méthodologiques de la théorie de la dominance économique (TDE, Lantner 1974; Lantner et Lebert 2015; Lebert 2016; 2019). Ce cadre conceptuel permet d'interpréter les flux économiques entre territoires à l'aune des effets de domination et des dynamiques d'inégalités exercées par les acteurs les plus influents sur les acteurs les moins influents, contraignant ceux-ci à une action d'adaptation (Perroux 1948; Lebert 2019). En cela, la TDE permet de fixer à travers une approche structurale les rapports de domination, manifestes ou tacites, existant entre les acteurs d'un réseau. À cet ancrage théorique s'ajoute un ancrage méthodologique empruntant à la Théorie des Graphes d'Influence (TGI, Lantner 1974). Dans la TGI, un graphe est constitué de nœuds (entités) reliés par des arcs (relations d'influence), souvent pondérés par diverses métriques. Ces pondérations sont utilisées pour estimer l'influence globale, prenant en compte les relations directes et indirectes. La TGI offre une applicabilité variée et peut être couplée à de nombreux outils d'analyse de graphes, tels que les méthodes d'optimisation et les algorithmes de partitionnement. Dans la littérature, cette approche a d'abord été appliquée aux relations de dépendance et d'interdépendance entre les branches productives des économies nationales (Lantner 1974), les mouvements de capitaux dans l'industrie médiatique (Lequeux 2002), les flux informationnels au sein des entreprises (Gallo 2006) ou les flux de marchandises dans le commerce international (Lebert et Younsi 2015). Dans cette thèse, cette approche sera utilisée pour décrire et analyser des flux de connaissances dans la lignée des travaux de Meunier (2017) sur les innovations duales et de Lebert (2016) et Lebert et Meunier (2020) sur les flux intra et interterritoriaux. Plus précisément, nous nous intéresserons à mesurer l'autonomie stratégique des territoires dans la maîtrise des connaissances nécessaires aux innovations stratégiques. En suivant Lebert et Meunier (2020) et Kouakou et Szego (2022), nous concevons l'autonomie stratégique par l'innovation comme la somme d'une capacité d'autarcie, capturant les capacités des territoires à produire et utiliser les connaissances de manière indépendante, et d'une capacité d'interdépendance, mesurant l'influence que le territoire exerce ou subit de l'extérieur.

Ce travail de thèse porte ainsi son attention sur la production et la diffusion des connaissances scientifiques et technologiques au sein des systèmes géographiques d'innovation de défense. Ceci dans l'objectif d'explorer les dynamiques influençant les relations d'interdépendance et d'autonomie dans le réseau global de flux de connaissances. Cette approche revient à se poser la question de recherche suivante :

Quelles dynamiques influencent les flux de connaissances scientifiques et technologiques dans l'élaboration des capacités d'autonomie stratégique des territoires nationaux ?

Ce travail de thèse se propose d'explorer cette question au sein de cinq chapitres distincts. Nos deux premiers chapitres détailleront de cadre théorique et les précédents travaux soutenant notre question de recherche. Ces chapitres constituent des chapitres préliminaires, permettant d'introduire trois chapitres empiriques. Ces derniers représentent autant d'articles de recherche distincts, dont les apports sont cohérents et complémentaires pour le raisonnement général de cette thèse. Notre prochain point revient en détail sur le plan de thèse de ce document.

Ce travail de thèse questionne la relation existante entre l'activité scientifique et l'activité technologique et comment celle-ci se déploie sur les dimensions nationales et internationales. Nous verrons comment cette relation joue un rôle important dans la capacité des nations à construire une souveraineté économique dans le secteur stratégique de la défense.

Pour cela nous organisons ce manuscrit autour de cinq chapitres : deux chapitres théoriques, et trois chapitres empiriques. Nos deux premiers chapitres représentent des chapitres préliminaires permettant de détailler le cadre théorique et méthodologique mobilisé par nos travaux empiriques. Les trois chapitres suivants explorent empiriquement notre objet de thèse. Nous détaillons ainsi dans un premier temps la structure internationale d'échange de connaissances scientifiques et technologiques dans le spatial-armement afin d'en décrire les dynamiques depuis la fin de la guerre froide. Ensuite, nous nous concentrons sur la relation entre science et technologie en documentant la complémentarité entre deux formes distinctes de lien science-technologie : le lien implicite basé sur la sémantique et le lien explicite, basé sur les citations. Nous adoptons pour cela, une démarche inductive au travers d'un cas d'étude sur une technologie duale, l'impression 3D. Enfin, nous lions les dimensions scientifiques, technologiques et territoriales en comparant l'autonomie stratégique des nations dans la maîtrise des connaissances liées à la défense. Pour cela, nous contrôlons économétriquement

l'impact des capacités scientifiques sur les capacités d'innovation technologiques. Ces trois chapitres empiriques combinent des approches structurales et économétriques.

Le premier chapitre préliminaire aborde la dichotomie fondamentale dans la conceptualisation des connaissances. Il distingue les connaissances tacites, incarnées dans les individus et à la diffusion géographiquement limitée, des connaissances explicites, plus aisément transférables. Cette distinction permet de comprendre les mécanismes de diffusion des connaissances et leur impact sur l'innovation. De plus, le concept de territoire est exploré, soulignant son rôle essentiel dans l'étude des systèmes d'innovation, un élément clef pour saisir la dynamique de l'évolution technologique et scientifique.

Le deuxième chapitre préliminaire définit et analyse le secteur de la défense, en étudiant son évolution historique et la manière dont l'innovation y est conceptualisée. Ce chapitre aborde le système d'innovation de défense, et met en lumière les méthodes utilisées pour identifier les flux technologiques et scientifiques dans le secteur de la défense. Un accent particulier est mis sur les contraintes liées au secret défense, qui limitent la collecte et l'analyse des données, posant ainsi un défi majeur pour la recherche dans ce domaine.

Notre troisième chapitre s'inscrit dans la continuité des travaux de Lebert et Meunier (2017; 2020) sur les réseaux mondiaux de recherche et développement orientés vers la défense. En utilisant une approche structurale à long terme, nous examinons dans ce chapitre l'opposition entre la nature codifiée, universelle et désintéressée des connaissances scientifiques et le caractère plus tacite, privé et concurrentiel des connaissances technologiques. Pour ce faire, nous mobilisons des données de citations de brevets liés à un usage militaire et aérospatial, ainsi que la bibliographie des articles scientifiques référencés dans ces mêmes brevets. Nous appliquons les outils de la Théorie de la Dominance Économique (TDE, Lantner 1974; Lantner et Lebert 2015; Lebert 2016; 2019) afin d'étudier les relations d'interdépendance au sein des réseaux de connaissances internationaux.

Nos résultats mettent en évidence l'existence d'une structure bipolaire dans les échanges de connaissances technologiques. Cette structure est notamment composée de deux clusters : l'un regroupe les membres de l'OTAN et leurs alliés, tandis que l'autre se compose des pays issus de l'éclatement du bloc de l'Est. En revanche, le réseau mondial de connaissances scientifiques ne présente aucune structure particulière. Ce résultat décrit l'interdépendance internationale en termes de connaissances technologiques comme ancrée dans le jeu des alliances géopolitiques. Contrairement aux connaissances scientifiques, dont la diffusion semble moins entravée par le contexte historique et politique.

Notre quatrième chapitre, co-écrit avec Cécile Fauconnet et Clément Sternberger, se concentre sur le lien entre production scientifique et développement technologique. Plus précisément, nous examinons la dynamique entourant la Non-Patent Literature (NPL), qui représente les citations scientifiques présentes dans les brevets d'invention. À cet effet, nous effectuons une comparaison économétrique de deux méthodes d'explication de la présence de ces références dans les inventions. La première méthode repose sur des hypothèses déterministes et postule que les co-citations entre articles scientifiques et brevets d'invention permettent d'expliquer les citations ultérieures reçues par un article (Yamashita 2020). La seconde méthode explique ces citations par la proximité cognitive entre inventeurs et chercheurs, en utilisant la proximité sémantique au sein des productions (Ogawa et Kajikawa 2015; Arts, Hou, et Gomez 2021).

Nos résultats soutiennent la validité de ces deux méthodes et argumentent en faveur de l'existence d'une dimension implicite, non prise en compte par les modèles de co-citations, dans l'explication de l'application des connaissances scientifiques au développement technologique. Ce chapitre nous permet de questionner l'origine des flux de connaissances de la science vers la technologie en soulignant la présence d'un phénomène implicite dont l'influence varie en fonction des régions considérées. Ce chapitre nous permet également de soutenir la pertinence de l'utilisation de la NPL en tant que pont entre la science et la technologie.

Enfin, notre dernier chapitre s'inscrit dans la continuité des travaux de Lebert et Meunier (2020) et Kouakou et Szego (2022) sur le calcul de l'autonomie stratégique des nations dans leur capacité d'innovation de défense. Nous enrichissons cette littérature en ajoutant une dimension scientifique. En utilisant une approche structurale complétée par une étude économétrique, nous cherchons à établir le lien entre l'Autonomie Stratégique Technologique (TSA) et l'Autonomie Stratégique Scientifique (SSA). Pour ce faire, nous mobilisons comme précédemment des données de citations de brevets liés à un usage militaire et aérospatial, ainsi que la bibliographie des articles scientifiques référencés dans ces mêmes brevets. La méthodologie de ce chapitre ajoute la dimension autarcique des flux de connaissances internationaux en complément de la dimension d'interdépendance déjà présentée. La prise en compte de ces deux dimensions est au cœur du calcul de l'autonomie stratégique par l'innovation, afin de ne plus étudier uniquement les flux internationaux, mais plutôt les capacités nationales de chaque acteur. Notre stratégie économétrique comprend principalement une étude d'impact utilisant la méthode par *Entropy Balancing* développé par Hainmueller (2012). Celle-ci permet de considérer le niveau de maîtrise scientifique d'un territoire comme traitement dont

nous mesurons les effets sur une population de 25 pays. Enfin nous consolidons nos résultats à l'aide de modèles et de variables alternatifs.

Nos résultats soutiennent une corrélation entre le niveau retardé d'autonomie scientifiques et le niveau d'autonomie technologique dans le domaine de la défense. Ce résultat suggère un lien de causalité entre les capacités scientifiques intrinsèques à un territoire et sa capacité à innover. Par conséquent, la présence de capacités de production et de diffusion de connaissances scientifiques pertinentes pour l'innovation dans le domaine de la défense, sur un territoire donné, se révèle être un facteur favorisant l'accroissement de l'autonomie stratégique. Cette situation reflète un ancrage territorial des capacités scientifiques, malgré une tendance croissante à l'internationalisation, et peut s'interpréter comme résultant de l'existence de connaissances scientifiques tacites qui favorisent un échange accru de connaissances local.

Chapitre 1 :

La connaissance et le territoire

Introduction

La problématique abordée par cette thèse nécessite de définir clairement les conceptions théoriques relatives à la connaissance, ainsi que la relation complexe que celle-ci entretient avec le territoire qui la produit, l'utilise et la diffuse. Il est essentiel de distinguer les différentes dimensions attribuées au concept de connaissances, notamment l'opposition entre les connaissances codifiées, matérialisées par un support reproductible, et les connaissances tacites, incarnées dans les individus. Par ailleurs, il convient également d'examiner le rôle des activités scientifiques et technologiques dans la production de ces deux formes de connaissances.

Le concept de territoire a été étudié sous divers angles, y compris juridiques, politiques, économiques, culturels et sociaux. Les critères permettant de différencier deux entités territoriales doivent être adaptés à l'objectif théorique poursuivi. En économie de l'innovation, le territoire peut être défini comme un espace d'interactions privilégiées. La proximité géographique, mais également culturelle, linguistique et normative unissant les acteurs d'un même territoire, détermine l'intensité des échanges économiques et cognitifs au sein de celui-ci. C'est dans la particularité de ces interactions que le territoire trouve sa singularité. Elles lui permettent de constituer une base de connaissances qui lui est propre. Les connaissances présentes sur un territoire influencent sa capacité à innover de manière radicale et soutenue, déterminant ainsi sa capacité à guider le progrès technologique à l'échelle mondiale.

Ce premier chapitre théorique vise à détailler les contributions de la littérature soutenant cette conception de la relation entre connaissances et territoire. Nous reviendrons d'abord sur la notion de connaissances en économie, en détaillant l'évolution des concepts qui y sont associés, et notamment la distinction entre sa dimension tacite et explicite. Nous explorerons aussi les raisons qui différencient la science et la technologie dans leur rapport à la production, l'utilisation et la diffusion des connaissances. Ensuite, nous examinerons en détail la notion de territoire et de proximité dans la diversité de leurs conceptions. Enfin, nous aborderons la question de l'autonomie et de la souveraineté des territoires.

1 La connaissance dans l'économie

Le rôle de la connaissance dans l'économie, longtemps considéré comme exogène, a progressivement intégré le champ de l'analyse économique, notamment au travers des travaux de Kenneth Arrow (1962). Pour cet auteur, la production n'est plus seulement une fonction de la main-d'œuvre et du capital, mais aussi une source d'acquisition de connaissances. Il souligne que l'activité de production crée des problèmes qui stimulent l'apprentissage et le développement de solutions innovantes. Cette idée met en évidence le rôle actif de l'expérience dans l'augmentation de la productivité et illustre comment l'information et la connaissance sont générées et utilisées de manière endogène dans l'économie. En cela, la connaissance est un produit secondaire de la production et joue un rôle moteur dans le développement économique. Cependant, la connaissance est ici indissociée de l'information. Cette information-connaissance est alors fondamentalement indivisible, elle accuse un coût de production potentiellement important, par opposition aux coûts plus faibles associés à son utilisation répétée (Arrow 1962; Dosi et Nelson 2010). Son utilisation est supposée entraîner des rendements croissants sous l'argument que plus elle est utilisée, plus il est facile de la comprendre et de l'appliquer (Dosi, Orsenigo, et Labini 2002).

À la suite de ces travaux, la conception de la connaissance évolue vers un concept multidimensionnel qui va bien au-delà de la simple accumulation d'expérience ou d'informations. Selon Foray (2009), la connaissance se définit comme un assemblage dynamique de capacités d'apprentissage et de ressources cognitives. C'est un ensemble de faits, d'informations, de compréhensions et de compétences acquises par l'expérience, l'apprentissage ou l'enseignement. L'information, originellement confondue avec la connaissance, ne peut en être dissociée. Cependant, l'information n'est qu'une composante de la connaissance. Elle est formée de données formatées et structurées, souvent inactives, alors que la connaissance est intrinsèquement active, toujours en évolution et en croissance à mesure que l'individu acquiert de nouvelles informations, compétences ou expériences. Cette dynamique de la connaissance est essentielle à l'avancement et à l'innovation dans les domaines académiques, scientifiques et industriels. La nature dynamique de la connaissance souligne également le rôle crucial de l'apprentissage et de l'éducation dans son acquisition et sa croissance. La connaissance n'est pas seulement acquise, elle est construite et reconstruite continuellement par les individus.

Le développement des TIC a joué un rôle crucial dans la diffusion et l'accumulation des connaissances dans l'ensemble de la société (Carluer et Le Goff 2002; Gallié et Guichard 2002), comme dans le domaine de la défense (Barbaroux 2011). En effet, l'extension des canaux de communication a permis d'augmenter la quantité de connaissances communicables en réduisant la nécessité de les transcrire sur un support (Le Goff 2014). L'importance croissante de la connaissance en tant que capital intangible, fréquemment qualifiée de « capital humain », a été mise en évidence par une multitude d'études à partir du début des années 1990. Ce courant, désigné par les termes « d'économie de l'apprentissage » (Lundvall et Johnson 1994), « d'économie basée sur la connaissance » (Leydesdorff 2006) ou « d'économie de la connaissance » (Foray 2009), attribue à la connaissance le rôle moteur du progrès technique et de l'innovation. La diffusion accrue des connaissances par les TIC a permis un développement des activités intensives en connaissances tel que les nano- et biotechnologies, mais également des technologies de communication elles-mêmes. Ces effets de cercle vertueux ont permis un développement rapide des nouvelles industries du numérique et des gains de productivité importants. Ils ont également permis d'innover radicalement dans les cinq grands domaines d'innovation théorisés par Schumpeter (1942) : les produits, les procédés, les débouchés, les modes de production et les matières premières (Le Goff 2013).

Dans ce contexte, de nombreux travaux ont proposé une conceptualisation de la connaissance en tant qu'actif économique. La prochaine section détaille les différentes formes de connaissances et leur importance pour l'analyse proposée au cours de cette thèse.

1.1 Les différentes formes de connaissances

Les différentes typologies de la connaissance proposées dans la littérature permettent de distinguer des formes très diverses de connaissances. Les distinctions faites peuvent cependant, être réduites à une dichotomie, opposant deux formes de connaissances de nature différente. D'un côté, la connaissance codifiée, incarnée sur un support facilement reproductible et mobile, et de l'autre la connaissance tacite, incarnée dans les individus, difficilement reproductible et peu mobile.

1.1.1 La connaissance codifiée

La connaissance codifiée, ou explicite, est une forme de connaissance qui a été documentée et formalisée de manière à faciliter sa transmission et son stockage. Elle repose

tout entière sur l'existence d'un support, matériel dans le cas d'un ouvrage imprimé, immatériel dans le cadre d'une production numérisée. La reproduction de cette connaissance est alors intimement liée à la reproduction de son support. Le coût de reproduction est ainsi considéré comme faible, voire nul dans le cas d'un support numérique. Cette production sans frais, fait de cette connaissance un bien non-rival, qui est « *soumis à la solidarité dans sa consommation ou son utilisation* » (Ostrom et Ostrom 1977, p.3). Cette caractéristique implique que l'utilisation ou la jouissance de ce bien par une personne n'empêche pas son utilisation ou sa jouissance par une autre. Il reste ainsi disponible pour une utilisation par d'autres en quantité et qualité inchangées. On considère alors que le coût marginal de la consommation d'une unité de connaissance par un individu supplémentaire est nul (Stiglitz 1999). En cela, ce type de connaissance possède une forte capacité à être partagée et diffusée de manière cohérente et uniforme. Cette forme de connaissance se rapproche de l'information. Les manuels, les règles, les procédures, les théorèmes mathématiques, les lois scientifiques, entre autres, sont des exemples de connaissances codifiées. Ces connaissances, en raison de leur formalisation, font souvent l'objet d'une protection par des droits de propriété intellectuelle (DPI), renforçant ainsi leur valeur en tant que bien économique. Ces DPI permettent de rendre la connaissance partiellement excluable, en accordant un droit d'exploitation exclusif à une personne physique ou morale. En cela, on considère la connaissance codifiée comme un bien public impur (Stiglitz 1999).

La capacité à codifier et à transférer efficacement la connaissance constitue une compétence fondamentale pour les organisations, notamment dans les secteurs liés à la science, la technologie et l'innovation. Nonaka et Takeuchi (1995) ont particulièrement mis en avant cette compétence de codification comme l'un des facteurs clefs ayant contribué à la supériorité du système d'innovation japonais à la fin du XX^e siècle. Cependant, la capacité à codifier la connaissance ne doit pas être considérée de manière isolée ; elle est étroitement liée à l'accessibilité et à l'utilisation des TIC. En effet, ces technologies jouent un rôle de facilitateur dans le processus de codification des connaissances. Balconi (1998) a notamment souligné que l'adoption massive des TIC a accéléré la codification des connaissances, même dans des domaines traditionnellement peu intenses en connaissances codifiées.

La conceptualisation de la connaissance codifiée comme un bien public impur, facilement transférable, a permis d'identifier un certain nombre de formes de connaissance dans la littérature. La typologie proposée par Lundvall et Johnson (1994) distingue ainsi quatre formes de connaissance économiquement pertinentes, dont deux sont principalement liées à des

connaissances codifiées (Ancori, Bureth, et Cohendet 2000). Chaque catégorie est envisagée comme comportant une part résiduelle de connaissances tacites (Gorman 2002).

La première tient au « savoir-quoi » (*know-what*) qui constitue une connaissance très proche de l'information. Elle est principalement constituée de faits, comme les prévisions météo du jour ou la date d'un événement historique. Le développement des TIC a rendu ce type de connaissance facilement reproductible et accessible par tous. L'accumulation importante de ce type d'information joue un rôle clef dans des domaines d'expertise précis comme la médecine ou le droit. Une seconde forme de connaissance relève du « savoir-pourquoi » (*know-why*), celle-ci représente les connaissances théoriques liées à la compréhension d'un phénomène naturel, psychologique ou social. Pour les auteurs, ce type de connaissance peut être rapproché de la connaissance scientifique et joue un grand rôle dans le développement technologique dans l'industrie chimique ou électronique. Cette connaissance est supposée être produite et circuler, en autres, au sein des universités.

Une seconde typologie intéressante dans le cadre de cette thèse découle du caractère codifié de la connaissance. C'est le cas de la connaissance « omniprésentes » (« *ubiquitous* »). Ce type de connaissance représente des connaissances universelles en circulation entre les territoires et dont l'absorption par les industries locales joue un rôle important dans le renouvellement de leur sentier technologique (Asheim et Isaksen 2002; Asheim 2007). Ce type de connaissance permet au territoire de nourrir des bases de connaissance dites « analytique », où les connaissances scientifiques sont très importantes et où la création de connaissances est souvent basée sur des processus cognitifs et rationnels, ou sur des modèles formels (Asheim 2007).

Bien que les connaissances codifiées puissent être incorporées dans une diversité de supports comme des enregistrements, des cartes, des livres, des documentaires, etc. Notre approche se concentre sur les connaissances codifiées les plus couramment utilisées dans l'analyse quantitative de l'innovation : les brevets d'invention et les articles scientifiques. Ces données possèdent l'avantage d'être normalisées et massivement disponibles en ligne. Aussi, cette thèse utilisera la production et la diffusion des connaissances codifiées au sein de ces documents comme un *proxy* de l'activité d'innovation présente sur un territoire. Cette utilisation se fait en conscience que ces données ne représentent que la partie la plus visible de la production et des échanges de connaissances.

1.1.2 La connaissance tacite

« *Nous pouvons savoir plus que nous ne pouvons dire* » (Polanyi 1956, p.4).

Cette citation de Michael Polanyi se réfère à l'existence d'une partie intrinsèquement implicite dans l'accumulation et la production des connaissances. Selon cet auteur, chaque unité de connaissance comporte une partie explicite, communicable par le langage ou l'expérience, et une autre intrinsèquement tacite, non-communicable et strictement personnelle. Cette forme de connaissance est profondément ancrée dans l'action, l'engagement, l'expérience personnelle et les contextes spécifiques. Elle comprend des compétences pratiques, des savoir-faire, des intuitions et des expériences qui ne peuvent pas être facilement exprimées ou formalisées. Ce type de connaissance est incorporé dans l'esprit des individus et peut être difficile à transférer ou à partager sans un processus d'apprentissage direct bâti sur l'interaction et l'expérimentation. De plus, l'existence de ce type de connaissance peut, dans sa forme la plus pure, échapper à la conscience de l'individu, elle est alors intrinsèquement ineffable (Grant 2007). L'accumulation de ces connaissances par un individu relève alors d'un « apprentissage par le corps », difficilement conscientisable (Nonaka et Takeuchi 1995).

Cette partie cachée de la connaissance, difficile à quantifier, amène certains économistes à la considérer comme un bien privé. Par opposition à l'information-connaissance pure considérée comme un bien public, la connaissance tacite, en raison de sa nature unique et personnelle, devient une ressource privée à l'usage exclusif des individus ou des organisations qui les possèdent (Callon 1994).

Ici, deux visions de la connaissance tacite se distinguent, elles sont issues du « débat sur la codification » publié dans la revue *Industrial and Corporate Change* au début des années 2000. La première considère qu'une nouvelle connaissance est, avant tout, tacite, c'est alors à l'individu ou à l'organisation qui l'abrite de faire l'effort de codifier cette connaissance afin de pouvoir la valoriser (Cowan et Foray 1997). La codification est alors un vecteur de valorisation de la connaissance au travers d'une incorporation dans des produits ou des brevets d'invention. La connaissance est ainsi intégrée dans un processus de codification dès l'instant où elle est générée et devient mature à mesure qu'elle se codifie. Cowan, David et Foray (2000) soutiennent que l'importance accordée à la dimension tacite est souvent surestimée et que les « degrés de tacite » dépendent principalement des coûts et des avantages associés au processus de codification, plutôt que des propriétés intrinsèques aux connaissances.

Une seconde vision, plus proche de la vision originelle de Polanyi (1958; 1966) considère toute forme de connaissances comme ayant une partie irrémédiablement tacite. Ce

faisant, le processus de codification est présenté comme nécessairement limité (Balconi, Pozzali, et Viale 2007). Malgré un effort de codification poussé, une connaissance comportera toujours une partie non-exprimable verbalement, qui tient à l'appropriation personnelle du savoir par l'individu. Ce faisant, toute connaissance se situe sur un continuum entre tacite et explicite (Grant 2007). Ces deux perspectives convergent sur l'idée que les deux formes de connaissances sont toujours impliquées et nécessaires dans le processus de création de connaissances et d'innovation (Nonaka, Toyama, et Konno 2000; Johnson, Lorenz, et Lundvall 2002).

Que le processus de formalisation soit considéré comme complet ou non, la connaissance tacite, en tant que forme non codifiée de savoir, est incorporée dans l'esprit, le corps et les habitudes des individus (Nelson et Winter 1982). Elle est par essence peu reproductible, pour la raison évidente qu'on ne peut reproduire à volonté un ingénieur ou un technicien. Ce constat pousse Asheim et Isaksen (2002) à considérer dans leur typologie une forme de connaissance tacite, « collante » territorialement. Ce « *sticky knowledge* » est constituée d'une combinaison d'expériences spécifiques à un lieu, de compétences artisanales et de connaissances basées sur la R&D.

Castillo (2002) propose une typologie plus poussée et distingue quatre formes de connaissances tacites permettant de mieux appréhender les dimensions inconsciente ou collective de ce type de connaissance. Tout d'abord, la connaissance tacite « non-lettrée » (*nonepistle*) se réfère à un type de savoir qui est profondément personnel, ineffable et indescriptible, similaire à une « intuition » ou à un « sentiment viscéral ». Cette connaissance est souvent inconsciente pour la personne qui la possède. Elle se manifeste par un apprentissage implicite, où l'individu acquiert des connaissances sans effort conscient. Ensuite, la connaissance tacite sémantique (*semantic*) est une catégorie de connaissance qui concerne les formes verbalisables de savoir qui, en raison d'une symbolique spéciale ou d'un comportement distinctif propre à un métier, n'ont pas besoin d'être explicitement mentionnées. Dans le contexte des « communautés de pratique », une symbolique spéciale rend inutile l'expression explicite de cette connaissance et permet de communiquer plus efficacement. Également, la connaissance tacite socioculturelle (*sociocultural*) désigne un savoir qui émane la mémoire commune de l'ensemble social, n'étant attribuable à aucun individu précis. Ce type de connaissance collective s'inspire de la vision d'Hayek sur la dispersion des connaissances au sein d'une société. Elle est souvent enracinée dans la culture de l'organisation et n'est pas facilement transférable ou imitable, ce qui peut conférer un avantage durable à une organisation. Enfin, la connaissance tacite approfondie (*sagacious*) se réfère à une forme profonde de savoir

qui va au-delà de la simple observation et implique une perspicacité et une compréhension innées des phénomènes.

Dans la typologie de Lundvall et Johnson (1994), la connaissance tacite est liée à deux formes de connaissances, le savoir-faire et le savoir-qui. Le premier se réfère aux connaissances acquises par l'expérience, aux compétences, c'est-à-dire aux capacités à produire un bien ou un service de manière efficace. La seconde relève de compétences sociales, qui impliquent la connaissance de qui sait quoi et de qui sait comment faire quoi. Ce type de connaissances est profondément ancré dans le réseau social auquel appartient l'individu ou l'organisation. L'existence de ce savoir détermine les capacités à accéder et à mobiliser les connaissances d'un individu dans un domaine spécifique (Foray et Lundvall 1998).

Ces typologies permettent de considérer la connaissance comme une entité collectivement construite ou émanant de processus inconscients. Par sa nature, la connaissance tacite est intrinsèquement irréplicable en tant que telle. De plus, sa quantification s'avère logiquement complexe, voire impossible, étant donné son caractère essentiellement intangible et subjectif. L'impact de la connaissance tacite sur les processus d'innovation est, par conséquent, étroitement lié à l'environnement spécifique dans lequel elle est mobilisée. Aussi, la présence de connaissances tacites joue un rôle majeur dans les différences de capacités d'innovation entre les différents territoires (Almeida et Kogut 1997).

1.1.3 La diffusion des connaissances

Comme évoquée précédemment, la capacité d'une connaissance à être diffusée dépend directement de sa capacité à être reproduite. Une connaissance codifiée, possédant un coût de reproduction considéré comme nul, acquiert des caractéristiques très proches de celles d'une information. La vision néo-classique de la diffusion des connaissances, notamment basée sur la conception de Arrow (1962), argumente dans le sens d'une information-connaissance comme un bien économique standard, une marchandise échangeable sur le marché au travers de transactions de droits de propriété intellectuelle. Ces DPI permettent de limiter le caractère non-rival de l'utilisation d'une connaissance en la rendant artificiellement rare. Dans l'échange des connaissances via les DPI, il est supposé que les agents bénéficient d'une information parfaite. Cependant, le coût marginal d'utilisation quasi-nul d'une connaissance rend le contournement d'un DPI, via l'imitation, inférieur au coût de développement de la connaissance initiale. Ce phénomène décourage à terme l'innovation (Mansfield, Schwartz, et Wagner 1981).

Des études ultérieures ont cependant mis en lumière les coûts liés à l'apprentissage des connaissances (Dosi, Llerena, et Labini 2006). Le transfert de connaissances, même codifiées, ne se résume pas à un transfert informationnel et implique des coûts afin d'acquérir, de stocker et d'utiliser les connaissances. Chaque organisation possède alors une « capacité d'absorption » (Cohen et Levinthal 1990) déterminant ses opportunités d'absorption des connaissances présentes dans son environnement.

Pour être utilisable par un individu ou une organisation, la connaissance doit pouvoir être mise en relation avec d'autres connaissances, le processus de production de connaissance est dit cumulatif et co-relationnel (Fleming et Sorenson 2004; Krafft, Quatraro, et Saviotti 2011). Un article d'astrophysique de pointe n'amène aucune valeur ajoutée à un profane en la matière. Si un exemplaire d'une nouvelle connaissance n'a quasiment aucun coût, le réseau de connaissance nécessaire à l'utilisation de cette dernière possède lui un coût. Pour une entreprise, ce coût comprend le fonctionnement du laboratoire de recherche capable d'absorber cette nouvelle connaissance. Opérationnellement, cette capacité d'absorption peut être mesurée par le ratio de dépense R&D/Chiffre d'affaires (Cohen et Levinthal 1990). Il est également possible d'allonger une « chaîne de coûts » dont le premier maillon est le coût d'acquisition d'un exemplaire du bien, on trouve ensuite un coût lié aux actifs complémentaires, le coût de maintien de ces actifs dans le temps et enfin le coût de mobilisation du bien (Callon 1994). Dans ce contexte, Pavitt (1991) relève l'importance de ne pas confondre la conception de la connaissance comme un bien public et la connaissance comme un bien gratuit.

Le coût d'acquisition et d'utilisation d'une connaissance constitue ainsi une limite importante à sa diffusion qu'il convient de ne pas négliger. Cet argument est fondamental dans l'étude des disparités de développement entre territoires. Ces coûts d'acquisition permettent de concevoir les différences de développement entre les territoires comme un processus relevant des capacités et de la volonté de ces derniers plutôt que comme le bénéfice spontané lié à l'utilisation passive d'un bien public global. La diffusion des connaissances n'est donc pas « automatique », les écarts technologiques entre pays ne peuvent alors être comblés qu'avec un engagement volontaire de l'ensemble des acteurs dans la construction de capacités cognitives accélérant et facilitant l'accès au stock mondial de connaissances (Reslinger 2013).

Un second argument limite la considération de la connaissance comme un bien public se diffusant librement. Il peut être résumé par la célèbre phrase de Maryann Feldman : « *la connaissance traverse les couloirs et les rues plus facilement que les continents et les océans.* » (Feldman 1994, p.2). Bien que les informations et les connaissances codifiées puissent être communiquées à distance à un coût quasi-nul, la présence d'une dimension tacite limite la

diffusion de certaines connaissances à une échelle géographique restreinte (Rallet et Torre 1999; Balconi, Pozzali, et Viale 2007). Cette distinction est au cœur de l'opposition entre connaissances locales collantes et connaissances globales omniprésentes (Asheim et Isaksen 2002). Cette distinction fait reposer le processus d'innovation sur deux niveaux géographiques distincts. Le premier est local et nécessite une proximité physique entre acteurs pour permettre la diffusion et l'enrichissement des connaissances tacites au travers d'interactions sociales au sein d'un réseau interpersonnel. Le second est national, voire international et dépend de l'intégration de connaissances globales plus codifiées et génériques en circulation entre les territoires. La diffusion des connaissances tacites, passe par la mobilité des travailleurs qualifiés, les collaborations inter-entreprises et institutionnelles, et les échanges informels dans un espace régional donné. En cela, elle constitue une externalité positive géographiquement bornée ou *spill-over* (Mouhoud 2006).

Les travaux fondateurs de Krugman (1991a; 1991b) reconnaissent l'existence des externalités de connaissance tout en leur donnant un caractère secondaire dans l'explication des forces d'agglomération des activités économiques. Cette position est justifiée par (i) la présence de clusters où les externalités de connaissance ne sont pas essentielles comme dans l'exemple des activités financières de Wall Street, par (ii) l'explication de l'agglomération des activités économiques par des externalités principalement pécuniaires, et enfin (iii) la difficulté voir l'impossibilité de mesurer et de reconnaître les flux de connaissance (Moussa 2012). Cependant, les travaux de Jaffe (1989) ont remis en cause cette impossibilité en introduisant les brevets d'invention comme mesure des flux de connaissances. Jaffe (1989) et Audretsch et Feldman (1996) ont validé empiriquement la localisation des *spill-overs* de connaissances, en utilisant respectivement la colocalisation des technologies brevetées et le nombre d'inventions régionales. D'autres études ont exploité les citations de brevets pour tracer les flux de connaissances et leur relation avec la distance géographique (Jaffe, Trajtenberg, et Henderson 1993; Almeida et Kogut 1997; Maurseth et Verspagen 1999). L'impact de la localisation sur la production de nouveaux produits a également été étudié (Brouwer, Budil-Nadvornikova, et Kleinknecht 1999). Toutes ces méthodes ont cependant montré un certain nombre de limites résumées dans Breschi (2001). Plus récemment, les travaux de Belenzon et Schankerman (2013) ont utilisé une méthodologie comparative pour analyser les *spill-overs* des brevets universitaires sur les brevets d'entreprise, en tenant compte de la distance géographique. Une approche légèrement comparable a également été utilisée pour vérifier l'influence des concentrations locales d'acteurs sur l'absorption des connaissances académiques par les entreprises en tenant compte de la distance géographique (Bikard et Marx 2020). Ces deux

dernières études ont pointé une limite géographique à la localité des *spill-overs* située respectivement dans un rayon d'environ 80 km et 240 km.

Ces diverses études établissent une forte interdépendance entre le territoire et le processus d'innovation. Cette interdépendance s'inscrit dans un mécanisme de rétroaction où les acteurs innovants se regroupent sur un territoire donné pour bénéficier des retombées de la connaissance. À son tour, cette concentration territoriale limite la diffusion des connaissances à une certaine géographie (Colletis 2010).

Les études précédemment citées révèlent que la diffusion de la connaissance n'est ni libre ni exempte de coûts. Cette observation, conjuguée à la reconnaissance que les externalités générées par la production de connaissances sont circonscrites géographiquement, met en exergue l'importance de mener une comparaison des capacités de production de connaissances à l'échelle territoriale. Dans cette optique, la présente thèse se concentre spécifiquement sur l'étude de la mobilité territoriale des connaissances dans le secteur de la défense. Une exploration approfondie de la notion de territoire est présentée dans la seconde partie de ce chapitre.

1.2 Les activités productrices de connaissances

La connaissance est omniprésente au sein de nos sociétés modernes, sa création est un corollaire de l'activité humaine si bien que les activités culturelles et artistiques jouent également un rôle dans le processus d'innovation. Ces activités produisent des connaissances désignées comme « symbolique » qui se rapportent à la manière dont nous créons du sens et du désir. Elles touchent aux aspects esthétiques des produits, à l'élaboration de dessins, d'images et de symboles, et à l'exploitation économique de ces éléments culturels (Asheim, Boschma, et Cooke 2011).

Consciente de cette diversité, cette thèse choisit de se concentrer sur les activités technologiques et scientifiques en tant qu'activité créatrice de connaissances. Ces deux activités sont les moteurs de la R&D et constituent le cœur de la conception des nouveaux biens et services marchands. La littérature a opposé la science à la technologie de nombreuses façons. Sur la base de la classification de Cozzens et al. (2005), nous explorons cette opposition, mais également les profondes interactions liant ces deux sphères d'activité.

1.2.1 La Science

« La science, au sens large, est la recherche de la connaissance, et cette recherche est basée sur des faits et des vérités observés. Ainsi, la science part de conditions de départ connues et recherche des résultats finaux inconnus... » (Audretsch et al. 2002, p.156).

L'activité scientifique, en tant qu'activité créatrice de connaissances, consiste à rechercher des résultats inconnus sur la base de ce qui est déjà connu. Elle est l'apanage des chercheurs ou scientifiques, qui sont supposés évoluer, en l'absence de toute forme de considérations économiques, avec un « goût pour la science » et sont incités à publier, à partager leurs productions afin d'aider la communauté à progresser. Les mécanismes d'évaluation de la recherche se fondent alors sur la validation et les citations par les pairs. Cette démarche doit respecter une méthodologie et des critères communs de scientificité, dans le respect du concept de scepticisme organisé. La communauté scientifique récompense les travaux les plus novateurs par une rétribution sociale, sous forme d'opportunité de carrière et de notoriété (Allen 1977; Dasgupta et David 1994; Besancenot et Vranceanu 2015; Gans, Murray, et Stern 2017).

Cette vision de l'activité scientifique est alignée sur l'éthos de la science de Merton (1942). Cette philosophie repose sur quatre piliers : l'universalisme, le communisme (au sens de communauté), le désintéressement et le scepticisme organisé. Les chercheurs sont encouragés à évaluer le travail sur ses mérites (universalisme), à partager leurs découvertes (communisme), à agir sans considération de gains personnels (désintéressement) et à soumettre leurs conclusions à un examen rigoureux (scepticisme organisé). Cet éthos sert à orienter la conduite des scientifiques et à maintenir l'intégrité de la science. Elle valorise la collaboration, l'originalité et l'objectivité, contribuant à l'avancement continu du savoir scientifique (Merton 1957). Un chercheur est ainsi incité à poursuivre des recherches avec un fort enjeu pour la communauté, dont les résultats auront potentiellement un impact important sur l'état des connaissances, il est également incité à publier rapidement et de manière ouverte (David et al. 1992). L'existence de l'idéal mertonien de désintéressement est relativisée par les études empiriques. Si un coût d'opportunité est payé par les chercheurs en termes de rémunération (Stern 2004), ce qui tend à valider l'existence d'un désintéressement, il apparaît néanmoins que l'intérêt scientifique des chercheurs est susceptible d'être orienté par les sources de financement (Macfarlane et Cheng 2008; Stephan 2012).

D'un point de vue organisationnel, l'activité scientifique est menée principalement au sein des universités, étant financée majoritairement par des fonds publics. La connaissance produite est généralisable, reproductible, codifiée et publiable sous forme d'articles, d'ouvrages

et de prises de parole publiques. Le caractère codifié et désintéressé de la connaissance scientifique suppose ainsi son financement par les pouvoirs publics dans le sens où aucune organisation à but lucratif n'a *a priori* intérêt à prendre en charge son développement. Pour autant, le développement de projet de recherche fondamentale peut être mené par des entreprises privées. Ce développement peut être motivé par la volonté d'acquérir un *first mover advantage* soit l'avantage concurrentiel qu'une organisation tire de sa position de pionnier technologique lorsqu'elle est la première à exploiter une percée scientifique (Rosenberg 1990). Les entreprises peuvent également encourager leurs salariés à publier des articles académiques pour recruter de nouveaux employés, surveiller et motiver leur personnel de recherche (Henderson et Cockburn 1994), promouvoir des incitations internes pour la recherche fondamentale (Cockburn, Henderson, et Stern 1999), ou développer une plus grande capacité d'absorption des connaissances produites dans l'environnement de l'entreprise (Cohen et Levinthal 1990; Cockburn et Henderson 1998). À l'opposé, la recherche menée dans le secteur privé peut freiner la diffusion des connaissances scientifiques dans l'objectif de préserver leur propriété intellectuelle ou l'obtention d'un avantage concurrentiel (Stokes 1997; Cockburn, Henderson, et Stern 1999; Stern 2004; Gans, Murray, et Stern 2017).

Le processus de création de connaissances scientifiques implique des intrants de même nature, la science agrège des connaissances encodées verbalement et produit de nouvelles connaissances encodées verbalement (Cozzens et al. 2005). Autrement dit, la production scientifique se nourrit principalement d'elle-même.

La faible dépendance aux connaissances extérieures, les incitations fortes à la publication, le haut de degré de codification et le canal privilégié de l'article scientifique comme moyen de communication font de l'utilisation de base de données d'articles scientifiques un *proxy* fiable et largement reconnu de l'activité scientifique. Par extension, les références entre articles permettent de suivre fidèlement la direction du développement scientifique (Small et Garfield 1985). Cette méthode possède cependant des inconvénients qui incluent une propension à publier variable selon les domaines scientifiques, une négligence des articles rédigés dans des langues autres que l'anglais, et le fait que les résultats scientifiques présentés lors de conférences ou sous la forme de logiciels ne sont pas publiés au même degré que les articles traditionnels (Meyer 2002; Han 2007).

Cette thèse conceptualise la science comme une activité produisant des connaissances universelles, codifiées et par essence très mobiles. Nous mobilisons les articles scientifiques et leurs réseaux de citations comme *proxy* de l'intensité et de la direction de la recherche scientifique en accord avec la littérature.

1.2.2 La Technologie

«... La technologie est l'application des nouvelles connaissances acquises par la science à un problème pratique » (Audretsch et al. 2002, p.156).

L'activité technologique est conduite par des ingénieurs ou inventeurs, elle est tournée vers la réalisation d'un « artefact » nouveau dans un contexte de concurrence. Ce processus implique la création de nouvelles connaissances commercialisables, principalement tacites, intégrées dans des produits, des processus ou des services, qui seront évalués en fonction de leur capacité à fournir des avantages concurrentiels (Cozzens et al. 2005). En conséquence, cette activité se déploie principalement au sein des entreprises, de l'industrie.

Le contexte de concurrence présent entre ces acteurs réduit les incitations des ingénieurs à échanger entre eux, les canaux de communication sont réduits aux partenaires de l'organisation, voire uniquement à l'organisation elle-même. La communication horizontale est involontaire et relève d'une divulgation malveillante ou d'une maladresse, la connaissance technologique se diffuse alors principalement via le déplacement des ingénieurs entre les organisations (Allen 1977).

D'un point de vue organisationnel, la prise en main de l'activité de développement technologique par des entreprises privées aboutit à une division du travail innovant (Arora et Gambardella 1994; Rosenberg et Nelson 1994). D'un côté, les universités, axées sur la recherche fondamentale, cherchent à repousser les frontières du savoir, souvent sans un objectif commercial immédiat (Nelson 2001). De l'autre, les entreprises se concentrent sur la recherche appliquée et le développement technologique, visant à convertir la connaissance en solutions commerciales (Chesbrough 2003). Elles comprennent les besoins du marché et possèdent des compétences en développement de produits (Cohen, Nelson, et Walsh 2002). Cependant, les universités intègrent de manière croissante une capacité d'innovation en tant que « troisième mission », après la recherche et l'enseignement (Gulbrandsen et Slipersæter 2007). Ceci s'est notamment développée à la suite de la promulgation du *Bayh-Dole Act* aux États-Unis en 1980 autorisant le dépôt de brevets d'invention par les universités et autres organisations à but non-lucratif financées par des fonds publics.

La division du travail innovant entre université et entreprise n'est ainsi pas parfaite, elle reste pourtant un phénomène empiriquement observable. Ahmadpoor et Jones (2017) observent par exemple que 80 % des articles scientifiques liés à un développement technologique proviennent d'universités et que 78 % des brevets référençant une source scientifique sont déposés par des entreprises privées.

Le processus de création de connaissances technologiques agrège des informations et incitations de la part d'un large panel de parties prenantes : collègues, utilisateurs, clients, commerciaux, investisseurs, concurrents, etc. L'activité d'invention mélange fondamentalement un plus grand nombre de disciplines et de champs de connaissances que l'activité scientifique. L'intégration de connaissances scientifiques et technologiques extérieures est facilitée par des phénomènes de *gatekeeper*, à savoir des membres de l'organisation « *plus exposés à la littérature, [qui] ont plus de contacts oraux en dehors du laboratoire, détiennent plus de brevets et ont publié plus d'articles que leurs collègues* » (Taylor 1975, p.1). Le caractère partiellement tacite et concurrentiel de la connaissance technologique constitue un frein important à sa diffusion. Le brevet d'invention, par la protection légale qu'il offre et l'effort de codification qu'il nécessite, permet la diffusion des connaissances technologiques. Ainsi, bien que l'activité de développement technologique implique une plus grande quantité de savoir-faire et connaissances tacites, les brevets d'invention en représentent la partie codifiée.

Le brevet est l'instrument le plus communément utilisé pour approximer l'activité technologique, il est hautement codifié, détaillé, certifié par les institutions et facilement disponible en ligne. Cependant, l'utilisation d'un tel *proxy* possède un certain nombre de limites qui peuvent être résumées comme suit : toutes les inventions ne sont pas brevetées ; toutes les inventions ne sont pas brevetables et tous les brevets n'ont pas le même niveau d'inventivité (Griliches 1990).

Tout d'abord, le secret est encore largement pratiqué, certaines entreprises considèrent que le risque d'imitation de leur invention est trop faible pour couvrir les frais liés au dépôt de brevet (Levin et al. 1987; Thumm 2004). Ensuite, le brevet peut être utilisé comme un outil stratégique, certaines entreprises instrumentalisent le dépôt de brevet pour mener des stratégies offensives. Ces stratégies ont pour but de limiter l'exploration technologique des concurrents, communiquer, augmenter les indicateurs de performance internes, influencer la standardisation, etc. Ces brevets sont considérés comme moins représentatifs de l'activité technologique (Cohen, Nelson, et Walsh 2000; Blind et al. 2006; Holgersson et Granstrand 2017). L'utilisation des réseaux de citations entre brevets pour suivre le développement technologique est une méthode solide et répandue, bien que limitée dans sa représentativité (Jaffe, Trajtenberg, et Fogarty 2000).

Cette thèse mobilise des données de brevets et leurs réseaux de citations comme représentation des flux de connaissances technologiques entre les territoires, en ayant conscience des limites liées à leur interprétation. Dans l'objectif d'étudier les liens entre science

et technologie, cette thèse s'intéresse également au moyen empirique permettant d'identifier leurs interactions.

1.2.3 Le lien entre science et technologie dans le processus d'innovation

Le lien unissant science et technologie a longtemps été négligé avant d'être considéré comme unilatéral. Le progrès de la modélisation de l'innovation nous permet aujourd'hui d'embrasser la complexité des liens qui rendent ces deux activités complémentaires.

Les premiers modèles d'innovation, dits modèles exogènes, conceptualisés au XIX^e siècle et regroupés par Rosenberg (1982) sous l'appellation de « modèle de la boîte noire », distinguent clairement la science et la technologie de l'innovation. L'invention est présentée comme le résultat d'un « acte technique » perçu comme non motivé économiquement (Forest 2014). Elle est alors considérée comme exogène et n'est pas objet de l'analyse économique. Schumpeter (1939) interprète ce modèle à travers la figure de l'entrepreneur. Doté d'une volonté de profit et d'une aversion au risque plus faible que les autres individus, l'entrepreneur sélectionne parmi les inventions disponibles celles susceptibles de générer des bénéfices. Par cela, il accomplit « l'acte économique » établissant le lien entre invention et innovation.

Au milieu du vingtième siècle, la conception de l'innovation a subi une transformation significative : elle n'est plus considérée comme un simple résultat, mais perçue comme un processus continu. Forest (2014) lie notamment ce changement de conception à l'évolution des conditions de concurrence, d'une concurrence fondée sur les prix à une concurrence fondée sur la créativité (Penrose 1959). Le processus d'innovation est décrit comme linéaire et hiérarchique. La linéarité déroule une série d'étapes obligatoires, débutant par la recherche fondamentale, suivie par le développement technologique, la production industrielle, pour aboutir finalement à la commercialisation d'un nouveau produit. La dimension hiérarchique signifie que chaque étape dépend de la précédente et ne peut être initiée que lorsque la phase précédente est complètement achevée. Toutefois, la nature mécanique de ce modèle a été très rapidement questionnée. La linéarité n'admet pas de phénomène de *feedback* par lequel la technologie influence la science en fournissant un besoin d'explication théorique. Les cas de l'aviation et de l'aérodynamique, de la machine à vapeur et de la thermodynamique sont autant d'exemples d'une science « défensive » qui vient fournir *a posteriori* une explication théorique aux avancées technologiques faites par essai-erreur (Brooks 1994). Ces nombreux exemples permettent d'affirmer que la technologie peut précéder la science. La séquentialité est

également remise en question par les phénomènes de diffusion et d'absorption interterritoriale des connaissances produites, notamment au niveau de la science fondamentale. Les ressources investies par un pays peuvent ainsi déboucher sur une innovation dans un autre pays éloigné, ou sur pas d'innovation du tout (Boschma 2008).

Pour surmonter les lacunes des modèles linéaires, Kline et Rosenberg (1986) ont été les premiers à proposer un modèle rétroactif, qui met en évidence l'interdépendance et la rétroaction entre chaque étape de l'innovation. Dans ce modèle, l'innovation est le fruit d'un processus de conception interagissant en permanence avec la science et le marché. La connaissance acquiert une dimension transversale, n'intervenant plus uniquement comme source de l'innovation, mais à chaque étape de sa conception. Le marché adopte également un rôle actif, capable d'initier le processus d'innovation en identifiant un segment inexploré ou une demande potentielle. La vision d'une innovation poussée par les avancées scientifiques (*science-pushed*) est complétée par la vision d'une innovation tirée par le marché, le besoin (*market-pull*, Griliches et Schmookler 1963; Scherer 1982). Malgré le progrès important que constitue le modèle rétroactif, celui-ci reste aveugle à la nature des acteurs, de leur proximité et leurs interactions.

Le développement de l'approche systémique, notamment au travers de ses dimensions holistes et dynamiques (Forrester 1961 ; Bertalanffy 1968), permet de faire progresser l'interprétation de l'innovation vers une dimension globale. Cette dernière ne s'inscrit plus dans un processus fermé et statique, mais dans un système ouvert et évolutif, limitant toute interprétation empirique à un caractère instantané. Les interactions entre acteurs permettent au système d'acquérir une valeur supérieure à la somme de ses parties, ce qui permet de capturer le caractère « volatile » de la connaissance. L'innovation s'inscrit dans un système caractérisé par des acteurs hétérogènes, intégré dans un réseau de relations et délimités par une frontière plus ou moins perméable. Le niveau d'interaction doit être suffisant pour que la suppression d'un seul élément constitutif du système soit à même de transformer le fonctionnement global de celui-ci. L'approche systémique de l'innovation permet d'extraire le concept d'innovation d'un processus de décision indépendant de l'environnement pour l'intégrer dans un réseau d'acteurs en interactions (Amable 2001). La notion de système d'innovation est relativement malléable. Chaque auteur intègre ainsi une quantité variable de facteurs influençant l'innovation. Lundvall (1992) distingue cependant deux approches : une première ayant une conception étroite où les acteurs et interactions sont limités aux domaines de la science, de la technologie et de l'enseignement et une seconde incluant les réseaux institutionnels et économiques qui affectent le système productif.

Cette thèse mobilise une vision systémique afin d'étudier les interactions entre acteurs et leur influence sur la diffusion des connaissances scientifiques et technologiques à l'intérieur même de ces sphères d'activités et entre elles. Malgré l'existence de phénomènes de rétroactions, la linéarité du processus d'innovation reste pertinente (Godin 2006) et nous considérerons la science comme le principal moteur de l'innovation.

Les échanges d'informations et de connaissances entre les sphères scientifique et technologique ne sont pas strictement nécessaires au processus d'innovation. Jensen et al. (2007) distinguent ainsi deux modes d'innovation : le premier basé sur l'utilisation et la production de connaissances codifiées, qu'elles soient technologiques ou scientifiques, le *Science, Technology et Innovation mode (STI)*, impliquant de potentielles interactions entre science et technologie ; le second est basé sur un processus informel d'apprentissage et de savoir-faire basé sur l'expérience le *Doing, Using et Interacting mode (DUI)*, ne nécessitant aucune forme d'intervention scientifique. Bien qu'il ne soit pas strictement nécessaire, ces échanges sont cependant récurrents dans la plupart des secteurs industriels. Brooks (1994) identifie six sources de contribution de la science à la technologie et deux sources de contributions de la technologie à la science que l'on peut résumer ainsi : l'activité scientifique permet l'émergence de nouvelles connaissances, de nouveaux outils de conception théorique et de nouvelles méthodes d'analyse permettant à la fois de nouveaux développements technologiques, l'évaluation des précédentes technologies, leurs améliorations et le maintien d'une capacité d'absorption des connaissances. La technologie fournit à la science des besoins d'explications théoriques, des nouvelles interrogations scientifiques, des instruments et des techniques de mesures permettant des nouvelles expérimentations. Ces deux entités se conçoivent ainsi comme indépendantes et capables d'accumuler des connaissances par elle-même tout en ayant des interactions récurrentes et d'intensités variables. Ces interactions peuvent être mesurées de différentes manières.

Premièrement, les individus cumulant des activités scientifiques et technologiques, des auteur-inventeurs sont considérés comme un vecteur de connaissances incarnées entre la sphère scientifique et technologique, ces vecteurs sont des sujets d'études privilégiés des interactions S&T. Ainsi, plusieurs études empiriques ont montré que la mobilité des chercheurs et des techniciens au niveau local constitue un vecteur de diffusion des connaissances entre firmes (Saxenian 1994). La diffusion des connaissances de manière informelle entre les différents chercheurs ou ingénieurs, par exemple, constitue une source d'économies de coûts de transaction liées à l'échange d'idées et de connaissances. L'étude des auteur-inventeurs permet notamment de mettre en évidence des collaborations informelles entre université et industrie

(Zhu et Liu 2020), de souligner les *inputs* de recherche fondamentale au sein d'une invention (Noyons et al. 1994, Wang et Guan 2011), de mesurer la différence de mobilité géographique entre connaissances scientifiques et technologiques (Agrawal, Cockburn, et McHale 2006) ou encore d'identifier un impact positif du dépôt d'invention sur la qualité de la recherche (Azoulay, Ding, et Stuart 2009). Ces résultats sont cependant limités par les problématiques de *disambiguation*, à savoir l'ambiguïté existante dans l'identification d'un individu uniquement par son nom, notamment causée par l'homonymie et la synonymie (Ferreira, Gonçalves, et Laender 2012).

Deuxièmement, les percées relativement récentes dans le domaine du traitement du langage naturel permettent un accès plus large à la lecture automatisée et à l'extraction de données à partir de documents écrits. Appliqués à l'économie de l'innovation, ces progrès techniques améliorent les applications des outils de cooccurrence sémantique. Ce type d'analyse repose sur l'hypothèse qu'un champ sémantique est spécifique à un domaine de recherche ou à la résolution d'un problème particulier. Par conséquent, deux documents dont la sémantique est proche peuvent être considérés comme parlant d'un même sujet, faisant face à des problèmes similaires et, finalement, comme porteurs de connaissances comparables. Cette méthode permet d'identifier des sujets scientifiques émergents, potentiellement brevetables (Shibata et al. 2008) ou des opportunités de recherche et de développement technologique (Shibata, Kajikawa, et Sakata 2011). Plus récemment, cette approche a été développée pour extraire la solution technique de la littérature des brevets afin de résoudre les problèmes exprimés dans les articles et *vice-versa*, extraire la solution théorique des articles pour résoudre les problèmes exprimés dans les brevets (Sasaki et al. 2020). Cependant, l'analyse sémantique reste limitée par les capacités informatiques de calcul et n'est actuellement appliquée qu'à des cas d'usages spécifiques.

Enfin, l'approche la plus commune des interactions S&T est sans nul doute la bibliométrie. Cette approche a été introduite par les travaux de Carpenter et Narin (1983) et Narin et Noma (1985). Elle permet d'étudier l'intensité des relations entre la recherche scientifique et la production technologique via l'étude de la NPL. Cette dernière représente dans une très forte majorité des cas des références scientifiques au sein des brevets d'invention. Ces travaux révèlent une croissance importante de la quantité de NPL dans les brevets ainsi qu'une concentration de celle-ci sur des travaux issus de laboratoire prestigieux avec un fort impact de publication (Narin, Hamilton, et Olivastro 1997). Les références NPL offrent des informations empiriques détaillées sur la diffusion et l'absorption des connaissances scientifiques (Tijssen 2004) et permettent de « *développer des indicateurs non triviaux et robustes* » (Callaert et al.

2006, p.1). L'étude de la NPL a notamment permis d'estimer que 80 % des articles de recherche renvoient à un futur brevet et que 61 % des brevets ont un lien en amont avec un article de recherche antérieur, ces articles et brevets liés sont en moyen distants de 2 à 4 citations de la frontière S&T (Ahmadpoor et Jones 2017). Ces études ont également permis de mettre en évidence une différence dans les mécanismes d'évaluation de la science et de la technologie, un article très influant n'entraînera pas nécessairement des innovations radicales par le jeu des citations NPL et inversement (Gittelman et Kogut 2003). Cependant, la littérature met en évidence un impact positif des références NPL sur la qualité technologique des brevets, à savoir leur capacité à influencer et donc à être cité par de futurs brevets (Fleming et Sorenson 2004). Cet effet reste significatif lorsque l'on distingue les références scientifiques présentes sur la couverture du brevet (*front-page* NPL) et celles présentes à l'intérieur du brevet (*in-text* NPL, Verberne, Chios, et Wang 2019). Cependant, cette dernière étude rejoint un constat partagé dans la littérature récente, à savoir la faible correspondance entre ces deux types de références. Les références *in-text* reflètent plus fidèlement les sources de connaissances scientifiques utiles à l'inventeur (Yamauchi et Nagaoka 2015; Bryan, Ozcan, et Sampat 2020; Marx et Fuegi 2020). Cette différence tient principalement au processus d'examen du brevet qui laisse généralement le contenu à l'inventeur et la première page à l'examineur quant aux référencements des sources scientifiques. Cette situation va dans le sens d'un certain nombre d'études qualitatives qui relativise la pertinence des références NPL *front-pages* à l'échelle individuelle (Meyer 2000; Callaert, Pellens, et Van Looy 2014; Bikard et Marx 2020).

Au-delà des incohérences de référencement entre examinateur et inventeur, il existe une différence dans l'intensité et la pertinence de ces citations selon l'office de dépôt du brevet considéré. Ainsi, les brevets déposés auprès de l'office états-unien (USPTO) comportent en moyenne un plus grand nombre de références scientifiques que les brevets déposés auprès de l'office européen (EPO), ces citations sont cependant jugées moins fiables que les citations européennes (Webb et al. 2005; Callaert et al. 2006).

Cette thèse utilise les connaissances scientifiques extraites via le référencement NPL *front-page* pour constituer une « image » des connaissances présentes de l'autre côté de la frontière S&T. En accord avec les recommandations de Callaert, Pellens, et Van Looy (2014), ces références ne constituent pas un lien de connaissance direct entre un article et un brevet et ne seront pas interprétées en tant que telles. Aussi, l'étude de la NPL sera limitée à un niveau macroscopique permettant de renseigner les sujets globalement intéressants pour les inventions étudiées.

2 L'autonomie des territoires

Outre la localité des *spillovers* déjà évoquée, la notion de territoire joue un rôle central dans la compréhension du processus d'innovation. Que l'on considère le territoire à l'échelle régionale ou nationale, celui-ci joue un rôle déterminant dans l'intensité des interactions entre acteurs innovants. Au-delà de sa simple dimension géographique, un territoire se conçoit comme un espace socio-économique d'interactions entre acteurs, dans lequel le temps joue un rôle important dans la construction d'un réseau de proximités singulier (Colletis et al. 1999). Également, le processus de mondialisation a entraîné une transformation des processus productifs, en dispersant les chaînes de production à l'échelle mondiale. Ce phénomène a relevé l'importance de la prise en compte de l'interterritorialité dans l'étude du processus d'innovation.

2.1 La notion de territoire en économie

2.1.1 Le territoire

Historiquement, le territoire fait référence à une notion de division ecclésiastique, juridique, administrative ou politique. Un territoire s'inscrit donc dans une unité de gouvernance spécifique, il désigne une étendue géographique sur laquelle s'exerce une forme spécifique de contrainte politique. Ici, la notion de territoire « *se comprend par la domination du pouvoir politique sur l'espace. Elle témoigne de l'existence d'un espace national et d'espaces infranationaux sur lesquels s'exerce une autorité. Les frontières nationales et infranationales sont les marqueurs des limites spatiales du pouvoir. Cette approche nécessite un découpage politique et administratif* » (Nadaud 2019, p.31). Cependant, la définition d'un territoire ne se limite pas à cette dimension politico-juridique.

Paquot (2011) offre une synthèse exhaustive de l'évolution du terme « territoire » tel qu'il est employé dans divers champs disciplinaires, notamment en droit, en histoire, en géographie, en ethnologie, en anthropologie et en urbanisme. Il en ressort une notion de territoire embrassant une multitude de dimensions, géographiques, sociales et économiques. Le territoire est souvent désigné comme une étendue sur laquelle vit un groupe humain et constitue également une manifestation tangible de leurs productions culturelles. Il est également envisagé

comme un espace pensé et dominé par un groupe social pour assurer sa reproduction et la satisfaction de ses besoins vitaux. L'auteur insiste sur le développement de la notion de territoire comme un « construit social » dans lequel le territoire se définit non pas par les caractéristiques naturelles telles que le relief ou les conditions climatiques, mais plutôt comme l'issue des actions humaines. Il évolue pour devenir un champ de tensions pour des pouvoirs concurrents et divergents. Le territoire trouve « *sa légitimité avec les représentations qu'il génère, tant symboliques que patrimoniales et imaginaires, elles-mêmes nourries de la langue dominante parlée par les populations de ce territoire* » (Paquot 2011, p.31).

Le territoire apparaît ainsi comme un construit politique, géographique et social, il est une « *production collective, résultant des actions d'un groupe humain, avec ses citoyens, ses dispositifs de gouvernance et son organisation* » (Torre 2015, p.7). Cependant, le territoire se conçoit également dans une perspective relationnelle. Le territoire est alors conçu comme une organisation ou un système constitué d'acteurs liés entre eux par des rapports sociaux dynamiques (Courlet 2008). En science régionale, le territoire est un « construit social permanent » (Leloup, Moyart, et Pecqueur 2005), un système dynamique qui se construit grâce aux relations de proximité géographique développées entre une pluralité d'acteurs. Il fait référence à des relations organisées et des groupes qui se reconnaissent dans des projets communs (Sack 1986).

En conséquence, le territoire peut être conçu comme un système complexe (Courlet 2008), appréhendé comme une construction intellectuelle évolutive qui se compose de deux sous-systèmes en interaction : l'espace géographique et le système des acteurs (Moine 2006).

L'idée de territoire met l'accent sur les relations et les interactions entre les individus qui le composent (Courlet 2008). Les déterminants du territoire ne sont pas liés aux propriétés individuelles de ses éléments, mais à la dynamique de leurs interactions. Le territoire est vu comme un système de relations économiques et sociales et un système de gouvernance locale rassemblant une collectivité, un ensemble d'acteurs privés et un système d'administrations publiques locales (Leloup 2010). Cette vision systémique du territoire souligne la complexité et la nature évolutive du concept, qui ne peut être appréhendé que par la mise en évidence des interactions entre le groupe humain et l'étendue terrestre qui lui sert de support.

En somme, le territoire est un espace approprié, vécu et construit socialement, englobant des dimensions juridiques, politiques, économiques et culturelles, délimité par des frontières et marqué par des relations et interactions entre individus et groupes sociaux. Il est à la fois un lieu de vie, de pouvoir et d'interaction, en constante évolution et réappropriation.

2.1.2 La proximité entre acteurs

L'importance des interactions entre acteurs dans la construction des dynamiques territoriales va de pair avec leur proximité. Cette notion se conçoit dans un premier temps comme une proximité physique entre acteurs, elle est un élément déterminant dans la prise en compte des interactions inter- et intraterritoriale. Cette proximité facilite la diffusion des connaissances, en particulier lorsque les connaissances tacites jouent un rôle crucial dans les activités innovantes (Audretsch et Feldman 1996). Les entreprises tendent à se localiser proche les unes des autres pour profiter des externalités technologiques qui favorisent l'innovation. La proximité géographique, ou proximité spatiale, fait ainsi référence à la distance physique qui sépare deux entités, comme des individus ou des organisations (Bouba-Olga et Grossetti 2008). Celle-ci est influencée par le temps et les coûts de transport, et est subjective, dépendant du jugement individuel sur la distance qui sépare les acteurs (Rallet et Torre 1999).

La simple proximité physique ne suffit pas à expliquer entièrement les motivations derrière les interactions entre acteurs. C'est sur cette insatisfaction quant à l'analyse des mécanismes et des déterminants de la « boîte noire territoire » et plus particulièrement des mécanismes de coordination entre acteurs que se sont développés les travaux de « l'école de la proximité » (Filippi, Wallet, et Polge 2018). Cette insatisfaction a été renforcée par la prise en compte du développement des TIC comme un moyen croissant de s'affranchir de la distance physique dans la collaboration (Carluer et Le Goff 2002).

En se fondant sur ces motivations, ce courant de la littérature relativise l'importance de la proximité géographique par l'observation d'autres formes de proximité tout aussi utiles à l'innovation (Boschma 2005). Ces proximités non-géographiques, conceptualisées dans les sous-divisions interactionnistes, institutionnalistes et évolutionnistes (Balland 2010), concernent notamment les proximités organisationnelles, institutionnelles, sociales et cognitives.

(i) La proximité organisée ou organisationnelle est liée aux logiques de coordination technico-productive entre, par exemple, deux firmes d'un même groupe ou bien un ensemble de fournisseurs et leurs donneurs d'ordres (Moussa 2012). Elle désigne le degré de dépendance ou d'interdépendance entre des organisations, qui facilite la coordination, la collaboration et le partage de connaissances, en particulier de connaissances tacites (Kirat et Lung 1999). (ii) La proximité institutionnelle définie comme l'adhésion d'agents à un même espace commun de représentations, de règles d'action et de modèles de pensée (Kirat et Lung 1999). Elle implique l'intériorisation de normes, routines, lois, contrats, valeurs et langages communs. (iii) La

proximité sociale, fondée sur la confiance, l'amitié et les relations familiales, met en avant le rôle des interactions et du lien social dans un espace territorialisé (Colletis 2010). Enfin, (iv) la proximité cognitive se réfère à la complémentarité des bases de connaissances des acteurs. Deux acteurs maîtrisant des connaissances proches seront amenés plus aisément à échanger. Ce type de proximité accroît les capacités de compréhension et d'absorption entre acteurs, elle joue en cela un rôle particulièrement décisif (Nootboom 2000).

2.1.3 Les modèles territoriaux de production

Le développement de la notion de territoire est concomitant avec sa conceptualisation au sein de modèles territoriaux de production. Le développement de ces modèles a entraîné une évolution significative dans la compréhension des dynamiques locales de production et d'innovation. Ces conceptions ont été notamment appliquées dans des études empiriques portant sur certaines régions spécialisées ou particulièrement développées.

Dans ce contexte, les travaux de Marshall (1890, 1919, 1920) introduisent le modèle du district industriel. Dans ce modèle, la colocalisation des entreprises sur un même espace géographique s'explique par la concentration d'interdépendances localisées et d'externalités économiques. À son tour, la présence d'externalités positives dans l'environnement favorise l'implantation de nouveaux acteurs. Ce modèle explique ainsi la concentration géographique des acteurs par l'existence d'externalités positives ultérieurement désignées sous le terme « d'externalités marshalliennes ». La concentration des acteurs dans des districts industriels est ainsi favorisée par trois vecteurs : (i) la création d'un marché du travail spécialisé et l'amélioration des compétences qui découlent des investissements conjoints des entreprises. (ii) La diminution des coûts de production grâce à un meilleur développement des infrastructures de transport, la proximité des fournisseurs et l'effet de volume de la demande qui aide à réduire les prix. (iii) L'accroissement de la productivité et l'innovation, au travers d'une facilitation des échanges d'informations et d'expériences entre les acteurs économiques. La conceptualisation de ce type d'externalité a depuis été consolidée par Arrow (1962) et Romer (1986) et est communément désignée comme externalités de type MAR (Marshall – Arrow – Romer). Le district industriel marshallien est ainsi caractérisé comme une entité industrielle au sein d'un espace géographique bénéficiant d'une « atmosphère industrielle », une forte culture locale favorisant la coopération des entreprises. L'œuvre de Marshall a jeté les bases d'une compréhension de la notion de territoire comme un espace économique privilégié, construit par les acteurs et moteur du processus d'innovation (Zimmermann 2008).

Cette théorisation a été enrichie par des concepts tels que l'économie d'agglomération (Isard 1956), qui a introduit la distinction entre les économies de localisation, ou économies de spécialisation, et les économies d'urbanisation, ou économies jacobsiennes. Les premières favorisent les entreprises concurrentes dans un même secteur donné et reposent sur l'existence d'externalités marshalliennes. Les secondes renvoient aux bénéfices obtenus grâce à la taille de l'agglomération et aux échanges intersectoriels (Zimmermann 2008). Elles reposent sur l'existence d'externalités jacobsiennes, en référence aux travaux de Jane Jacobs (1969). Ces derniers avancent que c'est la diversité et non la spécialisation des industries concentrées géographiquement qui stimule l'innovation. Les externalités de Jacobs émergent de la concentration en un même endroit de firmes provenant de divers secteurs industriels.

L'évolution de cette théorisation du territoire a également été influencée par des recherches empiriques, notamment celles appliquant le district industriel marshallien à l'étude de la « Troisième Italie ». Ces travaux ont souligné l'importance de la concentration spatiale des acteurs économiques, la coopération interentreprises et la concurrence comme moteurs de la réussite économique. Les recherches de Bagnasco (1977) et Becattini (1979, 1989, 1990) ont apporté une reconnaissance au rôle crucial du territoire comme lieu de coordination des activités économiques, soulignant ainsi les bénéfices de la colocalisation des entreprises. En s'appuyant sur ces travaux, Daumas (2007) a identifié les éléments clefs qui caractérisent ces districts, notamment leur spécialisation, leur dynamisme, leur coopération et leur concurrence, ainsi que l'importance des économies externes permises par la proximité géographique et l'homogénéité socioculturelle.

L'approche par les technopoles ou parcs technologiques se distingue comme une forme particulière de district industriel classique, marqué par une intense concentration de laboratoires de recherche publics et privés et une spécialisation dans les nouveaux domaines de haute technologie. Cette approche repose sur l'hypothèse que la proximité géographique facilite la communication entre les différents acteurs (Longhi et Quéré 1991). En France, les technopoles sont conçues comme des instruments de politique publique pour stimuler le développement économique dans les secteurs de haute technologie, avec un accent particulier sur la commercialisation des surfaces industrielles plutôt que sur la création de réseaux d'innovation (Doloreux 2002).

Une autre approche centrale relève du concept de « cluster », introduit par Porter (1990, 1998, 2003). Cette approche se réfère à une concentration géographique d'entreprises et d'institutions interconnectées dans un domaine spécifique, où concurrence et coopération sont intégrées (Porter 1998). L'exemple emblématique des producteurs de carreaux de céramique en

Émilie-Romagne illustre la réussite de ce modèle, avec 60 % des exportations mondiales attribuables à un cluster comprenant différents acteurs économiques. Les clusters créent un avantage concurrentiel durable grâce à la synergie locale de connaissances, relations et motivations, combinant des éléments concurrentiels et coopératifs (Porter 1998). L'équilibre entre ces deux aspects est vital pour le succès du cluster. Ceux-ci ne se limitent pas aux entreprises, mais englobent également des institutions publiques telles que les universités, agences de développement, think-tanks, fournisseurs et prestataires de services. Des clusters célèbres comme Hollywood et la Silicon Valley ont inspiré des politiques publiques en France, avec l'établissement des pôles de compétitivité au début des années 2000. Le modèle de la Silicon Valley, centré sur de petites entreprises technologiques, des laboratoires de recherche et des établissements de formation, souligne l'importance des relations étroites et de confiance dans la création d'un réseau local performant (Torre et Zimmermann 2015; Bouba-Olga 2017)

Il est possible de distinguer une dernière approche au sein des systèmes territoriaux de production : l'approche par les milieux innovateurs. Cette dernière vise à comprendre pourquoi certaines régions se révèlent plus innovantes que d'autres (M. Maillat, Senn, et Quévit 1993; Ratti, Bramanti, et Gordon 1997; Crevoisier 2001). Les milieux innovateurs sont constitués d'un ensemble d'acteurs localisés sur un même territoire, générant des interactions multilatérales et des externalités spécifiques à l'innovation (Maillat 1995). La proximité spatiale des différents partenaires est mise en avant, favorisant l'émergence, le maintien et le renouvellement d'une dynamique d'apprentissage.

Chacune des approches précédentes attribue au territoire un rôle central et spécifique dans le processus de développement économique et le progrès technique. Bien que la proximité géographique soit souvent mise en avant comme un facteur favorisant les interactions, ces méthodes soulignent davantage les dynamiques relationnelles et collaboratives au sein d'un territoire donné pour stimuler l'apprentissage et l'innovation.

2.1.4 Les systèmes d'innovation territoriaux

Les modèles précédemment exposés sont complémentaires à l'approche systémique de l'innovation territoriale. Cette dernière permet de concentrer l'analyse sur les dynamiques favorisant l'innovation et intègre une plus grande dimension institutionnelle. Plus précisément, « la notion de 'Système d'Innovation' (SI) rassemble diverses tentatives d'incorporer des éléments institutionnels dans l'analyse économique du changement technique, l'architecture des systèmes scientifiques, la genèse de l'innovation technologique et, pour les approches les

plus conséquentes, d'étudier les conséquences de l'innovation sur les performances économiques de long terme des nations » (Amable 2001, p.367). En cela, l'approche par les SI constitue une continuation des approches par les modèles territoriaux productifs appliquées à l'analyse unique du processus d'innovation et permettant une prise en compte plus large des facteurs influençant ce processus.

Dans une approche systémique, l'innovation est le résultat d'un processus global qui s'appuie sur trois fondements théoriques. D'abord, les institutions sont considérées comme des déterminants des choix économiques, engendrant ainsi des comportements et des performances économiques distincts (Smith 2000). Deuxièmement, l'innovation est un processus cumulatif soumis à des contraintes internes et externes à l'entreprise, à la fois techniques, scientifiques et économiques (Kline et Rosenberg 1986; Olsson 2000; Fleming et Sorenson 2004). Enfin, l'innovation est un processus social qui caractérise les bases de connaissances spécifiques aux acteurs de chaque système, influençant ainsi leur capacité à innover à l'avenir (Asheim et Coenen 2005).

Les SI se représentent comme un réseau d'institutions du secteur public et privé dont les activités et les interactions initient, importent, modifient et diffusent de nouvelles technologies (Freeman 1987). Le caractère malléable de l'approche systémique lui permet d'être déclinée au niveau sectoriel (Breschi et Malerba 1997; Malerba 2002) et technologique (Carlsson et Stankiewicz 1991; Bergek et al. 2008). Cette thèse se concentre volontairement sur une autre forme d'approche des SI fondée sur une dimension territoriale. Nous mobiliserons ainsi les notions de système d'innovation régional (SRI, Cooke et al. 1997; Asheim et Isaksen 2002; Asheim 2007; Asheim, Boschma, et Cooke 2011) et de système national d'innovation (Freeman 1987; Lundvall 1988; Nelson 1993). Cette thèse explore également, la dimension interterritoriale à l'échelle internationale en suivant la conception initialement proposée par Niosi et Bellon (1994). Pour cela, nous mobilisons une approche plus globale de la conception des SI dans la droite ligne des systèmes d'innovation globaux (Ernst 2002), internationaux (Carlsson 2006) et multi-échelle (Binz et Truffer 2017). La section suivante détaille les particularités de ces trois approches.

Le Système National d'innovation (SNI) :

Les travaux pionniers de R. Nelson, B.A. Lundvall, R. Rosenberg et C. Freeman dans les années 1980 ont établi le cadre des Systèmes Nationaux d'Innovation (SNI), en définissant ceux-ci comme un ensemble d'institutions dont les interactions influencent la performance

innovante des entreprises nationales (Nelson 1993). Plus précisément, un SNI est « *un système d'interactions entre des entreprises privées et publiques (grandes ou petites), des universités et des agences gouvernementales, visant à produire de la science et de la technologie à l'intérieur des frontières nationales. L'interaction entre ces unités peut être technique, commerciale, juridique, sociale et financière, dans la mesure où l'objectif de l'interaction est le développement, la protection, le financement ou la réglementation de nouvelles sciences et technologies* » (Niosi et Bellon 1994, p.175). Ces travaux s'inspirent de la notion de systèmes de production nationaux de l'économiste allemand du XIX^e siècle Friedrich List. Ce cadre conceptuel s'appuie sur l'hypothèse que le partage d'un réseau d'acteurs institutionnels, d'un langage, d'une histoire et d'une culture commune est un facteur déterminant pour le partage des connaissances. Il capture la manière singulière avec laquelle un territoire innove. Ces interactions systémiques au niveau national sont considérées plus importantes que celles entre les pays, soulignant l'importance des politiques nationales dans le façonnement de ces interactions et de la structure du système d'innovation (Niosi et al. 1992). Niosi et Bellon (1994) distinguent, par exemple, les trajectoires historiques des États-Unis, du Royaume-Uni et de l'ex-URSS qui ont favorisé la R&D des technologies de défense, contrairement au Japon et à l'Allemagne qui se sont concentrés sur les technologies civiles dans la seconde moitié du XX^e siècle. Le cadre des SNI met ainsi en relief la complexité des facteurs qui régissent l'innovation, et leur enchevêtrement à travers les domaines institutionnels, culturels et politiques.

Le Système Régional d'Innovation (SRI) :

Les SRI reposent sur des fondements comparables aux SNI avec la particularité d'une granularité territoriale plus fine à l'échelle régionale et locale. Cette approche à échelle réduite se fonde sur le constat que « *la capacité technologique, comme toute autre dimension de l'activité économique, n'est pas répartie de manière égale et uniforme entre les nations et leurs régions* » (Storper 1995, p.896). Cette approche accorde une importance centrale à la proximité géographique dans les interactions entre acteurs. Dans ce contexte, la connaissance est particulièrement collante (Asheim et Isaksen 2002), et l'hypothèse de la localité des *spill-overs* y prend une importance plus grande qu'à l'échelle nationale. D'autre part, les SRI soulignent l'importance des acteurs locaux dans le processus d'innovation. L'influence de la proximité géographique favorise les relations entre les entreprises innovantes, ce qui procure les avantages externes nécessaires au processus d'innovation (Doloreux et Guillaume 2005). Les frontières du système ne sont pas nécessairement définies par des limites administratives, mais doivent

refléter la cohérence du tissu économique et une certaine orientation « vers l'intérieur » du territoire dans les processus d'innovation (Edquist 2001).

Le Système d'Innovation Global (SIG) :

« Il apparaît (...) que les systèmes nationaux d'innovation eux-mêmes s'internationalisent, même si les institutions qui les soutiennent restent spécifiques à chaque pays ». (Carlsson 2006, p.64)

Les systèmes d'innovation globaux (SIG), également désignés sous les termes de SI international ou multi-échelle, représentent une structure complexe et interconnectée qui transcende les frontières nationales et régionales. À l'inverse des systèmes d'innovation plus localisés qui se concentrent sur des interactions territoriales spécifiques, les SIG intègrent les acteurs internationaux tels que les entreprises multinationales, les universités, les ONG, les gouvernements et d'autres organisations. Ces acteurs collaborent dans des réseaux complexes, contribuant à l'innovation à travers des proximités géographiques et non-géographiques variées (Coe et Bunnell 2003; Maskell, Bathelt, et Malmberg 2006). Ainsi, une partie des processus d'innovation *« reposent sur des formes de communication qui peuvent s'étendre sur de grandes distances, parce qu'ils sont réalisés à intervalles réguliers et de manière planifiée (par le biais de réunions, de congrès et de projets du secteur privé avec de longs horizons de planification, où la communication fait appel à un langage scientifique hautement codifié et donc normalisé - qui ne dépend pas de la culture) »* (Storper 1995, p.898). Au-delà de la simple diffusion de la connaissance, les SIG englobent des activités telles que la formation de marché et la mobilisation de l'investissement (Binz, Truffer, et Coenen 2016), reflétant l'hypothèse que l'innovation résulte d'un processus collaboratif et intégré à l'échelle mondiale. Cette perspective est en partie motivée par la mondialisation et l'évolution rapide des technologies de l'information. Comme le montre Le Goff (2014) à partir d'une étude de cas internationale, en interrogeant le concept de « cluster » et les typologies existantes de Systèmes Productifs. Les firmes réseaux et les centres d'enseignement supérieur et de recherche y apparaissent comme les acteurs majeurs des territoires pour stimuler l'innovation et l'entrepreneuriat notamment grâce au *« learning by commuting »* défini comme une forme d'apprentissage médiatisée par les TIC et la *« connexion réticulaire multi-modale qui permet à l'agent d'être là et dans plusieurs « ailleurs » »* (Le Goff 2000), en complément des autres moyens préexistants. Le Goff (2014) transpose cette « commutation » empruntée au champ des télécommunications en termes sociologiques et économiques pour analyser les dynamiques à l'œuvre au sein des

territoires étudiés et notamment de la *Bavarian Silicon Valley* du bassin munichois (analyse des réseaux sociaux (Wassermann et al. 2007) et nouvelle sociologie économique (Granovetter 1973)). Il caractérise les divers acteurs de l'innovation, appartenant à de multiples réseaux sociaux, par leurs capacités à explorer puis exploiter leurs réseaux, en utilisant leurs propres carnets d'adresses, ceux de leurs partenaires, ceux mis en place par les pouvoirs publics, ou tous les signaux parfois « faibles » émis par les membres du Système Productif ou simplement en relation avec celui-ci. Une fois l'exploration effective, ces acteurs décident d'exploiter certaines relations en combinant, de manière complémentaire, plusieurs modalités d'échanges médiatisées ou non par des technologies et des infrastructures. Cette pratique en deux temps permet d'apprendre et d'innover au sein de communautés sociales élargies et hétérogènes à partir d'une première communauté restreinte et homogène. Ainsi pour Le Goff (2014), c'est à travers le prisme d'un dosage subtil et spécifique de « proximités géographiques » et de « proximités organisées » (Pecqueur et Zimmermann 2004; Rallet et Torre 1995; 2005) ou « médiatisées » que le « *learning by commuting* » se met en place pour innover au sein des Systèmes Productifs.

Dans la perspective d'une internationalisation des systèmes d'innovation, Spencer (2003) montre également que les entreprises partageant leur connaissance à l'international possèdent de meilleures performances en matière d'innovation que celles qui n'interagissent qu'avec leur système d'innovation national. Également, Binz et Truffer (2017) montrent que les développements technologiques dépendant des connaissances scientifiques concentrent leurs facteurs clefs de réussite à l'échelle transnationale et globale. Ces facteurs clefs regroupent notamment la création de connaissances, la mobilisation des investissements, la légitimation de la technologie et la création de marché (Bergek et al. 2008). Dans le même contexte, Dosso et Lebert (2020) intègrent les flux de connaissances nécessaires au processus d'innovation au sein de Réseaux Globaux d'Innovation (RGI). Les auteurs observent l'existence de *pipelines*, des voies privilégiées permettant aux acteurs locaux d'accéder aux connaissances mondiales. Sur ces mêmes réseaux, Liu et al. (2013) distinguent deux formes de RGI, l'un relevant d'un modèle d'organisation local et l'autre d'un modèle d'organisation mondialisé. L'existence de ces réseaux est directement corrélée avec le développement des Réseaux Globaux de Production (RGP) développé par Ernst (2002) et Ernst et Kim (2002).

L'inclusion croissante des territoires dans la mondialisation, à travers leur mise en concurrence, entraîne le développement de chaînes de valeur et de production mondialisées. Le pendant de ce phénomène en matière d'innovation se traduit par des réseaux de flux de connaissances de plus en plus globalisés au sein desquels la connaissance scientifique, par son

caractère codifié, théorique, universelle et désintéressée, constitue un bien public globalisé, mais impur dont chaque acteur est susceptible de se saisir. Dans ce contexte, la question de l'autonomie des territoires dans leur capacité d'absorption, de production et de diffusion des connaissances nous renseigne sur leurs capacités d'innovation et sur les éventuelles dépendances nouées entre les territoires. La question de cette autonomie devient particulièrement centrale pour la souveraineté des territoires lorsque l'on s'intéresse à des secteurs innovants particulièrement stratégiques comme la santé, l'énergie ou la défense. Notre prochaine section détaille la notion de l'autonomie et de souveraineté dans la littérature économique.

2.2 La question de la souveraineté

L'ordre international moderne, initié avec les traités de Westphalie en 1648, a établi des principes fondamentaux tels que le respect de la souveraineté nationale et le devoir de non-ingérence, formant la base de l'Europe des États-nations (Blin 2006). Le système westphalien a influencé divers traités ainsi que la pensée dans les domaines des sciences sociales et économiques (Wieviorka 2007; Courlet et Pecqueur 2013), y compris les théories commerciales majeures comme le modèle HOS (Nadaud 2019).

La mondialisation, transcendant cette structure, a instauré un système économique mondialisé caractérisé par l'interconnexion des économies, l'ouverture des marchés financiers et l'affaiblissement des régulations étatiques au profit des réseaux transnationaux (Norel 2004). La mondialisation est principalement caractérisée par l'extension du capitalisme à l'échelle mondiale, symbolisant l'emprise d'un système économique global (Adda 2012). Elle incarne l'émergence d'un marché global autorégulateur et reflète une intégration croissante et une interdépendance des économies internationales, comme en témoignent les notions « d'économie-monde » de Braudel (1967) ou de « système-monde » de Wallerstein (1974). Quiggin (2000) décrit la mondialisation comme « *l'augmentation de l'intégration internationale des marchés des biens, des services, des capitaux et du travail* », tandis que Smith (1999) la définit comme une « *compression du temps et de l'espace* ». Elle conduit à la création d'institutions supranationales, régionales et internationales, transcendant les frontières nationales (Helleiner 1999). Sur l'aspect économique, la mondialisation est marquée par la libéralisation du marché et la réduction de la capacité gouvernementale à réguler le commerce et la circulation financière.

La réduction de la souveraineté dans la mondialisation peut être interprétée selon un processus tridimensionnel (Savanovic 2014). Premièrement, elle représente un transfert de décisions à des entités supranationales comme l'Union européenne (UE), qui se voit accorder des pouvoirs législatifs dans de nombreux aspects de la vie sociale, économique et politique. Deuxièmement, elle incarne une infériorité croissante des États par rapport aux exigences provenant d'institutions externes telles que le FMI, la Banque mondiale ou l'OMC, qui peuvent contraindre les États à prendre certaines décisions. Troisièmement, il existe un processus dans lequel les grandes entreprises transnationales peuvent influencer les décisions économiques et politiques des États souverains.

Au niveau des territoires, la mondialisation a entraîné une redéfinition des dynamiques à l'œuvre. Elle a permis à certains territoires de se positionner comme des « oasis de l'économie mondiale » (Pecqueur 2007), en exploitant leurs caractéristiques spécifiques. Les métropoles, avec leurs activités à vocation mondiale, jouent un rôle central dans cette dynamique (Veltz 1996; Scott 2001). Toutefois, ce point de vue a donné lieu à une perception binaire qui opposerait les territoires intégrés et les territoires exclus de la mondialisation (Davezies 2008; Guilluy 2015), négligeant l'ancrage de tous les territoires dans la mondialisation par le biais de chaînes de valeur et la fragmentation des activités économiques (Bouba-Olga 2017). Cette complexité est soulignée par Pecqueur (2006), pour qui le territoire devient un produit de la globalisation, et n'est plus protégé du global par les instances régionales et nationales, mais est en prise directe avec lui (Claval 2003).

Dans cette dynamique mondiale, la compétitivité et l'attractivité sont devenues des critères essentiels. Cette compétitivité peut cependant créer des problèmes en traitant les territoires comme des entreprises, générant la concurrence plutôt que la coopération (Vanier 2010), et en oubliant que les territoires nourrissent des interdépendances fortes, soulignant l'importance de prendre en compte l'interterritorialité.

La notion d'interterritorialité va au-delà de la concurrence, soulignant l'interdépendance et la complémentarité des territoires (Vanier 2005; 2008; 2015). Cette réalité complexe est marquée par l'individualisation, la mobilité croissante, et conduit à une « mise en société des territoires » (Vanier 2008). L'économie moderne se caractérise par la fragmentation des chaînes de valeurs, où la production est internationalement segmentée (Bouba-Olga 2017), remplaçant le concept de « made in » local par un « made in monde » (Berger 2013; Bouba-Olga 2017). Le capitalisme réticulaire (Vanier 2015) a également émergé, où les réseaux sont le champ de la création de valeur, remplaçant les machines dans le capitalisme industriel. La gouvernance de ces réseaux peut menacer le contrôle des pouvoirs publics sur les territoires (Vanier 2015).

Parallèlement, le degré de dépendance entre le territoire et le réseau devient un sujet d'analyse essentiel (Voiron-Canicio et al. 2010).

La mise en réseau des territoires dans une relative émancipation de la tutelle nationale constitue une dimension supplémentaire de la remise en cause de la souveraineté économique des États et soulève plus que jamais la question de leur autonomie.

2.2.1 L'autonomie stratégique comme composante de la souveraineté nationale

Dans le dictionnaire Larousse (2023), la notion de souveraineté se réfère au « *pouvoir suprême de l'État, qui implique l'exclusivité de sa compétence sur le territoire national (souveraineté interne) et son indépendance absolue dans l'ordre international où il n'est limité que par ses propres engagements (souveraineté externe)* ». En droit international, la souveraineté interne signifie que le gouvernement d'un État est considéré comme l'autorité suprême à l'intérieur de ses frontières et de sa juridiction. La souveraineté externe concerne les relations d'une puissance souveraine avec d'autres États. Elle signifie qu'un État n'est pas soumis au pouvoir juridique d'un autre État ou de toute autre autorité supérieure et qu'il se trouve en principe sur un pied d'égalité avec les autres États. Le concept de souveraineté en droit international est généralement lié à la souveraineté extérieure, qui dépend de la reconnaissance par les tiers. Ainsi, la notion de souveraineté est profondément liée à une notion d'autonomie territoriale dans l'exercice d'une contrainte politique et à une notion d'indépendance et de reconnaissance par les acteurs extérieurs (Mazzanti 2013).

Les approches précédentes de la souveraineté interne et externe recouvrent respectivement les définitions westphaliennes et juridiques de celle-ci auxquelles Krasner (1999) ajoute utilement deux autres formes plus proches de la sphère économique. Tout d'abord, la souveraineté d'interdépendance, selon laquelle un État souverain possède la capacité et la volonté de contrôler les flux de personnes, de biens et de capitaux entrant ou sortant du territoire. Ensuite, la souveraineté intérieure se concevant comme la capacité à choisir et à mettre en œuvre des politiques sur son territoire. Toutes ces dimensions sont évidemment fortement liées entre elles, elles peuvent cependant faire l'objet d'analyse distincte. Par exemple, Mitchell (2010) analyse l'impact de la mondialisation sur la souveraineté intérieure quand Savanovic (2014) se concentre sur une définition westphalienne restreinte. Cette thèse se concentre principalement sur la dimension d'interdépendance de la souveraineté, en proposant d'évaluer les capacités des États à influencer les flux de connaissances à l'œuvre au sein de leur territoire.

Cette thèse approche la notion de souveraineté par le prisme de l'un de ses déterminants : l'autonomie stratégique. La poursuite d'une souveraineté économique est nécessairement conditionnée aux capacités concrètes d'indépendance des acteurs d'un territoire. Il apparaît clair qu'un État, qui, en raison de son isolement géographique ou de sa taille restreinte, nourrit de fortes dépendances vis-à-vis d'un acteur extérieur, ne peut prétendre qu'à une souveraineté au sens juridique ou westphalien, sans jamais atteindre une forme de souveraineté économique. La notion d'autonomie stratégique vise justement à quantifier et limiter les situations de dépendances strictes.

Dans la littérature, l'Autonomie Stratégique (AS) renvoie principalement à un concept développé à l'échelle de l'Union européenne en réaction au transfert d'attention des États-Unis de l'Europe vers l'Asie (Smith 2018) et à l'agressivité croissante de la Chine et de la Russie (Anghel et al. 2020).

La feuille de route européenne pour la constitution d'une AS, relève d'une volonté de l'Union de construire une alternative complémentaire à l'OTAN, considéré en état de « mort cérébrale » par le président français en 2019². Cette alternative vise à la consolidation des capacités de l'Union à défendre ses valeurs et ses intérêts. Si la définition claire de l'AS et de ses objectifs ne fait pas consensus au sein de l'Union (Franke et Varma 2019; Libek 2019), un certain nombre de définitions convergent. Dans ce contexte, l'AS s'entend comme la « *capacité d'agir de manière autonome, de ne dépendre que de ses propres ressources dans les domaines stratégiques essentiels et de coopérer avec ses partenaires chaque fois que cela est nécessaire. (...) [elle] ne vise pas l'autosuffisance, mais plutôt des moyens et des outils permettant de réduire les dépendances extérieures qui compromettent l'autonomie dans des domaines réputés stratégiques, sans pour autant cesser de collaborer avec des partenaires dans un cadre multilatéral* » (Anghel et al. 2020, pp.1-3). Originellement limitée au domaine de la sécurité et de la défense, la notion d'AS européenne a dépassé la simple volonté de consolider une capacité de défense pour désigner un système politique, militaire, technologique et industriel. Ce système doit permettre à l'Union d'agir de manière autonome à travers la maîtrise de la production d'équipements militaires, de l'innovation technologique de pointe, de l'accès à l'espace, du renseignement, des technologies et réseaux numériques, de la cryptologie, de l'IA, des données, de la sécurité des infrastructures critiques, des approvisionnements et investissements stratégiques ainsi que par la souveraineté monétaire (Arnould 2020). L'auteure précise qu'en cela « *la souveraineté des États est conditionnée par l'autonomie stratégique et*

² Le Figaro avec AFP. (2019, 7 novembre). « Pour Emmanuel Macron, l'Otan est en état de « mort cérébrale » »

la prise de conscience que cette dernière n'est possible qu'en la cherchant, de manière complémentaire, à la fois au niveau national et au niveau européen (Arnould 2020, p.498). »

Ainsi, l'AS se conçoit comme un déterminant de la souveraineté des nations dans le sens où seule une nation capable d'atteindre un niveau optimal d'AS peut prétendre à une souveraineté étendue sur les quatre dimensions présentées précédemment.

2.2.2 L'autonomie stratégique par l'innovation

Si la conception de l'AS doit profiter d'une vision transversale mêlant cyberspace, économie et géopolitique pour pouvoir protéger la souveraineté européenne (Leonard et al. 2019), seul le domaine de la défense profite d'un consensus politique clair (Anghel et al. 2020). En conséquence, cette thèse se concentre sur la mesure de l'autonomie dans les domaines d'innovation de la défense. Les caractéristiques singulières entourant le développement et l'identification des innovations en matière de défense seront l'objet de notre second chapitre introductif.

Dans le domaine de la défense, l'autonomie stratégique se déploie sur les dimensions politiques, opérationnelles et industrielles (Kempin 2017). Sur sa dimension opérationnelle, elle peut se concevoir comme un « *outil militaire permettant d'agir seul* » associé à des « *capacités d'entraînement permettant de ne pas le rester* » (Charillon 2013) ou encore comme « *les capacités (...) permettant l'initiative et l'action autonome, mais aussi la capacité à entraîner avec elle ses alliés et partenaires* » (Ministère de la Défense 2013). Sur sa dimension industrielle, et plus précisément sur l'innovation industrielle, l'autonomie stratégique s'interprète comme la capacité des nations à placer sous leur contrôle les systèmes scientifiques et techniques leur permettant de pourvoir en innovation leur Base Industrielle et Technologique de Défense (BITD). Cela s'illustre par la capacité de développer indépendamment les technologies de défense, ainsi que la capacité à imposer ses choix aux autres, en occupant une position dominante dans le réseau d'innovation.

Sur cette dimension, le Conseil de l'Europe reconnaît que celle-ci « *doit disposer d'une base industrielle et technologique européenne plus intégrée, plus durable, plus innovante et plus compétitive pour pouvoir assurer le développement et le soutien de ses capacités de défense, ce qui pourra aussi lui permettre d'accroître son autonomie stratégique* » (Conseil Européen 2013, p.7). Cette considération souligne l'importance de nourrir une capacité de production d'innovation en matière de défense comme un instrument de puissance pour les États (Mérindol, Versailles, et Cardot 2003). En conséquence, la puissance technologique d'un

État et son autonomie stratégique en matière de défense sont profondément liées. La notion de puissance telle qu'exposée par Raymond Aron témoigne de la proximité entre ces deux concepts : « *La puissance d'un individu est la capacité de faire, mais avant tout, celle d'influer sur la conduite ou les sentiments des autres individus. J'appelle puissance sur la scène internationale la capacité d'une unité politique d'imposer sa volonté aux autres unités.* » (Aron 1962, p.90).

Ainsi, les travaux empiriques exposés dans cette thèse définiront l'AS en matière de défense comme une mesure de la puissance technologique du territoire concerné. Pour cela, nous mesurons l'autonomie stratégique par les capacités d'un territoire à innover seul, mais également sur sa capacité à imposer ses orientations technologiques aux autres territoires. De cette manière la mesure de l'AS permet de capter les capacités des territoires à influencer les trajectoires technologiques internationales (Dosi 1982) afin de servir au mieux leurs choix stratégiques. Dans sa composante technologique, l'AS ne repose plus seulement sur l'indépendance des États mais sur leur faculté à collaborer.

Les travaux de Lebert et Meunier (2020) sont à notre connaissance les premiers à avoir proposé une mesure de l'autonomie stratégique par l'innovation. Leur définition de l'AS passe par la mesure de deux dimensions inséparables. La première consiste à disposer des connaissances et des technologies pour innover seul. La seconde, à avoir des capacités d'entraînement technologique, des interdépendances avec les autres territoires, afin de pouvoir influencer sur le progrès technologique dans le domaine des technologies de défense. Ces deux dimensions sont transcrites respectivement par une mesure d'introversion et d'extraversion. Ces indicateurs mesurent la part des flux connaissances inter-régionaux au sein des frontières d'un même pays et les flux connaissances que les pays échangent avec le reste du monde. Un pays est alors autonome stratégiquement d'un point de vue technologique s'il nourrit un équilibre entre une certaine autarcie et une faible dépendance extérieure pour la création de connaissances. Cette thèse utilisera des indicateurs adaptés de ces travaux afin de quantifier l'AS des territoires.

Ces indicateurs sont issus de la Théorie de la Dominance Economique (TDE, Lantner 1974; Lantner et Lebert 2015) qui repose d'un point de vue méthodologique sur la théorie des graphes. Cette dernière théorie est à l'origine un outil fondamental pour les études sociométriques, au travers de l'Analyse des Réseaux Sociaux (ARS), débutée dans les années 1940 (Bavelas 1948; Luce et Perry 1949). La synthèse de ces travaux énonce qu'"un vaste champ de problèmes sociaux pouvait être compris comme des cas particuliers d'un modèle structural général" (Freeman 2004, p.114). Dans ce contexte, l'analyse topologique introduite

par Claude Ponsard et Roland Lantner, s'inscrit dans la continuité des idées de François Perroux concernant les phénomènes de pouvoir en économie. Elle a permis l'élaboration d'instruments d'analyse structurelle basés sur la théorie des graphes, afin de construire une représentation formelle des relations de dominance. Cette combinaison d'approches théoriques a facilité le croisement des traditions de recherche en analyse *input-output* et en ARS (Freeman 2004).

Dans la méthodologie de Lebert et Meunier (2020), la TDE permet ainsi de situer l'innovation dans un système complexe de flux de connaissances internationaux, plus précisément, elle permet de mesurer l'influence "globale" d'une entité A sur une entité B en tenant compte de ses relations avec d'autres entités (C, D, etc.). Elle s'intéresse ainsi aux « effets de domination » définis par Perroux (1948) comme la capacité d'une économie dominante « par ses mouvements mêmes, et en dehors de tout dessein prémédité [à] influence[r] d'autres économies réduites à une action d'adaptation ». La TDE s'inscrit ainsi dans le cadre d'interprétation des échanges de connaissances mondiaux comme un ensemble de relations cachées ou manifestes entre acteurs dominants et dominés. Elle nous permet d'évaluer l'effort intellectuel consenti par les nations au sein du concert international de la R&D de défense année après année.

La recherche entourant l'autonomie stratégique par l'innovation reste aujourd'hui très exploratoire et nécessite encore de nombreux travaux pour en consolider les méthodes et résultats. Néanmoins, un certain nombre d'études nous permettent déjà de décrire des tendances générales. La première d'entre elles, Lebert et Meunier (2020) illustre la suprématie états-unienne sur le système global de connaissances technologiques liées au domaine de la défense pour les années 2010 et 2012. Les États-Unis sont à la fois le pays le plus intégré sur leurs territoires, mais aussi celui qui a le plus d'interactions avec les autres. Cela leur permet d'absorber de manière efficace les connaissances produites dans le monde et de diriger le système global d'innovation défense dans la direction souhaitée par leur propre BITD. Ces résultats désignent un quatuor de tête de l'AS mondiale composé des États-Unis, de l'Allemagne, du Royaume-Uni et de la France.

Sur la base de cette première approche Kouakou et Szego (2022) investiguent l'influence du contexte de gouvernance des nations sur leur niveau d'AS. Il en résulte que la capacité de contre-pouvoir exercé par la société civile est un facteur corrélé à l'accroissement d'une capacité d'AS, également, la stabilité politique et l'absence de violence liée ou non au terrorisme apparaissent négativement corrélés. À ces variables s'ajoutent des facteurs d'influence positive de contrôle comme l'intensité d'investissement ou le niveau de dépense militaire. Plus récemment, ces mêmes auteurs ont mis en évidence un impact positif de

l'autonomie stratégique sur le niveau de développement économique mesurer par le PIB par habitant. Ces travaux argumentent en faveur de l'innovation de défense comme vecteur de développement de la société dans son ensemble.

Jusqu'à présent, ces recherches ont négligé l'analyse des flux de connaissances scientifiques, bien que ceux-ci jouent un rôle crucial dans le développement technologique de la défense. Nous nous proposons de pallier modestement cette lacune dans la droite ligne des futurs travaux préconisés par Dosso et Lebert (2020) et Lebert et Meunier (2020).

En résumé, l'autonomie stratégique est une notion relativement récente permettant d'illustrer les besoins des nations et de l'Union européenne de limiter leur dépendance à de grands acteurs mondiaux concernant la production de biens et services vitaux pour la protection de leurs intérêts et de leur souveraineté. Cette thèse conçoit l'autonomie stratégique comme le principal vecteur permettant à une nation s'assurer sa souveraineté économique. Cette thèse se concentre sur la conception originale de l'autonomie stratégique comme relevant principalement du secteur de la défense. L'application des indicateurs d'AS développé grâce à la TDE au secteur de la défense nous permet de mesurer les relations de domination existant au sein du système de connaissance global et nous renseigne sur les hiérarchies à l'œuvre. Son application aux flux de connaissance scientifique est nouvelle et relève d'une démarche exploratoire. Nous nous proposons ainsi d'étoffer la littérature sur le rôle de l'activité scientifique dans le développement d'une capacité de défense.

Conclusion

Les conceptions précédemment exposées nous permettent de concevoir la souveraineté des territoires dans la production, l'utilisation et la diffusion des connaissances dans le domaine de la défense comme un enjeu stratégique. La capacité des territoires à innover de manière autonome est déterminée par leur aptitude à placer sous leur contrôle les flux de connaissances circulant au sein d'un réseau globalisé. La constitution d'une base de connaissances opérationnelle est intimement liée aux dynamiques économiques, politiques, culturelles et sociales facilitant l'interaction entre acteurs, tant au niveau local qu'international. Ce constat légitime la pertinence du concept de système d'innovation territorial, qui permet de conceptualiser le processus d'innovation dans toute l'hétérogénéité de ses déterminants. Les capacités d'innovation d'un territoire sont ainsi largement influencées par des facteurs clefs tels que le régime de gouvernance, la qualité des institutions, la fiabilité de la régulation, l'intensité du financement public de la recherche et de l'enseignement, ou encore la cohésion culturelle et linguistique. En somme, les capacités d'innovation d'un territoire apparaissent comme le résultat de la qualité du construit social que représente le territoire.

Dans ce contexte, cette thèse aborde la question de la souveraineté des territoires en matière d'innovation à travers la mobilisation de la notion d'autonomie stratégique. Nous contribuons ainsi à intégrer ce concept dans le champ d'étude de l'économie de l'innovation en proposant une mesure de celle-ci. L'observation du niveau d'autonomie stratégique en matière d'innovation implique l'analyse des flux de connaissances scientifiques et technologiques émis et absorbés par un territoire. Une telle approche quantitative est nécessairement limitée à l'observation des connaissances explicitement codifiées. Cependant, nos études empiriques prennent en compte l'importante dimension tacite attachée à la production de connaissances. Nous nous attacherons ainsi à mettre autant que possible en lumière cette dimension tacite, permettant au territoire de constituer une spécialisation scientifique et technologique sur le long terme.

L'étude du cas restreint de l'innovation en matière de défense nous permet de concentrer nos analyses sur un secteur particulièrement stratégique pour la souveraineté nationale. Notre prochain chapitre vise à détailler la spécificité de ce cas d'étude.

Chapitre 2 :

L'innovation de défense

Introduction

Comme nous l'avons exposé précédemment, notre mesure de l'autonomie stratégique des territoires repose sur l'évaluation de leur indépendance dans la production et la diffusion des connaissances liées à l'innovation de défense. Ce type d'innovation occupe une position centrale dans la protection des intérêts et de la souveraineté des nations. En dépit des changements significatifs survenus après la chute de l'Union soviétique, qui ont conduit à une certaine normalisation de l'industrie de la défense caractérisée par une internationalisation et une privatisation, cette industrie conserve des particularités notables. Ces spécificités comprennent une prédominance de l'intervention de l'État dans son financement et sa régulation, une complexité croissante rendant l'industrie dépendante des avancées scientifiques, et une tendance prononcée à la mise au secret des connaissances.

Ce chapitre vise à enrichir le cadre théorique de cette thèse en détaillant les conceptualisations spécifiques à l'étude des innovations de défense. Nous commencerons par définir cette industrie à travers les différents acteurs qui la composent. Ensuite, nous établirons le cadre des systèmes d'innovation de défense, considéré comme une synthèse conceptuelle du paradigme théorique utilisé dans cette thèse. Par la suite, nous aborderons une dimension plus technique en justifiant notre méthode d'identification des connaissances pertinentes pour l'innovation en matière de défense. Enfin, nous tâcherons de définir et de quantifier la pratique du secret dans cette industrie, en nous appuyant sur la littérature disponible, bien que celle-ci soit relativement limitée.

1 Qu'est-ce que la défense ?

La défense regroupe l'ensemble des activités et services participant au maintien de la sécurité et de l'intégrité d'un territoire et de sa population. Elle revêt un caractère multidimensionnel, à l'intersection des domaines opérationnels, politiques, stratégiques et économiques (Bellais, Foucault, et Oudot 2014). L'étude de l'une ou plusieurs de ces dimensions par le prisme de la science économique relève d'une « économie de défense » dans laquelle nous nous inscrivons pleinement. Cette branche de l'économie prend notamment comme sujet les importations et exportations d'armes (Fontanel 1983; Brauer et Dunne 2004; Fauconnet et Malizard 2016), les politiques budgétaires de défense (Droff et Malizard 2014) et leurs conséquences sur la croissance économique (Malizard 2020) ou bien entendu, le processus d'innovation militaire (Bellais et Droff 2014; Droff et Rademacher 2020). En conséquence, l'économie de défense peut adopter une approche microéconomique en raisonnant à l'échelle d'une entreprise de défense (Benkeltoum 2016; Bellais 2022), comme une approche macroéconomique en dressant des monographies de systèmes nationaux (Serfati 2008; Mowery 2009; Walsh et Francis 2011), ou encore en comparant la productivité des systèmes d'innovation de défense à l'échelle internationale (Bitzinger 2011; Lebert et Meunier 2020). Cette thèse se place dans la lignée de ces deux dernières approches.

La complexité inhérente à la conceptualisation du secteur de la défense peut être adéquatement décrite à travers l'examen de trois concepts fondamentaux : le complexe militaro-industriel, la base industrielle et technologique de défense et le système d'innovation de défense. L'exploration approfondie de ces trois approches conceptuelles offre un panorama des enjeux et des acteurs exerçant une influence significative sur l'activité de défense.

1.1 Le Complexe Militaro-Industriel

Les acteurs du secteur de la défense peuvent être définis dans le cadre d'un Complexe Militaro-Industriel (CMI), une entité comprenant divers membres des forces armées, de la bureaucratie civile de la défense, du corps législatif, ainsi que des fabricants d'armes et leurs employés (Dunne et Sköns 2009). L'utilisation du concept de CMI est relativement ancienne et a notamment gagné en popularité à la suite de son utilisation par le président américain Eisenhower en 1961.

Ce concept structurant de l'économie de défense est principalement utilisé pour décrire l'existence d'une collusion d'intérêt potentielle entre les grands groupes industriels, les dirigeants politiques et les membres de l'armée, au détriment de l'intérêt public (Galbraith 1967; 1973) et du désarmement international (Fontanel 2004). Ce dernier auteur définit le CMI comme « *une coalition d'intérêts qui unit les industriels et les militaires dans le but d'assurer un développement continu de la production et de la vente d'armes* » (Fontanel 1994, p.62). Le CMI évolue au sein d'une industrie militaire peu soumise à la concurrence. Le marché est très régulièrement en situation de monopsonie (un seul acheteur, généralement l'État) et d'oligopole voire de monopole (peu ou pas de concurrence). Ces conditions garantissent un profit stable sur le long terme pour les entreprises du secteur et permettent au CMI de consolider des privilèges et appuis politiques et économiques non négligeables. Pour Galbraith (1967), la relation étroite entre les représentants politiques américains et les firmes de l'armement s'articule largement autour des contributions électorales, et de la prééminence économique du secteur de l'armement. Pour cet auteur, les déterminants de la course aux armements durant la guerre froide étaient ainsi principalement internes, l'opposition au bloc soviétique étant utilisée comme prétexte pour maintenir la demande d'armement à un niveau élevé. La persistance du développement des technologies militaires et l'absence d'un désarmement substantiel après la fin de la guerre froide constituent, pour cet auteur, un témoignage du caractère endogène de la demande militaire (Bellais et Coulomb 2013).

Les définitions du CMI sont variables et dépendent du propos de l'auteur qui l'emploie. Bellais et Coulomb (2013) distinguent quatre conceptions majeures : (i) le « pouvoir des élites », dépeint une collaboration entre l'establishment militaire et les industries d'armement visant à protéger leurs intérêts mutuels et à assurer la reproduction d'une rente ; (ii) le « techno-industrialisme », promu par Galbraith, met en lumière l'alliance entre militaires, industriels et politiciens en quête d'une suprématie technologique ; (iii) l'approche « bureaucratie wébérienne » considère la volonté de reproduction de la structure administrative comme l'élément-clef du CMI ; (iv) enfin, l'analyse marxiste voit le CMI comme un moyen pour les industriels monopolistes de maximiser leurs profits en orientant les dépenses publiques vers l'armement.

L'existence même d'un CMI est remise en question après la chute de l'URSS. Les profonds changements intervenus dans le secteur de la défense durant cette période laissent envisager une normalisation de l'industrie et une disparition du CMI. Ce concept est ainsi largement associé à la période de la guerre froide et au système américain. Cependant, Bellais et Coulomb (2013) notent une résurgence du CMI aux États-Unis après le 11 septembre 2001,

marquant l'avènement d'un potentiel « Complexe Sécurito-Industriel ». Les attentats perpétrés en Europe à partir de 2015 et l'agressivité croissante de la Russie sur le continent laissent potentiellement présager une résurgence similaire du CMI en Europe.

1.2 La Base Industrielle et Technologique de Défense

La faible pertinence du concept de CMI pour décrire l'industrie de la défense post-guerre froide nous amène à considérer un autre concept : la Base Industrielle de Défense (BID) ou Base Industrielle et Technologique de Défense (BITD). La BID fait référence à l'ensemble des entreprises et des secteurs qui sont impliqués, directement ou indirectement, dans la production et la fourniture d'équipements, de technologies et de services pour les besoins de défense d'un pays. La définition exacte de ce qui constitue la production militaire est difficile tant l'usage de certaines technologies comme les semi-conducteurs ou les techniques de cryptage profite d'une forte dualité, à la fois civile et militaire. Un corps d'armée utilise ainsi des systèmes d'armes létaux comme une batterie de missiles balistiques ou des avions de combat, des produits non-létaux, mais stratégiques comme des véhicules de transport ou des systèmes de géolocalisation et d'autres produits de consommation plus courante comme du matériel de communication et de la nourriture. La consommation de chacun de ces produits est indispensable à l'activité de défense, ils ne sont cependant pas tous conçus en ce sens (Dunne 1995). De la même manière, les grands groupes de l'armement partagent leur production entre une production orientée vers des besoins militaires et une production destinée à des besoins civils. Cette dualité dans la production des acteurs de la défense leur permet d'équilibrer une potentielle diminution de leurs activités militaires par une augmentation proportionnelle dans le secteur civil, et inversement. Sur le plan technologique, ces firmes capitalisent sur les avancées des deux domaines pour stimuler leur processus d'innovation. Par conséquent, les innovations survenues dans le secteur militaire peuvent enrichir la production civile (*spin-off*), et inversement (*spin-in*, Bellais et Guichard 2006; Acosta, Coronado, et Marín 2011). Ainsi, la BITD peut être envisagée de manière étroite, en se concentrant uniquement sur les principaux producteurs de défense, ou de manière élargie, en englobant divers aspects de l'économie jugés stratégiques pour la défense nationale.

Le rôle de la BITD va au-delà de la simple fourniture de moyens de guerre. Elle est également justifiée par les besoins de sécurité des nations. La notion de sécurité doit être entendue non seulement comme la capacité à défendre l'intégrité d'un territoire, mais comme les moyens visant à prévenir toute atteinte à la liberté de décisions et d'action, individuelles ou

collectives, à l'intérieur d'une nation ou d'un ensemble de nations qui partagent les mêmes valeurs (Mérindol, Versailles, et Cardot 2003). La notion de sécurité vise à couvrir les menaces non-conventionnelles issues de « moyens de guerre hybrides » comme la guerre cybernétique, la désinformation, les opérations de guérilla, le crime organisé et le terrorisme. Plus récemment, l'instrumentalisation des flux migratoires a rejoint la liste de ces moyens de guerre hybrides (Łubiński 2022). La fourniture des moyens de sécurité élargit la base industrielle et technologique à la fourniture de matériels relatifs à la protection des frontières, aux équipements anti-émeutes, à la protection des données personnelles, à la sécurité des infrastructures critiques comme les aéroports, etc. Outre la dualité des technologies, l'industrie de la défense est ainsi également impliquée dans la production de technologies applicables au domaine de la sécurité.

Afin de distinguer plus facilement les frontières de la BITD, Moura (2014) définit des « unités marchandes », représentant les sociétés marchandes et les entreprises individuelles qui mettent sur le marché des biens et services qu'elles ont produits et pour lesquels un prix de marché est disponible. Ces unités excluent de fait les administrations dont le fonctionnement n'est pas financé par une activité marchande. Sur l'exemple de la BITD française en 2011, ces unités sont celles : (i) ayant contractualisé avec le ministère de la Défense pour la fourniture de biens et services relatifs à la fabrication des systèmes d'armes ; (ii) ayant contractualisé directement avec l'Organisation Conjointe de Coopération en matière d'Armement (OCCAr) pour la réalisation de programmes d'armement en coopération ; (iii) ayant exporté des matériels militaires ; (iv) ayant contractualisé avec des organismes publics autres que le ministère de la Défense pour la réalisation de R&D militaire, comme avec le Commissariat à l'Énergie Atomique. Cette classification décrit la BITD française comme composée de 552 entreprises (Moura 2014). Cette définition implique des acteurs directement en lien avec le premier type de production identifié par Dunne (1995), à savoir des entreprises impliquées dans la production et la vente de systèmes d'armes létales. En France, ces activités essentielles pour la fabrication de systèmes d'armes sont : la fabrication de produits explosifs, l'élaboration et la transformation de matières nucléaires, la fabrication d'armes et de munitions, la construction de navires et de structures flottantes, la construction aéronautique et spatiale, la construction de véhicules militaires de combat et la fabrication d'équipements d'aide à la navigation (Moura 2012). En conséquence, la BITD est plus restreinte que le secteur de la défense, qui, en termes de comparaison, regroupait 47 276 unités marchandes et non-marchandes en 2010 en France (Moura 2012). Cette thèse se concentre sur l'analyse des productions innovantes des acteurs de la BITD mondiale en suivant une définition restreinte proche de celle exposée précédemment et en excluant l'industrie nucléaire.

1.3 Les Systèmes d'Innovation de Défense

Cette dernière approche nous permet de considérer les spécificités de l'innovation de défense. Celle-ci est relativement récente et mobilise le cadre conceptuel des systèmes d'innovation pour l'étude spécifique de l'industrie de défense. L'approche par les Systèmes d'Innovation de Défense (SID, James 2009) est au cœur de cette thèse. Le développement récent du concept de SID découle principalement des travaux de chercheurs issus de l'université de San Diego en Californie. Ce cadre conceptuel permet de comparer les performances des systèmes d'innovation nationaux à l'aune de la course mondiale à l'innovation de défense (Bitzinger et al. 2011). Elle permet également la réalisation de plusieurs monographies illustrant les capacités et l'évolution des SID, à travers des études de cas telles que la Chine (Cheung 2009; Walsh et Francis 2011; Bitzinger 2011; 2016), l'Inde (Bitzinger 2014; Behera 2018), la Russie (Kashin 2021) et Israël (Bitzinger 2018). L'innovation de défense est définie ici comme la transformation des idées et des connaissances en produits, processus et services nouveaux ou améliorés pour des applications militaires, aérospatiales et à double usage (Cheung 2021). Au croisement des perspectives sectorielles et nationales, les systèmes d'innovation en matière de défense sont guidés par des facteurs clefs, tels qu'identifiés par Cheung (2021). Ces facteurs comprennent des éléments « catalytiques », tels que le soutien politique de haut niveau et le niveau de menace externe ainsi que des facteurs « intrants », comme les transferts de technologie et le capital humain. Ces systèmes sont également influencés par des éléments contextuels, comme l'héritage historique, le contexte politique et la taille du pays concerné. En outre, la qualité des structures institutionnelles et organisationnelles, incluant la qualité de la régulation, de la protection des droits de propriété intellectuelle, des normes de gouvernance et des entités de recherche, joue également un rôle déterminant dans la dynamique des SID.

Ainsi, cette approche permet de tenir compte de l'environnement géopolitique dans le développement des capacités d'innovation de défense. Cette caractéristique est propre au secteur de la défense et trouve son origine dans le phénomène de course à l'armement entre puissances. Cette course à l'armement, centrale pendant la guerre froide, est toujours à l'œuvre aujourd'hui, suggérant que ce phénomène est davantage attribuable à un climat général de tensions internationales qu'à la structure d'opposition bipolaire spécifique à la période de la guerre froide (Bellais 2013). Cette situation place l'innovation en matière de défense dans un contexte de concurrence internationale où l'objectif est d'acquérir une supériorité technologique sur l'adversaire. Cette supériorité permet d'agir contre une menace identifiée, soit par un mécanisme de dissuasion, soit à l'appui d'une intervention opérationnelle.

L'innovation de défense est motivée par la volonté de surpasser un adversaire potentiel ou de combler une faiblesse identifiée. Ces incitations sont renforcées par des facteurs externes comme la menace d'un conflit armé ou une défaite militaire, mais également des facteurs internes comme une compétition entre différents services de la défense ou l'absence de renseignements fiables sur un adversaire potentiel (Sempere 2015). L'innovation en matière de défense est intrinsèquement liée aux stratégies de défense nationale.

Dans ce contexte, l'État assume un rôle encore plus central et prédominant dans le SID qu'il ne le fait dans le cadre plus général du SNI. Il agit, d'une part, comme le principal financeur des programmes de R&D, en allouant des budgets substantiels à des organismes de recherche, qu'ils soient publics ou privés, pour le développement de nouvelles technologies. D'autre part, l'État se positionne comme le principal acquéreur des matériels ainsi développés. Jusqu'aux années 1990, en France, l'industrie de la défense recevait la quasi-totalité des aides publiques en R&D (Belin et Guille 2008). Cette dépendance significative du secteur de la défense vis-à-vis des financements publics s'explique par l'importante intensité de la R&D dans le secteur et par les risques conséquents de ces investissements. Ces risques sont liés à la complexité des technologies développées et à la dépendance à un changement de doctrine, de budget ou de situation géopolitique pour le client. En tant que client unique et utilisateur final des technologies de défense, l'État a le pouvoir d'influencer directement les orientations de l'innovation en fonction de ses besoins et spécifications (Dunne 1995; Hartley 2006). Il joue un rôle régulateur et normatif essentiel, en établissant des réglementations et des normes qui encadrent le développement et l'utilisation des innovations de défense. Celles-ci incluent la mise en place de contrôles à l'exportation et la protection des droits de propriété intellectuelle (Markusen et Costigan 1999). L'État agit également comme coordonnateur et facilitateur, orchestrant la collaboration entre les entreprises, les universités et les laboratoires de recherche. Il élabore des stratégies à long terme pour l'innovation en matière de défense, identifie les domaines prioritaires de R&D et anticipe les futurs besoins et menaces en matière de sécurité. Ce rôle central de l'État a pour conséquence de structurer l'espace économique en encrant la BITD au sein du territoire (Droff et Malizard 2019). Ce phénomène de long terme est particulièrement visible dans le développement de la « *Gunbelt* » aux États-Unis sur la seconde moitié du XX^e siècle. Dans cet exemple, les financements liés aux besoins du Pentagone pendant la guerre froide ont profondément transformé le paysage industriel à l'échelle nationale (Markusen et al. 1991). Enfin, les investissements publics en R&D dans le domaine de la défense jouent souvent un rôle crucial en tant que catalyseurs de l'innovation dans le secteur civil. Ce phénomène est illustré par la transition de technologies militaires vers des applications

civiles, à l'instar de l'Internet et du GPS (Ruttan 2006). De surcroît, Mazzucato (2015) met en évidence que nombre de technologies intégrées dans l'iPhone découlent de projets militaires, notamment financés par la *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) aux États-Unis. En France, le développement d'une capacité de dissuasion nucléaire, notamment au travers de la Force Océanique Stratégique, a stimulé des progrès significatifs dans l'industrie médicale, automobile et aéronautique (Masson 2017). Cette dynamique a également un impact socio-économique notable, se traduisant par la création de 10 000 à 22 000 emplois et favorisant l'émergence de technopoles localisés, comme celui de la ville de Brest (Tertrais 2015).

Ainsi, l'État et l'industrie de la défense entretiennent une relation étroite dans laquelle l'État, en tant que maître d'ouvrage, fournit une part importante du financement nécessaire à l'élaboration des technologies de défense. Ce financement peut être direct, à travers des partenariats publics-privés, ou indirect, par le biais de subventions pour la recherche fondamentale. En contrepartie, les entreprises du secteur de la défense, agissant en qualité de maître d'œuvre, fournissent les équipements essentiels à la protection des intérêts et de la souveraineté de l'État, ainsi qu'à la sécurité de sa population. Cette contribution se traduit par le développement de matériels compétitifs sur le plan international, afin de maintenir un avantage stratégique face à d'éventuels adversaires.

Cette thèse mobilise le cadre conceptuel de l'innovation de défense afin d'explorer les dynamiques et les déterminants des performances scientifiques et technologiques des différents systèmes d'innovation. Nous adoptons également une démarche inductive sur le cas d'étude d'une technologie à double usage : l'impression 3D. Ceci dans le but d'explorer les formes d'interaction S&T potentiellement à l'œuvre au sein des SID. Notre prochaine section fixe les caractéristiques propres à notre cas d'étude depuis la fin de la guerre froide.

2 La fin de la guerre froide, un tournant pour l'innovation de défense

La chute de l'Union soviétique marque un changement de paradigme pour l'industrie de la défense. La fin du conflit bipolaire Est-Ouest ouvre une perspective d'apaisement des tensions internationales. Ce contexte se traduit par une baisse importante des dépenses militaires au sein des principaux pays développés, de 3.27 % du PIB mondial en 1990 à 2.16 % en 2000³. Cette réduction des dépenses militaires a facilité une réaffectation des fonds vers les secteurs civils, contribuant ainsi à la diminution des déficits publics et à l'augmentation des investissements dans des domaines tels que la santé et l'éducation. Cette période est souvent qualifiée de celle des « dividendes de la paix » (Serfati 2008). Cependant, le contexte géopolitique a regagné en tension au début des années 2000, notamment porté par un changement politique en Russie, par la montée en puissance de la Chine et par les attentats du 11 septembre 2001. À l'exception des puissances européennes (Ministère de la Défense 2013; Matelly et Lima 2016), ces évolutions ont généralement marqué la fin des politiques de réduction des dépenses militaires et ont relancé la compétition pour le développement technologique dans le domaine de la défense. Après la reprise à la hausse des dépenses européennes à partir de 2015, les dépenses militaires mondiales ont atteint en 2019 leur plus haut niveau depuis 1988 (SIPRI 2020).

Dans ce contexte, l'innovation en matière de défense a évolué, notamment à travers la privatisation et l'internationalisation des entreprises de défense et l'émergence de technologies duales, d'une complexité croissante des équipements et de l'augmentation des coûts associés. Notre prochain point détaille ces évolutions.

2.1 Privatisation et internationalisation

Depuis la fin de la guerre froide, le secteur de la défense dans les pays occidentaux, notamment en Europe et en Amérique du Nord, a connu des transformations structurelles profondes, marquées par un mouvement général de privatisation des moyens de production (Hébert 1995). Historiquement, ces moyens étaient contrôlés, directement ou indirectement, par

³ Source : Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI)

l'État, à travers des arsenaux et des entreprises nationales. Deux objectifs principaux ont motivé ces privatisations : améliorer l'efficacité des entreprises, notamment en matière de gestion de programmes, de stratégies, et de relations avec les sous-traitants, et permettre la consolidation de la base industrielle, particulièrement à l'échelle européenne, en réponse à la contraction des budgets de défense (Bellais et Coulomb 2013).

Parallèlement, les grands groupes d'armement ont progressivement diversifié leurs activités vers les marchés civils, tels que la cybersécurité et la protection des infrastructures critiques, pour compenser la réduction du marché des matériels militaires. Cette diversification a contribué à brouiller les frontières des BITD nationales.

Cette période de transition a également été caractérisée par un double mouvement dans les relations entre l'État et l'industrie de défense. D'une part, l'État a recentré ses compétences autour de domaines stratégiques, conservant un rôle « d'acheteur intelligent », bien informé des enjeux technologiques et conscient des risques financiers associés aux projets de R&D (Mérindol 2004). D'autre part, le secteur privé a renforcé son rôle « d'entraîneur technologique », capable de proposer des solutions clef en main pour le secteur de la défense, comme de co-construire des développements technologiques avec celui-ci (Mérindol 2015).

Néanmoins, cette évolution a entraîné des conséquences parfois problématiques. La privatisation et la diversification des activités ont créé une distinction plus marquée entre les armées (clients) et les entreprises de défense (fournisseurs), rendant leurs relations plus formalisées et compétitives. Cette nouvelle dynamique, marquée par une concurrence accrue dans l'attribution des marchés, a parfois mené à des productions technologiques défailtantes ou inadaptées à un déploiement opérationnel (Bellais 2013). Ces problèmes s'ajoutent à la tendance générale de surcoût et de retard de livraison qui caractérisent les programmes d'innovation de défense depuis la fin de la guerre froide (Alic 2007; Bellais et Droff 2014; Sempere 2015).

En définitive, les tendances observées vers la privatisation et la diversification des activités, associées à une collaboration moins soutenue entre le secteur public et le secteur privé, ont conduit à une forme de « normalisation » des entreprises de défense. Ce processus a entraîné des changements fondamentaux dans la structure des systèmes d'innovation de défense, marquant un tournant significatif dans les interactions entre les sphères gouvernementales et industrielles.

Ce mouvement de privatisation s'accompagne d'une internationalisation dans la production d'armes. Quelques années après la fin de la guerre froide, Richard Bitzinger identifiait déjà que « *la production d'armements entièrement nationale est peut-être en déclin,*

la production multinationale d'armements - par le biais d'une collaboration sur des systèmes d'armes individuels et, de plus en plus, par le biais de liens interentreprises dans l'ensemble de l'industrie internationale de l'armement - semble de fait se développer » (Bitzinger 1994, p.170). Cette globalisation de la production de défense s'accompagne d'une internationalisation du processus d'innovation, à l'image du développement du F-35 *Joint Strike Fighter*, un avion développé, financé et testé par neuf pays différents : l'Australie, le Canada, le Danemark, l'Italie, les Pays-Bas, la Norvège, la Turquie, le Royaume-Uni et les États-Unis.

Pour Hérault (2018), l'internationalisation des chaînes de valeur dans l'industrie de la défense est influencée par plusieurs facteurs. Tout d'abord, la demande mondiale en armement qui a progressivement dépassé les zones de production, stimulant les échanges internationaux. Deuxièmement, l'accroissement de la complexité technique des systèmes de défense et des contraintes budgétaires des États encourageant une spécialisation accrue des acteurs, permettant de bénéficier d'avantages comparatifs et d'intégrer des composants civils à moindre coût. Ensuite, la dualité croissante des chaînes de valeur, associée à l'intégration de technologies civiles, telles que l'électronique et les TIC, dans les systèmes militaires, a renforcé l'internationalisation des approvisionnements. Par ailleurs, la libéralisation progressive des échanges internationaux d'armement à travers divers accords bilatéraux et régionaux facilite les transferts d'armes entre États. Les stratégies d'indigénisation des capacités de production adoptées par les États importateurs, qui impliquent des transferts de technologies et l'intégration de fournisseurs locaux, jouent un rôle significatif dans l'internationalisation des chaînes de valeur dans le secteur de la défense (Hérault 2018). Enfin, les mouvements capitalistiques, notamment les fusions-acquisitions, ont conduit à l'émergence de groupes de défense transnationaux, dont les implantations industrielles dépassent largement leurs bases nationales historiques, et qui, en cherchant à générer des synergies, sont susceptibles de favoriser une internationalisation accrue des chaînes de valeur.

L'internationalisation du processus d'innovation appliqué à la défense reste à notre connaissance peu documentée. Cette thèse ambitionne d'apporter un éclairage sur ce sujet par l'étude du réseau global de connaissances dans le domaine.

2.2 Des innovations complexes, dépendantes des avancées scientifiques

La course mondiale à l'armement a pour conséquence une surenchère dans l'élaboration des systèmes d'armes de défense. Ainsi, l'innovation de défense est marquée par une complexité croissante qui se manifeste à la fois dans les produits de défense eux-mêmes, tels que les armes

et équipements militaires, et dans les processus de conception et de production qui les soutiennent. Les productions de défense peuvent être comparées à des *Complex Product Systems* (CoPS), qui sont définis comme des ensembles de sous-systèmes organisés hiérarchiquement et intégrant une variété de connaissances technologiques et scientifiques (Hobday 2000). Ces systèmes impliquent une haute complexité technologique et organisationnelle, un coût unitaire très élevé, de fortes incertitudes, des procédures réglementaires contraignantes (certification, test de qualification, etc., Mérindol 2016). Cette complexité inhérente aux produits de défense est mise en évidence par le nombre élevé de composants qu'ils intègrent. À titre d'exemple, dans les années 1990, un moteur à réaction comportait plus de 22 000 pièces (Hobday 1998), tandis que le système de guidage du missile intercontinental *Peacekeeper* en comprenait plus de 19 000. En comparaison, une automobile de la même période ne contenait qu'environ 4 000 pièces (Kelley et Watkins 1994). L'évolution de ces systèmes complexes se caractérise de plus en plus par la nécessité de compétences organisationnelles diversifiées et de capacités spécifiques, notamment dans les domaines stratégique, fonctionnel et de la gestion de projet (Davies et Hobday 2005).

L'internationalisation de la R&D et la diversification des sources de connaissances et d'expertise contribuent à accroître la complexité dans le secteur de la défense. Cette situation se traduit par une multiplication des possibilités de combinaison de connaissances et d'applications, exigeant par conséquent des collaborations variées et multi-échelles entre organisations publiques et privées de diverses envergures (Broekel 2018). Ce phénomène est accentué par l'augmentation des pressions concurrentielles sur les marchés de la défense (Belin et al. 2019) et par une utilisation étendue des technologies de l'information et de la communication (TIC) dans le développement et la mise en œuvre des systèmes d'armement (Barbaroux 2011).

Cette complexification croissante des produits de défense, avec leur intégration de multiples sous-systèmes et technologies avancées, a des implications significatives sur les efforts d'innovation. Elle entraîne non seulement des coûts, en termes de ressources humaines et financières, croissants (Foucault 2012) mais a également pour conséquence un allongement des cycles de vie des projets de défense (Government Accountability Office 2019) et une dépendance accrue aux connaissances scientifiques (Fauconnet 2019).

Sur ce dernier point, la littérature donne à la science un rôle de plus en plus prépondérant dans le développement des innovations de défense. Fauconnet (2019) souligne l'accroissement notable de l'importance des connaissances scientifiques dans l'innovation de défense depuis 1945. L'auteure démontre en particulier que la science est positivement corrélée avec

l'originalité des brevets liés aux domaines militaires et aérospatiaux. Dans cette perspective, Barbaroux (2020) caractérise l'innovation de défense comme étant le résultat d'une base de connaissances analytiques, telle que définie par Asheim (2007). Ces bases de connaissances s'inscrivent dans un environnement industriel où la création de connaissances repose principalement sur des processus cognitifs et rationnels et sur des modèles formels. Les organisations exploitant ce type de connaissances disposent généralement de leurs propres services de R&D. Elles s'appuient aussi sur les avancées issues de la recherche universitaire et d'autres organismes de recherche, intégrant ces résultats dans leurs processus d'innovation. En conséquence, l'industrie de défense peut être associée à une industrie qui privilégie un mode d'apprentissage STI (*Science, Technology, Innovation*, Jensen et al. 2007). Ce mode d'apprentissage implique l'utilisation et le développement de connaissances explicites et globales, souvent issues de la R&D, pour résoudre des problèmes locaux et produire des connaissances potentiellement universelles. Il se caractérise en opposition au mode DUI (*Doing, Using, Interacting*), qui repose sur des connaissances tacites et souvent localisées, acquises sur le terrain par la pratique, l'usage et l'interaction. Il est important de noter que le mode d'apprentissage STI est conçu comme une extension complémentaire du mode DUI, ce dernier fournissant la base sur laquelle le mode STI se développe et se renforce.

Ces contributions diverses de la littérature académique soulignent l'importance d'examiner l'innovation dans le domaine de la défense à travers le prisme des avancées scientifiques qui lui sont associées. À cet égard, le projet Manhattan est un cas d'étude particulièrement éloquent, illustrant l'impact significatif de la science sur la supériorité militaire d'une nation (Paarlberg 2004 ; Serfati 2005). Le succès de ce projet a été un facteur déterminant dans la formulation d'une doctrine de défense axée sur le progrès scientifique et sur un investissement accru dans la science comme vecteur de développement (Bush 1945). Ce cas historique met en lumière la corrélation étroite entre les innovations scientifiques et les stratégies de défense nationale. Pour Robert Paarlberg « *c'est au milieu du XX^e siècle que la course mondiale aux armements est devenue essentiellement une course à la science* » (Paarlberg 2004 p.125). Pour l'auteur, la supériorité militaire américaine sur les champs de bataille conventionnels après 1945 provient non seulement d'une domination des dépenses militaires mondiales, mais également d'une domination de la connaissance. Les connaissances scientifiques en chimie, physique, biotechnologies, ainsi que celles relatives aux TIC, apparaissent comme particulièrement stratégiques. Un exemple plus récent d'implication de la science dans le développement des systèmes d'armes peut être trouvé dans le développement des canons électromagnétiques.

Pour Paarlberg, la mondialisation accentue la disponibilité des connaissances scientifiques, permettant aux pays peu développés de profiter des avancées générées sur d'autres territoires. Cette diffusion des connaissances constitue une opportunité pour attirer des talents scientifiques formés à l'étranger et renforcer la supériorité scientifique des États-Unis.

D'autres auteurs nuancent les rapports qu'entretient la science avec l'industrie de défense. Pour Bellais (2005), l'industrie de défense sous-exploite les percées théoriques permises par l'activité de recherche. L'auteur appelle à un nécessaire rapprochement entre défense et science. Ce constat peut être appuyé par les résultats empiriques de Fauconnet (2021) qui soulignent un recours moins intense des grandes entreprises de l'armement aux sources scientifiques, relativement aux autres grands groupes innovants à l'échelle mondiale.

Cette thèse suit fidèlement la vision de Pierre Barbaroux sur une innovation de défense dépendante des avancées scientifiques à l'image des biotechnologies ou de la médecine. Nous proposons de poursuivre les travaux empiriques de Fauconnet (2019; 2021) afin d'explorer davantage la relation ambivalente unissant science et défense. Pour cela, nous documenterons les sources scientifiques intéressant le développement moderne des technologies en matière de défense. Nous nous intéresserons également aux dynamiques territoriales concernant l'incorporation des connaissances scientifiques dans le développement technologique.

3 L'identification des connaissances intéressant l'innovation de défense

Pour approcher empiriquement les connaissances intéressant l'industrie de la défense, cette thèse utilise des données issues des bases de données de brevets d'invention et d'articles scientifiques. Notre distinction des productions scientifiques et technologiques de défense repose sur des choix méthodologiques issus de la littérature. Cette approche méthodologique est présentée dans les points suivants.

3.1 Les technologies de défense

Identifier de manière exhaustive les technologies de défense est une tâche ardue en raison de l'importante dualité de leur usage, à la fois civil et militaire. Un exemple édifiant réside dans les technologies de communication et de détection radar par ondes radio. Ces technologies constituent une des classes technologiques les plus soumises au secret-défense, aussi bien lors de la Seconde Guerre mondiale (Gross 2022) que récemment aux États-Unis (de Rassenfosse, Pellegrino, et Raiteri 2020) ou en Chine (Nouwens et Legarda 2018). Cette technologie permet aussi bien des usages civils, dans des domaines tels que l'électroménager ou la téléphonie mobile, que des usages militaires, notamment dans le brouillage radar et le guidage balistique. La prise en compte de ce double usage réside au cœur de l'approche théorique en innovation de défense.

La dualité se conçoit tout au long du processus d'innovation et peut être distinguée au niveau des connaissances mobilisées, des technologies utilisées, des biens ou services produits et des usages finaux qui en sont faits. Notre conception théorique approche la dualité par l'angle des connaissances et des technologies, notre objectif étant d'étudier l'évolution de la réflexion internationale sur les innovations de défense plus que d'étudier leurs productions, leurs échanges ou leurs utilisations.

La littérature dresse deux visions opposées de la dualité des connaissances pour notre domaine d'application. La première considère les transferts de connaissances entre les sphères civile et défense comme relevant de la traduction d'un domaine d'application à un autre, de manière spontanée. Cette dualité a trait à la nature même de la connaissance technologique, qui

se prête ou non à un double usage (Chinworth 2000; Acosta et al. 2013). La seconde vision de la dualité considère les transferts de connaissances comme relevant justement d'un manque de dualité. Elle reflète une potentialité de co-construction des connaissances technologiques entre acteurs (Cowan et Foray 1995; Meunier et Zyla 2016). Un certain nombre de travaux récents s'accordent sur le caractère systémique de la dualité technologique, qui ne dépend pas tant de la nature de la technologie considérée que du système d'innovation dans lequel elle s'insère (Meunier 2017). Nous considérerons ici qu'une technologie possède une dualité déterminée dans la droite ligne des travaux de Manuel Acosta.

En économie de l'innovation, la dualité technologique peut être abordée de trois manières différentes : via les financements, les acteurs ou les technologies. La première approche repose sur l'hypothèse que les projets R&D financés par les agences de défense sont *a priori* militaires ou *a minima* duaux. Les applications commerciales de tel programme constituent alors des retombées civiles et marquent un transfert de technologies depuis la sphère militaire, un *spin-off* (Chakrabarti, Dror, et Eakabuse 1993). Cependant, cette méthode se heurte à l'opacité et à la complexité du financement des programmes d'innovation de défense.

Une seconde approche basée sur la nature des acteurs permet également de nous renseigner sur l'appartenance de la technologie développée. Ainsi, des acteurs largement impliqués dans la BITD d'une nation produiront *a priori* des innovations militaires, ces acteurs peuvent être identifiés via les codes APE liés à leur activité (Fauconnet et al. 2018) ou via la liste des entreprises de défense publiée annuellement par le SIPRI (Acosta et al. 2018). Comme vu précédemment, les grands groupes de défense sont pour la plupart impliqués sur les marchés civils et militaires. Aussi l'appartenance d'un acteur à la sphère défense est pondérée par la part de son chiffre d'affaires générée sur ces activités défenses (Fauconnet et al. 2018; Lebert et Meunier 2020). Cette approche permet d'établir que les entreprises de défense ont tendance à être plus concentrées technologiquement que les entreprises civiles. Autrement dit, plus une entreprise est impliquée sur son activité défense, moins elle sera amenée à maîtriser une diversité importante de technologie (Fauconnet et al. 2018). Plus largement, ces entreprises possèdent une capacité limitée à générer un chiffre d'affaires au sein du marché de la défense, une croissance d'activité au-delà de cette limite résulte alors d'une stratégie de diversification nécessitant de s'extraire des innovations à usage purement défensif (Mowery 2010). À titre d'exemple, en 2017, les principaux acteurs français du secteur de la défense, tels qu'Airbus Group, Thales et Safran, réalisaient moins de 50 % de leur chiffre d'affaires dans le secteur

défensif. Dans le même ordre d'idées, il est à noter que les grands groupes spécialisés dans la production d'innovations de défense déposent majoritairement des brevets sur des technologies classées comme civiles, soulignant ainsi la prédominance de la dualité dans leur stratégie d'innovation.

Enfin, la mesure de dualité la plus utilisée, et la plus partielle, consiste à mesurer la dualité technologique en identifiant les classes technologiques présentes dans les brevets, comme relevant d'un usage défensif ou non. Cette littérature s'appuie sur la Classification Internationale des Brevets (CIB ou IPC) pour identifier les classes technologiques relevant du domaine de la défense. Les plus explicites sont regroupées sous les codes IPC F41 et F42 représentant les technologies liées à l'armement et aux munitions. Les inventions composées totalement ou partiellement de ces deux classes technologiques accusent une dualité d'usage faible. Cette dualité s'accroît proportionnellement au nombre de classes technologiques additionnelles indiquées dans le brevet. Autrement dit, plus la technologie présente dans l'invention se rapproche d'une arme ou d'une munition, moins cette technologie est susceptible de trouver des applications civiles (Acosta, Coronado, et Marín 2011). La littérature identifie également d'autres codes IPC se référant de manière relativement explicite à des usages défensifs. Ce sont notamment les classes technologiques liées aux explosifs : C06 (Schmoch 2008) ; ainsi qu'aux classes technologiques liées à l'armement des aéronefs et des navires : B64D et B63G (Acosta et al. 2018). La liste complète des classes technologiques relatives à des usages défensifs faiblement duaux est détaillée dans l'annexe des chapitres empiriques. Cette approche a notamment permis de révéler une dimension géographique dans les effets de *spin-off*. En effet, il a été observé que les brevets militaires issus du Royaume-Uni, de la France et des États-Unis sont particulièrement cités pour des applications civiles (Acosta, Coronado, et Marín 2011). Par ailleurs, l'expérience antérieure des entreprises en matière de détention de brevets se révèle être un facteur déterminant dans le développement de technologies à double usage (Acosta et al. 2013). Il ressort également des études que la propension à développer des technologies duales est généralement plus marquée chez les acteurs européens de la défense que chez leurs homologues américains (Acosta et al. 2018). Ces observations soulignent l'importance de considérer les contextes géographiques et l'historique des entreprises dans l'analyse de la dualité technologique.

Ce travail de thèse utilise principalement cette dernière méthode pour étudier l'innovation de défense. Les technologies sélectionnées offrent une part réduite de dualité et

sont peu susceptibles d'être appliquées à un usage civil. En contrepartie, certaines technologies utilisées intensivement par la défense échappent à notre cadre conceptuel en raison d'une dualité d'usage trop importante. Cette dualité limite la capacité de ces technologies à pouvoir être ciblées de manière satisfaisante par une approche quantitative. Ce dernier point a fait l'objet d'un travail approfondi par Meunier (2017, chap. 3). En étudiant l'intensité des interactions entre code IPC au sein des Systèmes de Connaissances Technologiques (SCT) des entreprises de défense, l'auteur a pu identifier 26 sous-groupes de SCT liés à des applications restreintes. Ainsi, nous pouvons estimer que les codes IPC utilisés dans notre approche nous permettent de cibler, entre autres, les missiles, l'armement, les véhicules de défense et les drones de défense. Nous pouvons également anticiper que notre échantillon échappera à des technologies duales liées à des usages défensifs dans le guidage à distance (G06Q, G06F, H04L, H04B...) ou les systèmes électriques (H02J, H02M, G05F, H02P). Notre approche vise ainsi à approximer l'effort défensif fait par chaque nation en postulant que les flux de connaissances ciblés sont proportionnels à l'ensemble des flux de connaissances impliqués dans l'innovation à usage défensif.

En complément de cette approche, notre quatrième chapitre se focalise délibérément sur une technologie à double usage. Ce choix est motivé par la volonté d'examiner en profondeur la présence d'une dimension tacite dans les échanges de connaissances entre les domaines scientifique et technologique. Cette démarche requiert l'identification d'un secteur innovant spécifique, caractérisé par des contours technologiques clairement définis, afin de constituer un cas d'étude robuste. Les technologies de défense, telles que définies précédemment, ne permettent pas de circonscrire un secteur technologique avec une précision suffisante et de bénéficier *in fine* d'une quantité suffisante de données. Le choix de l'impression 3D comme objet d'étude offre la possibilité de se concentrer sur une technologie émergente, étroitement liée aux progrès scientifiques, et dont les applications militaires et aérospatiales ont été largement documentées (Droff et Rademacher 2020 ; Jagoda et al. 2020).

Ce quatrième chapitre se distingue donc par l'étude d'une technologie moins directement liée au champ de l'économie de défense. Il s'inscrit dans une démarche inductive visant à explorer un phénomène potentiellement présent dans l'ensemble de l'industrie de défense. Toutefois, il est important de souligner que les conclusions tirées de cette étude ont une portée limitée et servent uniquement à étayer l'interprétation générale des dynamiques sous-jacentes régissant l'intégration des connaissances scientifiques dans le processus d'innovation.

3.2 La science de défense

Comme mentionné précédemment, l'innovation de défense est particulièrement dépendante des avancées scientifiques. Cependant, l'identification d'une recherche scientifique de défense est une tâche ardue, tant les productions scientifiques ont, par essence, un caractère plus universel, codifié et mobile que les productions technologiques (Cozzens et al. 2005) ; elles sont par conséquent bien plus sujettes à la dualité. Mérindol (2004) distingue une partie de la recherche comme relevant de la sphère militaire avec l'argument suivant : « *La recherche fondamentale correspond aux travaux expérimentaux ou théoriques entrepris principalement en vue d'acquérir de nouvelles connaissances sur le fondement des phénomènes sans envisager une application particulière. Elle n'est, a priori, ni civile ni militaire (...). La recherche appliquée comprend des travaux originaux entrepris en vue d'acquérir des connaissances nouvelles. Cette recherche est dirigée en vue d'exploitations pratiques. Dans ce sens, la recherche appliquée peut être orientée vers un besoin spécifique militaire ou civil* » (Mérindol 2004, p.100). Si la recherche fondamentale est absente de toute forme de considération défensive intrinsèque, la recherche appliquée, parce qu'elle s'inscrit dans un processus de développement civil ou militaire, peut acquérir formellement une de ces deux caractéristiques.

Il est également possible de distinguer l'activité des chercheurs financés par des organismes de défense comme comportant des caractéristiques propres à celle-ci, avec notamment des interactions plus fortes avec l'industrie que les chercheurs civils (Libaers 2009). Cependant, distinguer la recherche appliquée de la recherche fondamentale ou les financements propres aux programmes de recherche échappe au cadre de cette thèse. Par conséquent, tenter d'établir une distinction entre recherche à but défensif et recherche civile apparaît peu pertinent. Aussi, nous considérons l'ensemble des domaines scientifiques comme duaux par essence, en cela qu'ils produisent des intrants potentiels à la production d'innovation de défense sans pour autant avoir été développés en ce sens. Autrement dit, nous considérons la science comme une activité neutre, en cela qu'elle ne peut être entreprise dans un cadre strictement militaire comme le développement technologique.

Cependant, il est hypothétiquement concevable que l'industrie de la défense, à l'instar des autres secteurs industriels, concentre son intérêt sur certains domaines scientifiques particuliers. Cette hypothèse repose sur une certaine correspondance entre les technologies développées et les sujets scientifiques mobilisés (Bassecoulard et Zitt 2004; Ba et Liang 2021). Le développement technologique en matière de défense, puisqu'il se concentre particulièrement sur l'application de certaines technologies comme l'armement, les

télécommunications, le blindage, etc., est susceptible de nécessiter des connaissances théoriques concentrées sur les sujets scientifiques sous-jacents. À notre connaissance, aucune étude quantitative n'a encore permis d'identifier les sujets d'intérêts pour l'industrie de la défense. C'est dans ce contexte que s'inscrit l'apport de cette thèse, qui vise à explorer cet aspect méconnu. Nous nous proposons ainsi d'identifier les articles scientifiques intéressant la défense de différentes manières. Une première méthode utilise le contenu des textes présents dans les articles afin de cibler un sujet d'étude précis intéressant la défense. Nous utilisons pour cela une liste de mots-clés identifiés dans la littérature. La seconde consiste à collecter les références scientifiques au sein des brevets comportant des classes technologiques liées à des usages militaires et aérospatiaux. Le quatrième chapitre de cette thèse utilise la première méthode, tandis que le troisième et le dernier chapitre emploient la seconde.

Chacune de ces méthodes repose sur la présence de certaines informations au sein des bases de données publiques et privées mobilisées dans cette thèse. Notre point suivant détaille l'utilisation de ces bases de données.

3.3 Les bases de données

Afin d'estimer les dynamiques scientifico-techniques à l'œuvre au sein des territoires, cette thèse mobilise un certain nombre de bases de données. Celles-ci concentrent des informations relatives aux brevets d'inventions, aux articles scientifiques, aux localisations des inventeurs et auteurs de ces documents ainsi qu'aux citations et références présentes dans ceux-ci.

La principale base de données utilisée au cours de cette thèse est la base Lens.org. Lens.org est une base de données académique ouverte et publique, offrant un accès libre à un ensemble de plus de 200 millions de documents de brevets issus de diverses juridictions internationales, ainsi qu'à des millions d'articles de revues scientifiques et leurs citations associées. Cette ressource se caractérise par sa capacité à permettre une exploration intégrée et systématique des brevets, de la littérature scientifique et des réseaux de citations. La base de données Lens.org est utilisée dans chacun des chapitres afin de collecter les données de brevets d'inventions, de citations et d'articles scientifiques.

Cette base de données est complétée au besoin par d'autres bases offrant des avantages spécifiques. Ainsi, dans le cadre de l'analyse sémantique proposée dans notre quatrième chapitre, nous mobilisons la base DWPI. La DWPI (*Derwent World Patents Index*) est une base de données privée de brevets mondiaux, maintenue par Derwent, une filiale de Clarivate

Analytics. Elle offre des résumés d'experts, des traductions en anglais, une classification unique des inventions et le regroupement de familles de brevets. Cette base de données est particulièrement adaptée à l'analyse sémantique grâce aux résumés d'expert qui minimise les erreurs dans le texte et nous fournit des données textuelles très complètes.

Données de brevets d'invention :

Comme présenté précédemment, nous utilisons les données de brevets comme *proxy* de l'activité technologique. Au sein des bases de données précédemment mentionnées, nous mobilisons une batterie d'informations : la localisation des inventeurs et des déposants, les codes IPC, les citations faites à d'autres brevets, les références faites à la littérature scientifique, les résumés, revendications (*claims*) et titres, les familles d'inventions et les dates de dépôts.

Les trois données critiques utilisées dans cette thèse sont les localisations, les codes IPC et les mentions à l'état de l'art technologique et scientifique. Il est à noter ici que la suite de cette thèse distinguera les sources technologiques comme des citations, et les sources scientifiques comme des références.

La localisation des brevets priorise les adresses des inventeurs comme moyen de lier la production d'une connaissance à un territoire. Ce choix méthodologique considère que les adresses des inventeurs représentent plus fidèlement le lieu de production de la connaissance que les adresses des déposants, qui sont généralement des entreprises. Ce choix est motivé par la proximité directe des inventeurs au processus d'innovation et de création. Les grandes entreprises, bien que basées à un endroit, peuvent voir leur R&D dispersée mondialement. Utiliser l'adresse de l'inventeur met en évidence la diversité géographique des contributions, tout en limitant les biais des relocalisations fiscales ou administratives des entreprises. Bien que ce choix introduise une certaine complexité et de potentiel biais liés au renseignement du domicile comme le lieu effectif de la R&D, ce choix méthodologique est partagé par une grande partie de la littérature en géographie de l'innovation (Breschi et Lissoni 2009; Krafft, Quatraro, et Saviotti 2011; Berge et Weterings 2014; Antonelli, Crespi, et Quatraro 2022). Cette méthode peut être rejetée par manque de données (Antonelli, Krafft, et Quatraro 2010), confondue dans le cas du Japon (Inoue, Nakajima, et Saito 2017) ou bien combinée aux adresses des déposants (Graf et Krüger 2011). Cette thèse priorise l'adresse des inventeurs, et utilise les adresses des déposants lorsqu'elles constituent la seule information disponible.

La connaissance technologique contenue dans les brevets est catégorisée selon la Classification Internationale des Brevets (CIB ou IPC en Anglais). La CIB⁴, établie par l'Arrangement de Strasbourg en 1971 et gérée par l'Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI), classe les inventions en fonction de leurs domaines technologiques. Elle adopte une structure hiérarchique, subdivisée en sections, classes, sous-classes, groupes principaux et secondaires, couvrant une large part du spectre technologique. Évolutive, elle intègre régulièrement de nouvelles technologies. Conçue pour l'uniformité internationale, elle possède quatre niveaux d'agrégation pour un total de 70 788 groupes secondaires correspondant à autant de classes technologiques « 7-digits ». Cette thèse utilise la nomenclature à son niveau le plus fin dans l'objectif d'identifier le plus précisément possible certaines technologies en matière de défense. Cependant ces technologies seront désignées et regroupées à niveau des sous-classes, soit « 4-digits » comme cela est usuellement le cas en économie de l'innovation (Krafft, Quatraro, et Saviotti 2011).

Enfin, les données de brevets utilisées dans cette thèse seront regroupées par « famille d'invention ». Cette information, fournie au sein des bases de données, permet d'identifier les brevets d'invention similaires déposés pratiquement à l'identique dans différents offices de dépôts dans le monde. Déposer simultanément une invention dans de nombreux pays permet de profiter d'un droit de propriété à l'échelle globale et constitue une pratique courante en innovation. Le degré avec lequel une invention est protégée dans le monde est considéré comme une mesure de sa valeur économique et des capacités d'investissement de son déposant (Squicciarini, Dernis, et Criscuolo 2013). Regrouper les inventions par famille permet d'éviter de dupliquer les flux de connaissances liés à une même invention. Ce travail de thèse utilise les regroupements de brevets faits par l'INPADOC (*INternational PATent DOCumentation*), qui couvre des brevets dont les informations de dépôt et le contenu sont très proches, mais pas nécessairement identiques, ce qui permet la constitution de familles de brevets élargies. De la même manière, nous utilisons la date de dépôt de la première demande (qui est identique à tous les brevets d'une famille) comme date de création de la connaissance technologique. Ces choix s'inscrivent dans la droite ligne de la méthodologie utilisée dans l'immense majorité des travaux sur les flux de connaissances technologiques.

⁴ <https://www.wipo.int/classifications/ipc/fr/>

Données d'articles scientifiques :

Les données servant de *proxy* à l'activité scientifique englobent des articles issus de revues spécialisées, des extraits ou la totalité d'ouvrages scientifiques, ainsi que les comptes rendus issus de conférences dans le domaine scientifique. Notre étude se focalise essentiellement sur les lieux de production de ces documents, leurs classifications thématiques, les résumés et les dates de publication. Le lieu de production d'un document est déterminé par l'adresse de l'institution à laquelle est affilié l'auteur. Lorsqu'un ouvrage est le fruit du travail de multiples auteurs, la localisation du document se voit fractionnée entre plusieurs territoires, chacun correspondant à une institution affiliée à un auteur différent. Cette méthode dite par *fractional counting* se distingue des méthodes de *full counting* utilisée par la base de données Scopus (Patelli et al. 2017) dans laquelle chaque territoire affilié au document se voit attribuer l'intégralité de la production de connaissance. Notre approche, bien que plus complexe à mettre en œuvre, est plus adéquate pour les analyses interterritoriales (Waltman et van Eck 2015). Cette méthode se distingue également de travaux allouant une localité unique à un ouvrage scientifique selon l'affiliation du premier auteur uniquement (Bryan et Ozcan 2021).

L'identification des sujets abordés dans les ouvrages scientifiques repose sur la classification des revues ASJC (*All Scientific Journal Classification*) et la taxonomie MAG (*Microsoft Academic Graph*) permettant d'identifier les mots-clefs présents dans le document. Ces outils méthodologiques, relativement récents, ont notamment été utilisés par Baruffaldi et al. (2020) et Bikard et Marx (2020).

La localisation des connaissances est bornée à l'échelle des nations. En conséquence, nous utilisons la norme ISO 3166-2 qui reconnaît 250 territoires. Il est important de noter que, bien que la plupart de ces entités soient des États souverains, certaines sont des territoires, des régions spéciales ou d'autres types d'entités territoriales profitant d'une certaine autonomie, comme le Groenland ou Hong Kong par exemple.

L'identification des connaissances contribuant à l'innovation dans le domaine de la défense constitue une démarche complexe, notamment en raison de la dualité d'usage caractéristique de ce type d'innovation. Cette dualité exige une approche spécifique, adaptée aux objectifs empiriques de notre objet de thèse. Nous privilégions ainsi l'utilisation des classes technologiques comme méthode la plus appropriée pour identifier les connaissances produites à l'échelle mondiale. Cette méthode permet d'intégrer les contributions intellectuelles issues de

nombreux territoires, sans être restreinte par la présence de grandes entreprises du secteur sur ces derniers. La section suivante de ce travail aborde une problématique cruciale lors de la collecte de connaissances technologiques à usage militaire et aérospatial : la question de la mise au secret.

4 La limite du secret

L'enjeu de souveraineté entourant l'élaboration des technologies en matière de défense entraîne logiquement une importante culture du secret. Ce dernier occupait une place centrale dans la conduite du projet Manhattan (Gross 2022) et reste encore aujourd'hui une préoccupation centrale dans la conduite des projets de défense. Le développement du *Joint Strike Fighter* F-35 précédemment mentionné a ainsi été sujet à un certain nombre d'attaques informatiques ayant permis la fuite d'informations (Gorman, Cole, et Dreazen 2009).

La nature et la quantité des informations et connaissances placées sous le sceau du secret sont, par nature, très difficiles à quantifier. Le secret peut être pratiqué dans les entreprises pour des raisons concurrentielles ou être contractualisé au sein des partenariats public-privé pour des raisons de sécurité nationale. Dans ces cas-là, il est strictement impossible à estimer d'un point de vue quantitatif. Il existe, cependant, une pratique de mise au secret susceptible de laisser des traces analysables : la mise au secret des brevets d'invention.

Cette thèse repose principalement sur l'analyse de ce type de donnée afin d'approximer la direction et la nature du développement technologique. Nous nous devons ainsi de documenter cette pratique afin d'estimer les limites susceptibles d'affecter la collecte de nos données et donc la représentativité de nos résultats. Cette section est d'autant plus nécessaire qu'elle cible un sujet relativement peu documenté en économie de défense.

4.1 Historique de la pratique de mise au secret des inventions

La sociologie des sciences a mis en exergue le rôle prépondérant qu'occupe l'appropriation des connaissances scientifiques et techniques dans le renforcement des pouvoirs politiques, religieux, économiques et militaires à travers l'histoire. Dans le domaine militaire, cette appropriation prend une dimension stratégique cruciale pour garantir une supériorité sur l'adversaire. La sociologue Blandine Laperche résume cette situation ainsi : « *la divulgation des informations et des connaissances scientifiques et techniques (comme celle qu'entraîne le dépôt de brevet) nuit à toute forme d'appropriation (et donc à toute tentative de renforcement du pouvoir) (...), la divulgation des connaissances (...) à l'ennemi potentiel ou présent mettrait à néant les objectifs défensifs ou offensifs des innovations militaires* » (Laperche 2005, p.113).

L'avènement des premiers conflits mondiaux a souligné la nécessité d'instaurer un système de contrôle moderne et institutionnalisé de la documentation des brevets. Aux États-Unis, les *Secrecy Acts* de 1917 et 1940, instaurent un contrôle systématique des demandes de dépôt de brevet en temps de guerre. C'est ainsi qu'environ 11 000 brevets d'invention liés en partie au projet Manhattan ont fait l'objet d'un *Secrecy Order* (SO), une mise au secret forcée, pendant toute la durée du second conflit mondial. Une grande majorité de ces brevets a ensuite été autorisée à la publication à la fin du conflit, bien que la durée de mise au secret ait été prolongée pour les brevets directement impliqués dans le projet Manhattan (Gross 2022).

Le climat de tension internationale qui règne au commencement de la guerre froide argumente en faveur d'un maintien des contrôles des brevets en temps de paix. Un troisième *Secrecy Act* voit le jour aux États-Unis en 1951, renforçant les contrôles et les sanctions liés à la publication des brevets sur le sol américain. En France, la loi du 2 janvier 1968 consolide le système législatif permettant au ministère de la Défense d'exercer une contrainte sur la publication des inventions. Ainsi, la pratique de mise au secret, autrefois réservée au temps de guerre, se pérennise et s'institutionnalise au cours de la seconde moitié du XX^e siècle aux seins des principales puissances occidentales. Ce recours à la mise au secret aurait été appliqué de manière bien plus large et récurrente au sein des nations du bloc soviétique (Martens 2021).

La période de désescalade militaire et le relatif apaisement des tensions internationales, consécutifs à la chute de l'URSS, ont entraîné une diminution de l'usage du secret dans le domaine technologique. Toutefois, l'augmentation des dépenses militaires mondiales au début des années 2000 a marqué un renouveau de cette pratique. Cette évolution suggère que l'application du secret dans le secteur technologique est étroitement liée à l'état des tensions internationales, reflétant les dynamiques géopolitiques et les besoins en sécurité nationale (de Rassenfosse, Pellegrino et Raiteri 2020). La Chine est restée dépendante des importations militaires russes jusqu'à la deuxième moitié des années 2000, date à partir de laquelle elle a achevé la mise en place d'une BITD fonctionnelle et capable de subvenir à ses besoins stratégiques (Nouwens et Legarda 2018). C'est également sur la période 2005-2010 que la mise au secret des inventions a connu son usage le plus extensif en Chine, selon les dernières données disponibles (Nouwens et Legarda 2018). Plus récemment, les données publiées par l'*United States Patent and Trademark Office* (USPTO), sur demande de la *Federation of American Scientists* (FAS), révèlent que cette pratique de mise au secret reste d'actualité aux États-Unis.

Ces données détaillent un recours constant, bien que relativement modéré, à la mise au secret concernant les brevets, en particulier durant les deux dernières décennies⁵.

L'Office Mondial de la Propriété Intellectuelle (OMPI) actualise régulièrement une liste des pays pratiquant un contrôle institutionnel sur la publication de leurs inventions. Dans cette liste figurent les principales puissances mondiales : États-Unis, Chine, Russie, France, Royaume-Uni, Corée du Sud, Inde, Israël, etc. Il est à noter l'absence du Japon et de l'Australie.

4.2 Processus de mise au secret

Le processus de mise au secret des inventions repose sur une obligation légale en vigueur dans la plupart des pays développés : l'obligation d'un premier dépôt à l'office du pays de résidence du déposant. Toute invention développée sur le territoire national doit ainsi être subordonnée à un dépôt national, ou *a minima* une autorisation, avant de pouvoir être publiée ou déposée dans un office étranger. Cette dernière règle est cependant plus flexible pour les pays ayant des accords facilitant l'échange d'informations liées à la propriété intellectuelle, comme c'est le cas pour les membres de l'OTAN, par exemple (Wuylens 1999). Les procédures de mise au secret se déroulent généralement en trois phases distinctes : (i) le filtrage des inventions, (ii) le maintien du secret et (iii) la compensation (Locke 2019).

La première phase concerne principalement les technologies entrant dans les domaines d'intérêt des différents ministères de la Défense, chacun d'entre eux fournissant publiquement ou non une liste exhaustive aux offices de dépôt⁶. Les demandes de brevet sont examinées et les organismes en charge de cet examen possèdent un délai généralement court, cinq mois en France, six mois aux États-Unis, pour juger de l'intérêt ou non de l'invention pour la défense nationale.

Deuxièmement, si l'invention est jugée susceptible d'intéresser la défense, la divulgation peut être limitée aux pays alliés, l'invention peut être placée à un niveau de secret relatif au sein du territoire ou soumise au secret le plus strict. En France, les brevets d'invention ainsi déposés sont marqués de la mention « Diffusion Restreinte », « Secret » ou « Très secret ». Aux États-Unis, ce système est décliné en SO de type I, II ou III.

Enfin, les déposants se voient indemniser pour le préjudice causé par cette interdiction. Les indemnités varient en fonction des mesures prises par l'État, le cas le plus élevé étant

⁵ <https://sgp.fas.org/othergov/invention/stats-22.pdf>

⁶ Voir par exemple la liste à destination de l'office britannique :

https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/307009/p-securitylist.pdf

l'expropriation complète de la propriété intellectuelle. En France, l'expropriation est rare, l'usage étant plus souvent la cession ou la concession amiable de la propriété intellectuelle. L'État peut également utiliser une licence d'office qui permet à un tiers d'exploiter la propriété intellectuelle d'une invention sans le consentement du déposant, mais en contrepartie d'une indemnisation (Wuytens 1999).

Ces mesures coercitives, qualifiées d'« autoritaires » (Wuytens 1999), sont généralement limitées dans le temps. La sortie du secret s'effectue généralement au bout de quelques années, 3,7 années en moyenne aux États-Unis entre 1980 et 2000 (de Rassenfosse Pellegrino et Raiteri 2020). Cette sortie du secret est justifiée pour des technologies obsolètes, répandues ou rendues publiques par d'autres nations, par exemple. Elle permet de limiter les coûts pour l'État en termes d'indemnisation et les coûts pour la société en termes de diffusion des connaissances et d'innovations (Gross 2022). La mise au secret des brevets d'invention ne concerne qu'une partie des technologies soumises au secret-défense, on trouve notamment les technologies dites sensibles, placées au secret dès les premières phases de leur développement et financées entièrement par l'État ou via un contrat de marché public. La mise au secret peut alors être négociée en amont de l'invention au sein des contrats entre l'État et les entreprises de défense, sans jamais faire l'objet d'une demande de brevet. On peut également postuler que les données disponibles, qu'elles soient qualitatives ou quantitatives, occultent volontairement les informations les plus sensibles.

4.3 Quantification

Quantifier les inventions mises au secret est par nature une tâche périlleuse, tant le périmètre qui entoure le domaine de la défense est flou et les données rares. Il existe cependant certaines sources de données qui permettent d'approximer la proportion d'inventions mises au secret.

La première repose sur la liste des brevets déclassifiés par le ministère de la Défense des États-Unis depuis la Seconde Guerre mondiale, ainsi que des statistiques couvrant le stock d'inventions soumis au secret et le nombre de SO émis annuellement par les différentes agences gouvernementales américaines. Ces dernières données sont publiées par l'USPTO à la demande de la FAS, et figurent également, de manière moins explicite, dans l'USPTO *Patent Examination Research Dataset* (PatEx). Une seconde source de données concerne les brevets de défense déclassifiés par le gouvernement chinois successivement en 2017 et 2018, ces données publiées par le Bureau de la Propriété Intellectuelle de la Défense Nationale au sein de

la Commission Militaire Centrale regroupent plusieurs milliers de brevets. Une dernière source de données repose sur des interviews et témoignages de membres des offices de dépôt européens et soviétiques qui permettent des estimations plus approximatives.

Ces données permettent d'estimer que le poids de la mise au secret est resté relativement faible et stable au sein des pays du bloc occidental pendant la guerre froide. Ainsi, Martens (2021) estime que sur la période 1965-1984, les mises au secret représentaient entre 0.1 % et 0.6 % du volume des brevets publiés chaque année par la France, le Royaume-Uni, les États-Unis et la République Fédérale d'Allemagne (RFA). Sur la même période, l'auteur estime que la pratique du secret était plus répandue au sein du bloc soviétique, environ 14 % des demandes y était soumises, avec une volatilité très importante selon les années. En 1970, approximativement 1750 demandes avaient fait l'objet d'une mention « Non-Sujet à la Publication », soit un peu plus de 1 % des demandes, ce chiffre s'est accru avec les difficultés économiques de l'Union soviétique pour atteindre 19 % en 1984, soit environ 21 000 demandes. Une partie importante du secret consistait en un ralentissement volontaire de la procédure de publication, environ un cinquième des interdictions avaient ainsi une durée inférieure à deux ans. La République Démocratique d'Allemagne (RDA) affichait une pratique plus restreinte, estimée entre 1.2 % et 13.5 % du total des demandes de brevets. L'immense majorité des brevets issus de l'office est-allemand ont été déclassifiés à la suite de la réunification. Plus précisément, 882 sur environ 950 brevets ont été publiés, car ils ne représentaient pas d'enjeux stratégiques pour la nouvelle Allemagne. Cette déclassification massive traduit une définition bien plus large des inventions de défense et un recours bien plus systématique au secret en Allemagne de l'Est (Martens 2021).

Sur une période plus récente, de Rassenfosse, Pellegrino et Raiteri (2020) détaillent les émissions et les annulations de SO sur la période 1980-2000. Outre une durée moyenne de 3.7 années déjà évoquée, les SO américains ont connu une augmentation importante à la fin de la décennie 1980, passant d'environ 45 SO par an à environ 90, puis une diminution très importante au cours de la décennie suivante pour atteindre un volume annuel inférieur à 10. Cette diminution de la mise au secret s'accompagne d'une augmentation des annulations de SO sur la même période. Ces résultats vont dans le sens de Lee (1997) et Martens (2021) qui observent une augmentation et une diminution comparable du volume de SO actif sur la période 1980-2000.

Sur la même période en France, Wuytens (1999) estime que la part de mise au secret annuelle s'est réduite de 1.2 % en 1990 à 0.5 % en 1996. Ces chiffres représentaient une centaine de brevets mis au secret sur l'année 1990 pour moins de 80 en 1999. La même année,

le stock total d'inventions placées au secret était d'approximativement 1400 en France et seul « un très petit nombre [était] classifié depuis plus de 15 ans » (Wuytens 1999, p.141).

D'un point de vue technologique, les brevets analysés sur la période 1980-2000 montrent un intérêt des agences américaines de défense relativement ciblé. De Rassenfosse, Pellegrino et Raiteri (2020) produisent le classement des technologies les plus sujettes à des SO, par ordre d'occurrence : les systèmes de communication et de détection radar par ondes radio (USPC classes 342 et 343), les munitions et explosifs (USPC classes 102 et 149), les systèmes de communication utilisant des ondes acoustiques (USPC classe 367), les technologies optiques (USPC classe 356), les technologies liées aux énergies rayonnantes (USPC classe 250) et les technologies liées à l'aérospatial (USPC classe 244). Les systèmes de communication et de détection radar par ondes radio semblent être des technologies duales particulièrement intégrées aux innovations de défense, puisqu'elles faisaient déjà partie des technologies les plus sujettes aux SO au cours du projet Manhattan, juste derrière les technologies liées aux explosifs nucléaires et à la cryptographie (Gross 2022).

Sur les périodes plus récentes, Martens (2021) montre que la quantité d'émission de SO par le gouvernement américain s'est accrue à la suite du 11 septembre 2001, mais est restée globalement faible, soit environ 0.1 % du total des dépôts jusqu'en 2016. Également, Nouwens et Legarda (2018) estiment, à partir des brevets déclassifiés par la Chine en 2017, une mise au secret moyenne de 3.4 années sur la période 1985-2015, une très large majorité de ces brevets ayant été déposés sur la période 2005-2015. Les technologies visées par les mises au secret chinoises se concentraient sur les ordinateurs ou des composants électroniques, des missiles et projectiles, des radars et leurs composants, des satellites et leurs composants, des technologies de positionnement, des technologies aérospatiales et enfin des technologies d'artillerie.

La littérature sur le sujet étant limitée, celle-ci ne permet que des estimations prudentes du processus de mise au secret des brevets. Nous pouvons ainsi estimer que cette pratique est relativement limitée, concentrée technologiquement et touche principalement les inventions récemment déposées. Par conséquent, bien que la mise au secret représente une contrainte non négligeable dans l'identification des connaissances en matière de défense, elle ne semble pas constituer un obstacle majeur à l'obtention de résultats significatifs, particulièrement en ce qui concerne les données consolidées les moins récentes.

Conclusion

Ce chapitre nous permet de détailler les acteurs, les dynamiques et les choix méthodologiques influençant l'analyse de notre cas d'étude.

Le secteur de la défense présente tout d'abord une dimension politique, où les forces armées, les administrations centrales de la défense, le corps législatif et les fabricants d'armes exercent une influence sur les décisions de financement, de production et de vente des matériels de défense. Il inclut également une dimension industrielle, englobant toutes les entreprises impliquées, directement ou indirectement, dans la production et la fourniture d'équipements, de technologies et de services répondant aux besoins de défense d'un pays. Il aborde enfin une dimension liée au processus d'innovation, dans laquelle les interactions entre les services de R&D des entreprises, les instituts de recherche et les universités jouent un rôle dans les capacités des pays à nourrir un avantage technologique.

Ce chapitre nous permet également de contextualiser l'innovation de défense dans un secteur ayant subi une profonde transformation au cours des trois dernières décennies. Ces changements incluent d'abord un mouvement de privatisation important, rapprochant les acteurs des besoins et des productions du secteur civil. Ce mouvement de privatisation a entraîné une certaine normalisation de l'industrie, lui permettant d'ouvrir son système d'innovation aux expertises et connaissances disponibles à l'échelle internationale. Ceci contribue à réduire la dépendance des acteurs aux bases de connaissances propres à leur territoire. Ce phénomène est renforcé par la montée en complexité des innovations en matière de défense, accentuant la nécessité de collaborer avec d'autres nations et d'intégrer des connaissances scientifiques plus universelles, en circulation à l'échelle mondiale.

Ce chapitre détaille enfin nos choix méthodologiques concernant l'identification des connaissances intéressant la défense. Nous choisissons de nous concentrer sur les secteurs technologiques historiques de l'industrie tels que l'armement, l'aéronavale et l'aérospatiale. L'identification des connaissances relatives au développement de ces technologies bénéficie d'une littérature solide permettant de constituer des échantillons de connaissances à la dualité d'usage réduite. Ce choix est fait en tenant compte du fait que notre collecte de données ne couvrira pas des secteurs technologiques stratégiques plus modernes comme l'intelligence artificielle et les technologies de communication. Nous prenons également soin de circonscrire autant que possible les limites liées à la mise au secret des connaissances pour des raisons de

sécurité nationale. Cette pratique limite l'analyse des données les plus récentes, mais n'apparaît pas comme un obstacle à une analyse quantitative sur une plus longue période.

Ces précisions conceptuelles et méthodologiques nous permettent d'analyser dans le chapitre suivant les principales dynamiques ayant marqué la diffusion mondiale des connaissances intéressant la défense depuis 1990.

Chapitre 3 :

La Diffusion Internationale des Connaissances intéressant la Défense :

une approche structurale des évolutions marquant la période
post-guerre froide

Ce chapitre détaille les travaux présentés lors de la communication suivante :
Vernhes G. « Science, Innovation and Defense: a longitudinal study of intellectual dominance
in international knowledge networks », *ICES 2023*, 2023 June, Stockholm, Sweden.

Résumé

Ce chapitre développe une approche structurale permettant de décrire et de comparer l'évolution des réseaux globaux de connaissances scientifiques et technologiques en matière de défense depuis la fin de la guerre froide. La constitution des réseaux de connaissances technologiques repose sur l'agrégation de citations *backward* de brevets d'invention liés à des technologies à usage militaire ou aérospatial. Les réseaux de connaissances scientifiques reposent sur les références faites au sein des articles scientifiques identifiés dans la NPL *front page* des brevets défense.

Nos résultats illustrent une structure technologique et scientifique dominée par les États-Unis qui constituent l'acteur le plus influent et le plus autonome, occupant une place centrale dans les échanges mondiaux de connaissances. Ils montrent également l'émergence de nouveaux acteurs, dont l'ascension repose, de manière plus ou moins importante, sur l'absorption de connaissances étrangères. Ces acteurs émergents dans la production de connaissances intéressant la défense sont notamment la Chine, la Russie et la Corée du Sud. Nous interprétons l'ascension de ces acteurs comme le résultat d'une nécessité géostratégique, de capacités économiques et d'une volonté politique de haut niveau.

Nos résultats illustrent également une structure d'échange des connaissances technologiques marquée par la persistance d'un schéma bipolaire hérité de la guerre froide sur les décennies 1990 et 2000. En comparaison, aucune structure d'échange spécifique n'est constatée au sein du réseau mondial de connaissances scientifiques, ce qui suggère une diffusion de ces dernières moins sujette aux effets de frontières.

Introduction

Au printemps 2022, la Chine a exprimé sa volonté de s’émanciper du modèle de production scientifique dominé par les universités européennes et nord-américaines. Le président Xi Jinping a ainsi appelé les universités chinoises à sortir des classements internationaux, et en premier lieu du classement de Shanghai, pourtant mis en place par ce même régime 19 ans plus tôt⁷. Cette volonté d’émancipation s’exprime également par la mise en avant de revues scientifiques chinoises. La Chine est devenue une puissance scientifique de tout premier plan (Cao et al. 2020), avec le second plus important volume de publication dans le monde (OST 2018). Elle est toutefois régulièrement accusée de falsifier ses études scientifiques (Zuo 2019; Lew 2021) jusqu’à pousser les hauts gradés de l’armée chinoise à inviter « *les responsables de la recherche scientifique et technologique liée à la défense du pays à éviter la falsification et le plagiat* » (Chan 2018).

De son côté, la Russie a également annoncé son intention d’émanciper son système d’enseignement et de recherche des canons occidentaux à la suite de la condamnation par les principales puissances mondiales de son « opération militaire spéciale » en Ukraine en février 2022. Le ministère russe des sciences et de l’enseignement supérieur a ainsi annoncé son intention de sortir du processus de Bologne, instaurant le modèle européen des cursus universitaires licence-master-doctorat et le système européen de transfert des crédits ECTS (Levrèse 2022). Cette décision s’ajoute au décret gouvernemental abolissant les droits de propriété des « *titulaires de brevets associés à des États étrangers qui commettent des actes inamicaux à l’égard de personnes morales et physiques russes* »⁸.

Sous l’hypothèse que les volontés d’émancipation du bloc sino-russe iront jusqu’à restreindre l’accès à leurs publications (en privilégiant des publications en russe ou en mandarin au détriment de l’Anglais, ou en limitant le déplacement des chercheurs et ingénieurs, par exemple), la circulation mondiale des connaissances se verrait nécessairement affectée (Buckley et Hashai 2020). Une contrainte exercée sur cette circulation entraîne mécaniquement une hausse des coûts d’acquisition des connaissances, ce qui peut avoir un effet négatif sur la création de nouvelles connaissances et sur l’innovation. Cela a notamment été le cas en Chine en mars 2010, lorsque les différents services de Google ont été bannis du territoire. Les

⁷ Soazig Le Nevé, “Xi Jinping incite les universités chinoises à sortir des classements”, *Le Monde*, 15 août 2022

⁸ Décret du gouvernement de la Fédération de Russie n° 299 du 06.03.2022

institutions scientifiques chinoises ont connu une baisse de publications significative ainsi qu'une baisse de citations dès l'année suivante (Hussinger et Palladini 2022). Les entreprises chinoises ont également connu une baisse de la qualité et de la quantité de leurs innovations, proportionnelle à leur dépendance aux connaissances technologiques étrangères (Kong et al. 2022).

Certaines connaissances, par les applications technologiques qu'elles permettent, acquièrent un caractère stratégique pour les nations. C'est le cas des connaissances impliquées dans la production d'innovations à usage militaire, aérospatial et dual. En effet, ces innovations permettent la constitution d'un avantage technologique qui agit comme un mécanisme de dissuasion (Bellais 2013), permettant de préserver les intérêts et la souveraineté des nations.

La menace d'un coût d'acquisition accru des connaissances issues des systèmes d'innovation russes et chinois et l'augmentation globale des tensions géopolitiques internationales nous amène à nous interroger sur les liens de dépendances entre nations dans l'acquisition des connaissances nécessaires aux innovations stratégiques. Cette interrogation est d'autant plus légitime que les changements importants intervenus dans le secteur de la défense depuis 1990 ont largement internationalisé les chaînes de production et les systèmes d'innovation en matière de défense (Bitzinger 1994; Hérault 2018). Ceci s'observe également dans l'ensemble des industries avec une diffusion accrue des connaissances scientifiques et technologiques entre Systèmes Nationaux d'Innovation (SNI, Niosi et Bellon 1994; Carlsson 2006; Grillitsch et Trippel 2014; Binz et Truffer 2017). Dans ce contexte, nous proposons de répondre à la question suivante :

Comment les structures d'échange de connaissance entre nations en matière d'innovations de défense ont-elles évolué depuis la fin de la guerre froide ?

Plus précisément, ce chapitre propose de quantifier l'autonomie stratégique des nations en termes de connaissances scientifiques et technologiques dans le domaine des innovations de défense. Ce travail, à partir de données de brevets d'invention et d'articles scientifiques, permet de documenter le réseau global de connaissances en matière de défense, mais également les interdépendances et les évolutions hiérarchiques entre acteurs. Il permet également d'observer les différences dans la structure globale des réseaux de connaissances scientifiques et technologiques.

Pour ce faire, nous mobilisons les outils issus de la théorie de la dominance économique (Lantner 1974; Lantner et Lebert 2015) appliqués à l'innovation de défense (Lebert et Meunier

2020; Kouakou et Szego 2022). Ces outils nous permettent de mesurer l'autonomie stratégique des nations dans les systèmes de connaissances technologiques et scientifiques mondiaux comme la somme de leur capacité d'autarcie et d'interdépendance. L'autarcie décrit la capacité d'une nation à générer sur son territoire les connaissances nécessaires à ses innovations, l'interdépendance mesure la capacité à subir ou à exercer une influence sur la production de ces connaissances à l'international.

La suite de ce chapitre est organisée comme suit : (i) la première partie rappelle le contexte théorique particulier qui entoure l'étude des innovations de défense ; (ii) la seconde partie détaille la méthodologie et les données utilisées dans notre approche ; (iii) la troisième partie présente nos résultats empiriques ; (iv) enfin, la dernière partie interprète les implications théoriques des résultats obtenus et conclut.

1 Contexte théorique

L'innovation de défense peut être définie comme la transformation des idées et des connaissances en produits, processus et services nouveaux ou améliorés pour des applications militaires, aérospatiales et à double usage (Cheung 2021). La conception de ce type d'innovation a connu une évolution importante depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale.

1.1 Évolution du secteur de la défense

La période de l'après-guerre est marquée par la persistance de tensions internationales importantes, la menace d'une opposition militaire directe entre le bloc de l'Ouest et le bloc de l'Est, alimente une course technologique. Cette course s'illustre notamment au travers d'une surenchère dans l'élaboration d'armement nucléaire ou dans la course pour la maîtrise de l'espace. Les États-Unis ont été les premiers à maîtriser l'arme atomique, suivis par l'URSS qui a ensuite mis au point les missiles intercontinentaux, avant d'être rattrapés par les États-Unis, et ainsi de suite. Ce paradigme de conflit, centré sur les technologies, permet de faire peser sans cesse de nouvelles menaces sur l'adversaire, agissant comme un mécanisme de dissuasion. Chaque nouvelle menace amène l'élaboration de nouvelles technologies permettant d'y faire face, faisant apparaître une boucle « menace identifiée/technologie correspondante » justifiant le maintien des dépenses publiques dans le développement des technologies de défense (Bellais 2013).

Ces dépenses profitent également d'une certaine dualité dans l'usage des technologies mises au point. Des retombées technologiques, ou *spin-off*, permettent le développement de l'aéronautique civile, de nouveaux moyens de communication ou de la géolocalisation GPS par exemple (Mowery 2010). Durant cette période, les bases industrielles et technologiques de défense (BITD) des nations profitent ainsi d'une large contribution publique justifiée par la volonté de consolider ou de concurrencer une avance technologique sur l'adversaire et de permettre un développement technologique civil. Cependant, les difficultés rencontrées par l'économie soviétique à la sortie des années 1970 vont rendre la course à cette suprématie technologique difficilement soutenable.

La chute de l'union soviétique marque un changement de paradigme important dans le financement des technologies de défense. La fin du conflit bipolaire Est-Ouest ouvre une perspective d'apaisement des tensions internationales. Ce contexte se traduit par une baisse importante des dépenses militaires au sein des principaux pays développés, de 3.27% du PIB mondial en 1990 à 2.16% en 2000⁹. Cette réduction des dépenses a permis de réorienter les fonds alloués aux domaines militaires vers les domaines civils, permettant entre autres une réduction des déficits publics et des investissements dans la santé et l'éducation. Cette période sera désignée sous le terme de « dividendes de la paix » (Serfati 2008). Cependant, le contexte géopolitique regagne en tension au début des années 2000, notamment porté par un changement politique en Russie, la montée en puissance de la Chine et les attentats du 11 septembre 2001. À l'exception des puissances européennes (Ministère de la Défense 2013; Matelly et Lima 2016), ces changements ont globalement mis fin aux politiques de réduction des dépenses militaires et ont relancé la course au développement technologique de défense. Cette relance amène à considérer la domination technologique comme un outil de défense associé à un climat de tensions internationales, plus qu'à un schéma de conflit bipolaire propre à la guerre froide (Bellais 2013). Après la reprise à la hausse des dépenses européennes à partir de 2015, les dépenses militaires mondiales ont atteint en 2019 leur plus haut niveau depuis 1988 (SIPRI 2020).

L'innovation de défense en Europe et en Amérique du Nord est principalement le fait de grands groupes privés vendant leur production à leur propre gouvernement (Acosta et al. 2018). Depuis la fin de la guerre froide, ces grands groupes d'armement ont progressivement investi les marchés civils comme la cybersécurité et la protection des infrastructures critiques (aéroports, infrastructures énergétiques, etc.). Cette dualité croissante dans l'activité des entreprises de défense accentue le flou des frontières des BITD nationales et entraîne un double mouvement : d'un côté, l'État a recentré progressivement ses compétences autour de domaines stratégiques lui permettant de rester un « acheteur intelligent », informé des enjeux technologique et conscient du risque lié au financement d'un projet R&D (Mérindol 2004) ; de l'autre côté, le secteur privé consolide son rôle « d'entraîneur technologique » capable de proposer des solutions sur étagère pour le secteur de la défense comme de co-construire un développement technologique avec celui-ci (Mérindol 2015). Cette collaboration globalement moins intense entre privé et public entraîne une production technologique, parfois défailante

⁹ Source : Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI), Rapport annuel : armements, désarmement et sécurité internationale, 2023

ou inadaptée à un déploiement opérationnel (Bellais 2013), ces problèmes venant s'additionner à la tendance générale de surcoût et de retard de livraison déjà caractéristique des programmes d'innovation de défense depuis la fin de la guerre froide (Alic 2007; Bellais et Droff 2014; Sempere 2015).

La guerre froide situait la création de connaissances au sein d'un complexe militaire-industriel-scientifique autonome, marqué par des relations étroites entre les organes de la défense, les laboratoires gouvernementaux et les entreprises de défense, suivant un modèle de triple hélice (James 2009). Ce paradigme s'est progressivement transformé pour laisser place à un système d'innovation plus ouvert. L'innovation de défense s'est ainsi liée de manière croissante aux avancées dans les technologies civiles et à double usage. Cette situation accroît l'implication des acteurs civils « non-traditionnels » comme les PME ou les universités, dans les systèmes de connaissances (Stowsky 2004). Sur une période plus récente, la justification du soutien à l'industrie de défense par la dualité des usages, les *spin-offs*, est toujours utilisée, mais accuse un soutien politique plus faible que pendant la guerre froide (Sempere 2016). D'autres études plus récentes considèrent plus radicalement que le « schéma a changé » et que « la plupart des équipements militaires sont issus de technologies commerciales hautement sophistiquées » (Acosta et al. 2018, p.3). Cette ascendance croissante de l'innovation civile peut trouver une illustration récente dans le rôle décisif que le réseau de satellites Starlink a joué dans le maintien des systèmes de communications de l'armée ukrainienne¹⁰.

L'innovation de défense comporte un certain nombre de caractéristiques particulières. Tout d'abord, elle accuse une complexité importante, amenant les systèmes d'innovation à inclure une grande quantité d'acteurs. Mérindol (2016) intègre le processus d'innovation de défense au sein d'un *Complex Product System (CoPS)* caractérisé par une haute complexité technologique et organisationnelle, un coût unitaire très élevé, de fortes incertitudes, des procédures réglementaires contraignantes (certification, test de qualification, etc.) et une interaction forte client-fournisseur, production-procédé. Cette complexité est croissante et peut s'illustrer par la quantité particulièrement importante de composants embarqués dans les productions de défense. Par exemple, dans les années 1990, un moteur à réaction intégrait plus de 22 000 pièces (Hobday 1998), le système de guidage du missile intercontinental *Peacekeeper*

¹⁰ Élise Vincent, Alexandre Piquard, et Cédric Pietralunga. « How Starlink's Satellite Constellations are Changing War » *Le Monde*, 28 décembre 2022.

en intégrait plus de 19 000. À titre de comparaison, à la même époque, une voiture en contenait seulement 4 000 (Kelley et Watkins 1994).

Ensuite, l'innovation de défense s'inscrit dans un contexte de concurrence internationale. Cette compétition militaire et les enjeux de souveraineté qu'elle défend, entraînent une demande exigeante en termes de précision, de fiabilité, de sécurité ou d'interopérabilité. Ces exigences nécessitent un développement complexe proche de la frontière technologique et motivent l'intégration de connaissances issues de la recherche appliquée et de la recherche fondamentale (Paarlberg 2004; Sempere 2015). Fauconnet (2018) illustre en ce sens une dépendance particulièrement importante des innovations de défense aux intrants scientifiques relativement aux autres secteurs industriels. Cette propension suit une tendance d'intégration croissante de ces intrants dans l'état de l'art des inventions à usage militaire et aérospatial.

Également, dans le domaine de l'innovation en défense, les produits finaux sont généralement sur mesure, reflétant les préférences doctrinales, opérationnelles et organisationnelles propres aux forces armées d'une nation, ainsi que les compétences technologiques de son secteur industriel. Cette personnalisation accentue la différenciation des produits, offrant un avantage concurrentiel et permettant une tarification supérieure au coût marginal. Cette spécificité rend souvent impossibles les développements et achats internationaux conjoints, entraînant une perte d'efficacité en termes de coûts de production et de logistique (Sempere 2015).

Enfin, l'innovation de défense est motivée par la volonté de surpasser un adversaire potentiel ou de combler une faiblesse identifiée. Ces incitations sont renforcées par des facteurs externes comme la menace d'un conflit armé ou une défaite militaire, mais également des facteurs internes comme une compétition entre services ou l'absence de renseignements fiables sur l'adversaire potentiel (Sempere 2015). Cheung (2021) propose également une liste de facteurs clefs influençant l'innovation de défense, parmi lesquels les menaces de conflit dans l'environnement, l'héritage historique ou le soutien politique de haut niveau, entre autres.

En résumé, la fin de la guerre froide marque un changement de paradigme. Avec tout d'abord, une réduction globale des dépenses militaires au cours de la décennie 1990, suivie d'une reprise dans les années 2000, à l'exception des principales puissances européennes, pour finalement atteindre un niveau inédit sur période récente. Ensuite, un désengagement progressif de l'État laissant un poids plus important aux acteurs privés dans les systèmes d'innovation de défense. Aujourd'hui, l'innovation de défense s'insère dans un paradigme de concurrence

internationale, une course technologique héritée de la guerre froide dans laquelle une avance constitue un moyen de défense, en cela qu'elle permet d'agir plus efficacement sans être contesté par un adversaire (Sempere 2015), et qu'elle agit préventivement comme un mécanisme de dissuasion (Bellais 2013). Ce type d'innovation accuse une complexité croissante relevant l'importance des connaissances scientifiques au sein des systèmes d'innovation. Enfin, ce type d'innovation est, entre autres, motivé par la perspective d'un conflit et plus généralement un climat de tensions géopolitiques internationales. Ce chapitre couvre la période post guerre froide, de 1990 à 2019, en tenant compte des changements de contextes évoqués.

1.2 L'internationalisation des systèmes d'innovation

Les évolutions précédemment mentionnées ont entraîné une « normalisation » de l'industrie de la défense au sein des économies des pays développés. Ces changements s'inscrivent dans le contexte de la mondialisation, qui a favorisé une interconnexion croissante des systèmes d'innovation nationaux.

Le concept de Système National d'Innovation (SNI) peut se définir comme un réseau d'interactions entre entreprises privées et publiques de toutes tailles, universités et agences gouvernementales, visant à produire des connaissances scientifiques et technologiques au sein d'un territoire national (Niosi et al. 1992). Bien que la majorité des acteurs innovants soient des entreprises privées, l'État reste l'élément dominant du SNI. Il finance la recherche et le développement (R&D), fournit des experts scientifiques et techniques, établit un cadre réglementaire, incluant la propriété intellectuelle et le droit de la concurrence, et oriente les objectifs stratégiques, tant militaires que civils (Niosi et Bellon 1994). Le concept de SNI appliqué au secteur de la défense se décline en Système d'Innovation de Défense (SID), ce dernier se définit comme un ensemble coordonné d'organisations et d'institutions qui collaborent de manière interactive dans des domaines tels que la science, la technologie et l'innovation (Cheung 2021). L'objectif principal de ce réseau est de favoriser le développement des intérêts et des capacités en matière de défense, en particulier en ce qui concerne les activités stratégiques, de défense et à double usage civil et militaire. Historiquement, ces systèmes d'innovation étaient confinés à l'intérieur de frontières nationales. Toutefois, cette caractéristique a été atténuée dans la période post guerre froide en raison d'une augmentation des collaborations, des fusions et des acquisitions à l'échelle multinationale, particulièrement entre les États-Unis et les pays européens.

L'internationalisation du processus d'innovation n'est pas un phénomène récent. Dès 1994, Niosi et Bellon le caractérisaient comme « *un processus multidimensionnel par lequel certaines étapes clés de l'activité innovante sont menées par des agents situés dans différents systèmes nationaux. Parmi ces phases, les plus importantes sont : la recherche fondamentale ou de base menée de plus en plus dans le cadre d'une collaboration scientifique internationale, et la recherche appliquée et le développement menés soit par des alliances interentreprises, soit par le réseau international de laboratoires de R&D des multinationales, parfois avec l'aide d'universités et de laboratoires gouvernementaux. La création internationale de technologie induit également un flux croissant de technologie à travers les frontières ; le transfert de technologie augmente en conséquence* » (Niosi et Bellon 1994, p.193). Ce phénomène se manifeste notamment par l'augmentation des flux internationaux, incluant la part des dépenses de R&D sous contrôle étranger, les alliances technologiques internationales, les transferts de technologie, le commerce international de biens d'équipement et de haute technologie, ainsi que par les flux internationaux de personnel scientifique et technique, et les articles scientifiques corédigés à l'échelle internationale (Niosi et Bellon 1994).

Ce phénomène d'internationalisation est cependant relativisé par certains travaux, notamment ceux de Keith Pavitt pour qui les entreprises multinationales sont peu enclines à délocaliser leur activité de R&D. En conséquence, les activités d'innovation des entreprises « *sont fortement influencées par le système national d'innovation de leur pays d'origine : la qualité de la recherche fondamentale, les compétences de la main-d'œuvre, les systèmes de gouvernance d'entreprise, le degré de rivalité concurrentielle et les mécanismes d'incitation locaux, tels que l'abondance des matières premières, le prix de la main-d'œuvre et de l'énergie, et les modèles persistants d'investissement privé ou de marchés publics* » (Pavitt et Patel 1999, p. 94). Ces deux visions ne sont cependant pas incompatibles et présentent un processus d'innovation largement dépendant d'un système national, lui-même intégré de manière croissante dans la mondialisation. L'échelle d'action des acteurs dépend alors de leur taille, les petites organisations étant plus dépendantes des institutions et connaissances présentes localement (Carlsson 2006).

Récemment, une approche multi-échelle du processus d'innovation a été élaborée, s'appuyant notamment sur le concept de Système Global d'Innovation (SGI). Le processus d'innovation est ainsi découpé en processus clés, dont l'échelle d'action dépend de la technologie considérée et des connaissances nécessaires à son amélioration. Une technologie fortement dépendante des avancées scientifiques et largement standardisée profitera de processus clés déployés à l'échelle globale. À l'opposé, une technologie dépendante d'un

apprentissage DUI (*Doing, Using, Interacting*, Jensen et al. 2007), qui repose sur l'acquisition de connaissances par la pratique, l'utilisation et l'interaction, et qui intègre une part importante de connaissances collantes (Asheim et Isaksen 2002), c'est-à-dire des connaissances tacites et contextuellement enracinées, dépendra de processus clefs largement localisés (Binz, Truffer, et Coenen 2016; Binz et Truffer 2017). Ces auteurs dressent ainsi une typologie dans laquelle l'échelle géographique du processus d'innovation dépend à la fois du niveau de standardisation de la technologie et du type de connaissances impliquées dans son amélioration.

En reprenant cette typologie, l'innovation de défense appartient à une catégorie intermédiaire. Comme précisé précédemment, ce type d'innovation accuse à la fois une proximité importante avec le domaine scientifique et un niveau de standardisation faible avec des productions souvent adaptées et différenciées pour chaque État-client. L'innovation de défense se déploie alors au sein d'un « SGI ancré dans le marché », pour lequel la mobilité des connaissances et des investissements financiers est internationale. En revanche, la formation du marché et la légitimation restent relativement ancrées localement, dépendant de contextes institutionnels préexistants et de l'adaptation à des niches de marché locales (Binz et Truffer 2017).

Ainsi, la dépendance scientifique de l'innovation de défense place, au moins partiellement, les connaissances nécessaires à leur développement au niveau global. Sur ce sujet, Liu, Chaminade, et Asheim (2013) identifient l'existence d'un double Réseau d'Innovation Global (RIG ou *GIN*). Le premier repose sur l'existence d'une base de connaissances analytiques, dominées par des connaissances codifiées, proche de la science et permettant la création de nouvelles connaissances et technologies radicales (Asheim 2007). Le second réseau s'organise à l'échelle locale et nationale, et repose sur l'existence de bases de connaissances synthétiques. Celles-ci sont principalement composées de connaissances tacites, apprises et diffusées par interactions sociales entre partenaires. Elles sont constituées de connaissances appliquées, servant à abattre des barrières techniques. En conséquence, elles sont liées aux activités d'ingénierie (Martin et Moodysson 2013). Ainsi, les entreprises multinationales liées à une base de connaissances analytiques, profitent d'un réseau d'informations et de connaissances décentralisé et déployé mondialement, organisé autour de la R&D. À l'opposé, les entreprises dépendantes d'une base synthétique auront un réseau de connaissances organisé autour de leur réseau de production afin de profiter des informations et connaissances fournies par les clients, les concurrents et les fournisseurs (Liu, Chaminade, et Asheim 2013).

Il convient de préciser ici que ces deux réseaux de connaissances globalisés coexistent dans la plupart des industries dans la mesure où les bases de connaissances des entreprises et des territoires se composent d'une proportion plus ou moins importante de connaissances analytiques ou synthétiques en fonction de leurs spécialisations industrielles (Asheim 2007).

Les travaux traitant des flux de connaissances au sein des réseaux globalisés ont permis de mettre en lumière l'action des entreprises multinationales en tant que *pipelines* connectant les régions au réseau global de connaissances technologiques (Dosso et Lebert 2020). Les auteurs soulignent l'importance de poursuivre l'analyse des réseaux globaux d'innovation par l'étude des réseaux scientifiques au travers des citations NPL. Parallèlement, Bikard et Marx (2020) ont mis en évidence l'importance des centres urbains dans leur rôle de « hubs » favorisant l'application des connaissances scientifiques au développement technologique industriel.

Dans le prolongement de ces investigations, le présent chapitre vise à effectuer une comparaison des structures globales régissant les échanges de connaissances, tant scientifiques que technologiques, entre les différents SID. L'hypothèse sous-jacente est que ces deux catégories de réseaux de connaissances sont régies par des structures organisationnelles distinctes. Cette divergence serait attribuable aux variations dans la mobilité des connaissances et dans les motivations divergentes qui caractérisent les activités d'ingénierie et de recherche.

1.3 La Science et la Technologie en matière de défense

Avant de plonger dans l'analyse détaillée des structures régissant les échanges de connaissances dans le domaine de la défense, il est essentiel de comprendre la nature et les caractéristiques distinctives de la science et de la technologie en tant que piliers de l'innovation dans ce secteur. Ces deux domaines, bien que souvent interdépendants, sont régis par des principes, des objectifs et des pratiques qui leur sont propres. Cette section vise à éclairer ces distinctions. Nous préciserons également les hypothèses méthodologiques nécessaires à l'identification des technologies et de la science intéressant l'innovation de défense.

1.3.1 La Science et la Technologie

D'une part, l'activité scientifique est principalement l'apanage des chercheurs (ou scientifiques), qui sont supposés évoluer en l'absence de toute forme de considérations économiques, animés par un « goût pour la science » et incités à publier et à partager leurs

travaux afin d'aider la communauté scientifique à progresser. Les mécanismes d'évaluation de la recherche se fondent alors sur la validation et les citations par les pairs. Cette démarche doit respecter une méthodologie et des critères communs de scientificité, dans le respect du concept de scepticisme organisé. La communauté scientifique récompense les travaux les plus novateurs par une rétribution sociale, sous forme d'opportunité de carrière et de notoriété (Allen 1977; Dasgupta et David 1994; Besancenot et Vranceanu 2015; Gans, Murray, et Stern 2017).

Nous rejoignons ici la vision de Merton (1942) selon laquelle l'activité scientifique se fonde sur un ensemble de principes éthiques structurant la démarche scientifique. Ces principes, ou piliers, comprennent l'universalisme, caractérisé par l'évaluation des travaux scientifiques sur la base de leurs mérites intrinsèques ; le communisme, au sens de la mutualisation des connaissances ; le désintéressement, qui implique une conduite exempte de motivations personnelles ou lucratives ; et le scepticisme organisé, qui nécessite une évaluation critique des résultats de recherche. Ces principes guident le comportement des scientifiques en vue de préserver l'intégrité de la science, tout en valorisant la collaboration, l'innovation et l'objectivité, essentiels au progrès du savoir scientifique (Merton 1957). Les chercheurs sont encouragés à se consacrer à des travaux ayant une signification profonde pour la communauté scientifique, susceptibles d'influencer substantiellement l'état actuel des connaissances. La publication rapide et transparente des résultats est également encouragée (David, Mowery, et Steinmueller 1992). Cependant, des études empiriques ont modéré l'idéal mertonien du désintéressement, indiquant que, bien que les chercheurs sacrifient potentiellement des gains financiers (Stern 2004), leurs intérêts scientifiques peuvent être influencés par leurs sources de financement (Macfarlane et Cheng 2008 ; Stephan 2012).

Du point de vue des acteurs, l'activité scientifique est principalement menée au sein d'universités, financée par des fonds publics. La connaissance produite est généralisable, reproductible, codifiée et publiée sous forme d'articles, d'ouvrages ou de présentations lors de conférences. Selon Ahmadpoor et Jones (2017), environ 80% des références scientifiques citées dans les brevets entre 1945 et 2013 provenaient d'institutions universitaires.

Le processus de création de connaissances dans le domaine scientifique repose sur l'agrégation et la transformation des connaissances préexistantes, qui sont principalement codées sous forme verbale. Selon Cozzens et al. (2005), ce cycle de production de connaissances en science est en grande partie auto-alimenté, la science s'appuyant et se développant principalement sur la base de ses propres découvertes et contributions.

L'utilisation des bases de données d'articles scientifiques est largement reconnue comme

un indicateur fiable de l'activité scientifique. Cette approche repose sur la faible dépendance de la science aux connaissances externes, une forte incitation à la publication, un haut degré de codification des connaissances, et la préférence pour les articles scientifiques comme principal mode de communication. Les citations entre articles, offrent un moyen précis de tracer le cours du progrès scientifique (Small et Garfield 1985), bien que cette méthode comporte des limites identifiées (MacRoberts et MacRoberts 1989). Parmi celles-ci, nous pouvons citer : une variation dans la fréquence de publication selon les disciplines, un manque de considération pour les travaux publiés dans des langues autres que l'anglais, et le fait que les résultats scientifiques présentés dans des conférences ou sous forme de logiciels ne bénéficient pas du même niveau de considération que les articles traditionnels (Meyer 2002; Han 2007).

De l'autre côté, l'activité technologique, principalement menée par des ingénieurs ou inventeurs, est orientée vers la création de nouveaux artefacts dans un environnement compétitif. Ce processus engendre des connaissances nouvelles et commercialisables, intégrées dans des produits, processus ou services, et leur valeur est déterminée selon leur capacité à conférer un avantage concurrentiel (Cozzens et al. 2005). Cette activité se déroule principalement au sein des entreprises industrielles. Dans ce contexte compétitif, les opportunités pour les ingénieurs d'échanger des connaissances sont limitées, les canaux de communication étant souvent restreints aux partenaires ou à l'organisation elle-même. La transmission horizontale de connaissances est généralement involontaire et peut résulter de fuites d'informations ou d'erreurs. La propagation de la connaissance technologique se fait donc principalement par le biais de la mobilité professionnelle des ingénieurs entre les organisations (Allen 1977).

Le processus de création de connaissances technologiques s'appuie sur des informations et incitations émanant d'une variété de parties prenantes, incluant les collègues, les utilisateurs, les clients, les équipes commerciales, les investisseurs et les concurrents. Cette activité d'invention intègre un éventail de disciplines et de domaines de connaissances plus vaste que celui de l'activité scientifique. L'intégration de connaissances scientifiques et technologiques externes est souvent facilitée par des *gatekeepers*, des membres de l'organisation ayant un accès étendu à la littérature scientifique, un réseau de contacts plus développé, et une plus grande implication dans les brevets et publications (Taylor 1975). Les entreprises dominent dans le dépôt de brevets incluant des références scientifiques, représentant environ 78% du volume total de ces brevets entre 1976 et 2015 (Ahmadpoor et Jones 2017).

La nature partiellement tacite et intrinsèquement compétitive de la connaissance technologique constitue un obstacle majeur à sa diffusion. Le brevet d'invention, offrant une protection légale et nécessitant un effort de codification significatif, facilite la propagation de cette connaissance. Par conséquent, le brevet est souvent employé comme indicateur pour estimer l'activité technologique. Il se caractérise par un haut degré de codification, une description détaillée et une certification institutionnelle. Néanmoins, l'utilisation des brevets comme mesure de l'activité technologique présente des limitations notables. En effet, toutes les inventions ne sont pas brevetées, certaines ne peuvent pas être brevetées et tous les brevets n'ont pas le même degré d'innovation (Griliches 1990).

D'une part, la pratique du secret industriel reste courante, certaines entreprises jugeant que le risque d'imitation de leur invention est trop faible pour justifier les coûts associés au dépôt de brevet (Levin et al. 1987; Thumm 2004). D'autre part, les brevets peuvent être utilisés comme outils stratégiques, certaines entreprises exploitant le processus de dépôt de brevets à des fins offensives. Ces stratégies visent à restreindre l'exploration technologique des concurrents, à communiquer sur leurs propres avancées, à augmenter les indicateurs de performance internes, ou encore à influencer les processus de normalisation. Ces brevets sont souvent perçus comme moins représentatifs de l'activité technologique réelle (Cohen, Nelson, et Walsh 2000; Blind et al. 2006; Holgersson et Granstrand 2017).

Cependant, il existe des nuances fortes qui distinguent la réalité d'une description excessivement binaire : soit science, soit technologie. Tout d'abord, le développement de projet de recherche fondamentale peut être mené par des entreprises privées. Ce développement peut être motivé par la volonté d'acquérir un *first mover advantage* sur l'exploitation d'une percée scientifique (Rosenberg 1990; Arora, Belenzon, et Sheer 2021) ou de développer une capacité d'absorption des connaissances produites dans l'environnement de l'entreprise (Cohen et Levinthal 1990). Cette prise en main de la recherche par des acteurs privés peut freiner la diffusion des connaissances scientifiques dans l'objectif de préserver l'obtention d'un avantage concurrentiel (Stokes 1997; Stern 2004; Gans, Murray, et Stern 2017).

De la même manière, les universités intègrent de manière croissante une capacité d'innovation en tant que « troisième mission », après la recherche et l'enseignement (Gulbrandsen et Slipersæter 2007). Cette prise en main du développement technologique s'est notamment développée à la suite de la promulgation du *Bayh-Dole Act* aux États-Unis en 1980 autorisant le dépôt de brevets d'invention par les universités et autres organisations à but non-

lucratives financées par des fonds publics.

Ensuite, de nombreux individus cumulent une activité scientifique et technologique. Cette « double casquette » est relativement commune dans certains domaines où ces deux activités sont particulièrement proches l'une de l'autre comme les domaines des biotechnologies, des nanotechnologies ou de l'impression 3D. Cette quasi-symbiose entre ces deux activités entraîne une situation dans laquelle la distinction des connaissances scientifiques et technologiques relève d'une forme d'arbitraire. Les articles et les brevets faisant parfois l'objet d'une publication simultanée avec des contenus très similaires (Narin et Noma 1985; Stokes 1997; Bassecoulard et Zitt 2004).

Troisièmement, l'avènement d'une économie basée sur la connaissance, permise notamment par le développement des nouvelles technologies de communication a permis l'essor de la technologie basée sur la science (*science-based technology*). Cette forme de développement technologique est marquée par une forte hausse des interactions entre entreprises industrielles et universités. Les échanges de connaissances au sein de cette sphère technico-scientifique constituent un élément majeur de l'innovation dans certains domaines d'activité (Meyer-Krahmer et Schmoch 1998).

Ainsi, la Science et la Technologie sont généralement envisagées comme deux domaines d'activité distincts, chacun ayant la capacité de progresser et d'accumuler des connaissances de manière autonome. Toutefois, ces deux domaines manifestent des interdépendances et des complémentarités substantielles, instaurant entre eux une relation quasi-symbiotique. Cette relation peut être comparée à deux brins d'ADN, qui peuvent exister indépendamment l'un de l'autre, mais qui ne peuvent être véritablement fonctionnels qu'une fois associés (Brooks 1994).

1.3.2 L'identification des connaissances intéressant la défense.

L'identification des connaissances technologiques et scientifiques impliquées dans l'innovation en matière de défense est une tâche délicate tant la dualité de leur usage, à la fois civil et militaire, est importante. Aussi, la notion de dualité est incontournable en économie de l'innovation de défense. Dans ce contexte, la dualité, qui se définit comme l'utilisation potentielle d'une technologie à la fois dans le contexte civil et militaire, est un enjeu complexe. Notre recherche se focalise sur l'étude de la dualité à travers le prisme des connaissances et des technologies, avec pour objectif principal d'analyser l'évolution de la réflexion internationale sur l'amélioration des produits et services de défense. Notre approche se distingue de celles qui

se concentrent sur la production, l'échange ou l'utilisation directe des innovations de défense.

La littérature spécialisée offre deux visions contrastées de la dualité en ce qui concerne le transfert de connaissances entre le secteur civil et militaire. La première vision considère ce transfert comme une sorte de traduction spontanée d'un domaine à l'autre, attribuable à la nature même de la connaissance technologique, qui peut être intrinsèquement duale (Chinworth 2000; Acosta et al. 2013). La seconde vision, en revanche, voit le transfert de connaissances comme résultant d'un manque de dualité et met en avant la co-construction des connaissances technologiques entre différents acteurs (Cowan et Foray 1995; Meunier et Zyla 2016).

Bien que des recherches récentes soutiennent que la dualité est essentiellement un phénomène systémique, dépendant davantage du système d'innovation dans lequel il s'insère que de la nature spécifique d'une technologie (Meunier 2017), notre travail adopte la perspective que la dualité est une caractéristique inhérente à la technologie elle-même, en accord avec les travaux de Manuel Acosta.

Dans le domaine de l'économie de l'innovation, la mesure de la dualité technologique peut être abordée selon trois méthodologies distinctes : les financements, les acteurs impliqués et les types de technologies développées. La première méthode repose sur l'analyse des sources de financement de la recherche et développement (R&D). Il est supposé que les projets financés par des agences de défense sont, par défaut, soit explicitement destinés à des usages défense, soit du moins susceptible d'applications duales. Les applications commerciales issues de ces projets sont donc considérées comme des transferts technologiques de la sphère militaire vers la sphère civile, qualifiés de « *spin-off* » (Chakrabarti, Dror, et Eakabuse 1993). Toutefois, cette approche est limitée par la complexité et l'opacité des systèmes de financement dans le secteur de la défense.

La deuxième méthode se concentre sur la nature des acteurs engagés dans le processus d'innovation. Des entreprises fortement impliquées dans la Base Industrielle et Technologique de la Défense (BITD) d'un pays sont présumées produire principalement des innovations militaires. Ces entreprises peuvent être identifiées grâce à des indicateurs comme les codes APE (Fauconnet et al. 2018) ou la liste annuelle des acteurs du top 100 de l'industrie de l'armement publiée par le SIPRI (Acosta et al. 2018). Cette méthode permet également de comprendre que le degré d'implication d'une entreprise dans les activités de défense est inversement proportionnel à sa diversification technologique (Fauconnet et al. 2018).

Enfin, la troisième méthode, largement utilisée, mais également la plus partielle, consiste à classer les technologies en fonction des catégories de brevets. Cette classification utilise la Classification Internationale des Brevets (CIB ou IPC) pour identifier les technologies

spécifiquement liées à la défense. Par exemple, les technologies associées à l'armement et aux munitions sont classifiées sous les codes IPC F41 et F42. Plus une technologie est proche de ces catégories, moins elle est susceptible d'avoir des applications civiles (Acosta, Coronado, et Marín 2011). Cette méthodologie permet également d'intégrer une dimension géographique, en observant par exemple que les brevets militaires britanniques, français et américains sont les plus fréquemment cités pour des applications civiles. Cette méthode possède l'avantage d'être aveugle à la taille et l'influence de l'organisation déposante et permet de cibler des inventions déposées par des PME ou des individus, ce qui permet d'estimer plus précisément la base de connaissances des territoires en matière de défense.

Du côté scientifique, si l'impact de la science sur l'élaboration des capacités de défense est largement reconnu (Paarlberg 2004; Bellais 2005; Fauconnet 2019), identifier explicitement la recherche dédiée à la défense s'avère difficile. Cela s'explique par le fait que les travaux scientifiques possèdent souvent une nature fondamentale, codifiée, universelle et mobile (Cozzens et al. 2005), ce qui les rend intrinsèquement plus susceptibles d'avoir un caractère dual, c'est-à-dire applicables à des fins tant civiles que militaires.

Mérindol (2004) offre une perspective utile en distinguant la recherche fondamentale de la recherche appliquée. Selon elle, la première vise à acquérir des connaissances sans une application spécifique en vue et est donc neutre en ce qui concerne son orientation militaire ou civile. En revanche, la recherche appliquée est délibérément dirigée vers des applications pratiques, soit militaires, soit civiles (Mérindol 2004). On peut également considérer que les chercheurs financés par des institutions militaires présentent des caractéristiques distinctes, notamment des liens plus forts avec l'industrie par rapport à leurs homologues civils (Libaers 2009).

Cependant, étant donné les limites de ce chapitre, nous n'aborderons pas la question de la distinction entre la recherche fondamentale et appliquée ou les mécanismes de financement spécifiques à chaque domaine de recherche. Au lieu de cela, nous considérons l'ensemble des domaines scientifiques comme duaux par essence, en cela qu'ils produisent des intrants potentiels à la production d'innovation de défense sans pour autant avoir été développées en ce sens. Nous nous proposons ainsi d'identifier les articles scientifiques « intéressant la défense » en collectant les références scientifiques au sein des brevets comportant des classes technologiques à usage défensif.

1.4 L'autonomie stratégique

1.4.1 Origine et définition

Dans la littérature récente, l'Autonomie Stratégique (AS) est un concept clé dans le contexte de l'Union européenne, envisagé comme une alternative à l'OTAN pour protéger les intérêts communs des États membres. Cette notion s'étend au-delà de la capacité militaire pure, englobant un cadre politique, militaire, technologique et industriel qui assure l'indépendance de l'Union dans divers domaines. Parmi ces domaines, on trouve la production d'équipements militaires, l'innovation technologique de pointe et l'accès aux ressources stratégiques comme les terres rares et les hydrocarbures. L'AS s'articule autour de trois axes principaux : politique, opérationnel et industriel (Kempin 2017). Sur le plan opérationnel, elle représente la capacité d'agir de manière autonome tout en maintenant la capacité de coopérer avec des alliés et partenaires (Charillon 2013; Ministère de la Défense 2013). Sur sa dimension industrielle et plus précisément sur l'innovation industrielle, l'autonomie stratégique s'interprète comme la capacité des nations à placer sous leur contrôle les systèmes scientifiques et techniques leur permettant de pourvoir en innovation leur BITD. Lebert et Meunier (2020) développent une méthode pour mesurer l'AS en termes d'innovation, analysant les capacités de chaque pays à maintenir un équilibre entre autarcie et interdépendance dans la création de connaissances. Ils utilisent des indicateurs d'introversion et d'extraversion pour évaluer la proportion des échanges de connaissances au sein d'un pays et avec l'extérieur. En somme, un pays atteint une AS technologique quand il parvient à équilibrer son autonomie interne avec une ouverture mesurée sur le monde extérieur.

Les indicateurs produits par cette précédente étude dérivent de la Théorie de la Dominance Économique (TDE, Lantner 1974; Lantner et Lebert 2015). Ils utilisent l'analyse de réseaux basée sur la théorie mathématique des graphes pour évaluer les interactions dans les systèmes de connaissances. Cette méthode évalue l'influence globale d'une entité sur une autre, prenant en compte ses relations avec d'autres entités au sein d'un système complexe de flux de connaissances interterritoriaux. Plus précisément, elle permet de mesurer l'influence « globale » d'une entité A sur une entité B en tenant compte de ses relations avec d'autres entités (C, D, etc.). Elle s'intéresse ainsi aux « effets de domination » définis par Perroux (1948) comme la capacité d'une économie dominante « par ses mouvements mêmes, et en dehors de tout dessein prémédité, [à] influence[r] d'autres économies réduites à une action d'adaptation ».

Cet outil est particulièrement utile pour analyser les interactions au sein des réseaux mondiaux d'innovation, en cela qu'il permet d'identifier des relations de dominance entre les différents acteurs. Il nous permet dans ce chapitre une évaluation annuelle de l'engagement intellectuel des nations dans la R&D dans le domaine de la défense, soulignant la dynamique entre acteurs dominants et dominés.

1.4.2 Précédentes études

La recherche entourant l'autonomie stratégique par l'innovation reste aujourd'hui très exploratoire et nécessite encore de nombreux travaux pour en consolider les méthodes et résultats. Néanmoins, un certain nombre d'études nous permettent d'ores et déjà d'établir des tendances générales. La première d'entre elles, Lebert et Meunier (2020) illustre la suprématie états-unienne sur le système global de connaissances technologiques liées au domaine de la défense pour les années 2010 et 2012. Les États-Unis sont à la fois le pays le plus intégré sur leur territoire, mais aussi celui qui a le plus d'interactions avec les autres. Cela leur permet d'absorber de manière efficace les connaissances produites dans le monde et de diriger le système global d'innovation défense dans la direction souhaitée par leur propre BITD. Ces résultats désignent un quatuor de tête de l'AS mondiale composé des États-Unis, de l'Allemagne, du Royaume-Uni et de la France.

Sur la base de cette première approche, Kouakou et Szego (2022) examinent l'influence du contexte de gouvernance des nations sur leur niveau d'AS. Il en résulte que la capacité de contre-pouvoir exercé par la société civile est un facteur corrélé à l'accroissement d'une capacité d'AS. Le niveau d'engagement civique dans la sélection des gouvernants et la liberté d'expression apparaissent donc comme un facteur de stimulation de l'innovation. Ceci peut s'interpréter comme un impact positif de l'absence de contrôle politique sur la circulation des informations et des connaissances. Une circulation libre de celles-ci permet une plus grande interaction entre acteur et *in fine* un meilleur niveau d'innovation, comme avancé par Lehmann et Seitz (2017)

Également, ces résultats montrent qu'une plus grande stabilité politique et l'absence de violence, liée ou non au terrorisme, peuvent réduire l'autonomie stratégique, suggérant que les pays moins confrontés à ces menaces tendent à accorder moins d'importance à leur autonomie stratégique. De plus, l'intensité des dépenses militaires est un facteur clef, suggérant que des investissements militaires accrus conduisent à une plus grande autonomie stratégique à long terme.

Jusqu'à présent, ces recherches ont négligé l'analyse des flux de connaissances scientifiques, bien que ceux-ci jouent un rôle crucial dans le développement technologique de la défense. Nous nous proposons de pallier modestement cette lacune.

En résumé, l'autonomie stratégique est une notion relativement récente permettant d'illustrer les besoins des nations de limiter leur dépendance à de grands acteurs mondiaux concernant la production de biens et services vitaux pour la protection de leurs intérêts et de leur souveraineté. Son application à l'innovation industrielle de défense nous permet de mesurer les relations de domination existant au sein du système de connaissance global et nous renseigne sur les hiérarchies à l'œuvre. Son application aux flux de connaissances scientifiques est nouvelle et relève d'une démarche exploratoire. Nous nous proposons ainsi d'étoffer la littérature sur le rôle de l'activité scientifique dans le développement d'une capacité de défense.

2 Méthodologie et Données

2.1 Données

Les données d'articles et de brevets utilisées dans ce chapitre sont extraites en intégralité de la base de données Lens¹¹. Issue d'un financement et d'un développement principalement australien et états-unien, cette base de données met à disposition des données consolidées sur plus de 225 millions d'articles et 127 millions de brevets mondiaux. Elle présente également de riches métadonnées sur les personnes et institutions publiant ces documents ainsi que les liens de citations entre articles et brevets. Les données agrégées sont principalement issues du WIPO, de l'USPTO et de l'EPO pour les brevets d'invention et Microsoft Academic, CrossRef et ORCID pour les articles scientifiques.

Les données de brevets que nous extrayons de Lens répondent aux exigences suivantes : (i) avoir fait l'objet d'une demande de dépôt initiale sur la période [1990 ; 2019], (ii) comporter des citations technologiques ou scientifiques, (iii) intégrer au moins une technologie identifiée défense par les codes IPC issus de la littérature (voir Annexe A). Les brevets sont ensuite regroupés par *extended_family* correspondant à la classification INPADOC, afin d'identifier les inventions uniques. Les citations scientifiques et technologiques issues de chaque membre de la famille sont agrégées afin de maximiser l'étendue de l'état de l'art associé à chaque invention. L'échantillon final comprend 71 669 inventions et 12 100 articles scientifiques, ces deux échantillons forment respectivement les ensembles B_1 et A_1 .

Ensuite, et dans le but d'analyser les flux de connaissances internationaux, nous remontons d'un degré supplémentaire de distance à la frontière Science-Technologie au sens d'Ahmadpoor et Jones (2017) : le degré 1 ($D = 1$) représente d'un côté les brevets comprenant des références scientifiques et de l'autre les articles scientifiques cités par ces brevets, le degré 2 ($D = 2$) représente des documents éloignés d'une citation supplémentaire, à savoir un article cité par un article lui-même cité par un brevet ou une invention citée par une invention citant un article scientifique. Nous collectons ainsi les brevets cités et articles référencés dans les

¹¹ <https://www.lens.org/>

ensembles B_1 et A_1 pour former les ensembles B_2 et A_2 comportant respectivement 193 035 inventions et 121 626 articles.

Enfin, ces documents sont rattachés à un ou plusieurs territoires nationaux. En accord avec une partie de la littérature, nous privilégions les adresses des inventeurs pour localiser les créations de connaissance technologiques (Berge et Weterings 2014; Breschi et Lissoni 2009; Krafft et al. 2011). Dans de rares cas, seule l'adresse du déposant est disponible, auquel cas, elle est conservée. Les articles scientifiques sont reliés à l'adresse des institutions hébergeant les auteurs au moment de la rédaction de l'article.

À ces méthodes de localisation « classiques », nous ajoutons un traitement supplémentaire pour les inventions et les articles ne mentionnant aucune forme de localisations. Pour les brevets, nous collectons les mentions quant aux personnalités morales des déposants : un nom ou une partie d'adresse. Pour les articles, les documents non localisés mentionnent pour certains un nom d'institution. Ces informations peuvent faire référence à une localité comme une ville, une région ou un pays permettant d'ancrer territorialement les connaissances qui composent le document. Ce traitement vise tout particulièrement les inventions issues du système d'innovation chinois.

	
<p>B_1</p> <ul style="list-style-type: none"> • 71 669 familles d'inventions • 74 328 localisations : <ul style="list-style-type: none"> → 58 413 par l'adresse des inventeurs → 10 267 par analyse sémantique du nom du déposant → 5 648 par l'adresse du déposant • 116 pays 	<p>B_2</p> <ul style="list-style-type: none"> • 193 035 familles d'invention citées • 196 522 localisations : <ul style="list-style-type: none"> → 170 909 par l'adresse des inventeurs → 14 665 par analyse sémantique du nom du déposant → 10 617 par l'adresse du déposant • 147 pays
<p>A_1</p> <ul style="list-style-type: none"> • 12 100 articles cités par 6217 brevets • 7 941 localisable nationalement : <ul style="list-style-type: none"> → 6 843 par les institutions affiliées aux auteurs → 1 048 par analyse sémantique du nom de leur institution • 83 pays 	<p>A_2</p> <ul style="list-style-type: none"> • 121 626 références scientifiques localisées : <ul style="list-style-type: none"> → 105 847 par les institutions affiliées aux auteurs → 15 779 par analyse sémantique du nom de leur institution • 131 pays

Table 3.1 : Ensembles de l'échantillon de données

Après traitement sémantique, sur 11 674 brevets localisables grâce à ces mentions, 10 702 mentionnent une localité chinoise, soit 91,6% du total. Parmi ces inventions figurent de nombreux instituts de recherche des grandes villes chinoises, par exemple, l'Institut d'Ingénierie

des Satellites de Shanghai qui a déposé 356 brevets sous le nom « SHANGHAI SATELLITE ENG INST » sans renseigner de localisation. Ces mentions sont ensuite confrontées à l'office de dépôt du brevet avant d'être intégrées à notre échantillon. Les articles scientifiques non localisés ont profité d'un traitement similaire qui a permis de localiser des institutions principalement américaines.

Finalement, l'ensemble de l'échantillon constitué est résumé dans la Table 3.1, il comprend 925 886 flux de connaissances technologiques B₂-B₁, depuis 147 nations à destination de 116 pays et 311 950 flux de connaissances scientifiques A₂-A₁, depuis 131 nations vers 83 pays. Une visualisation interactive des réseaux de flux de connaissances scientifiques et technologiques issus de notre échantillon est disponible en ligne au lien en pied de page¹².

2.2 Calcul des indicateurs

2.2.1 Matrice de flux et matrice de Ghosh

L'analyse proposée dans ce chapitre repose sur une nouvelle interprétation des indicateurs d'autonomie stratégique (AS) issus de la TDE (Lantner 1974; Lantner et Lebert 2015) et appliqués à l'innovation (Kouakou et Szego 2022; Lebert et Meunier 2020). L'approche de ces auteurs peut être résumée comme suit : l'autonomie stratégique par l'innovation traduit la capacité d'un pays à produire des inventions de défense, seul, ou en collaboration avec d'autres, en s'assurant un haut degré de maîtrise du processus. L'approche structurale de la dominance économique est utilisée pour quantifier l'AS à partir de flux de connaissances technologiques repérés sur des données de citations de brevets. On distingue alors deux types de flux : ceux qui aboutissent à la production d'inventions de défense, et ceux qui produisent des inventions civiles. Les réseaux qu'ils construisent comprennent donc deux couches, ce qui aboutit à l'élaboration d'un multigraphe dirigé, pondéré et réflexif.

Ces précédentes mesures d'AS ne sont cependant pas complètes, car elles omettent les relations de stricte dépendance dans les relations cognitives internationales. Si un pays A transmet de la connaissance au pays B sans qu'il n'existe le moindre feedback, direct ou indirect, entre ces pays (i.e. de circularité), cette relation de dépendance de B vis-à-vis de A

¹² https://geabe-elvy.github.io/Interactive_knowledge_networks/Menu.html

pour sa production d'invention, et la capacité de B à absorber cette connaissance interne, ne sont pas prises en compte, car la mesure qu'ils proposent repose entièrement sur l'existence de circuits.

De plus, la mesure de ces auteurs est relative, car le score d'AS dépend à la fois de l'activité d'invention dans la défense, mais aussi dans le civil. Ce positionnement est assumé par les auteurs. Il s'agit de dire que l'autonomie stratégique est plus ou moins importante en fonction des moyens que le pays consacre à ses inventions de défense par rapport à ceux consacrés pour ses inventions civiles. Dans les résultats qu'ils obtiennent, cela vient mettre au premier plan de l'AS certains « petits » pays qui, structurellement ou de manière plus ponctuelle, font des efforts de R&D de défense importants rapportés à leur taille. La relativisation du poids de la défense par celui du civil vient donc gommer un effet taille. Cependant, cet effort de relativisation est, par construction, déjà pris en compte par la procédure de transformation des matrices de flux en matrices de Ghosh dans la théorie de la dominance économique. Ce qui revient à suggérer qu'il n'y a pas de nécessité absolue de passer par un multigraphe pour calculer l'AS, mais qu'un focus sur les seuls flux de défense peut être suffisant. Cependant, ce choix conduit à concevoir différemment le calcul de l'AS, car si la même procédure était maintenue sur un graphe simple, cela reviendrait à rendre nulle par construction sa composante « interdépendance ».

Ce chapitre se propose donc d'introduire une nouvelle mesure de l'AS qui prenne en compte, en plus de l'autarcie et des circularités (interdépendances), les relations de dépendance stricte avec un regard porté sur les seules inventions de défense. Dépendances et interdépendances reflètent toujours une double capacité : l'influence des autres, et l'absorption de connaissances externes. Dans le cas de l'interdépendance, ces deux capacités jouent ensemble. Dans le cas de la dépendance, elles jouent séparément (si on influence strictement, par les connaissances que l'on a produites, les processus d'invention d'un autre pays, sans feedback, on ne déploie pas de capacité d'absorption des connaissances produites par ce pays, et inversement si l'on est strictement influencé). La mesure que nous proposons agrège, comme chez (Kouakou et Szego 2022), ces deux capacités, mais en prenant en compte, donc, les dépendances.

Cette approche se décompose comme suit : premièrement, chaque nation est caractérisée par une capacité à faire seule, c'est-à-dire à réutiliser les connaissances précédemment générées sur son territoire pour innover. Cette dimension est capturée par l'indicateur d'autarcie. Deuxièmement, une nation possède une capacité d'influence ou une dépendance vis-à-vis du reste du système. En fonction, elle profite soit d'une capacité à

influencer l'innovation de défense des autres nations, soit elle subit une dépendance vis-à-vis des autres territoires pour la création de ses connaissances. Cette dimension est capturée dans le score d'interdépendance. La somme des scores d'autarcie et d'interdépendance constitue l'indicateur d'autonomie stratégique.

D'un point de vue méthodologique, cet indicateur est obtenu par calcul matriciel. Chaque nation est présente en ligne et en colonne en tant qu'émettrice ou réceptrice de flux de connaissance. Par exemple, une invention française comportant 3 IPC défense et 2 IPC non-défense citant, 2 inventions françaises, 1 invention allemande et 1 invention états-unienne entraînera les flux suivant au sein d'un multigraphe dirigé, pondéré et réflexif :

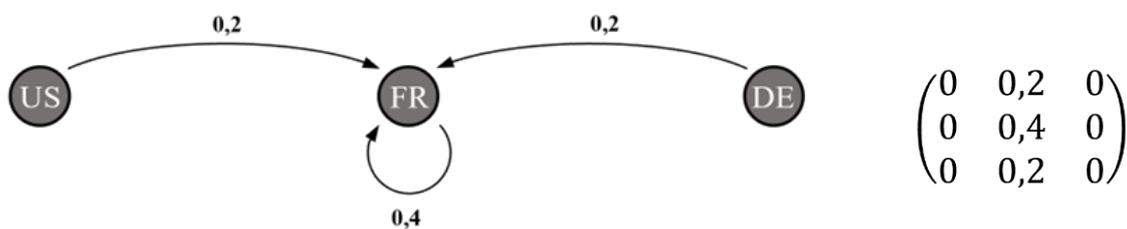


Figure 3.1: Exemple d'un multigraphe de flux de connaissances et sa matrice de flux

L'ensemble des flux de connaissances entre le pays i et le pays j pour l'année t , notés $x_{ij,t}$ sont ensuite agrégés par simple addition au sein d'une matrice de flux, notée X_t . Cette matrice carrée de taille n , pour n le nombre de pays, comporte en ligne les pays émetteurs i et en colonne les pays récepteurs j . Si l'on nomme D_t la matrice de même format que X_t contenant la diagonale principale de X_t (les relations autarciques) et des 0 ailleurs, on définit la matrice Y_t comme suit :

$$Y_t = X_t + X'_t - D_t \tag{1}$$

avec X'_t la matrice transposée de X_t . La matrice Y_t symétrise les flux et leur valeur en transformant des dépendances strictes en interdépendances locales (limitées aux pays concernés par ces dépendances). La matrice Y_t est ensuite transformée en matrice de coefficient C_t en divisant les flux $y_{ij,t}$ par la marge en ligne i ou en colonne j comme suit :

$$c_{ij,t} = \frac{y_{ij,t}}{\sum_{p=1}^n y_{ip,t}} \tag{2}$$

avec :

$$\sum_{p=1}^n y_{ip,t} = \sum_{p=1}^n y_{pj,t} \tag{3}$$

Enfin, l'application de la TDE implique la transformation de cette structure en matrice de Ghosh notée M_t avec $M_t = [I - C_t]$ et le calcul de ses déterminants.

2.2.2 Indicateur d'autonomie stratégique

Afin de mesurer l'impact d'un nœud « pays » sur l'ensemble de la structure, la TDE mesure la variation du déterminant de la matrice de Ghosh après avoir supprimé les flux que ce nœud entretient avec lui-même et celui qu'il entretient avec le reste de la structure. Deux déterminants sont ainsi calculés : celui qui supprime le flux en boucle du pays évalué, et celui qui supprime les flux (en ligne et en colonne) qui le lient aux autres pays. Ces différentes étapes de calculs peuvent être formalisées comme suit :

Pour aut l'autarcie, int l'interdépendance et p un pays :

$$aut_{p,t} = \det(M_{aut,t}); \text{ avec: } m_{pp} = 1 \quad (4)$$

$$int_{p,t} = \det(M_{int,t}); \text{ avec: } m_{ij} = 0 \text{ pour } i = p \text{ et } i \neq j \quad (5)$$

$$AS_{p,t} = aut_{p,t} + int_{p,t} \quad (6)$$

Comme évoqué précédemment, ce chapitre est à notre connaissance le premier à appliquer les outils de la théorie de la dominance économique à une analyse structurale de flux de connaissances scientifiques. La procédure précédemment décrite s'applique au réseau de connaissances scientifiques, à la différence notable que la littérature n'identifie pas de caractéristiques permettant de mesurer le niveau de dualité intrinsèque d'un article scientifique.

Aussi, nous considérons que son appartenance au domaine de la défense dépend du brevet qui l'a référencé. Les articles se voient ainsi pondérés d'un score d'appartenance présumé au domaine de la défense directement lié à la proportion de classe technologique de défense présent dans le brevet le référençant. De la même manière, nous considérons qu'un article ne « révèle » son potentiel dual qu'au moment de son référencement dans une invention de défense. Cette hypothèse nous permet de considérer les échantillons A_1 et B_1 sur la même temporalité, sans délai de la citation NPL ou d'éventuel phénomène de *sleeping beauties* (van Raan 2004). D'un point de vue méthodologique, cette différence s'applique comme suit : la matrice de flux scientifiques attribue une temporalité à la destination des flux de connaissance sur l'année de publication du brevet citant l'article et non de l'article lui-même. Par exemple, un article de l'ensemble A_1 publié en 1995 et référencé par un brevet en 2001 entraînera un flux de connaissance A_2-A_1 en 2001.

Finalement, ces mesures produisent deux indicateurs d'AS distinct : le premier pour le réseau de citations technologiques, abrégé TSA, composé d'une mesure d'autarcie et d'une mesure d'interdépendance T_a et T_i et un indicateur d'AS pour le réseau de citation scientifiques abrégé SSA, composé également d'une mesure d'autarcie et d'une mesure d'interdépendance S_a et S_i .

2.2.3 Clustering des relations d'interdépendances

La méthode de clustering utilisée dans ce chapitre est issue d'une littérature appliquant la Théorie des Graphes d'Influence (TGI) à l'étude des réseaux de flux économiques. Notre approche réutilise la méthode introduite par Lebert et al. (2008) pour la clusterisation des flux économiques liés au commerce international dans le bassin méditerranéen. Plus précisément nous utilisons une version améliorée pour utiliser moins de ressources computationnelles et présentée par Lebert et El Younsi (2013).

Cette méthode partitionne la matrice de Ghosh en isolant à tour de rôle chaque relation bilatérale. Il s'agit ensuite de mesurer la part d'interdépendance générale de la structure des échanges qui est internalisée par chacune de ces relations. Nous mesurons l'interdépendance des deux graphes partiels ainsi créés, le « petit » graphe comportant la relation bilatérale, et le « grand » graphe comportant le reste de la structure.

La TGI avance que le produit des interdépendances des deux partitions est égal à la somme des interdépendances intra-parties et inter-parties, les deux étant supérieures à l'interdépendance de la structure générale. Ainsi, la différence entre le produit des interdépendances des deux partitions et l'interdépendance générale de la structure permet de mesurer l'importance des interactions directe et indirecte des deux pays pour l'ensemble de la structure. En d'autres termes, cette différence quantifie la synergie associée au partitionnement de la structure d'échange. Plus cet effet synergique est marqué, plus le lien entre les deux pays est considéré comme cohésif. L'ensemble des mesures de cohésion est ensuite intégré au sein d'une matrice de proximité dont les différentes valeurs peuvent être représentées à l'aide d'un dendrogramme. Cette méthode peut être formalisée comme suit :

Supposons que le réseau de connaissance pour une année t soit représenté par un graphe G , avec i et j deux pôles du graphe permettant la partition p . D est le déterminant de la matrice de Ghosh de taille n , associée au graphe G . D_p représente le déterminant du « petit » cluster, à savoir la partition formée par la relation bilatérale entre i et j . $D_{\bar{p}}$ représente le déterminant du

cluster formé par les autres pays de la structure, le « grand » cluster. s_{ij} la synergie associée à la partition et S la matrice de proximité entre les pôles.

Alors la mesure de la synergie associée à la partition est donnée par :

$$\bar{s}_{ij} = \frac{D_p \times D_{\bar{p}}}{D} \geq 1 \quad (7)$$

Afin de pouvoir être comparées entre-elles les valeurs \bar{s}_{ij} insérées dans la matrice \bar{S} sont normalisées comme suit :

$$S = [s_{ij}]_{n \times n} \text{ où } s_{ij} = \frac{\bar{s}_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq n} \bar{s}_{ij}} \quad (8)$$

Enfin, la représentation graphique sous la forme d'un dendrogramme est basée sur S .

3 Résultats

3.1 Matrice du flux

L'analyse des matrices de flux nous éclaire sur l'évolution des proportions de flux de connaissances émis et absorbés par les territoires nationaux au cours de la période considérée. Plus spécifiquement, il s'agit d'examiner les marges de la matrice des flux (additionnant les valeurs lignes ou par colonnes), une fois amputée des flux intraterritoriaux (représentés par une diagonale égale à 1). Les échanges mondiaux de connaissances constituent des flux économiques au même titre que des flux financiers ou de marchandises. Aussi, la partie suivante décrit les échanges internationaux de connaissances en utilisant des termes empruntés à l'analyse du commerce international.

3.1.1 Réseau de connaissances technologiques

L'examen de la matrice de flux technologiques offre une première perspective sur les transformations structurelles des flux de connaissances. La Figure 3.2a met en évidence l'augmentation de la quantité de flux de connaissances importées par les douze plus importants SID depuis 1990. Cette croissance présente toutefois des disparités. On note une progression marquée chez des acteurs émergents tels que la Chine, la Russie, la Corée du Sud et la Turquie, tandis que pour des acteurs établis tels que l'Allemagne, la France, le Royaume-Uni et les États-Unis, l'augmentation est plus mesurée. La croissance de la Chine et de la Russie dans le réseau d'échange est telle que la Chine est ainsi devenue après 2015 le pays accusant le plus grand volume de citations internationales dépassant les États-Unis. Sur la même période, le SID russe a acquis un volume d'importation de connaissances comparable à celui des États-Unis.

L'augmentation du volume des connaissances assimilées est principalement imputable à une intensification des dépôts d'inventions dans le domaine de la défense, ainsi qu'à une prise en compte plus exhaustive de l'état de l'art. Le nombre total d'inventions publiées annuellement s'élevait à environ 3 000 au début des années 1990 et a ensuite connu une croissance graduelle, dépassant les 16 000 publications annuelles après 2015. De manière similaire, la quantité moyenne de citations par invention était comprise entre 3 et 4 durant la première moitié des années 1990, pour ensuite atteindre une moyenne de 8 citations par invention à partir de 2015.

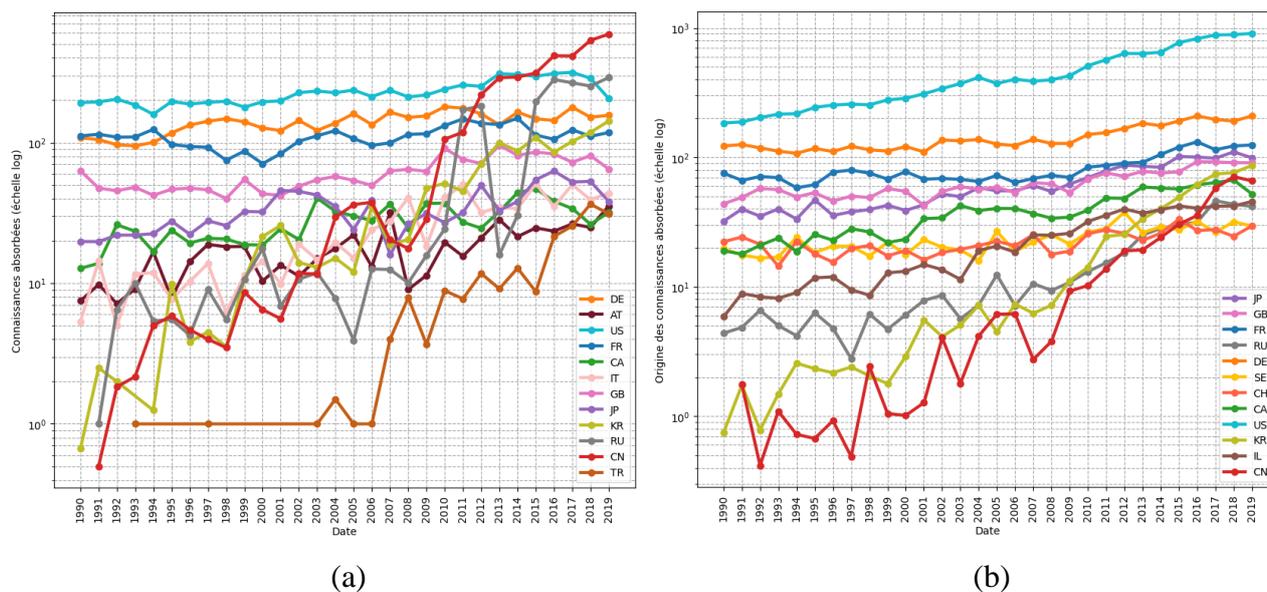


Figure 3.2 : Evolution des importations (a) et exportations (b) de connaissances technologiques sur la période 1990-2019 pour le top 12 mondial

Parallèlement, l'origine des connaissances citées par les innovations en matière de défense illustrée par la Figure 3.2b montre également une croissante globale. La Chine, la Corée du Sud, la Russie et Israël ont ainsi largement progressé sur la période en multipliant par plus de cinq la quantité de connaissances exportées vers les systèmes d'innovation de défense étrangers. Les puissances historiques du secteur comme la France, le Royaume-Uni, l'Allemagne et la Suède n'ont augmenté leur exportation que de 50 à 100%. Un groupe intermédiaire composé de puissances industrielles moins implantées comme l'Australie, le Japon, le Canada ont multiplié leur exportation de 2,5 à 3,7 fois. Cette croissance reste ainsi plus forte pour les acteurs émergents. Cependant cette hausse est plus mesurée que dans le cas des connaissances importées. La Chine reste ainsi derrière les principales puissances historiques du secteur de la défense dans l'exportation de connaissances technologiques intéressant le secteur. Les États-Unis ont très largement creusé l'écart avec les autres puissances mondiales en termes de diffusion de connaissances, en passant d'un poids cumulé des flux de connaissances exportées vers l'étranger de 184,3 en 1990 à 906,6 en 2019. À titre de comparaison, le second plus important exportateur, l'Allemagne, n'a progressé que de manière bien plus modeste, passant d'un poids cumulé de 122,4 en 1990 à 208,8 en 2019.

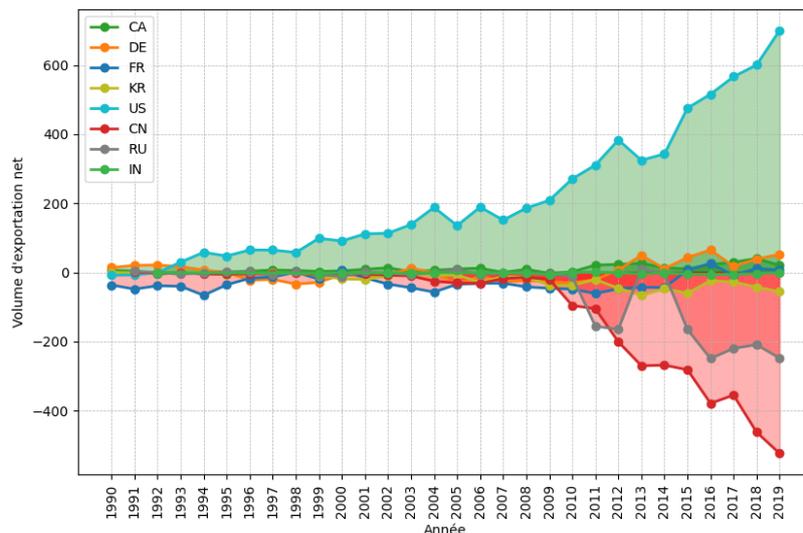


Figure 3.3 : Evolution des exportations nettes de connaissances technologiques sur la période 1990-2019 pour le top 8 mondial

Le volume d'exportation nette de connaissances présenté en Figure 3.3 illustre les principales contributions des SNI à la circulation globale des connaissances. Ce dernier montre tout d'abord le creusement d'un déficit cognitif très important pour la Chine et la Russie sur la décennie 2010. Ce déficit croissant traduit l'absorption massive de connaissances étrangères incorporée dans des inventions déposées par des inventeurs locaux. Cette interprétation est renforcée par le fait que la quantité moyenne de citations par invention au sein de ces pays a diminué sur cette période. Les moyennes glissantes sur trois ans de citations étrangères par inventions en Chine et en Russie étaient respectivement de 3.29 et de 4.13 en 2010 et de 2.20 de 2.69 en 2015. Le SID sud-coréen apparaît également comme le bénéficiaire d'importation de connaissances, mais dans une proportion plus réduite.

Parallèlement, les États-Unis ont très largement accru leur excédent cognitif depuis la fin de la guerre froide. Cela traduit une influence grandissante, et une position hégémonique du pays sur la conduite de l'innovation mondiale en matière de défense. Le territoire américain émet largement plus de connaissances à destination des BITD mondiales qu'il n'en absorbe pour sa propre BITD. Ce phénomène est renforcé par une moyenne glissante de citations étrangères par inventions en progression, soit 2.44 en 1995, 4.62 en 2005 et 5.17 en 2015.

3.1.2 Réseau de connaissances scientifiques

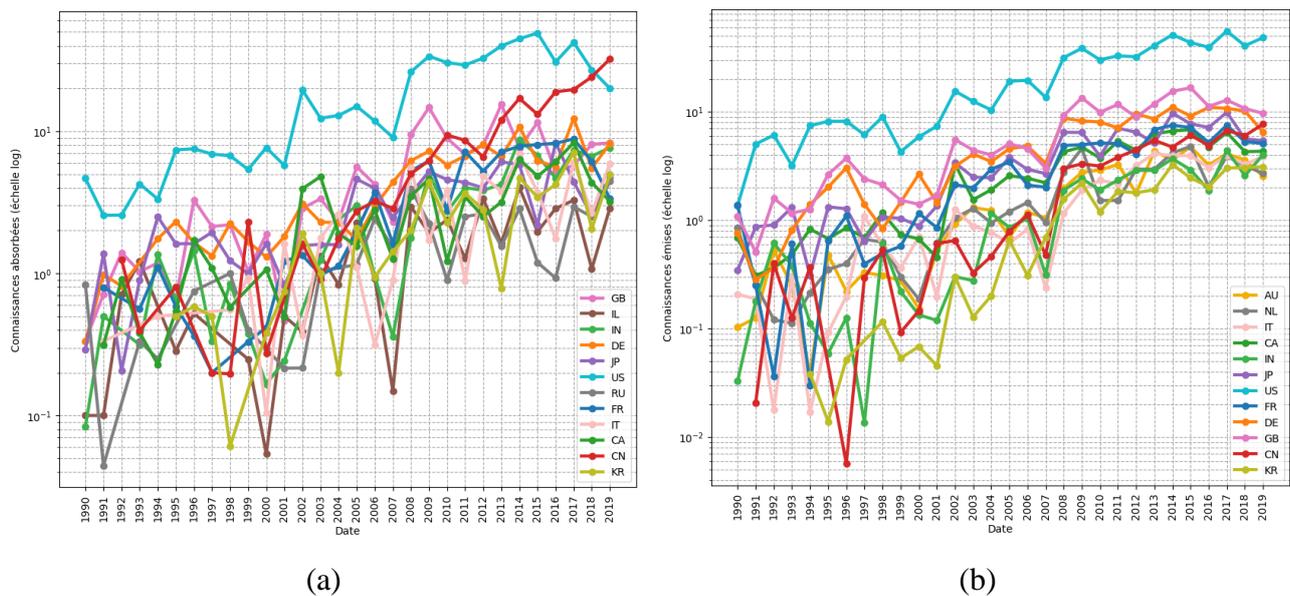


Figure 3.4 : Evolution des importations (a) et exportations (b) de connaissances scientifiques sur la période 1990-2019 pour le top 12 mondial

Les échanges de connaissances scientifiques susceptibles d'intéresser la défense offrent une structure plus erratique. Les échanges sont globalement en croissance, avec une volatilité annuelle importante. Celle-ci peut être expliquée par la quantité réduite de données analysées dans l'ensemble A_1 . Le réseau scientifique est également dominé par le SNI américain qui est à la fois le principal absorbeur de connaissances étrangères, mais également le principal contributeur du réseau global. Cependant, il convient de rappeler ici que les données scientifiques américaines sont sur-représentées dans notre échantillon.

La Chine montre une progression particulièrement importante sur la décennie 2010 de ces importations de connaissances scientifiques. Cette trajectoire traduit une augmentation très significative de la publication d'articles scientifiques dans les domaines intéressants la défense. Notre échantillon comprenait moins de 30 articles publiés annuellement dans les années 1990, pour plus de 2 400 après 2015. Cette augmentation marque le progrès le plus élevé de notre échantillon avec une multiplication par 30.79 des moyennes glissantes sur trois ans de connaissances absorbées. En moyenne, les autres nations n'ont multiplié leurs importations que de 8.5. À l'image du réseau technologique, le progrès de la Chine dans l'exportation des connaissances scientifiques sous-jacentes à l'innovation de défense reste plus mesuré.

L'Inde montre également une progression importante de ses capacités scientifiques. Elle figure parmi les SNI les plus influents dans l'échange mondial des connaissances intéressant la

défense. À l'instar de la Chine, ses capacités d'absorption de connaissances ont fortement augmenté sur la période et ont été multipliées par 24.18. L'Inde apparaît comme le seul acteur majeur du réseau mondial de connaissances scientifiques intéressant la défense qui ne possède pas de capacité de production technologique de premier plan.

À l'exception de l'Inde, les douze principaux importateurs du réseau scientifique sont identiques au réseau technologique, ce qui traduit une certaine cohérence dans les capacités des SNI. Les articles scientifiques cités par des inventions relevant du domaine de la défense proviennent d'un ensemble restreint d'acteurs. Pour rappel, seuls les États-Unis possèdent une propension importante à référencer les articles scientifiques issus de leur propre territoire dans leur invention. Ainsi, la présence d'acteurs similaires de part et d'autre de la frontière S&T traduit plus volontiers une spécialisation des SNI dans l'industrie de la défense, qu'un phénomène d'autocitation.

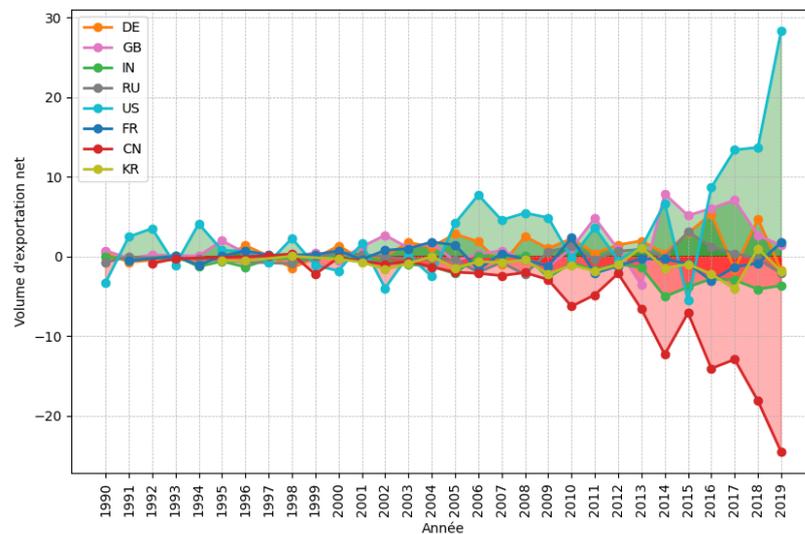


Figure 3.5 : Evolution des exportations nettes de connaissances scientifiques sur la période 1990-2019 pour le top 8 mondial

De manière globale, les performances scientifiques des SNI en matière de défense semblent plus homogènes, les nations offrant et absorbant des quantités de connaissances relativement comparables, ce qui entraîne une structure hiérarchique moins prononcée.

L'évolution des balances scientifiques pour les principales nations, illustrée en Figure 3.5 offre une tendance comparable à l'évolution des balances technologiques. Bien que leur situation soit plus erratique, les États-Unis bénéficient globalement d'un excédent dans leurs échanges de connaissances. Cet excédent contraste, ici aussi, avec le solde négatif grandissant

de la Chine, ces deux nations obéissant à des trajectoires quasi-symétriques sur la décennie 2010.

Les autres pays émergents dans le domaine de la défense comme l'Inde et la Corée du Sud accusent un déficit structurel dans les connaissances intéressant le secteur. La Russie, quant à elle, n'accuse pas de déficit majeur et apparaît plutôt comme un fournisseur net de connaissances. Ces résultats contrastent avec une littérature décrivant un système scientifique russe globalement en perte de vitesse (Klepach, Vodovatov, et Dmitrieva 2022), à l'exception des mathématiques (OST 2018).

Le Royaume-Uni possède un excédent scientifique marqué, ce qui apparaît cohérent avec l'excellence académique du système scientifique anglais, second acteur le plus influent derrière les États-Unis (OST 2018).

Pour résumer, les matrices de flux de connaissances illustrent une part très importante de flux émis et absorbés par les États-Unis. Plus généralement, les acteurs historiques d'Europe de l'Ouest apparaissent comme les principaux fournisseurs de connaissances à l'échelle mondiale.

Le creusement des déficits des acteurs émergents coïncide avec l'augmentation de l'excédent américain, mais également avec l'amélioration des balances extérieures de l'Allemagne, du Canada, du Royaume-Uni et de la France. Cette situation permet d'émettre l'hypothèse de flux de connaissances important depuis ces pays vers les acteurs émergents. Cette hypothèse sera vérifiée par l'analyse des clusters d'interdépendances dans la seconde partie de nos résultats.

3.2 Clusters d'interdépendance

Le *clustering* des relations d'interdépendance nous renseigne sur les principales interactions à l'œuvre au sein des réseaux d'échanges de connaissances pour la période post-guerre froide. Par égard pour la lisibilité des résultats, nous regroupons la hiérarchie des interdépendances au sein de dendrogrammes couvrant six périodes de cinq ans.

3.2.1 Réseau technologique

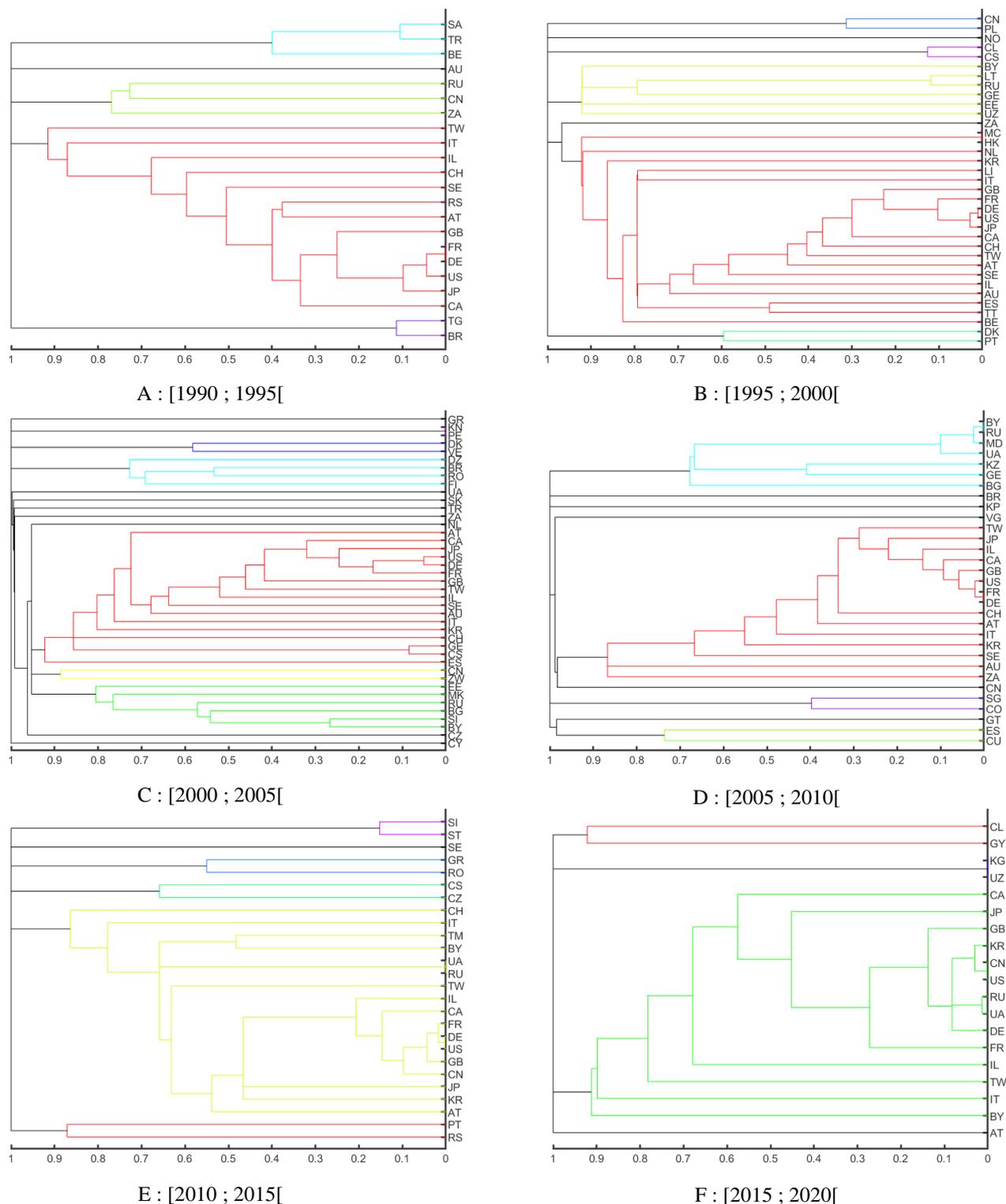


Figure 3.6 : Dendrogrammes des clusters d'interdépendances dans les échanges de connaissances technologiques par période de cinq années.

Au cours de la période post-guerre froide, plus spécifiquement entre 1995 et 2010, la dynamique globale des échanges de connaissances technologiques a été essentiellement gouvernée par deux clusters distincts. Ce phénomène est illustré sur les sous-figures B, C et D de la Figure 3.6. Le premier, que nous désignerons comme le « bloc atlantiste » est dominé par un trio formé par la France (FR), l'Allemagne (DE) et les États-Unis (US) et apparaît en rouge sur les sous-figure A, B, C et D. Ces nations sont au cœur des relations d'interdépendance technologique, détenant les liaisons les plus denses au sein du réseau jusqu'à l'année 2015. Ce cluster primordial est renforcé par l'adjonction de pays ayant une forte implication dans le secteur de la défense, y compris, mais sans s'y limiter, le Japon (JP), le Royaume-Uni (GB), le Canada (CA), Israël (IL), Taïwan (TW), l'Australie (AU), l'Autriche (AT) et l'Italie (IT).

En parallèle, un second cluster émerge à partir de 1995, principalement composé d'États anciennement affiliés au bloc soviétique et aux républiques socialistes de Yougoslavie. Il apparaît respectivement en jaune, vert et bleu dans les sous-figure B, C et D. Ce cluster « post-soviétique » est composé principalement de la Russie (RU) et de la Biélorussie (BY), mais s'étend également à d'autres anciennes républiques soviétiques comme l'Ukraine (UA), l'Estonie (EE), la Lituanie (LT), la Géorgie (GE), la Moldavie (MD), le Kazakhstan (KZ), l'Ouzbékistan (UZ) ainsi que des ex-membres du bloc de l'Est tels que la Bulgarie (BG) ou la Slovénie (SI).

Ainsi, la période 1995-2010 illustre une structure d'échanges des connaissances fortement influencée par la guerre froide, ce qui argumente dans le sens d'une dépendance technologique de longs termes entre les systèmes nationaux d'innovation. Sur cette même période, la Chine (CN) apparaît comme isolée, tandis que la Corée du Sud (KR) s'intègre progressivement au sein du cluster atlantiste en tant que nation périphérique, au même niveau que l'Italie (IT) par exemple.

À l'instar des exportations nettes de connaissances, les clusters d'interdépendance montrent un changement radical à partir de 2010. La bipolarité de la structure d'interdépendance s'estompe pour intégrer la Russie et la Chine au sein du cluster principal. La Russie garde cependant une relation d'interdépendance très intense avec une des anciennes républiques soviétiques : l'Ukraine. Cette relation d'interdépendance parmi les plus intenses du réseau se perpétue sur la période suivante 2015-2020, malgré le déclenchement d'un conflit entre ces deux pays en 2014. La dilution du cluster d'échange post-soviétique s'accompagne par ailleurs de l'intégration plus modeste d'un autre partenaire de la Russie au cluster principal : la Biélorussie.

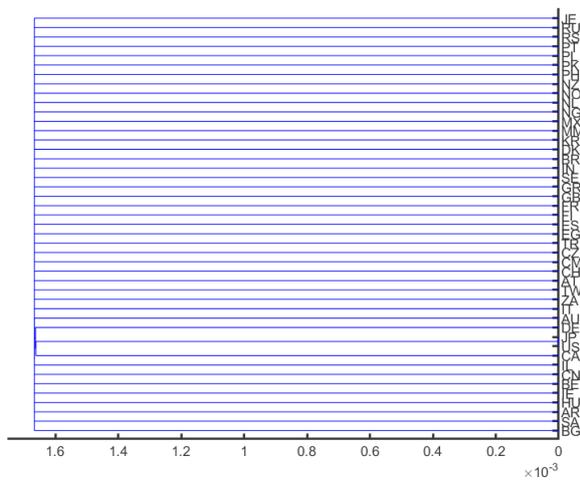
Ces résultats appuient l'idée d'un héritage technologique comme moteur des échanges de connaissances, au-delà des oppositions politiques ou militaires. Ces résultats rappellent qu'aujourd'hui encore, l'Ukraine et la Russie s'opposent avec un arsenal militaire largement hérité de l'union soviétique. De manière plus théorique, ces résultats rappellent également que les citations à l'origine de nos indicateurs constituent bien des flux de connaissances volontaires, sélectifs, et asymétriques sur des données publiques pour lesquelles il n'est pas nécessaire d'obtenir l'approbation de la partie citée (Bassecoulard et Zitt 2004).

Sur la même période, la Chine s'est progressivement intégrée au cœur des flux internationaux. Entre 2010 et 2015, elle rejoint un cluster restreint d'acteurs historiques : les États-Unis, l'Allemagne, la France et le Royaume-Uni. Sur le quinquennat suivant, elle détrône les alliés historiques des États-Unis pour devenir leur premier partenaire intellectuel. Cette interdépendance croissante s'effectue également à contre-courant du contexte de tension politique et économique entre ces deux pays.

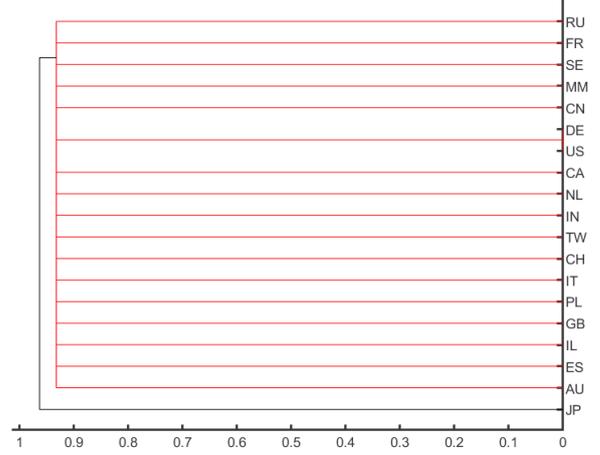
3.2.2 Réseau scientifique

Le clustering sur le réseau de connaissances scientifiques illustré en Figure 3.7 offre un résultat radicalement différent du réseau technologique précédent. Les interdépendances concernent un réseau d'acteurs plus limité, centrés sur les États-Unis. Ces derniers concentrent les interactions les plus fortes sur chaque période de cinq années, avec comme partenaire privilégié successivement l'Allemagne, le Royaume-Uni, la France et l'Australie. Le réseau scientifique apparaît comme monolithique, composé d'un seul bloc homogène présentant peu de structures claires et stables. Les échanges de connaissances n'apparaissent pas guidés par une dimension politique, géographique ou historique. Ainsi, la Russie est intégrée dans le réseau global d'échange de connaissances au même titre que des nations comparables comme l'Italie ou l'Inde. Elle n'entretient aucune relation privilégiée avec sa sphère d'influence. Elle marque cependant un certain isolement sur la dernière période.

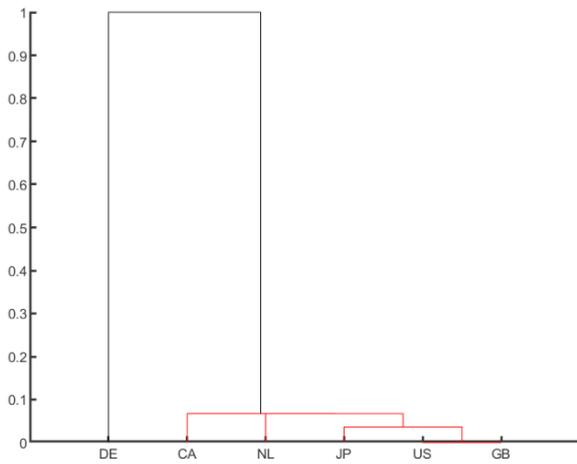
La position des acteurs dans le réseau semble être guidée uniquement par leur capacité à générer un volume important de connaissances scientifiques. Ainsi, les interdépendances scientifiques des acteurs semblent refléter les capacités scientifiques générales des territoires plus qu'une spécialisation industrielle de son SNI dans le domaine de la défense. De ce fait, les structures d'échange de connaissances scientifiques intéressant la défense ne suivent pas les structures technologiques. Cette différence traduit une nature plus neutre de la connaissance scientifique qui est globalement cohérente avec sa conception théorique.



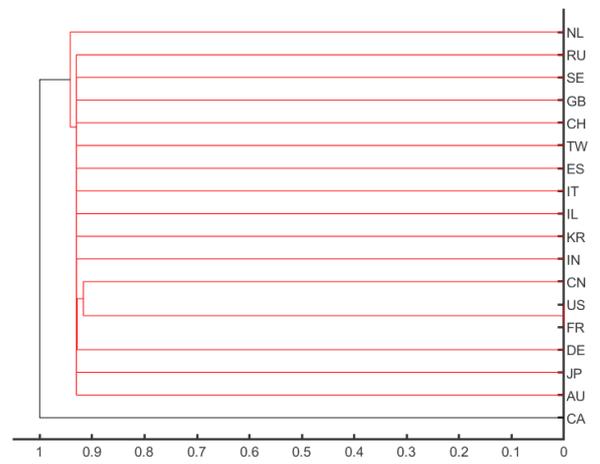
A : [1990 ; 1995[



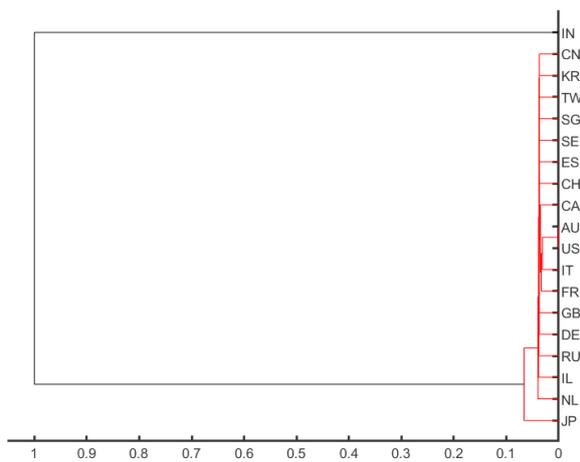
B : [1995 ; 2000[



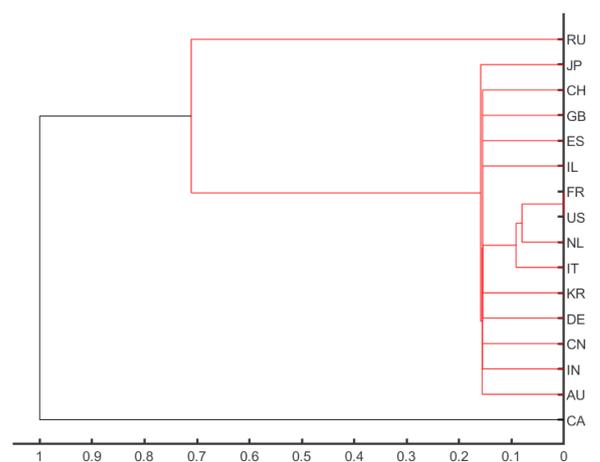
C : [2000 ; 2005 [



D : [2005 ; 2010[



E : [2010 ; 2015[



F : [2015 ; 2020[

Figure 3.7 : Dendrogrammes des clusters d'interdépendances dans les échanges de connaissances scientifiques par période de cinq années.

3.3 Autonomie stratégique

3.3.1 Hiérarchies technologiques

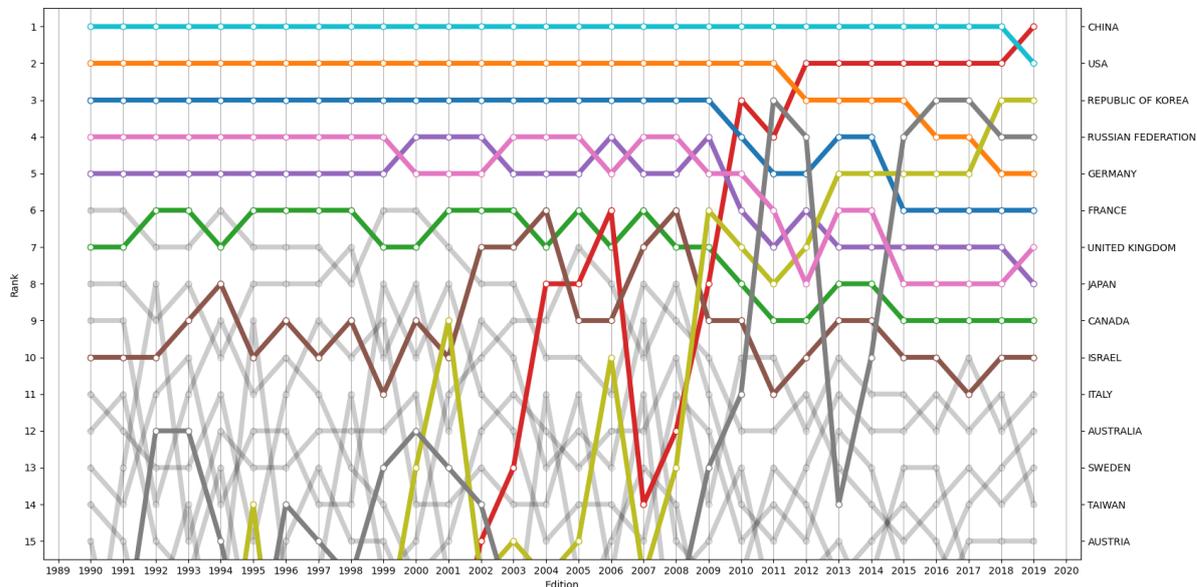


Figure 3.8 : Évolution hiérarchique des scores de TSA pour top 10 mondial, période 1990-2019

Les scores d'autonomies stratégiques technologiques et scientifiques sont compris entre 1×10^{-9} et 1×10^{-1} , aussi, nous représenterons l'évolution des scores obtenus dans des *bump chart* permettant de visualiser les dynamiques de la dominance cognitive mondiale.

Pour rappel, les scores d'AS présentés ici mesurent les capacités autarciques des nations et leurs capacités d'interdépendance, cette dernière regroupant également les dépendances strictes. Ainsi, des nations comme la Chine, la Russie, et la Corée qui accusent une dépendance nette aux connaissances extérieures possèdent tout de même une capacité d'interdépendance élevée. Cette situation provient d'un choix méthodologique de considérer les importations nettes de connaissances comme relevant d'un dépôt accru d'invention et de la consolidation d'une capacité d'absorption. Ces deux phénomènes traduisent ainsi une augmentation des capacités d'innovation favorisant la performance des SID nationaux. Les scores TSA permettent ainsi d'évaluer l'impact global des territoires nationaux sur l'ensemble de la structure en termes de production et d'absorption.

L'évolution hiérarchique illustrée en Figure 3.8 montre dans un premier temps une certaine stabilité. Les années 1990, marquées par le contexte de désescalade militaire post

guerre froide, présente une certaine reproduction de la hiérarchie. Cette dernière est dominée par un bloc atlantiste composé des membres de l'OTAN : États-Unis, Allemagne, France, Royaume-Uni, Canada et Italie ainsi que de leurs alliés historiques comme le Japon ou Israël. Cette hiérarchie respecte globalement celle des performances des SID nationaux décrite par Richard Bitzinger et ses coauteurs en 2011. Elle est également cohérente avec les niveaux d'absorption des connaissances.

De nouveaux acteurs émergent ensuite au début des années 2000 et vont progressivement déplacer le centre de gravité de la diffusion de connaissance technologique mondiale de défense vers l'Asie : la Chine, la Russie et la Corée du Sud. Ces acteurs vont accroître fortement leurs positions autour des années 2010 pour déclasser progressivement les puissances innovantes historiques et atteindre le top 5 des scores de TSA à partir de 2015.

Plus récemment et dans une moindre mesure, d'autres nations ont consolidé un effort d'autonomie stratégique confirmant un déplacement du centre de gravité vers l'est : la Turquie, l'Inde et l'Ukraine. Ces nations oscillaient entre les 25 et 40^{èmes} places mondiales avant 2010 et ont consolidé une position entre les 20^{èmes} et 25^{èmes} places à partir de 2015.

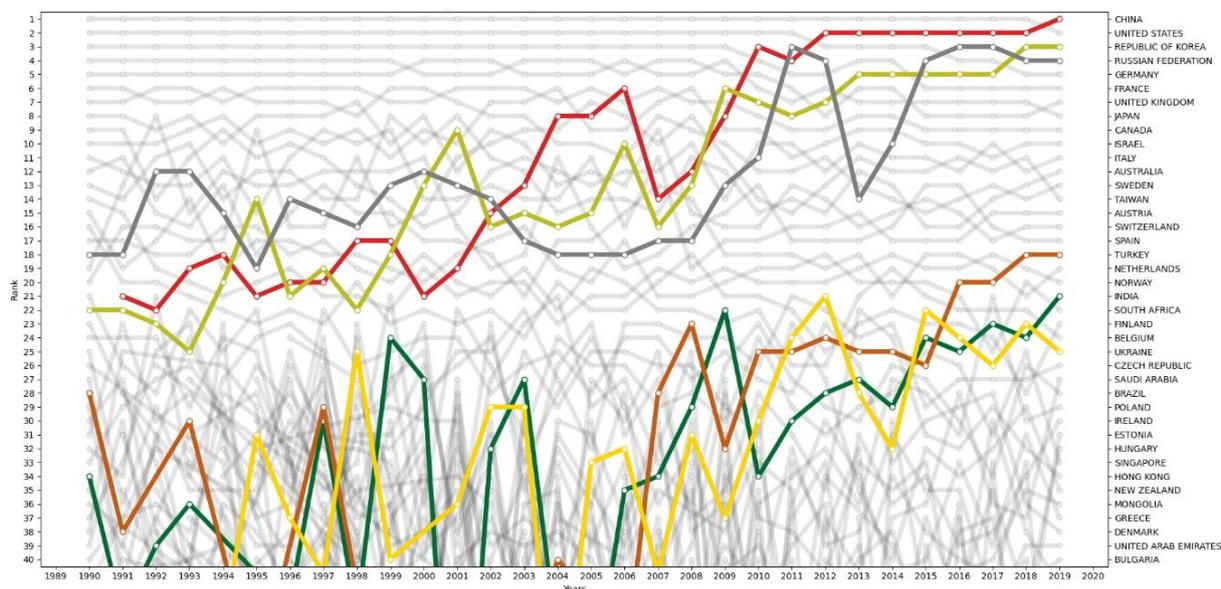


Figure 3.9 : Trajectoires des acteurs émergents dans le top 40 des scores TSA sur 1990-2019

Le bas du classement accuse une évolution bien plus erratique en raison de la faible quantité de connaissances produites et absorbées annuellement par ces acteurs. Ainsi, à l'issue de la période étudiée, plus de 90 territoires nationaux étaient impliqués dans la production et l'assimilation de connaissances technologiques relatives au domaine de la défense. Néanmoins,

une proportion significative de ces nations ne dispose pas d'une capacité d'innovation suffisamment robuste pour soutenir l'opérationnalité d'un SID qui serait, ne serait-ce que partiellement, autonome.

3.3.2 Hiérarchies scientifiques

La hiérarchie des scores d'AS issue des échantillons A_1 et A_2 ne profite pas de la même représentativité que les scores TSA. Le caractère plus erratique des résultats s'explique par les différences théoriques et méthodologiques détaillées dans les parties précédentes. Les connaissances scientifiques sont ainsi moins sujettes à la concurrence, sont plus mobiles et possèdent une dualité importante qui limite fortement la possibilité d'identifier une science de défense. Aussi, ces résultats sont logiquement plus proches de l'impact global des nations sur la sphère scientifique que des spécificités des systèmes d'innovation de défense nationaux (voir par exemple les classements proposés par King 2004; Cimini, Gabrielli, et Labini 2014; Abramo, D'Angelo, et Di Costa 2022). Cette évolution plus erratique peut également être expliquée par la quantité plus faible de données récoltées dans l'échantillonnage scientifique.

Malgré ce caractère erratique, l'évolution de cette hiérarchie depuis la fin de la guerre froide garde un certain nombre de caractéristiques communes avec les observations précédentes sur les données technologiques.

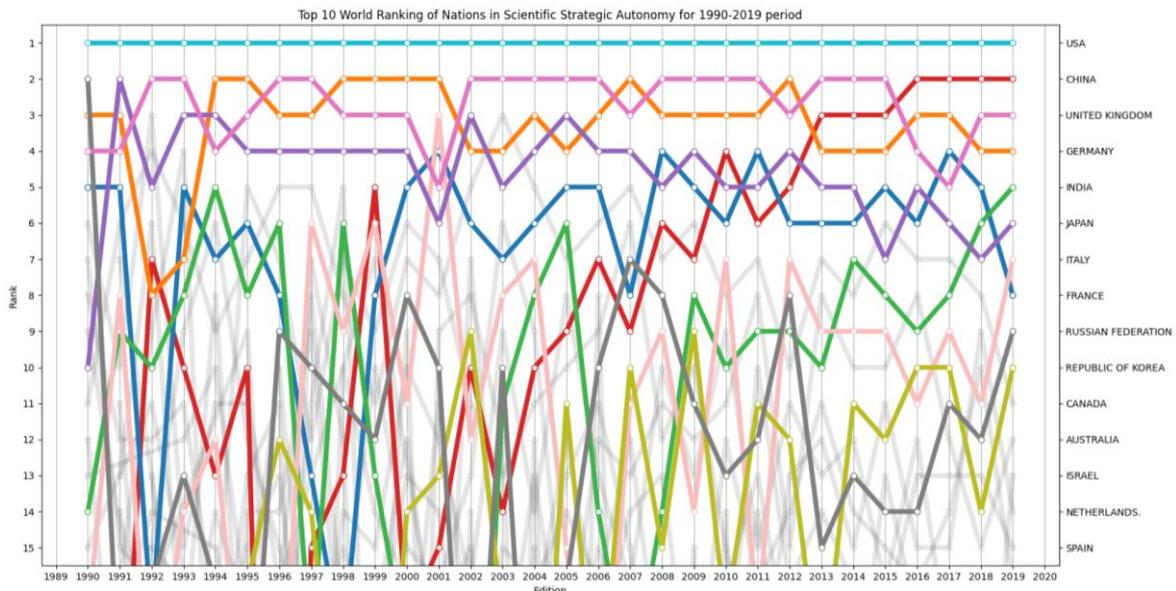


Figure 3.10 : Évolution hiérarchique des scores de SSA pour top 10 mondial, période 1990-2019

Tout d'abord, les États-Unis restent l'acteur le plus autonome au sein du réseau de connaissance. Son autorité intellectuelle sur les sujets scientifiques intéressants la défense est incontestée sur la période. La solidité de ce résultat est cependant limitée par la sur-représentation des articles scientifiques américains au sein de l'échantillon A₁. Plus largement, les scores SSA les plus élevés restent l'apanage d'une poignée d'acteurs en pointe sur l'ensemble des sujets intéressant la défense : les États-Unis, le Royaume-Uni, l'Allemagne et le Japon. Ce peloton de tête est rejoint ponctuellement par la France, le Canada et dans une moindre mesure par l'Inde et l'Italie. Ainsi, la supériorité des membres du bloc atlantiste apparaît comme moins contestée sur le plan scientifique. Cependant, deux nations montrent une progression importante depuis le début des années 2000 : l'Inde et la Chine.

La Chine, tout d'abord, dessine une progression parallèle à celle observée dans le système technologique, à la différence d'une émergence d'environ 3 années plus tardive. Ces efforts, consentis dans la sphère scientifique consolident sa position de principal *challenger* à l'hégémonie américaine sur la création des connaissances. L'Inde, ensuite, consolide une place dans le Top 10 mondial depuis 2009.

Un autre pays accuse des performances scientifiques plus élevées que ne le laissait présager les scores TSA : les Pays-Bas. Ces derniers ont en moyenne 6 rangs TSA en dessous de leur classement SSA, contre 22 pour l'Inde. À l'opposé, un groupe de nations possède des capacités scientifiques structurellement inférieures à leurs capacités technologiques : l'Autriche, la Suède, Taiwan et l'Afrique du Sud. Ces nations accusent une autonomie scientifique entre 6 et 12 rangs inférieurs en moyenne depuis la guerre froide. L'ascension technologique de la Corée du Sud et de la Russie ne s'est accompagnée respectivement que d'une progression modérée et d'une stagnation.

Ainsi, les situations de domination dans le système de connaissance scientifique apparaissent plus contestables, avec un réseau d'acteurs établi plus restreint (mais moins interprétable). Les acteurs figurant dans cette hiérarchie coïncident en grande partie avec ceux présents au sein du top 10 technologique, conférant ainsi une certaine cohérence entre ces deux catégories de réseaux, bien que les mécanismes hiérarchiques en jeu soient distincts. On peut noter l'absence dans les hiérarchies SSA et TSA d'acteurs majeurs comme le Brésil qui malgré une puissance économique comparable à celle de la Russie ou du Canada ne parvient pas à intégrer le top 25 des puissances intellectuelles dans le domaine de la défense.

4 Interprétation

4.1 Evolution post guerre froide

Tout d'abord, les résultats exposés précédemment mettent en lumière l'hégémonie américaine sur les systèmes de connaissances technologiques et scientifiques mondiaux. Ceci traduit l'influence imposante des découvertes et innovations américaines sur les travaux de R&D de défense internationaux ainsi qu'une avance technologique certaine dans le domaine. Ces résultats rejoignent ceux de Lebert et Meunier (2020). La productivité inégalée du système d'innovation américain est cohérente avec les dépenses militaires consenties par la première armée du monde. En 2019, le SIPRI estimait les dépenses militaires totales des États-Unis à plus de 2,5 fois celles de son principal rival : la Chine (SIPRI 2020).

Malgré un financement accru des projets R&D depuis 2012 aux États-Unis ¹³, la Chine semble de plus en plus capable de contester le leadership américain sur le domaine des innovations de défense. Les résultats sur la seconde moitié des années 2010 montrent même des capacités d'absorption et un score de TSA plus importants pour le système de connaissance chinois. Cette supériorité est alimentée par une capacité croissante à intérioriser les connaissances nécessaires à la productivité de son SID, c'est-à-dire à améliorer ses capacités d'autarcie.

Ces résultats sont en accord avec les études existantes qui attribuent l'ascension de la Chine principalement à ses compétences en matière d'imitation et d'adaptation. La Chine apparaît de plus en plus capable d'absorber des connaissances extérieures pour les améliorer, sur la base d'un système d'innovation principalement incrémental, encore peu adapté à la production d'innovations radicales, réellement disruptives (Mayer 2023). Certains considèrent la supériorité américaine comme difficilement contestable à court terme et moyen terme (Gholz et Sapolsky 2021), malgré un certain nombre d'arguments en faveur d'un déclin de la BITD américaine et d'une érosion de sa supériorité technologique (Steinbock 2014). Nos résultats argumentent en ce sens.

Comme nous l'avons vu, la littérature place un certain nombre de facteurs explicatifs à

¹³ https://www.sipri.org/sites/default/files/2022-04/milex_press_release_fre.pdf

la consolidation du système d'innovation défensif d'une nation, parmi lesquels la menace d'un conflit armé et une défaite militaire récente (Sempere 2015) ou encore l'héritage historique et le soutien politique de haut niveau (Cheung 2021). Ces facteurs clefs apparaissent comme particulièrement pertinents au vu des résultats présents sur les Figure 3.8 et Figure 3.9. En effet, chacune des nations ayant consolidé une capacité d'innovation de défense au cours de la période se trouve menacée ou engagée dans un conflit. L'intensité et les motivations géopolitiques d'un conflit pouvant être variée, nous interpréterons les résultats de ces pays à l'aune de la littérature propre à chaque système national d'innovation de défense.

La Chine, en premier lieu, exprime de longue date sa volonté d'étendre sa souveraineté aux territoires de la mer de Chine, méridionale et orientale. Cette volonté de « réunification complète » passe par la mise sous contrôle de Taïwan et d'archipels d'îles placées sous la souveraineté de la Corée du Sud, du Japon et des Philippines. Cette politique soutenue au plus haut niveau de l'État place nécessairement la Chine dans une perspective de conflit avec ses voisins et leur allié américain. De manière plus large, Bitzinger (2016) explique l'effort chinois pour construire une capacité autonome d'innovation de défense par trois facteurs principaux : (i) la recherche d'un *hard power* à la hauteur de son *soft power* économique, politique et culturel, (ii) une volonté de défendre ses intérêts régionaux en mer de Chine et (iii) le maintien d'une pression géopolitique sur Taïwan en vue d'une réunification et une volonté de limiter les capacités d'action des États-Unis dans la zone Indopacifique. Bitzinger et al. (2011) décrivaient le système d'innovation défensif chinois comme relevant d'un niveau 2 dit d'adaptation et de modification au côté d'autres nations émergentes comme l'Inde. Cependant, la Chine montrait déjà en 2011 une progression importante, notamment dans l'aéronautique, laissant présager aux auteurs une intégration prochaine au niveau 1, en tant que pays innovateur nourrissant un avantage technologique. Cette progression peut s'expliquer par le succès du « Programme S&T de défense sur 15 ans » et du « 11^{ème} programme quinquennal de défense » mis en place en 2005-2006 (Cheung 2009). L'arrivée au pouvoir de Xi Jinping constitue également un facteur d'accélération des capacités d'innovation de défense, en témoigne la croissance du budget accordé à la défense qui place la Chine au second rang mondial de la production d'arme ¹⁴. Mayer (2023) propose ainsi de classer la Chine comme un pays de catégorie 1 selon le classement de Bitzinger et al. (2011), nos résultats argumentent en ce sens. Cependant, cet auteur considère que malgré ses efforts d'autosuffisance dans un certain nombre d'industries

¹⁴ <https://www.sipri.org/media/press-release/2020/new-sipri-data-reveals-scale-chinese-arms-industry>

stratégiques, la Chine reste un « *suiveur rapide* » plutôt qu'un innovateur de défense à part entière. Ce constat rejoint une opinion plus générale exprimée à propos du système d'innovation chinois dans son ensemble. La Chine a en effet montré sur une progression très importante depuis trois décennies malgré un système de brevet « peu efficace » (Branstetter, Hanley, et Zhang 2023). La croissance parallèle des capacités d'absorption et d'auto-suffisance chinoise nous permet d'appuyer l'existence d'un système « d'adaptation créative » (Cheung 2021). Cependant les progrès de la Chine dans les domaines scientifiques sous-jacents peut également permettre d'argumenter dans le sens de capacités d'innovation potentiellement plus radicales.

La Russie, ensuite, est engagée depuis 1992 dans une série de conflits post-soviétiques visant à protéger sa souveraineté et sa zone d'influence. Ces conflits prennent place au sein de ses frontières comme en Ossétie du Nord (1992), en Tchétchénie (1994, 1999) ou au Daghestan (1999) ; et au-delà comme en Moldavie (1992) ou en Géorgie (2008). Ces conflits politiques, économiques et militaires opposent des forces favorables à un maintien dans la sphère d'influence russe à des forces favorables à leur émancipation. Le conflit russo-ukrainien débuté en 2014 s'inscrit dans cette lignée. Pour Kashin (2021), la modernisation du système d'innovation de défense russe prend racine dans la sortie des États-Unis du traité *ABM* (*Anti-Ballistic Missile*) en 2002, relevant le niveau de menace perçue par le pays et dans les faiblesses des équipements de défense constatée lors du conflit géorgien en 2008. Pour cet auteur, la période post-2008 marque un tournant dans l'évolution des capacités du système d'innovation de défense russe avec des réformes et des investissements conséquents ayant permis de rétablir une capacité d'intervention efficace en Crimée en 2014 et en Syrie à partir de 2015. Cette période marque également une priorisation des enjeux d'innovation de défense, qui avaient été délaissés sous la présidence de Boris Eltsine et les deux premiers mandats de Vladimir Poutine. Depuis 2011, la Russie a mis en place un programme d'armement massif de l'État. L'industrie de la défense a produit, déployé et mis à niveau de nombreux systèmes en cours de conception depuis les années 1990, mais elle peine toujours à produire des conceptions entièrement nouvelles (Bowen 2020). Entre 2016 et 2020, la Russie a occupé le second rang mondial en termes de volume d'armes exportées. Cependant, le pays échoue à réunir sur son territoire les composants nécessaires à l'élaboration des futures technologies de défenses et accusent des capacités d'innovation plus faible que la Chine et les États-Unis (Mayer 2023). Pour cet auteur, les causes sont multiples, mais concernent principalement une fuite des cerveaux et un contrôle important de l'industrie par l'État freinant l'incorporation des connaissances civiles. Nos résultats illustrent, effectivement, une performance du SDI russe plus faible que la Chine ou les

États-Unis. Ce pays accuse une absorption croissante de connaissances extérieures couplées avec une capacité autarcique en progression appuyant l'idée d'un régime d'adaptation des connaissances extérieures plus que d'un système capable d'innover à la frontière technologique. Cependant, la Russie possède des capacités scientifiques non négligeables et un héritage historique très important sur les domaines militaires et aérospatiaux. Ces capacités lui permettent de rester un acteur déployant un régime avancé d'innovation (Bitzinger et al. 2011; Cheung 2021).

La Corée du Sud, ensuite, est engagée depuis sa création en 1950 dans un conflit contre son rival nord-coréen. Ce conflit d'intensité variable a cependant franchi une étape notable dans la seconde moitié des années 2000 lorsque la Corée du Nord est devenue une puissance nucléaire confirmée. La progression régulière de la Corée du Nord dans la puissance et la portée de son arsenal nucléaire fait peser une menace constante sur la défense sud-coréenne. À cette menace, s'ajoutent les incursions extraterritoriales chinoises déjà mentionnées. Pour Raska et al. (2016) l'amélioration des capacités sud-coréennes d'innovation de défense post-guerre froide tient à 5 tendances stratégiques majeures : (i) l'élargissement de l'éventail des menaces nord-coréennes ; (ii) l'évolution des stratégies américaines et du dispositif militaire régional ; (iii) la montée en puissance de la Chine ; (iv) l'évolution du tissu sociopolitique de la Corée du Sud en raison de l'amélioration des conditions économiques ; et (v) les changements ultérieurs dans la dynamique politique et sécuritaire de l'alliance entre les États-Unis et la République de Corée. Pour ces auteurs, les facteurs influençant la trajectoire de l'innovation du pays sont donc les menaces externes de la Chine et de la Corée du Nord, les facteurs internes de développement économique et social et l'évolution du partenariat de défense l'unissant aux États-Unis. La stratégie de défense sud-coréenne établie en 2005 dans *Defense Reform Plan 2020 (DRP 20)* prévoit ainsi le développement d'une capacité de défense autonome en partenariat avec les États-Unis afin de permettre un désengagement progressif de ces derniers. Ce plan prévoit le développement d'une force défensive intensivement technologique pour faire face à une baisse des effectifs de l'armée, basée sur des prévisions démographiques. L'appui technologique américain, de même que l'impératif de développer une défense à forte composante technologique face aux menaces nord-coréennes et chinoises, apparaît cohérent avec la trajectoire mise en évidence par nos résultats.

L'Inde est également impliquée dans un ancien conflit opposant ses principaux voisins : la Chine et le Pakistan. Ces tensions se concentrent sur la région du Cachemire sur laquelle les

trois nations tentent d'imposer leur souveraineté. Ce conflit est une source constante de tensions militaires et diplomatiques, ces trois nations étant chacune dotées de l'arme nucléaire. À l'instar de la Chine, l'Inde nourrit de longue date l'ambition de bâtir une BITD autonome capable d'équiper sa défense en innovations de pointe. L'objectif fixé dans les années 1990 était d'accroître l'index d'auto-suffisance de 30% à 70% d'ici 2005. Entre 2006 et 2011, ce score était compris entre 36 et 48% et il n'a pas significativement augmenté depuis (Behera 2018). Cet auteur considère l'innovation de défense indienne comme étant en « mauvais état », et les investissements de ressources comme sous-optimaux. Il désigne cinq facteurs structureaux à cet échec : (i) le manque de productivité des programmes de R&D et de l'appareil industriel, (ii) le sous-investissement structurel en R&D, (iii) la mauvaise gestion des ressources humaines, (iv) un faible soutien des leaders politiques et, (v) des tensions internes dans les structures et processus d'acquisition. Il établit un lien direct entre l'inefficacité du système d'innovation défensif indien et une dépendance aux importations étrangères. Bien que ces importations d'armes aient diminué de 21% sur la période 2017-2021 par rapport à 2012-2016, le pays restait en 2021 le premier importateur d'arme au monde¹⁵. Bitzinger (2014) dresse un constat comparable des ambitions ratées du géant Indien dans le domaine des innovations de défense. Pour lui, cette « histoire ininterrompue d'échecs spectaculaires » (p.4) provient d'un poids étatique trop important, politiquement conservateur et prônant une doctrine protectionniste empêchant la BITD indienne de s'ouvrir et de se moderniser. Il désigne également un manque de gouvernance dans le domaine, laissant place à la corruption et au népotisme. Ce constat est partagé par Mohanty (2014) qui qualifie les performances indiennes de « spectacle désastreux » malgré l'existence de « poches d'excellence ». Nos résultats montrent effectivement un retard considérable de cette puissance économique de premier plan, qui, malgré des ambitions de longue date, n'a jamais réussi à intégrer le top 20 des nations les plus autonomes dans le domaine des technologies de défense. Le fait que l'Inde soit la seule nation à posséder des capacités scientifiques de premier plan sans pour autant posséder des capacités d'innovation de défense parmi le top 20 mondial argumente dans le sens d'un dysfonctionnement spécifique de la BITD indienne plus que d'une sous-performance structurelle du système d'innovation indien dans son ensemble. Cependant, l'Inde accuse depuis 2010 une progression constante qui relativise la morosité des prévisions issues de la littérature.

La Turquie est également impliquée dans un nombre important de conflits. À l'extérieur

¹⁵ https://www.sipri.org/sites/default/files/2022-03/sipri_at_press_release_fre.pdf

de ses frontières tout d'abord, avec le conflit séculaire l'opposant à la Grèce pour la souveraineté de certaines îles de mer Égée. En Syrie, en Irak et en Afghanistan ensuite, où la Turquie est activement impliquée dans la lutte contre le terrorisme islamique depuis plus de 20 ans. Enfin, cette nation lutte au sein de ses frontières contre les forces armées indépendantistes kurdes. De son côté, l'Ukraine est victime des menaces russes sur sa souveraineté depuis au moins 2013 et le mouvement Euromaïdan. Ces menaces sont devenues un conflit ouvert en 2014 et un conflit à haute intensité en 2022. Ces deux pays ne profitent cependant pas d'une attention suffisante de la part de la littérature en innovation de défense pour pouvoir contextualiser nos résultats.

Ainsi, l'émergence de ces nouveaux acteurs peut être interprétée comme résultant de territoires impliqués dans des conflits ou exposés à des menaces à leurs frontières, profitant d'un soutien politique important et d'un contexte économique et historique favorable.

Cependant, d'autres nations réunissant ces caractéristiques n'ont montré qu'une faible progression ou une stagnation hiérarchique depuis la fin de la guerre froide. C'est le cas par exemple d'Israël qui a maintenu ses capacités autour du 10^{ème} rang mondial. C'est également le cas de Taïwan qui accuse une progression réduite, de la 20^{ème} place en 1990 à la 8^{ème} en 2005 avant de redescendre progressivement à la 14^{ème} place en 2019. Israël, tout d'abord, possède une culture stratégique marquée par une « mentalité de siège » qui met l'accent sur le maintien d'un avantage technologique qualitatif pour compenser le surnombre réel ou fantasmé de ses adversaires potentiels (Bitzinger 2018). L'intensité constante de la menace émanant des territoires voisins depuis 1990 ainsi que le maintien d'une supériorité technologique stable face à cette menace peut expliquer la relative stagnation du système d'innovation de défense israélien.

Taiwan ensuite, est capable d'assurer 50% de ses besoins futurs en innovation de défense, mais dépend encore beaucoup des partenaires étrangers dans l'élaboration et la production de systèmes d'armes. Cette dépendance est très largement tournée vers les États-Unis, dont l'aide est jugée irrégulière, mais également vers l'Europe (An, Schrader, et Collins-Chase 2018). Taiwan est particulièrement dépendant des États-Unis pour les technologies les plus complexes. Consciente de sa dépendance, de la menace croissante de la Chine et des besoins de sa population vieillissante (Ferry 2016), Taipei exprime une volonté forte de développer une industrie de défense autosuffisante depuis le retour au pouvoir des démocrates progressistes (Democratic Progressive Party 2015) en 2016. Ces derniers étant moins

favorables au *statu quo* et à la négociation avec Pékin que le parti historique du Kuomintang (Le Pesant 2013). Malgré ce regain de volonté politique, la nécessité croissante de se prémunir contre une invasion chinoise et des capacités économiques importantes, Taiwan n'accuse pas de progrès significatif dans la course mondiale à l'innovation de défense depuis 2010.

Les pays émergents détrônent des nations dont la souveraineté territoriale n'a pas été significativement menacée depuis 2010, et plus généralement des puissances économiques peu soumises aux conflits à leurs frontières sur la période comme la France et le Royaume-Uni.

Les puissances européennes font face depuis les années 1990 à une perte préoccupante d'efficacité en matière d'innovation de défense (Bellais 2018). Bien que le financement et les résultats des projets R&D défense soient substantiel à l'échelle des États, la stagnation globale des budgets (Dupuy 2013) et l'absence de mutualisation au niveau européen rend difficile l'accomplissement de projets nécessitant des effets de seuil. Cette situation aboutit à la multiplication de projets R&D sur des sujets similaires. Comme le souligne Briani (2013), l'Europe conduit simultanément 2 à 3 fois plus de projets R&D par type d'arme que les États-Unis pour un budget moitié moindre. Cet auteur avance le coût de la non-collaboration européenne sur le sujet à plus de 120 milliards d'euros par an. Pour ces auteurs, le maintien de la supériorité technologique des nations européennes à moyen et long terme passe par la mise en communauté des efforts de R&D aussi bien que des débouchés, sur un marché européen de la défense. L'absence de menace directe à leur souveraineté et l'atomicité des projets de R&D peuvent expliquer la relative stagnation de l'autorité intellectuelle des puissances européennes comme la France, l'Allemagne ou le Royaume-Uni dans le domaine des innovations de défense. Cette situation pourrait cependant changer avec la reprise à la hausse des budgets de défense en 2015. Cette nouvelle attitude découle de la prise de conscience des menaces terroristes et de l'insécurité accrue des États européens (Matelly et Lima 2016). À titre d'exemple, la Suède représentait la 6^{ème} puissance cognitive mondiale en 1999 avant d'être rapidement déclassée après la libéralisation de son économie de défense. La période 1990-2014 marque pour ce pays une période de « *réductions et d'ambitions moindres en matière de capacités de défense* » (Lundmark 2018, p.6). Le pays montre une volonté de redynamiser ses capacités en réponse à la « posture d'agressivité » de la Russie sur son voisin ukrainien depuis 2014. Nos résultats montrent que ce changement de posture correspond à un arrêt du déclassement suédois et une stabilisation autour du 13^{ème} rang mondial sans pour autant marquer un réel retour du pays dans la course mondiale.

Le système d'innovation de défense japonais est quant à lui limité par une constitution « pacifiste » issue d'une doctrine politique historiquement opposée à la constitution d'une force armée. Depuis la Seconde Guerre mondiale, le Japon est limité constitutionnellement à l'élaboration d'une force purement défensive, il limite ses dépenses militaires sous la barre symbolique des 1% et interdit en principe la vente d'armes à l'étranger. La BITD japonaise est ainsi largement limitée dans ses débouchés et évolue sur un marché en situation de monopsonie. Bien que limitées politiquement, les capacités d'innovation japonaises sont portées par la puissance économique, technologique et scientifique du pays qui figure parmi les premières puissances innovantes du monde. Le Japon s'est ainsi maintenu dans le Top 5 des scores de TSA mondiaux jusqu'en 2009. Malgré une volonté affichée de faire face à la menace croissante que constituent les progrès balistiques nord-coréens et l'armement croissant de la Chine, le Japon ne semble pas avoir réussi à améliorer sensiblement ses capacités d'innovation de défense et reste déclassé autour de la 7^{ème} place sur la période 2009-2019. Cette situation est cependant susceptible de changer dans les prochaines années. En effet, en 2021, ce pays a opéré un tournant stratégique en se détachant de sa doctrine pacifiste historique. Ceci a pour principale conséquence une augmentation de son budget défense au-delà du plafond de 1% de son PIB qu'il s'imposait jusqu'alors¹⁶.

Une situation durable de paix ainsi que l'absence de soutien politique et financier sont également invoquées par de Melo (2015) pour expliquer le retard important de la BITD brésilienne sur le marché mondial des innovations de défense. Nos résultats illustrent effectivement l'absence de cette puissance économique de premier plan du top 25 mondial. Cette absence de résultat peut être liée à un système national d'innovation considéré comme globalement inefficace (Bakhtiar et al. 2021).

En résumé, nos résultats montrent une forte adéquation entre les dynamiques géopolitiques des territoires nationaux et l'évolution de la structure de diffusion des connaissances intéressants la défense. Ceci illustre une certaine cohérence entre nos résultats et les monographies des SID faites par la littérature. Notre interprétation place l'innovation de défense des nations à l'intersection d'une capacité économique et cognitive, d'une volonté politique et d'une nécessité géostratégique en adéquation avec le cadre conceptuel de Cheung (2021).

¹⁶ P. Mesmer, "Le Japon prêt à doubler ses dépenses de défense," *Le Monde*, 26 nov. 2021.

4.2 Interprétations théoriques

De manière plus théorique, nos résultats illustrent une différence importante dans la circulation des connaissances technologiques et scientifiques. En effet, les clusters d'interdépendances observés au sein du réseau global de connaissances technologiques ne possèdent pas d'équivalent au niveau scientifique.

Ce constat argumente dans le sens d'une mobilité réduite des connaissances technologiques, pour lesquelles il est nécessaire d'entretenir une certaine proximité, qu'elle soit géographique, institutionnelle, sociale, organisationnelle ou cognitive (Boschma 2005). Cela rejoint l'interprétation faite par Bellais et Guichard à propos des transferts de connaissances entre les domaines civils et militaires : « *le transfert de technologie ne consiste pas à distribuer une « boîte » de connaissances, facilement utilisable par la partie réceptrice, mais il exige au contraire un effort conjoint important de la part des deux parties. Ce besoin de collaboration, et donc de consentement, souligne la nature tacite des connaissances en question et soulève la nécessité de relations de collaboration avec la nation dont les connaissances doivent être absorbées* » (Bellais et Guichard 2006, p.285). Ainsi, les acteurs membres d'une même alliance politico-militaire telle que l'OTAN ou l'OTSC (Organisation du Traité de Sécurité Collective) possèdent des possibilités accrues d'échange et de collaboration. La proximité permise par le jeu des alliances géopolitiques peut se déployer au niveau organisationnel par l'adhésion des acteurs à un même réseau de fournisseurs ou de clients. On peut également postuler que le partage historique d'une BITD commune au sein du bloc soviétique ait maintenu une certaine proximité cognitive dans les bases de connaissances des différents territoires qui en sont issus. À ces différentes formes de proximité s'ajoute une proximité géographique évidente dans le cas de l'ancien bloc soviétique. Ainsi, le maintien d'une certaine bipolarité dans la structure globale des connaissances technologiques en matière de défense peut s'expliquer par la persistance de différentes formes de proximités encourageant la collaboration entre acteurs bien après la fin de l'URSS. Cette interprétation est renforcée par le fait que les pays de l'ancien bloc de l'Est ont historiquement été isolés sur les plans scientifique et technique, et ont donc été moins réceptifs aux influences étrangères. En contraste, les SNI nord-américains ont une histoire de plus grande ouverture aux influences extérieures (Niosi et Bellon 1994).

Une interprétation complémentaire tient compte de la normalisation de l'industrie de défense. Dans la mesure où les connaissances relatives aux technologies à usage militaire se diffusent de manière analogue aux connaissances civiles (Schmid 2017), les flux de connaissances technologiques sont susceptibles d'être affectés par la structure mondiale du

commerce international (Sjöholm 1996; Fracasso et Vittucci Marzetti 2015). Nos résultats peuvent ainsi être interprétés comme la conséquence d'un commerce international dans l'ancien bloc de l'Est centré autour de la Russie. Cependant, si la Russie constitue l'un des principaux partenaires commerciaux des anciens territoires du bloc de l'Est, ces derniers entretiennent également des liens commerciaux importants avec d'autres pays européens. Un certain nombre de contre-exemples limitent également cette interprétation. Par exemple, la Russie et l'Ukraine ont intensifié leurs interdépendances cognitives sur la décennie 2010 alors même que leur volume d'échanges commerciaux a très largement diminué sur la période ¹⁷.

Le caractère plus homogène de la structure des échanges de connaissances scientifiques peut être interprété comme le reflet du caractère plus fondamental, codifié et universel de la connaissance scientifique. Celle-ci apparaît comme moins dépendante du contexte géopolitique et historique des acteurs en présence. Cette interprétation rejoint les propos de Niosi et Bellon pour qui « [l]a coopération et les flux scientifiques internationaux sont plus intenses que les flux technologiques et reflètent la nature désincarnée de la connaissance pure, le soutien gouvernemental à l'internationalisation et la création scientifique au sein d'institutions essentiellement publiques ou quasi-publiques » (Niosi et Bellon 1994, p.190). Nos résultats apparaissent cohérents avec les conclusions de Patel et Pavitt (2000), selon qui l'internationalisation des processus de R&D est plus importante dans les domaines scientifiques. Pour les auteurs, ce phénomène s'explique par un déséquilibre croissant entre ce que la base scientifique nationale a à offrir et les exigences du système technologique. Ce phénomène force ainsi les entreprises à se lier à des entreprises étrangères.

Ce résultat rejoint également les observations faites par l'analyse des déplacements d'auteurs-inventeurs très influents. Lorsqu'un individu ayant déposé des brevets d'invention et des articles scientifiques change de territoire, ce déplacement est plus susceptible d'affecter négativement les citations reçues par ses brevets, que les références faites à ses productions académiques. Ce résultat suggère également que les interactions en face-à-face sont cruciales pour le transfert de connaissances dans la sphère technologique (Azoulay, Zivin, et Sampat 2011). Plus globalement, l'étude géographique des *spillovers* montre une diffusion des connaissances scientifiques moins entravée par des « effets frontières » et par la distance géographique (Belenzon et Schankerman 2013b).

¹⁷ Source : Atlas de la complexité économique, <https://atlas.cid.harvard.edu/explore>

Cependant, les connaissances scientifiques ne sont pas désincarnées et sont influencées par le déplacement des chercheurs (Azoulay, Zivin, et Sampat 2011; Ganguli 2015). Les flux de connaissances et les collaborations scientifiques sont également affectés négativement par la distance géographique et sont soumis dans leur diffusion à un effet de seuil au niveau des frontières nationales (Pan, Kaski, et Fortunato 2012). De plus amples recherches sont ainsi nécessaires pour conclure solidement à une dichotomie dans la structure de diffusion des connaissances scientifiques et technologiques en matière de défense.

Conclusion

Ce chapitre développe une approche structurale permettant de décrire et de comparer l'évolution des réseaux globaux de connaissances scientifiques et technologiques en matière de défense depuis la fin de la guerre froide. Nos résultats illustrent un volume croissant d'échanges de connaissances entre territoires nationaux. Les États-Unis dominent largement ces échanges en tant que principal émetteur et récepteur de flux de connaissances. Nos résultats illustrent également l'ascension de nouveaux acteurs émergents : la Chine, la Russie et la Corée du Sud. Ces acteurs profitent de capacités d'absorption importantes dirigées vers les connaissances nord-américaines et européennes. Ces capacités d'absorption ont permis à ces acteurs de mettre fin à un certain isolement et de s'intégrer au cœur des échanges mondiaux de connaissances. Dans le cas de la Chine, nos résultats vont dans le sens de la littérature qui considère son système d'innovation de défense comme relevant d'un « régime de rattrapage rapide » (Cheung 2021) ou d'une capacité de « suiveur rapide » (Bitzinger et al. 2011; Mayer 2023).

Les interdépendances fortes liées entre les systèmes d'innovation des acteurs émergents et des acteurs occidentaux historiques, en particulier les membres de l'OTAN, mettent en question la crédibilité d'une menace associée à un coût d'accès plus élevé aux connaissances stratégiques russes et chinoises. En d'autres termes, les réseaux de connaissances nationaux sont largement intégrés au sein d'un réseau global encore dominé par les acteurs occidentaux, les États-Unis en tête. Cette situation rend difficile pour des pays comme la Russie et la Chine de s'émanciper complètement des systèmes occidentaux en matière de sciences et de propriété intellectuelle. Cette intégration au sein d'un réseau mondial influence négativement leurs propres efforts pour développer un système d'innovation autonome dans le secteur de la défense. En somme, nos résultats montrent que les ambitions de la Russie et de la Chine pour l'indépendance en matière de connaissances stratégiques et d'innovation évoquées en introduction sont compromises par leur intégration dans des structures largement dominées par les acteurs occidentaux.

Également, l'évolution des capacités de production de connaissances intéressant la défense peut s'interpréter à l'aune des monographies des SID et SNI des différentes nations impliquées. Autrement dit, les flux de connaissances tels que nous les avons mesurés dans ce chapitre reflètent globalement les incitations économiques, politiques et stratégiques présentes au sein des territoires des principales puissances mondiales. Nous introduisons ainsi une

première approche quantitative permettant de compléter les études qualitatives et les avis d'expert documentant les monographies territoriales sur la production d'innovations de défense.

De manière plus théorique, nos résultats illustrent une structure de diffusion des connaissances technologiques un temps dominée par une bipolarité héritée de la guerre froide. La dilution de cette structure au sein d'un cluster unique regroupant les principaux acteurs mondiaux est concomitante avec l'émergence de la Chine et de la Russie au cours de la décennie 2010. L'existence de cette structure peut être interprétée comme la persistance d'une certaine forme de proximité entre les acteurs des différents systèmes d'innovation de défense issus de l'ancien bloc soviétique. Cette interprétation est renforcée par le caractère relativement isolé de l'ancien système d'innovation soviétique (Niosi et Bellon 1994).

L'absence de structure bipolaire au sein du réseau global de connaissances scientifiques argumente dans le sens d'une connaissance scientifique plus fondamentale, codifiée et universelle, moins dépendante de la proximité entre acteurs. Les flux de connaissances scientifiques apparaissent ainsi plus « neutres » au niveau global, moins influencé par la structure des alliances géopolitiques et du commerce international. Nos résultats ne nous permettent cependant pas d'argumenter solidement en faveur de cette interprétation et sont largement soumis aux résultats de recherches ultérieures plus approfondies.

Annexes

Annexe A : liste des technologies sélectionnées

Table 3.2 : liste des IPC militaires (Acosta et al. 2011)

Code IPC militaire pur :	4-digits	8-digits
Armes	F41A, B, C, F, G, H et J	tous
Munitions	F42B, C et D	tous
Code IPC duaux		
Articles de campement à usage militaire	A45F	3/06
Figurines permettant des exercices militaires	A63H	13/08
Substances de guerre chimique	A62D	101/02
Dispositions offensives ou défensives sur les navires	B63G	tous
Disposition d'éjection d'explosif, de bombes et support d'armement pour avion	B64D	1/04, 1/06, 7/00
Abris anti-bombe, balistique, nucléaire etc.	E04H	9/04
Porte et fenêtre pour abris	E06B	5/10

Table 3.3 : liste des IPC aérospatiaux (Fauconnet et al. 2018, OST28)

Code IPC	4-digits	8-digits
Astronautique, véhicules ou équipements à cet effet.	B64G	tous
Compositions explosives ou thermiques, leur fabrication, emploi d'une substance, utilisée seule, comme explosif.	C06B	tous
Dispositifs détonants ou d'amorçage, cordons ou mèches, allumeurs chimiques, compositions pyrophoriques.	C06C	tous
Moyens pour produire de la fumée ou du brouillard, compositions pour gaz de combat, production de gaz pour le sautage ou la propulsion.	C06D	tous
Allumettes, fabrication des allumettes	C06F	tous

Annexe B : liste des codes pays sélectionnables

Table 3.4 : Tableau de correspondance de la norme ISO 3166-1

Code ISO	Pays	Code ISO	Pays	Code ISO	Pays	Code ISO	Pays
AD	Andorra	ET	Ethiopia	LR	Liberia	SL	Sierra Leone
AE	United Arab Emirates	FI	Finland	LT	Lithuania	ST	Sao Tome & Principe
AL	Albania	FO	Faroe Islands	LU	Luxembourg	SV	El Salvador
AM	Armenia	FR	France	LV	Latvia	SY	Syrian Arab Republic
AN	Netherlands Antilles	GB	United Kingdom (Great Britain)	LY	Libyan Arab Jamahiriya	SZ	Swaziland
AR	Argentina	GE	Georgia	MA	Morocco	TC	Turks & Caicos Islands
AT	Austria	GH	Ghana	MC	Monaco	TD	Chad
AU	Australia	GI	Gibraltar	MD	Moldova Republic of	TG	Togo
AZ	Azerbaijan	GN	Guinea	MG	Madagascar	TH	Thailand
BA	Bosnia and Herzegovina	GR	Greece	ML	Mali	TJ	Tajikistan
BB	Barbados	GT	Guatemala	MN	Mongolia	TM	Turkmenistan
BE	Belgium	GU	Guam	MO	Macau	TN	Tunisia
BG	Bulgaria	GY	Guyana	MR	Mauritania	TR	Turkey
BH	Bahrain	HK	Hong Kong	MT	Malta	TT	Trinidad & Tobago
BJ	Benin	HR	Croatia	MU	Mauritius	TW	Taiwan Province of China
BM	Bermuda	HT	Haiti	MX	Mexico	TZ	Tanzania United Republic of
BR	Brazil	HU	Hungary	MY	Malaysia	UA	Ukraine
BS	Bahama	ID	Indonesia	NC	New Caledonia	US	United States of America
BY	Belarus	IE	Ireland	NG	Nigeria	UY	Uruguay
CA	Canada	IL	Israel	NL	Netherlands	UZ	Uzbekistan
CG	Congo	IN	India	NO	Norway	VA	Vatican City State (Holy See)
CH	Switzerland	IQ	Iraq	NZ	New Zealand	VE	Venezuela
CI	Côte D'ivoire (Ivory Coast)	IR	Islamic Republic of Iran	OM	Oman	VG	British Virgin Islands
CL	Chile	IS	Iceland	PA	Panama	VI	United States Virgin Islands
CN	China	IT	Italy	PE	Peru	VN	Viet Nam
CO	Colombia	JM	Jamaica	PG	Papua New Guinea	ZA	South Africa
CR	Costa Rica	JO	Jordan	PH	Philippines	ZM	Zambia
CS	Czechoslovakia (no longer exists)	JP	Japan	PK	Pakistan	ZW	Zimbabwe
CU	Cuba	KE	Kenya	PL	Poland		
CV	Cape Verde	KG	Kyrgyzstan	PR	Puerto Rico		
CY	Cyprus	KN	St. Kitts and Nevis	PT	Portugal		
CZ	Czech Republic	KP	Korea Democratic People's Republic of	QA	Qatar		
DE	Germany	KR	Korea Republic of	RO	Romania		
DK	Denmark	KW	Kuwait	RU	Russian Federation		
DO	Dominican Republic	KY	Cayman Islands	SA	Saudi Arabia		
DZ	Algeria	KZ	Kazakhstan	SD	Sudan		
EC	Ecuador	LA	Lao People's Democratic Republic	SE	Sweden		
EE	Estonia	LB	Lebanon	SG	Singapore		
EG	Egypt	LI	Liechtenstein	SI	Slovenia		
ES	Spain	LK	Sri Lanka	SK	Slovakia		

Chapter 4 :

Tacit Influence in the Science-Technology Relationship: A Comparison of Citation- and Semantic-Based Indicators in Identifying Technologically Relevant Papers

This chapter develops the preliminary paper presented in the following communication :
Vernhes G., Fauconnet C. and Sternberger C. 2022 « Identify technologically relevant paper
for 3D printing: a comparison of indicators based on scientific and patent data », *EPIP 2022*,
2022 September, Cambridge. United Kingdom.

Abstract

Identifying which scientific advances support technological innovation is a dynamic area of study. Various methods have been developed to assess the technological relevance of scientific articles. Each of them is grounded in a specific conception of the science and technology (S&T) link. This study focuses on contrasting the effects of an explicit S&T relationship, quantified through a collection of citations that are voluntary, linear and asymmetrical, with an implicit relationship quantified by semantic proximity, which is reciprocal and achronic. These two complementary perspectives facilitate a comparison between a hierarchical and linear vision of knowledge maturation and a co-evolving epistemic structure. To this end, we use two innovative indicators from recent literature. On the one hand, citation-based indicators measure co-references between a paper and recently filed patents, as proposed by Yamashita (2020). On the other hand, one semantic indicator, based on natural language processing of abstracts and titles from papers and patents, as developed by Arts, Hou, and Gomez (2021). This comparative analysis utilizes both the negative binomial regression model and its zero-inflated variant for consolidation. The findings, pertaining to the case study of 3D printing development, indicate that each indicator independently and effectively explains forward scientific references in patents, with minimal overlap. This suggests a complementary relationship between the two measures, with semantic proximity capturing implicit interactions that may be obscured by social and temporal biases inherent in the citation process (MacRoberts and MacRoberts 1989; Narin, Hamilton, and Olivastro 1997; Bassecoulard and Zitt 2004; Larivière and Gingras 2010). Additionally, our approach determines the regional effect which distinguishes each indicator's ability to explain future knowledge flows from science to technology. North American articles demonstrate a higher capacity to be explained by citation effects, while European articles show a balanced influence of the two indicators.

Introduction

In recent decades, the scientific community has faced an increasing number of publications. On the one hand, such democratization of scientific publication illustrates a great expansion of knowledge development in our modern societies. On the other hand, sorting and assimilating such a large amount of knowledge is a challenge that is becoming increasingly difficult to face. Scientific research and technological development have to deal with this excess of publication (Davidson et al. 1998) to find key information. Accordingly, a significant number of scientific papers will not be cited in future scientific works : estimations range from 10% (de Solla Price 1965b) to 74% (Schwartz 1997) depending on field and time period (Nicolaisen and Frandsen 2019).

The same phenomenon takes place with scientific references in patent literature. Citations from inventors and examiners are focused on a limited number of papers. Veugelers and Wang (2016) showed that only 10% of papers in the WoS database are cited as prior work in patent literature, and that these citations are concentrated in emerging scientific fields. This estimate of papers referenced in patent literature was even revised downward to between 3% and 4% by van Raan (2017). Nevertheless, most articles can still be linked to future technologies through indirect citations. The large-scale data analysis by Ahmadpoor and Jones (2017) has shown that most research articles (80%) link forward to a future patent through 2 to 4 indirect citations.

This concentration of technological interest in science has been measured by previous research by Narin, Hamilton and Olivastro (1997) who showed that scientific references in patents are mostly published in influential journals by prestigious laboratories and universities funded by public institutions. These results suggest that science referenced by inventors is subject to similar biases as science referenced by scientists. Such a phenomenon of prestigious attraction is called “cumulative advantages” (de Solla Price 1965b; 1976), “Matthew Effect” (Merton 1968) or “preferential attachment” (Barabási and Albert 1999) and is liable for focussing citations towards the most visible scientific sources, to the detriment of sources that are genuinely useful to the invention's development. It is therefore easy to hypothesize that some technologically relevant scientific articles are cited late or are not cited at all due to the lack of impact of their publication or the reputation of their laboratory, regardless of their content. Meanwhile, some papers are cited for preferential attachment and prestigious attraction despite

the fact that they did not bring key insight to invention development.

Despite this limitation, innovation economics has developed several methods to assist researchers and inventors in identifying the research frontier from the vast stream of publications. Citations are commonly used to estimate the value of research documents. This approach is based on the assumption that if a paper receives a lot of citations from peers and inventors, it is supposed to signify that it provides great insights for key issues. The researcher's h-index is based on the same assumption. Citation-based methods to identify valuable papers have shown strong results (Looy, Magerman, and Debackere 2007; Shibata et al. 2008; Boyack and Klavans 2010; Yamashita 2020), but they seem to have reached certain limits. Beyond the effect of cumulative advantages, we note the influence of patent examiners (Meyer 2000), the differences between in-text and front-page references (Verberne, Chios and Wang 2019), as well as the limits related to citation phenomena, including, among others, heterogeneous motivations for citations (Chubin and Moitra 1975), uncited informal influence (MacRoberts and MacRoberts 1989), copied citations (Simkin and Roychowdhury 2003) and self-citations (Bonzi and Snyder 2005). The limitations present in the literature undermine the ability of citation-based approaches to accurately represent the phenomenon of science-technology interactions.

Recent progress in Natural Language Processing (NLP) allows us to compute data from document texts instead of traditional methods that rely on metadata such as citations, technological classes and journal classification. This emerging possibility allows us to potentially fill the gaps left by traditional approaches. Recent works propose a complementary approach using semantic analysis to identify documents that deal with similar issues on both sides of the science-technology (S&T) frontier (Magerman, Looy and Song 2009). This method makes it possible to identify epistemic communities that benefit from a certain semantic and cognitive proximity. By doing so, the semantic approach assumes that two documents using similar wording are likely to be addressing the same subject matter and conveying similar knowledge (Lee 2008; Ogawa and Kajikawa 2015; Hou et al. 2023). This new approach helps conceptualize S&T interactions as a co-construction of technological and scientific activities with constant interaction, with one activity providing insight to the other. Semantic proximity helps to approximate an implicit, reciprocal, and achronic S&T relation (Bassecoulard and Zitt 2004). This new conception challenges the classical linear, voluntary, and asymmetrical S&T relations drawn by citation-based analysis.

Our reasoning can thus be crystallized around the following research question:

To what extent do semantic and citation-based methodologies enable us to understand complementary dimensions of interactions between science and technology?

This chapter offers to answer this question by comparing recently published semantic and co-citation indicators in their ability to explain forward patent scientific references, applied to the case study of an emergent technology: 3D printing. To do so, we rely on data from Lens.org and DWPI patent databases on the 2014-2018 period and we compute one citation-based indicator replicating Yamashita (2020)'s method and one semantic indicator assessing the overall proximity of the paper with previous patents replicating Arts, Hou and Gomez (2021) methodology, marginally adapted to scientific data.

Our results indicate a higher accuracy of the classical approach compared to the semantic approach in revealing technologically relevant articles, arguing for the robustness of NPL referencing analysis. Nevertheless, semantic proximity gives comparable and robust performance with little overlap, leading us to conclude that these types of approaches complement each other in explaining scientific and technological interactions. Both explicit and implicit interactions play an important role in S&T interactions. The explicit relationship helps to understand codified knowledge flows at a distance with a linear interpretation of the innovation process, while the implicit relationship makes it possible to understand more localized and instantaneous interaction processes with no time lag to track the progress of an epistemic community or assess the cognitive proximity between actors.

This chapter is structured as follows: Section 1 introduces the theoretical background and relevant previous literature. Section 2 argues for our choice of 3D printing as a case study and describes the overall research concept of this study, including database, data collection and quantitative methodology. Section 3 presents the results of the case study using the proposed methodology and discusses the implications of the results. The last section concludes.

1 Literature review

Science and technology are both knowledge-producing activities focused on the pursuit of problem-solving and novelties. These two activities drive R&D and are at the heart of the technical progress at work in our society.

However, literature opposes science and technology in different ways. On the one hand, science is run by researchers who have incentives to publish as often as possible freely available results to be rewarded by the scientific community (David, Mowery, and Steinmueller 1992; Dasgupta and David 1994; Fabrizio and Di Minin 2008; Besancenot and Vranceanu 2015; Gans, Murray, and Stern 2017). Scientific activity is supposed to evolve apart from economic considerations, following Merton's "Ethos of science". Based on this idea, scientific research is supposed to be mainly carried by universities and publicly funded laboratories, and produce knowledge as a public good, valuable for all. On the other hand, technology is about creating artifacts, i.e., marketable knowledge embedded in products, processes or services, which will be evaluated by their ability to provide competitive advantages. Technology produces more specific knowledge that is partially tacit and disseminated mostly through social interactions (Allen 1977; Cozzens et al. 2005). Technology is developed by engineers who receive information and incentives from a variety of stakeholders, including users, clients, sellers, investors, and competitors. The work of engineers involves a mix of disciplines, which is greater than that of researchers (de Solla Price 1965a; Allen 1977). Accordingly, technological development is typically conducted by firms.

Science and technology can be seen as two independent entities, fully able to accumulate knowledge on their own, but their opposition appears to be of little interest considering the development of science-based innovation in modern industries. Biotechnology, nanotechnology and life sciences are examples of innovative fields deeply related to scientific breakthroughs.

Indeed, scientific and technological research do not evolve in isolated spheres. The relationship between science and technology is very complex. It is important to analyse science as a source of technology (Martinez 2018) and technology as a source of science (Hsiao and Torvik 2020; Pearce 2020). Identifying and measuring science-technology interactions is a required step to deeply understand technical progress and the innovation process. Science, as a source of technological development, receives a lot of attention from scholars and has become,

in the last two decades, a classic theme in innovation economy. The impact of scientific activity on technical change is widely acknowledged. The current issue is not about its existence, but how to measure it accurately.

To do so, the analysis of patent and scientific paper databases is considered the most reliable empirical tool for conducting quantitative research. On the one hand, scientific papers (hereafter, papers or articles) are the main way of interaction within the scientific community. Indeed, the limited dependence on external knowledge, the strong incentives to publish, the high degree of codification, and the privileged channel of the scientific article as a means of communication make the use of scientific article databases a reliable and widely recognized proxy for scientific activity. By extension, inter-article references enable the direction of scientific development to be faithfully tracked (Small and Garfield 1985). It should be noted, however, that this method has a number of limits, which include a variable propensity to publish in different scientific fields, a tendency to overlook articles written in languages other than English, and the fact that scientific results presented at conferences or in the form of software are not published to the same extent as traditional articles (Meyer 2000; Han 2007). Despite these limits, these data allow a wide range of approaches to materialise knowledge flows: co-citation, direct citation, common bibliographic references, co-word, h-index, etc.

On the other hand, patents are the most common proxy used to measure technological innovation. They are highly codified, detailed, certified by institutions and easily available online. But patents also suffer from some bias, which can be summarized as follows: not all inventions are patented; not all inventions are patentable; and not all patents have the same level of inventiveness (Griliches 1990). Secrecy is still widely practiced, and some firms consider imitation risk as too low to cover patenting fees to prevent it (Levin et al. 1987; Thumm 2004). Secrecy can also be imposed by governments for national security reasons (Nouwens and Legarda 2018; de Rassenfosse, Pellegrino and Raiteri 2020; Martens 2021; Gross 2022). In addition, patents can be used strategically. Some firms use patents offensively to limit their competitors' exploration, communicate, increase internal performance indicators, influence standardization, and more. These patents are considered less representative of technological activity (Cohen, Nelson and Walsh 2000; Blind et al. 2006; Holgersson and Granstrand 2017).

Besides these weaknesses, papers and patents data are the strongest tools to materialise scientific and technological knowledge and analyse their diffusion.

The interaction between science and technology represents a significant field of inquiry, one that attracted attention over the past four decades. During this period, a diverse range of methodologies have been developed to quantify and understand these interactions. Among these methods, direct citation stands out as the most used technique.

On the science-to-technology issue, van Raan (2017) observes that a large majority of non-patent references in patent literature are scientific papers. Scientific references in patents have been labelled under several notations: Non-patent References (NPR), Citations (NPC) or Literature (NPL). We will use NPL notation. Since the pioneering works of Narin and colleagues (Carpenter and Narin 1983; Narin and Noma 1985) strong results have been found. For example, the most influential NPL is mainstream, basic, recent and published in influential journals by prestigious laboratories and universities funded by public institutions (Narin, Hamilton and Olivastro 1997). Thomas and Breitzman (2006) note that patents that cite scientific papers funded by government agencies are more likely to have a huge technological impact. Using the same approach, van Raan (2015; 2017) identify papers referenced in patents with an important time lag as “sleeping innovation”. These studies, mostly application-oriented, suggest that scientific input to science can be revealed even after a long sleeping period.

Using references crossing the S&T frontier to anticipate the appearance of a scientific subject or technological development is also a crucial area of investigation. Indeed, identifying potential future knowledge flows from science to technology is valuable for organization research planning and government innovation strategy. Accordingly, the European Union ran predictive analysis using the bibliographic coupling clustering method to identify the newest papers in the context of its Future Emerging Technology program (Warnke et al. 2016).

In addition, various researchers have employed clustering techniques based on co-citation and direct citation networks (Shibata et al. 2008) to analyse the evolution of research in areas related to sustainable energy, such as fuel cells and solar cells (Kajikawa et al. 2008), biomass and biofuels (Kajikawa and Takeda 2008) and regenerative medicine (Shibata et al. 2011).

Similarly, Breitzman and Thomas (2015) utilized these methods to identify technological opportunities for investment strategies and Park and Yoon (2018) introduced a methodology to identify emerging technology trends by assessing the impact and novelty of papers and patents in the ICT sector. More recently, Yamashita (2020) demonstrated the effectiveness of an indicator derived from co-citations between patents and articles, which can be used to measure the technological relevance of a given article.

Despite these advances and results, NPL analysis suffers from the time lag between patent citations and cited scientific references, which typically ranges from 3 to 20 years in emerging technology fields (van Raan 2017). This considerably limits the study of the innovation process, particularly in fields where scientific and technological interactions are ubiquitous. Qualitative studies have also pointed out the irrelevance of many NPL citations at the microscale level (Meyer 2000; Callaert, Pellens and Van Looy 2014; Verberne, Chios and Wang 2019; Bryan, Ozcan and Sampat 2020), indicating a need for more balanced and context-specific analysis in the field.

Recent breakthroughs in Natural Language Processing allow for wider access to automated reading and data extraction from written documents. Applied to innovation economy, this technical progress improves semantic cooccurrence tool applications. Semantic cooccurrence (hereafter co-word) analysis assumes that a wording is specific to a research field or a precise problem resolution. As a consequence, two documents with similar wording can be assumed to discuss the same subject, facing similar issues, and carrying similar knowledge. In this perspective, the Literature-Based Discovery (LBD) approach enables the grouping of scientific works that have a significant relationship by extracting related key concepts. This approach can be simplified to Swanson's original ABC model: A has a relationship with B, B has a relationship with C, and in the absence of a direct bibliographic reference, A has a potential relationship with C (Swanson 1986). This method, originally designed to increase life science discoveries, can be applied to identify potentially patentable emerging science topics in solar cells by comparing patents and papers' content (Shibata, Kajikawa and Sakata 2011). Comparable text-based clustering methods have been used to identify research and technology development opportunities for microalgae biofuels (Wang, Fang and Chang 2015) or identify radical innovations in the food industry (Kuzminov et al. 2018). More recently, a similar approach has been developed to extract technical solutions from patent literature to solve problems expressed in papers, and vice versa, to extract theoretical solutions from papers to solve problems expressed in patents (Sasaki et al. 2020). Advanced semantic proximity can also be used to distinguish scientific reference quality as prior knowledge and their impact on patent diffusion (Hou et al. 2023).

Hybrid approaches that use both citation analysis and semantic analysis are gaining traction. For instance, Kajikawa and his colleagues have explored the content-level relationship between papers and patents. They employed clustering based on direct citations within papers and patents, followed by matching the keywords of paper clusters with those of patents to

ascertain similarities (Ogawa and Kajikawa 2015). This method effectively bypasses the time lag typically associated with NPL analysis.

Furthermore, NLP has been increasingly applied to enhance the precision of identifying scientific citations within patents. Techniques such as extracting in-text citations (Verberne, Chios and Wang 2019) represent a significant progress in this field. These approaches not only offer a more balanced understanding of the interplay between scientific literature and patents but also facilitate a more efficient and accurate analysis of their interconnectedness. Despite the promising complementary contributions of co-word analysis to S&T studies, its application remains limited by existing computational capacities and is focused on specific research fields or technologies.

In the literature, there is an alternative to measures based on semantics and citation networks to measure S&T interactions: author-inventor. This approach compensates for NPL analysis limitations by focusing attention on persons who both publish papers and file patents. Author-inventor relationships represent a direct flow of embodied knowledge between papers and patents, with the advantage of bypassing NPL citation lag and producing more up-to-date results. This approach produces only a few results, and most of them are consistent with direct citation analysis: author-inventors who cite more NPL cite more basic papers (Noyons et al. 1994); patents filed by academic inventors contain more basic citations and auto-citation (Wang and Guan 2011). The author-inventor link can also be used to reveal informal university-industry collaborations (Zhu and Liu 2020). However, the use of this method is limited, mainly due to the difficulty of collecting solid samples of data on a large scale. This difficulty is related to disambiguation problems, i.e., linking authors to their documents on both sides of the S&T frontier is limited by homonyms and synonymy. This approach will not be explored further in this chapter.

Both co-word and co-citation analysis rely on radically different theoretical conceptions of S&T interactions. The citation linkage is conceptualized by Bassecouard and Zitt (2004) as explicit, voluntary, selective and asymmetrical. Citation is an active act in which authors select a very limited number of references from all relevant sources of prior knowledge. This voluntary and highly selective act is thus subject to several biases, limiting the exhaustiveness and relevance of the referencing. The main bias concerns the Matthew effect (Merton 1968; MacRoberts and MacRoberts 1989; Larivière and Gingras 2010) or “rich get richer” effect. It occurs when articles published by eminent researchers or prestigious institutions receive more

citations than similar or comparable work produced by lesser-known researchers or less renowned institutions. This can lead to cumulative advantages for established researchers, where their prior recognition leads to more attention, credibility, and citations, reinforcing their status in the scientific community. This bias can also be associated with the Halo effect, which determines the perception of the quality or merit of a research work based on the reputation or prestige of the author or institution (Zhang and Poucke 2017; Liao 2021). Additionally, citations can be influenced by auto-citations or in-house effects, leading to exaggerated credit being given to authors' and colleagues' previous work (Garfield 1979). Citations are also limited to published works, excluding tacit influences (MacRoberts and MacRoberts 1989) such as failed experiments, unpublished works, exchanges with colleagues, peer interpretation of results. The latter can be decisive for the novelty of science (Tahamtan and Bornmann 2018).

Furthermore, the time lag between citing patents and the cited articles is interpretable, in a cumulative scheme, as a delay in the use of former knowledge in a dependent context. As a consequence, citation analysis is embedded in the linear schema of innovation, as citations of technical production in scientific literature are very limited (Glänzel and Meyer 2003; Hsiao and Torvik 2020).

Finally, the explicit and asymmetrical dimension of citation excludes the need for collaboration between the citing author and the cited author, allowing for geographically distant knowledge flows.

The semantic relation is described by Bassecouard and Zitt (2004) as implicit, symmetrical and achronic. This relation is not the result of a direct, actively conscious connection, but rather emerges from a comparative analysis of two texts or lists of markers. This relationship should be interpreted *“in terms of topic sharing or social relation, rather than dependence. The achronicity of the lexical relation does not allow one to detect dependence at the micro level. Although based also on selection processes within technical and social repertoires, the lexical relation appears less scarce than citation. A topic sharing analysis should be able most of the time to recover larger sets of ‘citable’ objects and not only cited ones.”* (Bassecouard and Zitt 2004, pp. 687-688).

Accordingly, semantic analysis facilitates the approximation of an author's or organization's alignment with an epistemic community. The use of a shared language is indicative of the diffusion of tacit knowledge within a “community of practice”, enabling more efficient communication regarding specific concepts (Castillo 2002). Measuring how closely inventors align with the epistemic community underlying innovation in a particular field is

valuable. It provides insights into the current state of scientific dependence within the technological domain and the degree of "appliedness" in scientific output. It also helps to reveal cognitive proximity between actors in the innovation process (Boschma 2005; Qin et al. 2021).

At the same time, the symmetry of semantic relations drives a conception of S&T interaction as a co-evolutionary process. Both scientific and technological activities progress in parallel, driven by a shared epistemic community of scholars and inventors. Interaction takes place in both directions, with science helping technology and technology helping science, drawing a blurred distinction between the two activities.

Finally, citation indicators can be used to approach the dependency phenomenon in the S&T relationship. This dependency can be observed over a long period of time in the linear sense of the innovation process. This relationship does not involve any interaction between the citing and cited authors, resulting in distant relations. In contrast, semantic indicators can help measure an immediate relationship between the author and an epistemic community, providing an estimate of the author's proximity to it. This allows us to measure the cognitive proximity of a production to the latest knowledge assumed to be related to a specific field.

Consequently, this indicator measures two complementary phenomena of scientific and technological interaction, one measuring the overall maturation of knowledge over the long term and the other following a more current co-construction of knowledge within a community. The purpose of this chapter is to compare these two phenomena based on their ability to explain future scientific references in patents.

2 Methodology and data

The following section describes our case study and the methodology used to adapt our data sample to the citation- and semantics-based indicators that exist in the literature.

2.1 Case study: 3D printing

3D printing is a particularly interesting case study for our comparative analysis for several reasons. First, this technology embodies the scientific dependence of technological development (Xu et al. 2018). The development of 3D printing follows a typical science-based technology trajectory, which begins with a conceptual breakthrough, followed by an incremental development phase, leading to a radically new product on the market. This pattern is well established in innovation literature and can be seen in the famous example of the telegram's invention, which was enabled by Maxwell's equations among others.

The theoretical framework of additive manufacturing was first developed in Japan in the 1950s, with the work of Kojima in 1952 recognized as the first theoretical effort on the additive manufacturing process (Yang et al. 2017). The concept of layer printing then rapidly spread to Europe and the United States. Technological development began with prototyping in the 1970s, continued with patenting attempts in the early 1980s, and led to the first effective patent filing in the United States in 1986. The commercial application of 3D printing thus began in the late 1980s. This linear and international innovation process suggests a mode of innovation close to the Science, Technology, and Innovation (STI) mode, which is characterized by strong interdependencies between the technological and scientific spheres and significant conceptual mobility of the breakthrough underlying the innovation (Jensen et al. 2007).

Despite several decades of development, 3D printing is still widely regarded as an emerging technology and a radical innovation, potentially part of a new form of industrial revolution (Rayna and Striukova 2016). Literature highlights that emerging technologies, including 3D printing, are particularly intensive in NPLs (van Raan 2017), as seen in other fields such as nanotechnology (Hu et al. 2007) and genetics (Lo 2010). As such, we expect to find a significant number of citations and strong semantic proximity between papers and patents in this field of technology. Furthermore, we hope to complement the literature on

innovation economics with this case study on additive manufacturing, which, to our knowledge, has very few contributions.

Secondly, the case study of 3D printing enables us to explore a civilian innovation process with numerous military applications. In doing so, we are helping to document the S&T interactions potentially at work in less dual fields of innovation, such as armaments or aerospace equipment, which are also fields very close to scientific advances (Fauconnet 2018). Indeed, 3D printing presents some advantageous opportunities in the area of defense applications. The technology offers an exceptional level of design flexibility, facilitating the manufacture of intricate components that represent a significant challenge through conventional methods (Campbell et al. 2018). Furthermore, 3D printing exhibits the ability to accelerate the production of defensive structures within a battlefield environment, therefore enhancing the efficiency of military operations (Jagoda et al. 2020).

In addition to these benefits, 3D printing also has the potential to offer substantial logistical advantages for military forces. In particular, it could revolutionize the supply chain management of spare parts required for the operational maintenance of military equipment, effectively overcoming the inherent challenges associated with the conventional supply chain model. As an illustration of the technology's applied potential, the French army are currently conducting several experimental applications of 3D printing in field conditions (Droff and Rademacher 2020). In so doing, we contribute, indirectly, to the state of knowledge on the innovation process surrounding dual-use innovations.

Lastly, the International Patent Classification by the World Intellectual Property Organization (WIPO) makes 3D printing easily identifiable in patent publications under a unique 4-digit code: B33Y - Additive Manufacturing. This clear classification allows us to propose an original approach by identifying technologically relevant papers at the micro level, thus enhancing the opportunities for further technological development.

2.2 Definitions of indicators

The comparative analysis of citations and semantic indicators constitutes the central pillar of our methodological approach. We replicate the approaches of Yamashita (2020) and Arts, Hou and Gomez (2021), with marginal adaptation, to construct our indicators. The details of these two methodologies are developed in the following subsections.

2.2.1 Citations-based indicator: co-references between focal papers and patents

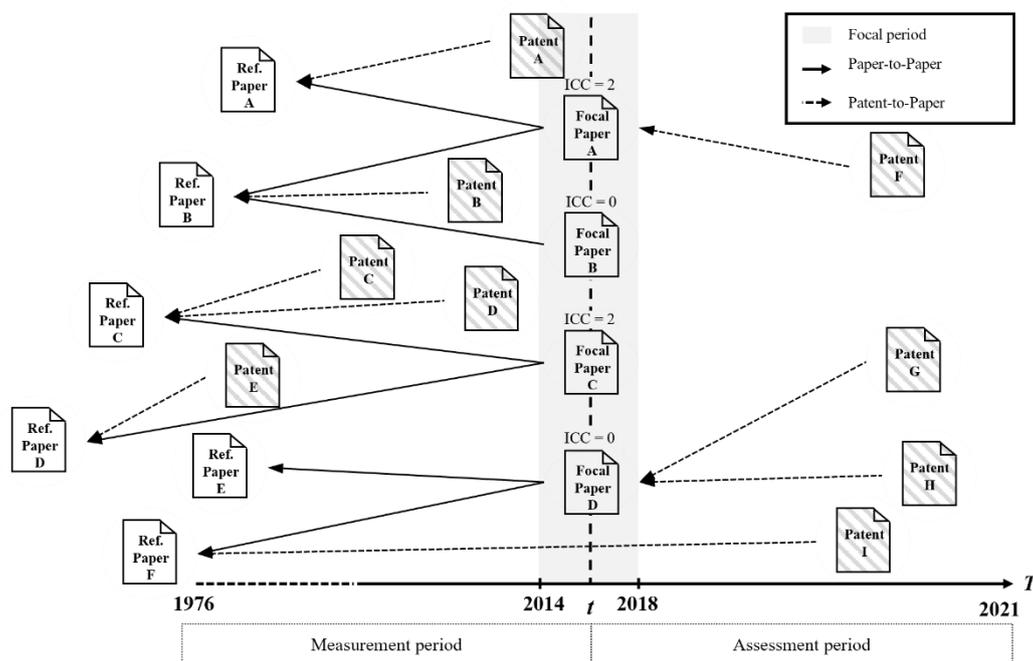


Figure 4.1: Diagram adapted from Yamashita (2020)'s indirect citation index

The Indirect Citation Indicator (ICC) method, as developed by Yamashita (2020) and adapted to our case study, is illustrated in Figure 4.1. ICC is computed by aggregating the common references between the focal paper and patent literature. In accordance with the original methodology, we incorporate a threshold at $ICC \geq 2$, representing the optimal indicator performance in the original dataset. The relevance of this threshold in our case study will be challenged in the robustness section. Thus, only focal articles referencing at least two articles referenced in patents will have a non-zero ICC score. For example, the focal article B will be considered null because it shares only one reference with patents. Our final citation-based indicator consists of normalized values of the total amount of co-reference between focal papers and patent literature.

This indirect citation indicator assumes that the proximity of an article to a technological application is an indicator of the technological relevance of the knowledge contained in the article. In other words, articles already cited by patents are assumed to capture singular features of the science-technology boundary, as defined by Ahmadpoor and Jones (2017).

Accordingly, Yamashita's indicator is based on a deterministic assumption, i.e., anticipation comes from what happened previously; the same inputs are supposed to lead to

similar outputs. The first consequence of this assumption is that articles that shared scientific references with patents, designated by Yamashita (2020) as R-PCPs and articles referenced by patents are supposed to share similar inputs to technological development. In this way, a focal article with an important number of common patent references will be assumed to be a good candidate for future patent citations. A secondary implication is that the context surrounding R-PCPs is assumed to influence their potential to be cited in future patents. For example, literature such as Tijssen (2010) and Ahmadpoor and Jones (2017) has shown that articles produced by firms are supposed to contain inputs closer to the technological frontier than articles produced by universities and public institutions. Accordingly, we will include author affiliation as a control variable for our dependent variable.

Finally, the indirect citation index is normalized using the min-max method in order to compare its effect on forward NPL citations with the semantic indicator.

2.2.2 Semantic-based indicator: mean similarity between documents contents

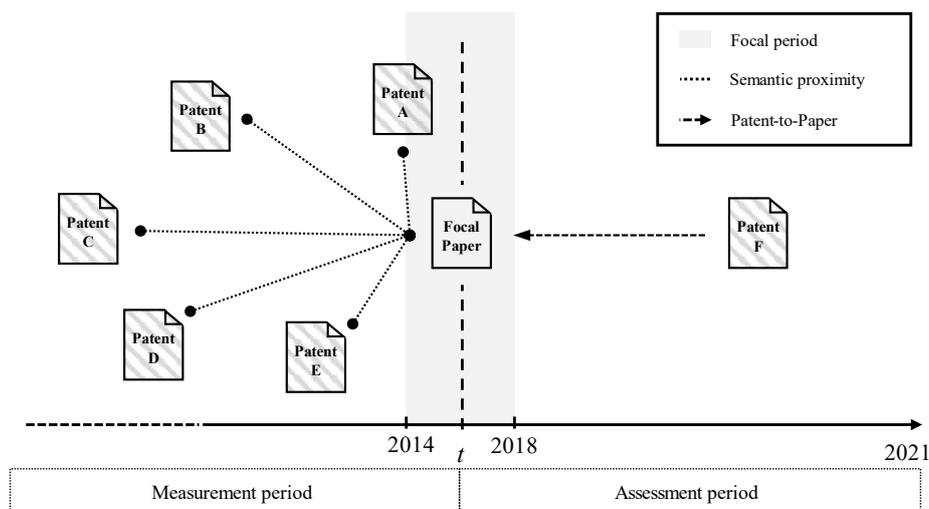


Figure 4.2: Diagram of semantic proximity index

Semantic proximity indicator is based on the vectorization of texts present in the documents of our sample. To do so, we rely on natural language processing (NLP) tools available in Python libraries. The scientific publication corpus is composed of the title and the abstract of the article, and the patent corpus is composed of the title, the abstract and the first claim of the priority patent of the invention family. Both publications and patent texts constitute a single corpus, which we use to create vectors embedding the scientific/technological content of each publication/patent. Following the method introduced in Arts, Hou and Gomez (2021),

we concatenate title, abstract, and claims (for patents only) for each document. Next, we lowercase the text and tokenize it to words using the following regular expression: `[a-z0-9][a-z0-9]*[a-z0-9]+|[a-z0-9]`. We define a word as a sequence of letters and numbers, which may include hyphens (“-“). Next, we clean the text by removing words composed only of numbers, one-character words (such as Greek letters), stop words from the Natural Language Toolkit (NLTK) in the Python library¹⁸, and words appearing in only one patent, considered potential errors. In addition to natural stop words, we also remove from the text a list of very common keywords in patents, defined by Arts, Hou and Gomez (2021). This list compiles the most frequently used keywords in patents. By doing so, we exclude the keywords that are not related to the technical content of patents, but we keep the frequently used technical keywords. The list of excluded keywords includes both very common non-technical keywords (e.g., invention, discovery, claim, disclose, describe, include, patent) and very common mistakenly combined words that result from the tokenization process (e.g., comprisinga, combinefirst).

Next, we apply stemming to each word using the SnowBall method from the NLTK library. What remains is a collection of unique stemmed keywords that represent the core semantic content of the document.

Once harmonized, we create one vector per publication or patent family. Each vector is composed of one dimension per unique word in the whole corpus after the text cleaning. The value for each dimension depends on the importance of the word in the text and its occurrences in the document compared to the rest of the corpus.

Finally, we compute a similarity score as the inverse of the cosine distance between the text vector of each scientific publication and the text vector of every patent applied for one year before its publication. We chose a one-year limitation, as our aim is to assess the closeness of a scientific publication with the contemporary technological state of the art.

Figure 4.3 briefly illustrates how our indicator is calculated using an article and a patent from our dataset, which are reduced to their titles for simplicity. The first rectangle displays the raw text, including errors such as "object" and unstemmed words like "layered." These words are subsequently removed and stemmed to generate tokenized vectors, as depicted in the second rectangle. The final square illustrates the similarity matrix, which computes one-to-one similarity scores between each document in our dataset.

¹⁸ Examples of stop words from the NLTK library include: *the, am, been, does, for, has.*

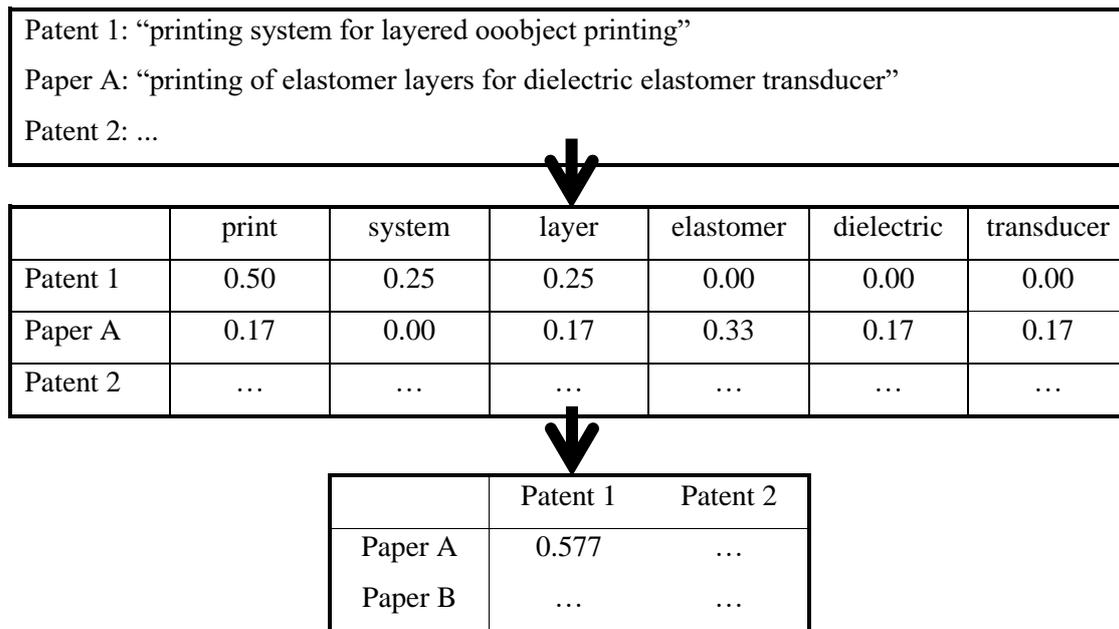


Figure 4.3 : Example of semantic vectors and proximity computation

To measure the proximity of an article to a technological field, we compute the average similarity score between a publication and every patent within its comparison corpus, as illustrated in Figure 4.2. This metric effectively gauges the overall proximity of a publication to the technological field, thereby providing insights into its proximity to the 3D printing epistemic community. Finally, like the ICC indicators, the semantic proximity mean indicator is normalized using the minmax method in order to effectively be compared.

2.3 Data

The question of the link between science and technology in the 3D printing domain is treated with the help of the original data from the Lens Project. The Lens is a founding member of the Innovation Information Initiative, which collaborates on innovation data, analytics and metrics with the MIT Knowledge Futures Group, Boston University, and the Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne. The Lens regroups more than 127 million global patent records and 370 million papers, with rich metadata including the people and institutions that generate this knowledge and the linkages between them, drawn from diverse data sources¹⁹. Thanks to this database, we can link scholar articles and patents through their citations.

To run our comparative analysis, we extracted from Lens Project all articles that contained keywords linked to 3D printing. This list, constructed with the help of experts in the

¹⁹ <https://about.lens.org>

domain, is presented in Table 4.3 in the appendix section. This method enabled us to collect 66,412 articles between 1984 and 2021. Extractions have been made for the November 2021 Lens edition.

The distribution of articles collected per year is presented in Figure 4.4a. This figure shows the emergence of the domain around 2014 in the scientific literature. Symmetrically, Figure 4.4b clearly highlights the emergence of patents related to the B33Y IPC code over the same period. This emergence had a key period around 2014, when the growing interest in scientific and technological fields became exponential. Sharing the same key period of emergence for both papers and patents argues for an apparent co-evolution of scientific and technological fields on this topic.

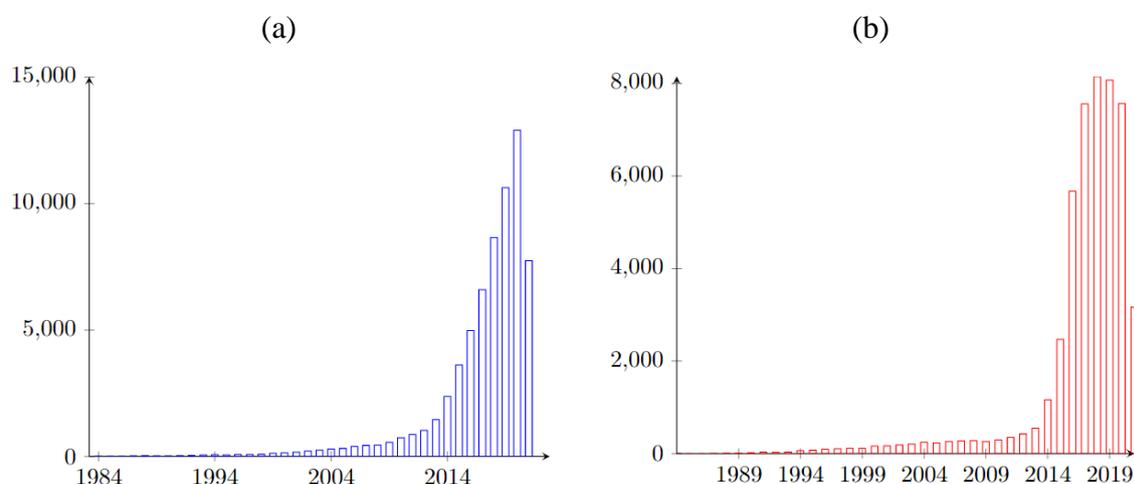


Figure 4.4 : Volume of article (a) and patent (b) respectively published and filed on 3D printing.

Our previous observations have led us to designate 2014 as the starting year for our focal observation period. As mentioned above, citations are time dependent. Consequently, we are interested in the time lag in citations between patents and articles. Indeed, we want to explain the patent citations received by scientists published from 2014 onwards and we need sufficient time lag. In order to set the period for the completeness of the forward references collected, Figure 4.5 represents the average lag between the publication date of an article and first filing date of the filing patent. The average time lag helps us fit our sample data as closely as possible to the recent period. The emerging technologies of 3D printing represent an increasing number of scientific and innovative publications. The challenge is to incorporate the maximum amount of data while maintaining their reliability and consolidation. The citation time of an article can vary depending on the field, from a couple of years to an entire generation (van Raan 2017).

However, this disparity in NPL time citation is reduced in the emerging technologies field. For example, it is close to 3 years in nanotechnologies (Daim et al. 2007; Finardi 2011). It should be noted that our main reference paper for NPL citations, Yamashita (2020), dealt with data from at least 3.5 years before his own paper communication. 3D printing data shows a rolling mean time lag slightly lower than 3 years since 2014. Consequently, we chose to limit our sample to late 2017 to avoid the computation of unconsolidated data, which gives us at least 3.5 years between NPL reference and data collection.

We use the Lens Project to cite patent data. All non-patent literature appearing in the patent part of the Lens Project is matched to each paper in the scholar part of the Lens Project. The data contained paper citations from patents published until mid-2021. In order to construct indicators of semantic proximity between articles and previous patents in the 3D printing field of study, we relied on the DWPI patent database. This comprehensive database is particularly suited for semantic analysis since patent texts are rewritten by technological experts, which minimizes errors in the text and provides us with highly comprehensive text data. In order to avoid computing similarity between a publication and two patents covering the same invention, we relied on patents at the INPADOC family level with the text of the priority patents. Following Arts, Hou and Gomez (2021), our patent corpus is composed of the patents' titles, abstracts and claims.

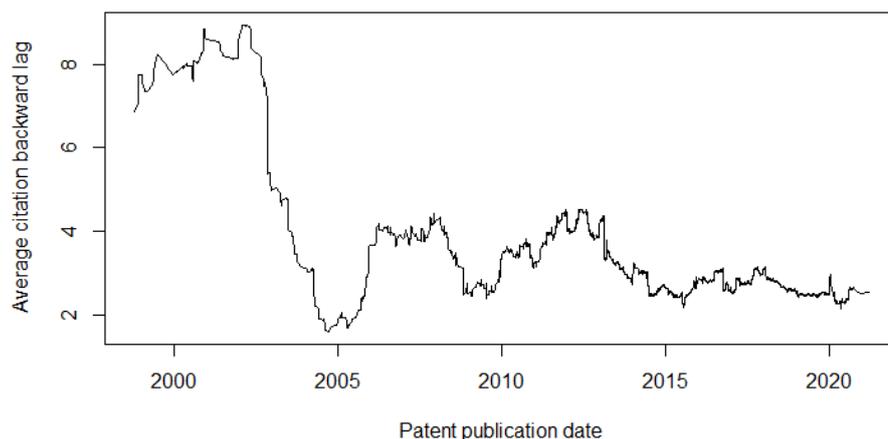


Figure 4.5: Weighted rolling mean of backward citation lag.

Finally, in order to compare the impact of our proximity indicators on the number of patent citations received by papers, we use a set of control variables such as the type of institutional sector of the authors (Affiliation), the scientific domain of the paper (Field), the region of the authors (Region), the number of backward references (Reference), and the number

of forward scientific citations (Scholarly citations). Additionally, we control for the impact factor (Hindex) of the journal and the number of authors (Authors count).

We justify the use of categorical variables as follows. First, the literature clearly identifies the impact of the institutional origin of an article on its ability to be cited in future patents (Thomas and Breitzman 2006; Ahmadpoor and Jones 2017). Accordingly, the identification of institutional sectors is necessary to derive our proximity indicators and analyse their effects. This is executed based on keywords identified by Yamashita (2020) and completed by hand analysis. The list of these keywords is available in Table 4.4, in the appendix. Papers are attributed to firms, universities, public institutions, or “Others”. Secondly, considering the scientific citation behaviour of patents highlighted in literature (Webb et al. 2005; Callaert et al. 2006), authors’ regions are affiliated to the trilateral patent office, the United States, European Patent Office (EPO) member states, Japan, and “Others”, following Yamashita (2020). The EPO category includes the 38 member states that were listed in January 2020. We detail the effects of our indicators on world regions by comparing the regression coefficients according to the three main regions defined by the United Nations: Europe, North America, and Asia. Finally, scientific references in patents are heterogeneous depending on the scientific domain (Ahmadpoor and Jones 2017). In order to control this heterogeneity in our case study, we use the ASJC Scopus classification²⁰ provided by the Lens database. We retain the highest level of classification, corresponding to the six domains detailed in Table 4.5.

To mitigate the issue of data duplication in cases involving international, interorganizational, or interdisciplinary articles, we have systematically established distinct classifications. These include the "International" institutional sector for articles co-authored by individuals from different regions; the "Interdisciplinary" scientific field for articles associated with multiple domains; and "Public Collaboration" as well as "Private-Public Collaboration" categories to address interorganizational authorship. This approach ensures a structured and clear classification, facilitating precise data analysis and interpretation. Also, items that do not provide the necessary data to be identified with a Field, Region or Affiliation category are classified in the respective “Others” categories.

In addition to categorical control variables, two continuous control variables are produced. Firstly, the number of retrospective references is taken into account, as it is assumed that an article with a higher number of references is more likely to provide useful knowledge (Costas, van Leeuwen and Bordons 2012) and to receive more co-citations with patents. This

²⁰ <https://scopus-category.data.istex.fr>

is controlled for by including the count of references as provided by the Lens database and applying a log2 transformation to these counts. Secondly, scholarly citation control variables help to control for article popularity in the scientific community. Despite the observation of Gittelman and Kogut (2003) that a highly influential article may not necessarily result in radical innovations through NPL, Tijssen, Buter and van Leeuwen (2000) found that highly cited papers are significantly more cited in other papers. To control for this effect, we incorporate the count of forward scientific references received by focal papers, as provided by the Lens database. These citations are compiled from the time of the papers' publication until the date of data extraction. As for the previous control variable, the scholar citation count is subjected to a log2 transformation prior to computation.

Additional variables are incorporated in order to control the excess of zeros and selection bias in our regression models. This helps to clearly distinguish zero-inflation and selection bias processes from counting processes. These additional variables will also be used as alternative control variables in order to add some robustness to our conclusion. The first variable controls the impact factor of the journal publishing the focal article. This allows us to control for the potential cumulative effects mentioned above. It also allows us to control the concentration of NPL on articles from important laboratories, which are more likely to publish in prestigious journals. This variable is obtained from the Scimago Journal Rank (SJR). As the classification scores are very extensive, we normalize them by using the minmax method. The second variable is the number of individuals authoring the article. Co-authored articles are more likely to receive citations; however, this trend is heterogeneous across scientific fields (Levitt 2015). We will control for co-authoring by computing the author count provided by the Lens database and log2 transform.

Table 4.6 in the appendix provides descriptive statistics for the continuous variables used in our models. The following section presents these models in detail.

2.4 Econometric strategy

2.4.1 Main model

To examine the relationship between the technological impact of scientific articles and the technological relevance of science, we employed a Negative Binomial (NB) regression as our primary analytical model. The choice of negative binomial regression is attributed to the discrete nature of our dependent variable, especially, the count of scientific citations referenced

in patents and the observed overdispersion in this variable. Our decision is justified by a series of tests confirming the overdispersion of our data, which negates the appropriateness of the Poisson regression model (detailed results are provided in Appendix C: Table 4.9). Table 4.1 presents the Pearson chi-squared test and the deviance goodness-of-fit statistic linked to Poisson regression, both of which indicate the overdispersion within our sample. The NB regression model, distinguished by its additional dispersion parameter θ , proves superior to the Poisson model for analysing count data with significant variance exceeding the mean. This model adjusts for overdispersion, thereby ensuring more accurate estimations of standard errors and an enhanced fit of the model. Contrary to the Poisson model, which assumes equidispersion (mean equals variance), the NB model permits the variance to be a function of the mean, thus yielding more precise and statistically robust inferences for datasets characterized by inherent variability.

Accordingly, our empirical model is structured as follows:

$$NPL \sim NB(\mu, \theta) \quad (1)$$

where NPL represents the number of patent citations received by scientific articles. In this model, the mean of NPL , denoted μ , is linked to the explanatory variables through a logarithmic link function. The variance of NPL is given by $V[NPL] = \mu + \theta\mu^2$ where θ is the dispersion parameter. The logarithmic link function is defined as:

$$\log(\mu) = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 \text{ScholarCit} + \beta_3 \text{References} + \beta_4 \text{Affiliation} + \beta_5 \text{Region} + \beta_6 \text{Field} \quad (2)$$

where, X is our main independent variable, encompassing proximity indicators between patents and papers. As previously discussed, we test two types of proximity: (i) bibliographic proximity between patents and the focal article through common scientific references; and (ii) semantic proximity between previous patents and the focal article. *ScholarCit* denotes the count of forward citations received by scientific papers from the scholar community. *Reference* is the count of scholar references in the article. *Affiliation* indicates the type of institution to which the author belongs. *Region* denotes the region of author. Finally, *Field* refers to the scientific domain of the focal article.

Our categorical variables (Field, Region and Affiliation) are computed to measure the relative effects of various values in comparison to others. The effects of the Field are measured in relation to the General domain, aiming to gauge the impact of each macro-domain of scientific production. The effect of Region is measured in relation to the “Others” category. We

assume that the missing values, grouped in this category, are randomly distributed. This implies that the regional effects will be measured in relation to origins that are randomly mixed. Regarding the Affiliation variable, we acknowledge a potential bias in identifying private organizations, leading to disproportionately missing data in this category. Consequently, we do not assess the effect of affiliation origin in comparison to “Others” but rather in relation to university affiliations, which are more prevalent and presumed to be more distant from the science and technology frontier.

2.4.2 Robustness

To enhance confidence in our results' interpretation, we performed several robustness tests. These tests aim to assess the vulnerability of our findings to various kinds of potential errors.

First, we control the consequences of representing missing data under the “Others” category. This involves assessing whether such categorization introduces any bias or skewness in the results. To do so, we simply avoid missing value integration in “Others” and reduce the data sample size to actual existing values.

Secondly, we control for the threshold value of the citation-based indicator. The original method of Yamashita computes a threshold of two, converting lower values to zero. We test the influence of this threshold by setting it at 0, 5 and 10, respectively. The results of these regressions will enable us to determine whether they have an influence on the indicator's ability to explain our dependent variable.

Due to the large number of zeros observed in the statistical description of our dependent variable, we adopted a Zero-Inflated Negative Binomial (ZINB) model in the third phase of our analysis, following Yu and Wu (2014) and Kim and Jun (2016) recommendations, to control for the excess of zeros. This alternative regression model, created to address excess zeros and overdispersion, is based on the assumption that the data consists of two types of zeros: “true zeros” and “excess zeros”. The ZINB model implements a two-stage regression approach. It categorizes the data into a zero-generation process, modelled through logistic regression, and a count process that follows a negative binomial distribution. This dual-structure framework of the model not only allows for distinct variable specifications in each component but also facilitates a nuanced analysis. This approach assists in identifying the factors that cause zero outcomes (“true zeros”) and those that result in an excessive number of zeros (“excess zeros”).

This method allows for a more accurate calculation of parameters and provides a greater understanding of the various mechanisms involved in generating data, thus improving overall comprehension of the statistical features of the dependent variable. To conduct the Zero-Inflated Negative Binomial (ZINB) analysis, a set of variables has been developed to assess the generation of zeros. The approach initially involves a conventional ZINB approach, including the main model variables as well as additional variables to distinguish the generation of excess zeros from true zero results (Lee et al. 2023). Furthermore, a more rigorous identification process for excessive generation of zeros is also employed, with only variables not included in the main model being used. This second step is essential to deliberately overestimate the zero-inflation generation process in order to robustly validate whether the primary results are significant. We use this last step to complement the first one, which fails to identify a significant zero-inflation process in our main model.

Fourthly, to avoid potential selection bias, we use the Heckman selection model to conduct our robustness analysis. The Heckman model is used to adjust for selection bias that may arise from the analysis of a non-random subset of data. This model operates in two stages: the first stage utilizes a probit model to estimate the ability of a value being selected for the study, while the second stage adjusts the regression analysis for the potential selection bias identified in the first stage. By incorporating the inverse Mills ratio, derived from the first stage, into the regression model, the Heckman approach corrects for the selection bias, ensuring that the estimates are not distorted due to non-random sampling. The potential selection bias in our study could result from the data collection methods of the Lens database, which encompasses scientific papers with well-established metadata. We can hypothesize that certain countries or institutions may be less equipped to produce papers containing the comprehensive references required for thorough metadata consolidation. Furthermore, it is reasonable to assume that journals with higher impact factors might enforce more stringent standards regarding metadata provision. Additionally, countries with a lower prevalence of publications in international English might face challenges in being adequately represented and consolidated in the database.

Finally, we extend our main model with additional control variables: Hindex and Authors Count. This analysis allows us to test the robustness of our results against possible omitted variable bias.

3 Results

Our results section is structured into three subsections. The first part details the primary outcomes of our main model, elucidating the core findings and their statistical significance. The second part provides a breakdown of these results by regions, offering a nuanced examination of regional variations and their implications. The final part is dedicated to robustness tests, which are crucial to assess the reliability and consistency of our findings.

3.1 Main Results

In assessing the suitability of the Poisson model for the given dataset, we noted significant disparities. The goodness-of-fit tests, as reported in Table 4.1 show high and statistically significant values, indicating a poor fit. Furthermore, a strong contrast between the mean (0.34) and the squared variance ($2.80^2 = 7.84$) as reported in Table 4.6, suggests pronounced overdispersion, a condition that violates the Poisson model's assumption of mean-variance equivalence. These findings strongly argue against the use of the Poisson model, pointing towards alternative models better suited for overdispersed data, such as the Negative Binomial model.

Table 4.1 : Goodness-of-fit tests for Poisson regression

Independent variables:	Indirect Citation Count	Semantic Proximity Mean
Deviance goodness-of-fit	21276.89***	21394.61***
Pearson goodness-of-fit	90479.36***	92521.22***

The negative binomial regression results, available in Table 4.2, provide insightful elucidations on determinants influencing forward patent citations. Indirect Patent Citations in model 1 exhibited a robust positive correlation, with a significant marginal effect of 0.210, indicating that an incremental unit in indirect citations potentially elevates future citations by 21%. Similarly, Semantic Proximity Mean, in model 2, also demonstrated a significant positive impact, suggesting a higher likelihood of citation with increased semantic closeness between focal papers and patents. The marginal effect is robustly fixed to 0.135 indicating that an incremental unit in semantic proximity potentially elevates future citations by 13.5%.

Scholarly Citations, consistently significant across models, underscore the importance of academic referencing for forward patent citations that are consistent with the previously mentioned literature. Reference count exhibited a minimal negative effect in model 1 and insignificance in model 2, implying a marginal or non-existent relationship in our dataset.

As expected, these results revealed that papers published by companies are closer to S&T frontier. Consequently, the coefficients and marginal effects for the “Company” affiliation in both models demonstrated significant positivity compared to papers affiliated with universities. Likewise, the “Others” category, encompassing papers of unidentified origin by our methodology, also exhibited positive and significant effects. These findings align with our hypothesis that papers authored by private companies are more difficult to link with clear affiliation origins and represent a significant part of this category. European and US papers show a higher significant propensity to be referenced in patents relative to the random “Others” category. This effect can be explained by the higher innovation capacity of these two regions, both in terms of scientific and technological production. Both affiliation and localization effects are consistent with Yamashita (2020) results. Only certain effects, such as that of Japanese scientific output, appear to be non-significant. This lack of significance may be explained by a lack of data. The General scientific field seems closer to technological applications in view of the significant negative marginal effects present in our results. We also observe that the interdisciplinary and “Others” categories show the lowest relative effects, reflecting a certain technological interest in fields that mix different scientific fields.

Our normalized indicators make it possible to compare our results. Citation-based indicator shows a higher coefficient and marginal effect than the semantics-based indicator. The difference between the regression coefficients of our indicators is highly significant, as confirmed by the Wald statistic. It shows a coefficient of 8.88, statistically significant at the 1% level. This reflects the relative superiority of the deterministic hypothesis, arguing that articles included in a scientific citation network close to the frontier are more likely to be of interest to technological development.

Table 4.2 : Main model regression results

Dependent variable: Forward patent citations to focal articles, <i>NPL</i>				
<i>negative binomial</i>				
Variables	(1)		(2)	
	Coefficient	Marginal Effect	Coefficient	Marginal Effect
Indirect Patent Citation	1.961*** (0.347)	0.210*** (0.038)		
Semantic Proximity Mean			1.296*** (0.174)	0.135*** (0.018)
Scholarly Citations	0.649*** (0.019)	0.070*** (0.003)	0.641*** (0.019)	0.067*** (0.003)
References	-0.050** (0.022)	-0.005** (0.002)	-0.003 (0.022)	-0.0003 (0.002)
Affiliation				
Company	0.789*** (0.203)	0.127*** (0.047)	0.887*** (0.200)	0.146*** (0.049)
Public Collaboration	0.148 (0.127)	0.017 (0.016)	0.180 (0.126)	0.020 (0.016)
Public-Private collaboration	0.064 (0.095)	0.007 (0.010)	0.061 (0.095)	0.007 (0.010)
Public	0.332 (0.251)	0.042 (0.037)	0.213 (0.255)	0.025 (0.033)
Others	0.488*** (0.104)	0.062*** (0.015)	0.589*** (0.104)	0.075*** (0.016)
Location				
Europe	0.345*** (0.077)	0.041*** (0.010)	0.328*** (0.077)	0.037*** (0.010)
International	0.140 (0.096)	0.016 (0.012)	0.156 (0.096)	0.017 (0.011)
Japan	0.075 (0.260)	0.008 (0.030)	0.104 (0.259)	0.011 (0.030)
United States	0.620*** (0.082)	0.084*** (0.014)	0.623*** (0.082)	0.082*** (0.014)
Field				
Health Sciences	-1.195*** (0.206)	-0.083*** (0.009)	-1.401*** (0.204)	-0.088*** (0.008)
Interdisciplinary	-0.414** (0.184)	-0.038** (0.015)	-0.558*** (0.181)	-0.047*** (0.013)
Life Sciences	-0.057 (0.230)	-0.006 (0.023)	-0.183 (0.227)	-0.017 (0.020)
Others	-0.581*** (0.184)	-0.057** (0.017)	-0.771*** (0.181)	-0.071*** (0.015)
Physical Sciences	-0.435** (0.173)	-0.046** (0.018)	-0.645*** (0.169)	-0.066*** (0.017)
Social Sciences	-4.735*** (1.081)	-0.11*** (0.004)	-4.893*** (1.085)	-0.110*** (0.004)
Constant	-3.570*** (0.205)		-3.800*** (0.207)	
Observations		17,543		17,543
Log Likelihood		-8,350.907		-8,338.922
theta		0.175***		0.177***
Akaike Inf. Crit.		16,739.810		16,715.840

Notes: Robust standard errors are in brackets. *: $p < 0.10$; **: $p < 0.05$; ***: $p < 0.01$.

Although the ICC indicator showed a higher effect, Model 2 shows a better fit of the model, as indicated by the log-likelihood and Akaike Information Criterion (AIC), suggesting a more accurate representation of the data. The significance of the theta parameter in both models is crucial, as it remedies the overdispersion in our initial regression using a Poisson model.

Our main results, as reported in Table 4.2, lead to the conclusion that each measure of proximity has a very significant positive impact on the count of forward patent citations received by publications. This supports the conclusion that linear and co-evolutionary phenomena play a complementary role in the incorporation of scientific knowledge into technological development. Going further, we explore in Figure 4.6 the distribution of the respective marginal effects of our two models in order to detect any threshold effects.

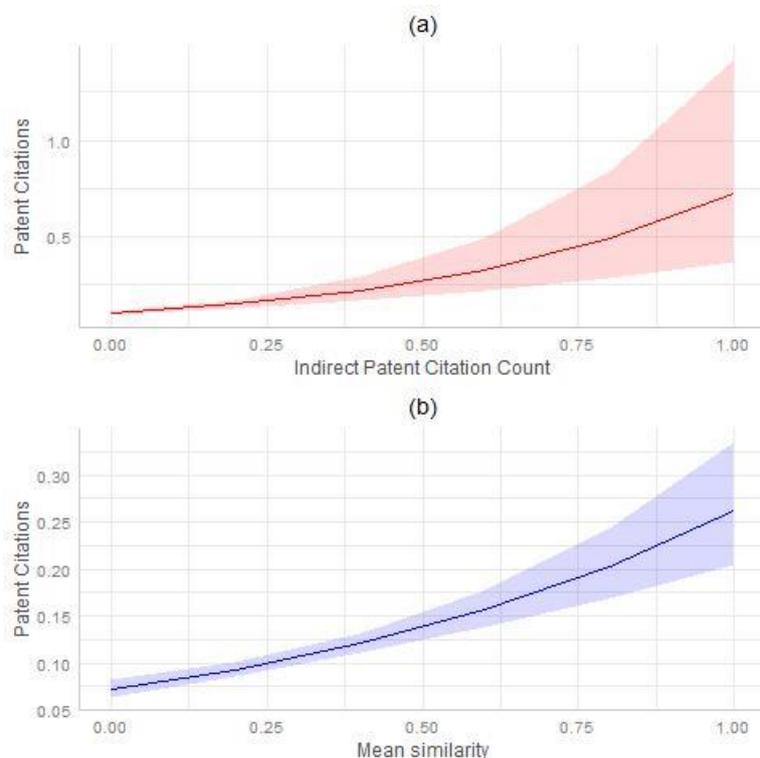


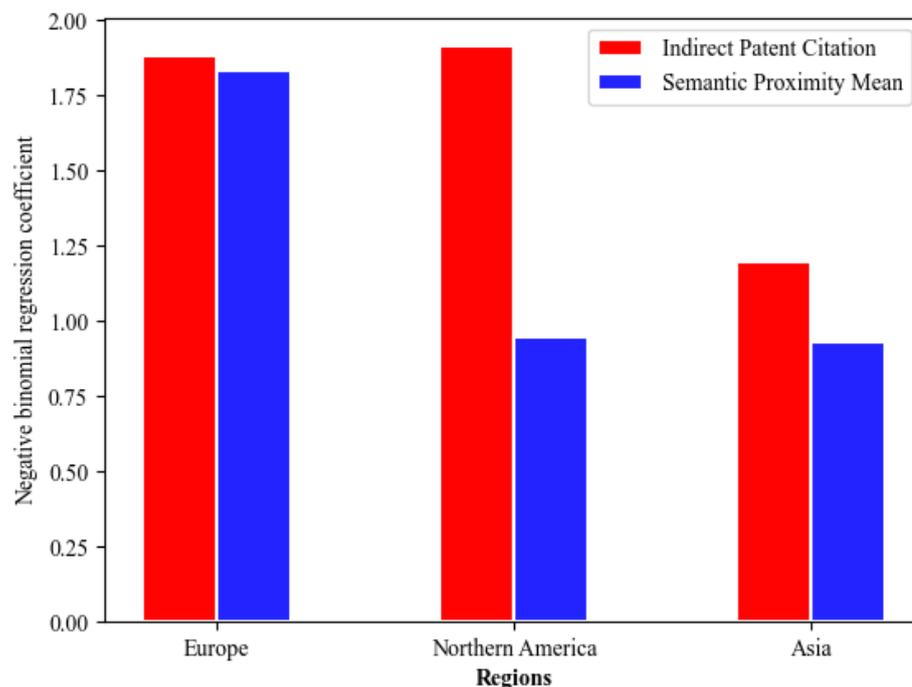
Figure 4.6: Indirect Patent Citation Count (a) and Semantic Proximity Mean (b)

The shape and extent of the increase in the expected number of patent citations, as depicted in subfigure 4.6a and 4.6b, reflect the strength and form of the relationships between the independent variables and the patent citations. In subfigure 4.6a, the more exponential increase in expected patent citations with the number of indirect patent citations might suggest a stronger and accelerating influence of this variable on the likelihood of receiving patent citations. The increase to approximately 0.75 indicates that where the indirect patent citation

count approaches one, there is an associated substantial rise in expected patent citations, despite starting from the same baseline as semantic similarity in subfigure 4.6b. This distribution seems to align with the cumulative effects associated with citation analysis. Subfigure 4.6b shows a more linear relationship. Although the maximum expected number of patent citations reaches only about 0.26, the consistent and steady increase implies that semantic similarity also plays a significant role in influencing patent citations, perhaps in a more predictable and proportionate manner. However, this more linear distribution does not rule out the influence of a cumulative effect, whereby the use of a semantic framework increases its capacity to be used as it spreads. However, this potential cumulative effect appears more limited.

None of our indicators appears to be dependent on a threshold effect. The varying distribution patterns of our indicators—more exponential for indirect citations and more linear for semantic similarity—do not imply one variable's dominance over another, but rather distinct relationship dynamics in S&T linkages. This is supported by a low Spearman's rank correlation coefficient of 0.281 confirming a limited association between the indicators.

Figure 4.7: Indicator results by regions



Notes: All coefficients shown are significant at the 1% level. Regressions exclude regional control variables. The numbers of observations are as follows: Europe: 6,337; Northern America: 4,021; Asia: 4,172 and follow comparable distribution densities. Region's definition follows the typology produced by the United Nations. Other regions, such as Oceania and Africa, do not benefit from sufficient observation to be analysed with confidence.

The next results show the breakdown of regression coefficients by region. These help to deeper understand how much semantic and citation relations work differently depending on the geographical dimension. Figure 4.7 illustrates notable regional disparities in the explanatory power of our indicators. In Europe, the indicators exhibit a similar capacity to represent S&T citation dynamics, whereas for North American publications, the coefficients vary substantially, with 0.945 for the semantic indicator and 1.913 for the citation indicator—an important contrast to the minimal difference of 0.054 for Europe.

These findings suggest a closer alignment between inventors and the epistemic community in Europe, resulting in higher-quality scientific references within invention patents. This aligns with prior research (Webb et al. 2005; Callaert et al. 2006), which found that while U.S. NPLs are more numerous, they are less indicative of the scientific grounds for inventions and more reflective of examiners' practices.

Asian NPL appear less strongly correlated with our indicators and show a moderate gap between their coefficients. This gap is proportionally closer to that observed for the sample as a whole. This lower coefficient can be interpreted as resulting from the lower development of some territories, like India and China, which show increasing publishing capacities but without the same level of efficiency in the productivity of their innovation systems (Bernardes and Albuquerque 2003).

The next section presents the results of our robustness strategy, wherein we employ alternative methodologies and datasets to validate the consistency of our initial findings.

3.2 Robustness results

Our estimations indicate that both citation and semantic relations are able to explain future scientific references in patents, with a slight superiority to citation links. In this section, we seek to check the robustness of this result. To do so, we perform five different assessments.

First, Table 4.10 presents the results of regression assessments using an alternative data computation method, where missing values (NAs) were omitted rather than categorized under the "Others" section. Additionally, the "Non-profit" affiliation was treated as a distinct category instead of being incorporated into "Others". This method led to a substantial decrease in the number of observations, from 17 543 to 9 616. Despite a marginal decline in the coefficient's magnitude, our findings continue to exhibit strong statistical significance. The fit of the model

was enhanced, as evidenced by a significant reduction in the log-likelihood and Akaike Information Criterion (AIC) values. However, it should be noted that the significance of papers authored by companies on our dependent variable diminished. This change might be attributed to the reduced sample size. This robustness test leads us to conclude that our results are not dependent on incorrect missing value computations.

Secondly, Table 4.11 presents the regression outcomes following changes in the ICC indicator threshold, set respectively at 0, 5 and 10. It is observed that alterations in the threshold exert a minimal impact on the results, as evidenced by a slight reduction in the ICC coefficient and marginal improvements in goodness-of-fit measures. These findings lead to the conclusion that, in contrast to the assertions made by Yamashita (2020), the Indirect Citation Indicator in our case study does not exhibit a significant threshold effect.

Thirdly, Table 4.12 displays the results of negative binomial (NB) regression with a zero-inflation specification. This table highlights the limited detection of excess zeros by a conventional logistic regression approach. The zero-inflation model identifies a weakly significant correlation between model 1 and the potential surplus of zeros. Consequently, we only observe minor changes in our results. There is a noticeable increase in the disparity between coefficients and a significant improvement in the relevance of private-public collaboration in model 1. The goodness-of-fit measures show a significant reduction, indicating an improved fit of the ZINB models. However, despite these improvements, our data sample does not seem to be heavily influenced by the excess production of zeros in its standard configuration. To further assess the impact of excess zero production on our findings, Table 4.13 presents regression results under a more rigorous zero-inflation detection criterion within the logistic model. These specifications only use the main independent variable and the journal impact factor (*Hindex*) to discern potential excess of zeros. This reduced specification aims to test the robustness of our results in scenarios of potential over-identification due to excess zero production. These results exhibit a positively significant and hierarchically consistent effect of our indicators on the independent variable. More specifically, we note a significant decrease in coefficient values along with a modest elevation in the coefficients of our control variables. These subsequent ZINB findings further elevate the significance of the goodness-of-fit indicators. These dual assessments of excess-zero production lead us to conclude that our results are not critically affected by an excessive production of null results in our dependent variable.

We do not use the Vuong test to determine the relevance of the ZI model versus its non-ZI version. The Vuong test is originally strictly intended to compare two non-nested models (Wilson 2015). The nesting of the NB model in the ZINB regression could raise concerns, particularly where it does not measure significant zero-inflation (Lee et al. 2023). We therefore stick to the variation of information criteria when assessing the relevance of ZINB regression results.

Fourth, Table 4.14 presents the regression results using the Heckman selection model, implemented to control for selection bias within our data sample. The results indicate that the correction for selection bias is represented by a significantly positive Inverse Mills Ratio value in both models. This finding suggests that the initial sample may have been subject to selection bias and the Heckman model's adjustment provides a more accurate representation of the underlying data relationships. Nevertheless, the results show the robustness of our main finding about selection bias. Despite a slight reduction in the indicator coefficients, both remain positive and strongly significant. Furthermore, the citation-based indicator continues to have a more significant impact on the dependent variables. Additionally, there is a slight reduction in the coefficients of the control variables, but this does not alter their nature or significance.

Finally, we introduce new control variables: Hindex and Authors count. To elucidate the influence of each variable, we incorporate them sequentially and then jointly. The regression incorporating the Hindex variable is confined to its actual positive values, aiming to accentuate its effect and enable comparison of results within a restricted sample. Table 4.15 indicates a modest decline in the values of both indicators, with a more pronounced decrease observed for the citation-based indicator. The Hindex is statistically significant at the 10% and 5% confidence intervals in models 1 and 2, respectively. Its inclusion does not fundamentally alter the nature or significance of the independent and control variables. An interesting shift occurs due to the restriction of the sample to those with fewer null values, reducing the number of observations from 17 543 to 11 380 and enhancing the data fit. Indeed, models 1 and 2 exhibit significantly improved log-likelihood and AIC values. This suggests that the exclusion of null Hindex values leads to fewer nulls across the entire dataset, resulting in a more robust assessment. Models 3 and 4 reveal a negligible impact of author count on the model estimations, indicating no correlation with the dependent variable. Models 5 and 6 yield results comparable to models 1 and 2. Notably, the "Others" field category disappears, suggesting that papers categorized under this field were linked to a null Hindex. These last two models demonstrate a

slightly weaker fit to the data, which can be interpreted as noise introduced by the non-significant author count variable. This new set of regression analyses, which include the additional control variables, further reinforces the robustness of our main findings, even when accounting for reductions in sample size and the presence of some unobserved values.

The differentiation of the time periods during which our explained and explanatory variables are measured enables us to exclude simultaneity as a source of endogeneity. Despite our efforts to ensure robustness, we acknowledge that some forms of endogeneity may still be present in our results. This is particularly relevant to the relationship between our explained variable and our indicator based on citations, both of which are influenced by citation phenomena. Nevertheless, the robustness tests conducted previously enable us to interpret our main findings with increased confidence, taking into account potential biases such as data computation errors, the presence of excess zeros, selection bias, and some non-observed values. The next section will describe the theoretical implications of our findings.

4 Theoretical implications

The robustness of our findings justifies the concurrent existence of citation and semantic links within the scientific sources of patents. These sources are influenced by both the deterministic network of citations and cognitive proximity, reinforcing the argument presented in recent literature regarding the significance of semantic analysis in evaluating the contemporary technological relevance of scientific articles. Additionally, our results support the confidence in using NPL to identify the prior knowledge that underpins inventions. A substantial part of these references can be explained by the sharing of common problems, placing researchers and inventors within the same epistemic community, and mutually benefiting from theoretical or technical solutions.

The differences in the distribution of marginal effects and the weak correlation existing between our two forms of indicators point out two distinct phenomena, both strongly influencing the integration of scientific knowledge into technological development. This finding is reinforced by the observation that the territory has a certain influence on the differences in involvement of the citation and semantic link. Different regions show varying tendencies in their preference for one type of link over the other when referencing scientific sources for patents.

The coexistence of the citation and semantic link effects describes a S&T relationship that operates in a linear and hierarchical pattern over the long term while also being capable of strong and more instantaneous interactions, suggesting a co-evolutive concomitant relationship.

To our knowledge, this study appears to be the first to compare the effects of the co-evolutionary process and the linear process to explain NPL references. The theoretical implications of our results are based on an inductive approach, and any extrapolation to other technological domains or to a general model remains speculative at this stage. Additionally, it should be noted that our dependent variable relies on citations. The apparent superiority of citation indicators might be explained by their greater inherent capacity for self-explanation. A complementary study could compare citation and semantic in their ability to explain forward semantic proximity, providing further insights into their relative strengths and limitations in

capturing the nuances of S&T links. Nevertheless, there is a potential emergence of a new research domain around a semantic approach to science-technology interactions. However, the accumulation of sufficient computational resources to empirically validate co-evolution in the general process of science-technology interaction poses a near-term challenge.

Conclusion

The subject of science-technology interactions benefits from a long-standing interest, leading to a rich theoretical construction and heterogeneous empirical methods. The utilization of scientific references in patents has facilitated the development of robust indicators, producing results that shed light on the various processes underlying scientific integration in technological development. Nevertheless, these citation-based indicators have their limitations, influenced by social and temporal factors that restrict a more nuanced understanding of the innovation process. With advancement in Natural Language Processing (NLP), the potential for widespread adoption of semantic proxy approaches is now emerging. This new method addresses some of the limits of the citation-based approaches, offering a more immediate and co-evolutionary perspective on the science-technology relationship.

This study proposes to compare the respective influences of citation link and semantic link on the propensity of a scientific article to appear among the NPL references of patents filed in the 3D printing domain. Our indicators, based on literature, measure bibliographic proximity between articles and patents by counting common references and mean semantic proximity between document content.

Our results support the strengths of both approaches in their ability to identify technologically relevant scientific articles, with a relative superiority to the citation-based approach. The weak correlation and different distribution of marginal effects between these indicators support the hypothesis that two distinct phenomena coexist within the science-technology interactions. The influence of these phenomena varies regionally, with North American NPL showing a stronger reliance on previous citations compared to semantic proximity to a community of practice, in contrast to the more balanced influences observed in Europe.

The incorporation of semantic analysis in the study of science-technology relationships appears to be a promising avenue for enriching our understanding of the innovation process. This approach could provide a complementary dimension to the existing citation-based analysis, thus offering a more comprehensive view of interactions between scientific research and technological development.

Appendix

A. Additional information on data collection

Table 4.3: List of keywords in scholar query

3D PRINTING
3D PRINTER
ADDITIVE MANUFACTURIN
ADDITIVE LAYER MANUFACTURING
DIRECT METAL LASER SINTERING
SELECTIVE LASER MELTING
ELECTRON BEAM MELTING
SELECTIVE LASER SINTERING
DIRECT METAL DEPOSITION
POWDER BED
LASER CLADDIN
CLAD

Table 4.4: Keywords to identify the three types of affiliation of focal papers.

Affiliations	Keywords / description
Firm	INC, LTD, CORP, CO, GMBH, AG, GRP, SA, AB, SPA, PLC, AS, MBH, BV, KG, KK, PC, LLC, NV, OY, LLP, SRL, R&D, KGAA, SRO, LTDA, CONSULTANTS, CONSULTING, CONSULTANCY, CONSULTANT, CONSULT, GROUP, COMPANY, LP, LIMITED, SARL, SAPA, VOS
University	UNIVERSITY, UNIV, UNIVERSITE, UNIVERSITAT, ECOL, ECOLE, ECOLES, MED, SCH, COLL, INST TECHNOL, CHU, CHRU, TH, ETH, FAC, GRAD SCH, POLYTECH, POLYTECN
Public Institute	NATL, ACAD, FED, NAEL, NATL, MINIST, EUROPEAN, GOVT, BUNDES, CITY, MUNICIPAL, PUBL, PREFECTURAL
Others	Non-profit organizations and other organizations not classified in the four sectors above and unknown.

Table 4.5: List of scientific domains

General
Life Sciences
Social Sciences
Physical Sciences
Health Sciences
Interdisciplinary

B. Descriptive statistics

Table 4.6: Summary statistics

Variables	N	Mean	Standard deviation	Min	25%	50%	75%	Max
Forward Patent Citations	17543	0,34	2,80	0	0	0	0	258
Indirect Patent Citation	17543	0,02	0,06	0	0	0	0,02	1
Semantic Proximity Mean	17543	0,29	0,16	0	0,17	0,26	0,38	1
References	17543	3,44	2,26	0	1,58	3,70	5,13	11,72
Scholarly Citations	17543	3,69	2,18	0	2,32	4,39	5,25	9,67
Hindex	11380	0,03	0,05	0,00	0,01	0,02	0,04	1
Number of authors	17543	1,87	0,94	0	1,58	2	2,58	7,25

Table 4.7: Correlation coefficients

Variables	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
(1) Indirect Patent Citation	1								
(2) Semantic Proximity Mean	0,20	1							
(3) References	0,31	0,11	1						
(4) Scholarly Citations	0,31	0,02	0,70	1					
(5) Field	0,03	0,03	0,05	0,09	1				
(6) Location	0,02	0,09	-0,15	-0,20		1			
(7) Affiliation	0,10	0,09	0,32	0,40	-0,03	-0,21	1		
(8) Hindex	0,21	0,07	0,36	0,26	-0,08		0,12	1	
(9) Number of authors	0,08	0,02	0,33	0,34	-0,07	-0,15	0,18	0,16	1

Notes: Only correlation coefficients significant at the 5% level (p -value < 0.05) have been reported.

C. Poisson regression

Table 4.9: Poisson regression results

Dependent variable: Forward patent citations to focal articles, <i>NPL</i>		
Variables	Poisson	
	(1)	(2)
Indirect Patent Citation	1.752*** (0.086)	
Semantic Proximity Mean		1.162*** (0.075)
Scholarly Citations	0.650*** (0.008)	0.657*** (0.008)
References	-0.115*** (0.011)	-0.045*** (0.011)
Affiliation		
Company	0.678*** (0.074)	0.591*** (0.074)
Public Collaboration	0.283*** (0.049)	0.300*** (0.049)
Public-Private collaboration	0.526*** (0.037)	0.525*** (0.037)
Public	0.139 (0.092)	0.094 (0.092)
Others	0.477*** (0.057)	0.593*** (0.057)
Location		
Europe	0.228*** (0.038)	0.252*** (0.038)
International	-0.139*** (0.048)	-0.086* (0.048)
Japan	-0.090 (0.135)	-0.029 (0.135)
United States	0.465*** (0.037)	0.483*** (0.037)
Field		
Health Sciences	-1.625*** (0.082)	-1.692*** (0.082)
Interdisciplinary	-0.908*** (0.052)	-0.941*** (0.052)
Life Sciences	-0.771*** (0.077)	-0.858*** (0.077)
Others	-1.064*** (0.058)	-1.088*** (0.058)
Physical Sciences	-0.952*** (0.043)	-1.013*** (0.043)
Social Sciences	-5.119*** (1.000)	-5.167*** (1.000)
Constant	-2.747*** (0.079)	-3.266*** (0.083)
Observations	17,543	17,543
Log Likelihood	-13,160.560	-13,219.420
Akaike Inf. Crit.	26,359.120	26,476.840
Deviance goodness-of-fit	21276.89***	21394.61***
Pearson goodness-of-fit	90479.36***	92521.22***

Notes: The effect of the categorical variables Affiliations, Location and Field is measured in relation to the reference variables: "University", "Others" and "General", respectively. Robust standard errors are in brackets. * $p < 0.10$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$.

D. Robustness results

Table 4.10: Robustness results for categorial control variables alternative computation

Dependent variable: Forward patent citations to focal articles, <i>NPL</i>		
	<i>negative binomial</i>	
	(1)	(2)
Indirect Patent Citation	1.919*** (0.368)	
Semantic Proximity Mean		1.191*** (0.202)
Scholarly Citations	0.630*** (0.023)	0.625*** (0.023)
References	-0.081*** (0.030)	-0.021 (0.030)
Affiliation		
Company	0.279 (0.334)	0.286 (0.334)
Public Collaboration	0.093 (0.132)	0.129 (0.131)
Public-Private collaboration	0.125 (0.103)	0.122 (0.103)
Non-profit organisation	1.215* (0.663)	1.103* (0.667)
Public	0.437* (0.260)	0.307 (0.265)
Location		
Europe	0.361*** (0.088)	0.354*** (0.088)
International	0.107 (0.105)	0.118 (0.105)
Japan	0.144 (0.272)	0.171 (0.272)
United States	0.729*** (0.090)	0.743*** (0.090)
Field		
Health Sciences	-1.192*** (0.207)	-1.342*** (0.205)
Interdisciplinary	-0.310* (0.180)	-0.419** (0.178)
Life Sciences	-0.248 (0.233)	-0.349 (0.230)
Physical Sciences	-0.460*** (0.169)	-0.616*** (0.166)
Social Sciences	-4.479*** (1.075)	-4.594*** (1.081)
Constant	-3.903*** (0.233)	-4.330*** (0.241)
Observations	9,616	9,616
Log Likelihood	-5,946.665	-5,942.875
theta	0.210*** (0.009)	0.211*** (0.009)
Akaike Inf. Crit.	11,931.330	11,923.750

Notes: The effect of the categorial variables Affiliations, Location and Field is measured in relation to the reference variables: “University”, “Others” and “General”, respectively. Robust standard errors are in brackets. * $p < 0.10$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$.

Table 4.11: Results of the robustness of threshold variations on the ICC indicator

Dependent variable: Forward patent citations to focal articles, <i>NPL</i>						
	Threshold = 0		Threshold = 5		Threshold = 10	
	<i>negative binomial</i>		<i>negative binomial</i>		<i>negative binomial</i>	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Indirect Patent Citation	1.962*** (0.347)		1.955*** (0.346)		1.934*** (0.345)	
Semantic Proximity Mean		1.296*** (0.174)		1.296*** (0.174)		1.296*** (0.174)
Scholarly Citations	0.649*** (0.019)	0.641*** (0.019)	0.649*** (0.019)	0.641*** (0.019)	0.649*** (0.019)	0.641*** (0.019)
References	-0.050** (0.022)	-0.003 (0.022)	-0.050** (0.022)	-0.003 (0.022)	-0.050** (0.022)	-0.003 (0.022)
Affiliation						
Company	0.789*** (0.203)	0.887*** (0.200)	0.789*** (0.203)	0.887*** (0.200)	0.789*** (0.203)	0.887*** (0.200)
Public Collaboration	0.148 (0.127)	0.180 (0.126)	0.148 (0.127)	0.180 (0.126)	0.148 (0.127)	0.180 (0.126)
Public-Private collaboration	0.064 (0.095)	0.061 (0.095)	0.065 (0.095)	0.061 (0.095)	0.065 (0.095)	0.061 (0.095)
Public	0.332 (0.251)	0.213 (0.255)	0.332 (0.251)	0.213 (0.255)	0.331 (0.251)	0.213 (0.255)
Others	0.488*** (0.104)	0.589*** (0.104)	0.488*** (0.104)	0.589*** (0.104)	0.487*** (0.104)	0.589*** (0.104)
Location						
Europe	0.345*** (0.077)	0.328*** (0.077)	0.345*** (0.077)	0.328*** (0.077)	0.344*** (0.077)	0.328*** (0.077)
International	0.140 (0.096)	0.156 (0.096)	0.139 (0.096)	0.156 (0.096)	0.138 (0.096)	0.156 (0.096)
Japan	0.075 (0.260)	0.104 (0.259)	0.075 (0.260)	0.104 (0.259)	0.074 (0.260)	0.104 (0.259)
United States	0.620*** (0.082)	0.623*** (0.082)	0.619*** (0.082)	0.623*** (0.082)	0.619*** (0.082)	0.623*** (0.082)
Field						
Health Sciences	-1.195*** (0.206)	-1.401*** (0.204)	-1.195*** (0.206)	-1.401*** (0.204)	-1.196*** (0.206)	-1.401*** (0.204)
Interdisciplinary	-0.415** (0.184)	-0.558*** (0.181)	-0.415** (0.184)	-0.558*** (0.181)	-0.417** (0.184)	-0.558*** (0.181)
Life Sciences	-0.057 (0.230)	-0.183 (0.227)	-0.057 (0.230)	-0.183 (0.227)	-0.059 (0.230)	-0.183 (0.227)
Others	-0.581*** (0.184)	-0.771*** (0.181)	-0.581*** (0.184)	-0.771*** (0.181)	-0.582*** (0.184)	-0.771*** (0.181)
Physical Sciences	-0.435** (0.173)	-0.645*** (0.169)	-0.435** (0.173)	-0.645*** (0.169)	-0.436** (0.173)	-0.645*** (0.169)
Social Sciences	-4.735*** (1.081)	-4.893*** (1.085)	-4.735*** (1.081)	-4.893*** (1.085)	-4.738*** (1.081)	-4.893*** (1.085)
Constant	-4.058*** (0.206)	-4.388*** (0.210)	-4.057*** (0.206)	-4.388*** (0.210)	-4.055*** (0.206)	-4.388*** (0.210)
Observations	17,543	17,543	17,543	17,543	17,543	17,543
Log Likelihood	-8,350.905	-8,338.922	-8,350.918	-8,338.922	-8,351.039	-8,338.922
theta	0.175*** (0.007)	0.177*** (0.007)	0.175*** (0.007)	0.177*** (0.007)	0.175*** (0.007)	0.177*** (0.007)
Akaike Inf. Crit	16,739.810	16,715.840	16,739.830	16,715.840	16,740.080	16,715.840

Notes: The effect of the categorical variables Affiliations, Location and Field is measured in relation to the reference variables: “University”, “Others” and “General”, respectively. Robust standard errors are in brackets.

* $p < 0.10$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$.

Table 4.12: Regression results for zero excess control

<i>Dependent variable: NPL</i>				
	<i>Negative binomial count model</i>		<i>Zero-inflation (ZI-Logistic) model</i>	
	(1)	(2)	(1)	(2)
Indirect Patent Citation	2.108*** (0.392)			
Semantic Proximity Mean		1.280*** (0.180)		
Scholarly Citations	0.626*** (0.019)	0.622*** (0.019)	-17.780 (11.363)	-79.570 (245.06)
References	-0.083*** (0.023)	-0.031 (0.022)	-12.433* (7.329)	-51.116 (153.128)
Hindex			8.38 (40.75)	30.308 (99.960)
Authors Count			-0.762 (0.575)	-0.915 (0.933)
Affiliation				
Company	0.844*** (0.211)	0.949*** (0.208)	19.254 (14.299)	88.809 (251.384)
Public Collaboration	0.152 (0.125)	0.184 (0.124)	-1.418 (13.321)	-11.720 (59.075)
Public-Private collaboration	0.073** (0.095)	0.070 (0.095)	21.141 (14.102)	98.227 (300.063)
Public	0.327 (0.246)	0.212 (0.248)	6.236 (99.729)	10.135 (536.333)
Others	0.454*** (0.104)	0.553*** (0.105)	-28.413 (17.974)	-126.500 (388.199)
Location				
Europe	0.315*** (0.076)	0.299*** (0.076)	-29.610 (18.299)	-127.599 (388.473)
International	0.135 (0.096)	0.150 (0.096)	9.9072 (10.250)	56.223 (179.428)
Japan	0.121 (0.259)	0.145 (0.258)	25.6718 (17.335)	101.748 (310.473)
United States	0.607*** (0.082)	0.614*** (0.082)	-5.7268 (7.514)	-30.202 (90.262)
Field				
Health Sciences	-1.200*** (0.204)	-1.412*** (0.200)		
Interdisciplinary	-0.400** (0.184)	-0.555*** (0.179)		
Life Sciences	-0.025 (0.234)	-0.169 (0.230)		
Others	-0.561*** (0.182)	-0.758*** (0.178)		
Physical Sciences	-0.445*** (1.171)	-0.662*** (0.166)		
Social Sciences	-4.698*** (1.055)	-4.873*** (1.057)		
Constant	-3.763*** (0.210)	-4.119*** (0.216)	29.826* (18.001)	127.686 (388.186)
Log(theta)	-1.735*** (0.037)	-1.730*** (0.037)		
Log Likelihood	-8,323.8	-8,314.6		
Akaike Inf. Crit.	16 716.27	16 697.25		
Observations	17,543	17,543		

Notes: The independent variables and the categorical variable "Field" are removed from the zero-inflated model due to the introduction of NAs. The effect of the categorical variables Affiliations, Location is measured in relation to the reference variables: "University" and "Others", respectively. Robust standard errors are in brackets. * $p < 0.10$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$.

Table 4.13: Regression results for zero excess control with strong identification

<i>Dependent variable: NPL</i>				
	<i>Negative binomial count model</i>		<i>Zero-inflation (ZI-Logistic) model</i>	
	(1)	(2)	(1)	(2)
Indirect Patent Citation	0.857** (0.366)		-47.683** (20.686)	
Semantic Proximity Mean		0.560** (0.218)		-5.182*** (1.123)
Scholarly Citations	0.613*** (0.019)	0.626*** (0.019)		
References	-0.082*** (0.024)	-0.009 (0.023)		
Hindex			-17.974*** (4.980)	-21.951*** (6.538)
Affiliation				
Company	0.822*** (0.203)	0.880*** (0.198)		
Public Collaboration	0.128 (0.124)	0.166 (0.125)		
Public-Private collaboration	0.077 (0.095)	0.068 (0.095)		
Public	0.344 (0.246)	0.302 (0.247)		
Others	0.490*** (0.105)	0.600*** (0.105)		
Location				
Europe	0.353*** (0.078)	0.341*** (0.077)		
International	0.123 (0.096)	0.144 (0.097)		
Japan	0.041 (0.253)	0.062 (0.251)		
United States	0.587*** (0.082)	0.597*** (0.082)		
Field				
Health Sciences	-1.205*** (0.200)	-1.359*** (0.197)		
Interdisciplinary	-0.465*** (0.179)	-0.550*** (0.176)		
Life Sciences	-0.157 (0.230)	-0.259 (0.227)		
Others	-0.514*** (0.180)	-0.625*** (0.179)		
Physical Sciences	-0.508*** (0.166)	-0.612*** (0.163)		
Social Sciences	-4.630*** (1.064)	-4.776*** (1.064)		
Constant	-3.366*** (0.214)	-3.901*** (0.226)	0.011 (0.149)	0.494* (0.267)
Log(theta)	-1.485*** (0.062)	-1.540*** (0.059)		
Log Likelihood	-8,303.270	-8,317.650		
Akaike Inf. Crit.	16 652.54	16 681.30		
Observations	17,543	17,543		

Notes: The independent variables and the categorical variable "Field" are removed from the zero-inflated model due to the introduction of NAs. The effect of the categorical variables Affiliations, Location is measured in relation to the reference variables: "University" and "Others", respectively. Robust standard errors are in brackets. * $p < 0.10$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$.

Table 4.14: Regression results for selection bias control

<i>Heckman selection</i>				
	<i>Dependent variable: log2(NPL)</i>		<i>Probit selection equation</i>	
	(1)	(2)	(1)	(2)
Indirect Patent Citation	1.345*** (0.357)		0.926*** (0.152)	
Semantic Proximity Mean		0.928*** (0.258)		0.659*** (0.084)
Scholarly Citations	0.561*** (0.106)	0.533*** (0.102)	0.309*** (0.010)	0.307*** (0.010)
References	-0.074*** (0.021)	-0.033 (0.021)	-0.012 (0.011)	0.012 (0.011)
Hindex			0.845**** (0.248)	0.910*** (0.245)
Authors Count			0.023 (0.019)	0.020 (0.019)
Affiliation				
Company	0.657*** (0.209)	0.643*** (0.203)	0.290*** (0.107)	0.297*** (0.107)
Public Collaboration	0.137 (0.122)	0.165 (0.117)	-0.109 (0.069)	-0.100 (0.068)
Public-Private collaboration	0.171** (0.086)	0.157* (0.083)	0.027 (0.049)	0.018 (0.049)
Public	0.376 (0.231)	0.348 (0.223)	0.029 (0.134)	0.020 (0.135)
Others	0.418*** (0.113)	0.475*** (0.118)	0.182*** (0.054)	0.228*** (0.054)
Location				
Europe	0.257*** (0.082)	0.257*** (0.081)	0.128*** (0.039)	0.137*** (0.039)
International	0.086 (0.089)	0.111 (0.089)	0.061 (0.049)	0.085* (0.048)
Japan	0.202 (0.23)	0.209 (0.225)	0.269** (0.118)	0.289** (0.118)
United States	0.494*** (0.125)	0.464*** (0.119)	0.306*** (0.041)	0.301*** (0.041)
Field				
Health Sciences	-1.134*** (4.824)	-1.169*** (0.253)	-0.496*** (0.107)	-0.541*** (0.106)
Interdisciplinary	-0.571*** (3.139)	-0.590*** (0.159)	-0.136 (0.096)	-0.144 (0.096)
Life Sciences	-0.275 (3.873)	-0.313 (0.202)	-0.152 (0.119)	-0.173 (0.119)
Others	-0.721*** (3.603)	-0.746*** (0.188)	-0.237** (0.099)	-0.260*** (0.099)
Physical Sciences	-0.682*** (3.332)	-0.718*** (0.171)	-0.252*** (0.091)	-0.280*** (0.091)
Social Sciences	-3.767*** (1.05)	-3.648*** (1.049)	-1.90*** (0.417)	-1.924*** (0.423)
Constant	-3.231*** (1.161)	-3.354*** (1.217)	-2.503*** (0.113)	-2.794*** (0.117)
Inverse Mills Ratio lambda			1.684*** (0.431)	1.566*** (0.418)
rho			1.015	0.996
sigma			1.659	1.571
R ²	0.145	0.141		
Adjusted R ²	0.136	0.133		
Observations: total: 17,543 - censored: 15566 - observed: 1977				

Notes: The use of the Heckman selection regression model is unsuitable for accurately measuring the effect on a counting variable. Therefore, to address this limitation, the dependent variable NPL is subjected to a log2 transformation. The effect of the categorical variables Affiliations, Location and Field is measured in relation to the reference variables: “University”, “Others” and “General”, respectively. Robust standard errors are in brackets. * $p < 0.10$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$.

Table 4.15: Results of the robustness for new control variables integration

Dependent variable: Forward patent citations to focal articles, <i>NPL</i>						
	Hindex		No. of Authors		Hindex & No. of authors	
	<i>zero-inflated count data</i>		<i>zero-inflated count data</i>		<i>zero-inflated count data</i>	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Indirect Patent Citation	1.730*** (0.371)		2.005*** (0.347)		1.728*** (0.371)	
Semantic Proximity Mean		1.216*** (0.196)		1.296*** (0.174)		1.216*** (0.196)
Scholarly Citations	0.644*** (0.022)	0.633*** (0.022)	0.647*** (0.019)	0.640*** (0.019)	0.644*** (0.022)	0.633*** (0.022)
References	-0.089*** (0.026)	-0.040 (0.026)	-0.053** (0.022)	-0.004 (0.022)	-0.089*** (0.026)	-0.039 (0.026)
Hindex	0.938* (0.560)	1.267** (0.551)			0.941* (0.561)	1.289** (0.551)
Number of authors			0.056 (0.037)	0.040 (0.037)	-0.002 (0.041)	-0.019 (0.041)
Affiliation						
Company	0.687*** (0.239)	0.803*** (0.237)	0.815*** (0.203)	0.908*** (0.200)	0.686*** (0.239)	0.792*** (0.237)
Public Collaboration	0.080 (0.138)	0.115 (0.137)	0.120 (0.128)	0.159 (0.127)	0.081 (0.139)	0.126 (0.138)
Public-Private collaboration	0.398 (0.271)	0.266 (0.275)	0.036 (0.097)	0.040 (0.097)	0.086 (0.107)	0.086 (0.107)
Public	0.085 (0.105)	0.077 (0.105)	0.309 (0.252)	0.198 (0.255)	0.399 (0.271)	0.273 (0.275)
Others	0.611*** (0.122)	0.716*** (0.123)	0.502*** (0.104)	0.599*** (0.104)	0.610*** (0.123)	0.711*** (0.123)
Location						
Europe	0.216** (0.085)	0.212** (0.085)	0.346*** (0.077)	0.329*** (0.077)	0.216** (0.085)	0.211** (0.085)
International	-0.093 (0.105)	-0.081 (0.105)	0.117 (0.097)	0.140 (0.097)	-0.092 (0.105)	-0.075 (0.106)
Japan	-0.147 (0.295)	-0.131 (0.296)	0.070 (0.260)	0.100 (0.259)	-0.147 (0.295)	-0.130 (0.296)
United States	0.545*** (0.088)	0.549*** (0.088)	0.621*** (0.082)	0.625*** (0.082)	0.545*** (0.088)	0.546*** (0.088)
Field						
Health Sciences	-1.178*** (0.209)	-1.305*** (0.207)	-1.197*** (0.207)	-1.407*** (0.204)	-1.178*** (0.209)	-1.300*** (0.207)
Interdisciplinary	-0.340* (0.186)	-0.424** (0.183)	-0.411** (0.184)	-0.560*** (0.181)	-0.340* (0.186)	-0.422** (0.183)
Life Sciences	-0.015 (0.229)	-0.085 (0.226)	-0.039 (0.230)	-0.175 (0.227)	-0.016 (0.229)	-0.087 (0.226)
Others			-0.567*** (0.185)	-0.764*** (0.181)		
Physical Sciences	-0.419** (0.175)	-0.565*** (0.172)	-0.423** (0.173)	-0.640*** (0.170)	-0.419** (0.175)	-0.566*** (0.172)
Social Sciences	-4.591*** (1.077)	-4.683*** (1.081)	-4.681*** (1.083)	-4.860*** (1.087)	-4.593*** (1.078)	-4.698*** (1.082)
Constant	-3.828*** (0.220)	-4.217*** (0.226)	-4.157*** (0.216)	-4.457*** (0.221)	-3.824*** (0.230)	-4.184*** (0.237)
Observations	11 380	11 380	17 543	17 543	11 380	11 380
Log Likelihood	-6,729.056	-6,720.721	-8,349.750	-8,338.324	-6,729.055	-6,720.611
theta	0.188*** (0.008)	0.190*** (0.008)	0.175*** (0.007)	0.176*** (0.007)	0.188*** (0.008)	0.190*** (0.008)
Akaike Inf. Crit.	13,496.110	13,479.440	16,739.500	16,716.650	13,498.110	13,481.220

Notes: The effect of the categorical variables Affiliations, Location and Field is measured in relation to the reference variables: “University”, “Others” and “General”, respectively. Robust standard errors are in brackets.

* $p < 0.10$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$.

Chapitre 5 :

**Le rôle de la Science pour l'Autonomie des Nations
dans l'innovation stratégique :**

étude économétrique des flux de connaissances intéressant
la défense

Ce chapitre a été corédigé par Dorgyès Kouakou (UEA, ENSTA, IP Paris)

Résumé

Ce chapitre aborde la question de la causalité linéaire entre les capacités scientifiques d'un territoire national et ses capacités de développement technologique. Dans un contexte de normalisation et d'internationalisation des systèmes d'innovation de défense (James 2009; Meunier 2017; Binz et Truffer 2017), les connaissances scientifiques, par leur caractère universel et hautement codifié, sont susceptibles de constituer un bien public mondial. Par conséquent, la diffusion globale de la science soulève la question de ses retombées locales. Cette question acquiert une importance accrue dans le domaine des innovations relatives à la défense, que nous définissons ici comme des technologies à usage militaire et aérospatiale. L'exploitation extraterritoriale des connaissances scientifiques en matière de défense pose un défi de souveraineté économique, auquel nous entendons apporter un éclairage quantitatif. À cette fin, nous commençons par mobiliser des données relatives aux brevets associés à des technologies pertinentes pour la défense, et nous identifions les références scientifiques au sein de cet échantillon comme un corpus de connaissances scientifiques pertinentes pour la défense. Nous collectons ensuite les citations et les références présentes dans nos deux échantillons afin de mesurer le degré d'autonomie des territoires dans la maîtrise des flux de connaissances scientifiques et technologiques. Nous employons enfin la causalité de Granger et une méthode par *Balancing Entropy* pour évaluer les liens existants entre ces deux indicateurs. Nos résultats sont par la suite consolidés par un modèle à effets fixes avec variables instrumentales. Nos résultats désignent une causalité entre l'autonomie scientifique d'un territoire et son autonomie technologique. Nous interprétons ces résultats comme la persistance d'une forme de connaissances scientifique tacite, collante territorialement, malgré l'existence d'un réseau de connaissances de plus en plus mondialisé. Ce phénomène permet aux territoires de bénéficier localement des avantages liés au financement et au développement de la recherche scientifique, notamment spécialisée dans les domaines des sciences physiques, tels que le génie aérospatial, électrique et électronique, ainsi que la chimie.

Introduction

De l'arme atomique au canon électromagnétique, l'intégration des avancées scientifiques au développement des technologies de l'armement constitue un mécanisme désormais habituel au sein de nos sociétés modernes. L'utilité du progrès scientifique pour le développement et la défense des nations a profité d'un large soutien à la suite de la Seconde Guerre mondiale, notamment grâce au célèbre rapport de Vannevar Bush (1945). Le schéma d'opposition bipolaire propre à la guerre froide a maintenu une forte nécessité d'amélioration des matériels militaires intégrant l'innovation de défense dans une structure d'échange de connaissances relativement fermée. Cette structure suivait un modèle en triple hélice comprenant l'industrie de l'armement, les instances gouvernementales en charges de la défense et les universités publiques (James 2009). La fin de l'opposition Est-Ouest au cours des années 1990 a entraîné un changement de paradigme important dans la relation entre l'innovation et la science en matière de défense. L'ouverture accrue des systèmes d'innovation de défense au développement civils, tant au niveau des acteurs (Stowsky 2004) que des connaissances (Meunier 2017) a entraîné une vision ambiguë de la relation entre la science et l'industrie de défense. Serfati (2005) décrit ainsi une relation privilégiée, en opposition à Bellais (2005) pour qui l'intégration des connaissances scientifiques par les entreprises de défense est insuffisante. Cette opposition est également à l'œuvre dans les études empiriques. Ainsi, Fauconnet (2019, chap. 2) décrit la présence particulièrement intense de références scientifiques dans l'état de l'art des technologies à usage militaire et aérospatiale. Cependant, l'intégration des connaissances scientifiques est significativement plus faible lorsque l'on compare les grands groupes de l'armement à l'ensemble des grandes entreprises innovantes (Fauconnet 2021).

Malgré l'ambiguïté du rapport de l'industrie de la défense aux progrès scientifiques, le caractère fondamental de la recherche dans le maintien de la supériorité militaire reste prégnant et fait de ce sujet un enjeu central dans la politique d'innovation des nations (Paarlberg 2004). La quête d'autonomie dans les capacités d'innovation de défense constitue une priorité politique pour certaines nations, notamment émergentes (Coulomb 2011), telles que la Chine (Cheung 2009) et l'Inde (Behera 2018). L'innovation de défense permet d'établir une supériorité technologique face aux adversaires, fonctionnant ainsi comme un mécanisme de dissuasion (Sempere, 2015). Généralement, elle contribue à l'amélioration des performances

opérationnelles des forces armées. Cependant, il convient de noter une exception importante avec les innovations qualifiées de « cannibales » (Kuo, 2022). Ces dernières présentent un risque d'affaiblissement des capacités militaires traditionnelles, en privilégiant l'adoption de technologies nouvelles et potentiellement non éprouvées. Ce type d'innovation peut induire des vulnérabilités significatives en période de conflit. En outre, la production, l'utilisation et la diffusion de connaissances nécessaires à l'amélioration de l'équipement de défense soulèvent des enjeux cruciaux de stratégie et de souveraineté (Dupuy 2013).

Ces enjeux, ainsi que le rôle prééminent de l'État dans la conduite de l'innovation en matière de défense, renforcent la pertinence d'analyser l'innovation dans le cadre d'un Système National (SNI).

Ce cadre conceptuel place le processus d'innovation dans un réseau de transmission de connaissances entre différents acteurs, avec en premier lieu les entreprises, mais également les centres de recherche, les universités, les institutions de soutien à l'innovation, les administrations publiques, etc. (Lundvall 1992). Malgré le rôle important des entreprises privées dans la conduite du processus d'innovation, l'État garde le rôle dominant du système en finançant une part importante de la R&D et de la science fondamentale ainsi qu'en assurant le respect de la propriété intellectuelle (Niosi et Bellon 1994) et en définissant les grandes orientations des besoins en innovation (Mazzucato 2018). Dans ce cadre, l'industrie de la défense joue un rôle important, en favorisant indirectement l'apparition de technologies de rupture dans le domaine civil (ou *spin-off*), comme Internet (Alic, Branscomb, et Brooks 1992; Ruttan 2006), ou plus récemment et plus indirectement l'iPhone (Mazzucato 2015). L'impact des capacités scientifiques des nations sur les performances de leurs systèmes d'innovation est largement reconnu (Patel et Pavitt 2000; Van Looy et al. 2006). Les performances scientifiques et technologiques des nations en matière de défense sont ainsi supposées largement liées.

Cheung (2021) identifie la partie d'un SNI appartenant au secteur industriel de la défense comme un Système d'Innovation de Défense (SID) dont l'objectif précis est de fournir la Base Industrielle et Technologique de Défense (BITD) en innovation. Les performances de ces SID sont alors, entre autres, influencées par le niveau de menaces géostratégiques, le soutien politique de haut niveau, l'héritage historique, les transferts de technologie, le niveau de développement économique, le niveau de capital humain, etc.

Dans un contexte général d'une circulation croissante des connaissances à l'échelle internationale, influencée notamment par la mondialisation des systèmes de production, par la

normalisation de l'industrie de défense et par le développement des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC, Hérault 2018), les flux scientifiques et technologiques sont supposés être affectés différemment (Patel et Pavitt 2000). Les connaissances scientifiques sont, en effet, supposées plus codifiées et peu limitées géographiquement dans leur diffusion (Belenzon et Schankerman 2013a; Bikard et Marx 2020). Le caractère à la fois ambigu et stratégique qu'entretient la science avec l'industrie de défense ainsi que sa capacité à se diffuser plus librement entre les territoires soulève un certain nombre de questions qui peuvent être résumées comme suit :

Quelles sont les connaissances scientifiques intéressant la défense, et dans quelle mesure leur présence sur un territoire influence-t-elle les capacités d'innovation de défense d'un pays ?

Notre approche vise à vérifier la persistance du lien entre science et technologie (S&T) au niveau des principaux SID mondiaux dans le contexte d'un réseau de connaissances internationalisé. Pour cela, nous mobilisons des données de citations de brevet d'invention et d'articles scientifiques comme *proxy* de l'activité scientifique et technologique. Ces données de citations sont interprétées comme des flux de connaissances comprenant un territoire émetteur et un territoire récepteur. Dans un premier temps, nous produisons des indicateurs d'autonomie stratégique basés sur une approche structurale des flux de connaissances intra et interterritoriaux. Cette première étape vise à mesurer la centralité des différents territoires nationaux dans les réseaux mondiaux de connaissances scientifiques et technologiques intéressant la défense. Dans un second temps, nous mesurons le lien existant entre l'autonomie scientifique et technologique à l'aide d'un test de causalité de Granger. Nous complétons ce test de causalité avec une approche complémentaire par *Entropy Balancing* (EB) et nous consolidons nos résultats à l'aide d'un troisième modèle avec variables instrumentales.

Nos résultats présentent les performances scientifiques d'un territoire dans les domaines intéressant la défense comme un vecteur de performance des SID.

Selon notre analyse, cet effet s'explique principalement par le renforcement d'une capacité d'absorption au niveau territorial (Schillaci, Romano, et Nicotra 2013), qui permet aux acteurs de jouer un rôle d'intermédiaire dans l'accès aux connaissances théoriques nécessaires à leurs développements technologiques. Autrement dit, nous interprétons ce lien S&T comme relevant des capacités des acteurs à jouer le rôle de *gatekeeper* (Taylor 1975), permettant une diffusion intraterritoriale des connaissances en circulation au sein d'un réseau mondial de

connaissances, plus que leurs capacités à générer les connaissances scientifiques directement utiles au développement technologique national.

La suite de ce chapitre est organisée comme suit : (i) la première partie rappelle le contexte théorique particulier qui entoure l'étude des innovations de défense ; (ii) la seconde partie détaille la méthodologie et les données utilisées dans notre approche ; (iii) la troisième partie présente nos résultats empiriques ; (iv) enfin, la dernière partie interprète les implications théoriques des résultats obtenus et conclut.

1 Cadre théorique

1.1 La relation science-technologie dans l'industrie de la défense

Les activités scientifiques et technologiques entretiennent des relations complexes. Longtemps considérée comme linéaire, il est communément admis aujourd'hui que cette relation obéit également à des phénomènes rétroactifs et multicanaux. Les connaissances scientifiques jouent ainsi un rôle complexe et transversal dans le processus d'innovation. Les différents champs de recherche permettent *in fine* un certain nombre d'applications techniques et d'amélioration de produits ou de services. Ainsi, l'industrie pharmaceutique apparaît particulièrement liée aux recherches en biochimie et en génie génétique, l'industrie numérique fait appel aux mathématiques, à la physique et à l'ingénierie des systèmes et le domaine des services peut mobiliser des connaissances issues de la psychologie, de la sociologie ou de l'économie (Caraça, Lundvall, et Mendonça 2009). L'intégration des productions scientifiques au processus d'innovation est largement hétérogène entre les différents secteurs industriels (Narin, Hamilton, et Olivastro 1997). Par exemple, cette intégration est relativement faible dans les industries du textile et des transports, tandis qu'elle est nettement plus marquée dans les secteurs chimiques et pharmaceutiques (Godin 1996).

Malgré les apports conséquents de Fauconnet (2019; 2021), les dynamiques de la relation S&T au sein de l'industrie de défense restent peu documentées d'un point de vue quantitatif. Ce travail vise à éclairer davantage ce sujet, notamment du point de vue des dynamiques intra et interterritoriales.

1.1.1 La science et la technologie

La littérature dresse un cadre théorique très différent pour les activités scientifiques et technologiques. D'un côté, la science se conçoit comme une activité de recherche basée sur des faits et vérités observées cherchant à produire de nouvelles connaissances comme autant de nouvelles compréhensions des phénomènes naturels, sociaux ou psychologiques. Cette activité part de conditions connues et recherche des résultats finaux inconnus (Audretsch et al. 2002). Elle est perçue comme un bien public, car les connaissances générées sont supposées être généralisables, reproductibles, codifiées et publiquement partageables sous forme d'articles ou d'ouvrages (Cozzens et al. 2005). En conséquence, la recherche est principalement conduite

par des institutions académiques, financées par des fonds publics. L'activité scientifique est généralement considérée comme le domaine des chercheurs (ou scientifiques) qui travaillent sans considérations économiques et sont motivés par un « goût pour la science ». La qualité d'un travail est évaluée par des pairs, en suivant le principe du scepticisme organisé, et se reflète par leur référencement dans une quantité importante d'autres travaux. Les contributions novatrices sont ainsi récompensées par des opportunités de carrière et une reconnaissance au sein de la communauté scientifique (Merton 1942; 1957; Allen 1977; Dasgupta et David 1994; Besancenot et Vranceanu 2015; Gans, Murray, et Stern 2017).

D'un point de vue quantitatif, l'usage de bases de données d'articles scientifiques et de leurs références bibliographiques est largement reconnu comme un *proxy* fiable de l'activité scientifique, malgré certaines limites telles que la sous-représentation des travaux non publiés en anglais ou des formats autres que les articles traditionnels (Small et Garfield 1985; Meyer 2002; Han 2007).

De l'autre côté, la technologie se conçoit comme une activité de développement cherchant à dépasser une impossibilité technique dans l'objectif de produire un « artefact » nouveau. Ce processus implique la création de nouvelles connaissances commercialisables, principalement tacites, intégrées dans des produits, des processus ou des services, qui seront évalués à l'aune de leur capacité à fournir un avantage concurrentiel (Cozzens et al. 2005). Le développement technologique est conduit dans des ingénieurs (ou inventeurs) dans un contexte de concurrence. Ce dernier réduit les incitations des acteurs à échanger entre eux, les canaux de communication sont réduits aux partenaires de l'organisation, voire uniquement à l'organisation elle-même. La diffusion des connaissances technologiques passe par le déplacement des ingénieurs entre les organisations ainsi que par leur codification au sein de documents protégés par des Droits de Propriété Intellectuelles (DPI).

D'un point de vue quantitatif, les dynamiques de l'activité technologique peuvent être approximées grâce à l'utilisation des bases de données de brevets d'invention. Cependant, l'utilisation d'un tel *proxy* possède un certain nombre de limites qui peuvent être résumées comme suit : toutes les inventions ne sont pas brevetées, toutes les inventions ne sont pas brevetables et tous les brevets ne présentent pas le même niveau d'inventivité (Griliches 1990). L'utilisation des réseaux de citations entre brevets pour suivre le développement technologique est une méthode solide et répandue, bien que limitée dans sa représentativité (Jaffe, Trajtenberg, et Fogarty 2000).

La science et la technologie entretiennent des interdépendances passant par de multiples de canaux. Brooks (1994) identifie six sources de contribution de la science à la technologie et deux sources de contributions de la technologie à la science que l'on peut résumer ainsi : l'activité scientifique permet l'émergence de nouvelles connaissances, de nouveaux outils de conception théorique et de nouvelles méthodes d'analyse permettant à la fois de nouveaux développements technologiques, l'évaluation des précédentes technologies, leurs améliorations et le maintien d'une capacité d'absorption des connaissances. La technologie fournit à la science des besoins d'explications théoriques, des nouvelles interrogations scientifiques et des instruments et techniques de mesures permettant des nouvelles expérimentations.

Les interactions S&T sont largement entretenues par une division du travail innovant (Arora et Gambardella 1994; Rosenberg et Nelson 1994) imparfaite dans laquelle une part non-négligeable de la recherche scientifique est conduite par des entreprises privées. Cette recherche privée peut être motivée par la volonté d'être le premier à exploiter une percée scientifique (Rosenberg 1990), par la volonté d'attirer de nouveaux employés (Henderson et Cockburn 1994) ou de développer les capacités d'absorption des connaissances présentes dans l'environnement (Cohen et Levinthal 1990; Cockburn et Henderson 1998). Parallèlement, une part croissante du développement technologique est présente au sein des universités publiques en tant que troisième mission, après l'enseignement et la recherche (Gulbrandsen et Slipersæter 2007). Les individus peuvent également cumuler les activités scientifiques et technologiques constituant un lien incarné entre ces deux activités. Cette « double casquette » est relativement commune dans certains domaines où ces deux activités sont particulièrement proches l'une de l'autre comme les domaines des biotechnologies, des nanotechnologies ou de l'impression 3D. Cette quasi-symbiose entre ces deux activités entraîne une situation dans laquelle la distinction des connaissances scientifiques et technologiques relève d'une forme d'arbitraire. Les articles et les brevets faisant parfois l'objet d'une publication simultanée avec des contenus très similaires (Narin et Noma 1985; Stokes 1997; Hou et al. 2023).

D'un point de vue quantitatif, l'étude des interactions S&T s'appuie sur diverses méthodes, notamment la bibliométrie et les analyses sémantiques, chaque approche ayant ses avantages et ses limites.

Premièrement, les individus cumulant des activités scientifiques et technologiques (des auteurs-inventeurs) sont considérés comme un vecteur de connaissances incarnées entre la sphère scientifique et technologique, aidant à identifier des collaborations informelles et des contributions de la recherche à l'innovation (Noyons et al. 1994; Zhu et Liu 2020). Néanmoins, des problèmes de désambiguïsation, tels que l'homonymie, limitent la taille des échantillons

analysable via cette méthode (Ferreira et al. 2012).

Deuxièmement, les avancées dans le traitement du langage naturel ont étendu les possibilités d'analyse sémantique, permettant l'identification de sujets scientifiques émergents et des opportunités de R&D (Shibata et al. 2008, 2011; Sasaki et al. 2020). Cependant, cette méthode est encore contrainte par les limites de calcul informatique.

Enfin, la bibliométrie, introduite par Carpenter et Narin (1983) et Narin et Noma (1985), utilise la *Non-Patent Literature* (NPL) présente dans les brevets d'invention afin d'étudier la relation entre la recherche scientifique et l'innovation. Cette dernière est principalement constituée de références scientifiques (van Raan 2017). On distingue alors les références *front-page* regroupant les apports de l'examineur, du déposant et de l'inventeur et les références *in-text* principalement à l'initiative de l'inventeur. Ces deux ensembles de références ne sont que partiellement superposés. Les références *in-text* sont jugées plus proches des sources théoriques de l'invention, mais nécessitent un traitement du langage naturel, très coûteux en ressources informatiques (Yamauchi et Nagaoka 2015; Verberne, Chios, et Wang 2019; Bryan, Ozcan, et Sampat 2020; Marx et Fuegi 2020). Ces deux formes de références permettent cependant d'expliquer de manière significative la qualité d'une invention (Fleming et Sorenson 2004; Verberne, Chios, et Wang 2019). Le référencement des sources NPL *front-pages* sont également soumis à une différence constatée dans leur qualité et leur quantité en fonction du bureau de dépôt considéré. Les brevets déposés auprès de l'office états-unien (USPTO) comportent en moyenne un plus grand nombre de références scientifiques que les brevets déposés auprès de l'office européen (EPO), ces citations sont cependant jugées moins fiables que les citations européennes (Webb et al. 2005; Callaert et al. 2006).

Malgré ces limites, les références NPL offrent des informations empiriques détaillées sur la diffusion et l'absorption des connaissances scientifiques (Robert J.W. Tijssen 2004) et permettent de « *développer des indicateurs non-triviaux et robustes* » (Callaert et al. 2006, p.1). L'étude des références NPL reste l'outil le plus solide à notre disposition afin de déployer une analyse du lien S&T à l'échelle internationale sur un grand échantillon de données.

Ce chapitre utilise les connaissances scientifiques extraites via le référencement NPL *front-page* pour constituer une « image » des connaissances présentes de l'autre côté de la frontière S&T. En accord avec les recommandations de Callaert, Pellens, et Van Looy (2014), ces références ne constituent pas un lien de connaissance direct entre un article et un brevet et ne seront pas interprétées en tant que telles. Aussi, l'étude de la NPL sera limitée à un niveau macroscopique permettant de renseigner les sujets globalement intéressants pour les inventions

étudiées.

Bien qu'existant, le référencement technologique au sein de la littérature scientifique (Hsiao et Torvik 2019; 2020) reste résiduel et ne nous permet pas d'apprécier quantitativement l'influence de la technologie sur la science. De plus, ce chapitre vise à documenter les déterminants de l'autonomie stratégique d'un territoire en matière d'innovation de défense. Aussi, nous nous concentrerons sur l'influence de capacités scientifiques sur les capacités d'innovation technologiques dans le sens de la linéarité des modèles classiques d'innovation (Balconi, Brusoni, et Orsenigo 2010).

1.1.2 Les spécificités de l'industrie de défense

Si les apports scientifiques au processus d'amélioration des matériels de défense sont communément admis, peu d'études quantitatives détaillent la dynamique de l'incorporation des productions scientifiques dans le processus d'innovation. De plus, les études prenant pour sujet les relations entre science et technologie dans l'industrie de la défense se focalisent sur des périodes historiques précises comme la Guerre Froide (Geiger 1992) ou se concentrent sur le cas américain (Paarlberg 2004; Serfati 2005; Mowery 2009).

Les études relativement récentes couvrant le sujet dressent un rapport ambigu entre la science et l'innovation de défense. Ainsi, Serfati (2005) décrit une relation privilégiée, héritée d'un changement de paradigme important à la suite du second conflit mondial et notamment du projet Manhattan. Pour l'auteur, la « mégascience » s'est ainsi développée grâce à des financements considérables et une alliance entre les institutions scientifiques, les agences technologiques et l'industrie de défense. Par contraste, pour Bellais (2005), la fin de l'opposition Est-Ouest et la réduction drastique des budgets alloués à la défense, a rompu l'alliance historique entre la science et la défense. La privatisation de l'industrie, sur la période post-Guerre Froide, a ainsi vu les entreprises, contraintes par des impératifs de rentabilité et de concurrence, s'éloigner du financement de la recherche fondamentale au profit de recherches à valorisation rapide. Face à cette situation, l'auteur appelle à un nécessaire rapprochement entre défense et science. Ce constat est appuyé par James (2009) pour qui la période post-guerre froide a été marquée par une ouverture des systèmes d'innovation de défense vers des acteurs « non-traditionnels » tels que les petites entreprises technologiques et les institutions académiques (Stowsky 2004).

Pour Fauconnet (2021), trois facteurs majeurs influencent la capacité des entreprises de défense à mobiliser des connaissances scientifiques. Le premier est le contexte institutionnel,

défini en grande partie par la relation entre l'État et les entreprises (Lazaric, Mérindol, et Rochhia 2009; Sempere 2015). Ce contexte est ambigu, car il peut à la fois restreindre et encourager l'innovation en fonction des politiques de l'État en matière de diffusion de l'information et de la technologie. Le deuxième facteur concerne la nature complexe et polyvalente de la production en défense, requérant une base évolutive de connaissances et de compétences scientifiques et technologiques (Versailles 2005; Dupuy 2013). Cette complexité provient des exigences de fiabilité, des besoins de s'adapter à un environnement en mutation rapide, et de la diversité des domaines industriels impliqués dans la production. Le troisième facteur est l'intensité des relations avec des acteurs extérieurs, en particulier la recherche publique (Stowsky 2004; Avadikyan et Cohendet 2005; Mowery 2012). Les cycles longs de la R&D militaire permettent un engagement plus profond avec la communauté scientifique, favorisant l'intégration des connaissances scientifiques dans le processus d'innovation.

Le contexte contemporain est également marqué par des changements structuraux significatifs dans le système d'innovation national et international. Les contraintes budgétaires et l'essor de la R&D civile ont poussé les entreprises de défense à se diversifier et à développer des coopérations avec le secteur civil et le monde académique (Meunier 2017; Belin et al. 2019).

D'un point de vue quantitatif, l'étude de la NPL révèle une croissance significative du volume de sources scientifiques citées dans les brevets liés à la défense. Cette tendance s'aligne avec les évolutions globales observées dans différentes industries et peut être interprétée comme la conséquence d'une circulation accrue des connaissances et d'un référencement plus exhaustif par les offices de dépôts (Fauconnet 2019). Ces références sont principalement faites par des technologies de l'armement (Fauconnet 2018). Les innovations de défense ont recours de manière plus intense à la NPL qu'une majorité d'autres domaines technologiques. Cependant, les grandes entreprises de l'armement mobilisent sensiblement moins de références scientifiques dans leurs brevets que les grands groupes innovants du secteur civil (Fauconnet 2021).

Ces dernières études sont, à notre connaissance, les seules à documenter quantitativement les interactions S&T en économie de la défense. Cependant, elles se concentrent sur les acteurs privés avec un prisme méso et microéconomique. Ce chapitre se propose d'étoffer modestement cette littérature en adoptant une approche plus macroéconomique et institutionnaliste.

1.2 L'autonomie des systèmes d'innovation de défense

L'approche institutionnaliste utilisée dans ce chapitre intègre le processus d'innovation de défense au sein d'un système d'innovation national et sectoriel. Ce système d'innovation de défense (SID, James 2009) se conçoit comme un sous-ensemble du Système National d'Innovation (SNI). Le SID possède un rôle moteur au sein du SNI en canalisant une part importante des financements publics de R&D (Cohen, Nelson, et Walsh 2002; Dupuy 2013) qui permettent *in fine* l'émergence de technologie de rupture (Ruttan 2006; Mowery 2009) et profitent au système économique dans son ensemble (Mowery 2010; Malizard 2020).

L'intérêt de l'utilisation de ce cadre théorique dans ce chapitre est multiple. Il permet de souligner le rôle des institutions étatiques dans l'innovation de défense, ainsi que la dimension nationale associée aux enjeux stratégiques de souveraineté et de sécurité. Il permet également de concevoir le processus d'innovation comme relevant d'un réseau d'interactions entre acteurs au sein d'un environnement de plus en plus internationalisé et affranchis des contraintes de distances. Ce dernier point permet notamment de définir l'autonomie des territoires dans ces réseaux d'échanges de connaissances mondialisés.

1.2.1 Les Systèmes d'Innovation de Défense

Les études précédentes s'intéressant au rôle de l'innovation dans le SNI (James 2009; Mowery 2009; Dupuy 2013) mettent en évidence la centralité de l'État dans le développement et la mise en œuvre de l'innovation en matière de défense. L'État occupe ainsi un rôle prééminent, transcendant celui d'un simple client pour devenir le pilier central d'un écosystème complexe. Ce rôle est intrinsèquement lié aux enjeux géopolitiques et de souveraineté, et il est exacerbé par un environnement de concurrence internationale visant l'acquisition d'une supériorité technologique (Bellais 2013; Sempere 2015). L'État agit non seulement comme principal financeur de la R&D dans ce domaine, mais aussi comme acquéreur majeur des technologies développées, tout en orchestrant les interactions entre les différents acteurs du secteur, tels que les entreprises et les instituts de recherche (Dunne 1995; Hartley 2006; Droff et Malizard 2019). Sa participation est également cruciale dans la configuration industrielle des programmes d'armement, où il module la dynamique concurrentielle et coopérative entre les entreprises de défense (Depeyre et Dumez 2007). Cette position centrale de l'État est accentuée par la nature particulière du secteur de la défense, où les motivations pour innover sont souvent dictées par des facteurs externes comme la menace géopolitique, mais aussi par des facteurs

internes tels que la compétition intra-sectorielle et l'absence de renseignements fiables (Sempere 2015). En somme, l'État n'est pas un simple acteur, mais plutôt le régisseur d'un écosystème d'innovation en défense, complexe et fortement influencé par des considérations géopolitiques et stratégiques.

La définition accordée à un SNI peut être relativement malléable. Nous adoptons une vision large des systèmes en plaçant au centre les acteurs et interactions liées aux domaines de la science, de la technologie tout en incluant en périphérie l'influence des réseaux institutionnels et économiques qui affectent le système productif (Lundvall 1992). Un tel système peut être défini comme un réseau de transmission de connaissances entre différents acteurs, y compris les entreprises, les entités gouvernementales, les institutions de recherche et les universités, dont le niveau de proximité conditionne les possibilités d'interactions (Smith 2000; Dupuy 2013). En conséquence, le SID se conçoit comme un réseau d'interactions, principalement national, permettant la transformation des idées et des connaissances en produits, processus et services nouveaux ou améliorés pour des applications militaires, aérospatiales et à double usage (Cheung 2021). Pour James (2009), la fin de la guerre froide a marqué une rupture fondamentale dans la structure des SID. Avant 1990, ceux-ci adoptaient une structure en « triple hélice » associant les forces armées, les laboratoires gouvernementaux et le secteur industriel de la défense. Ce système d'innovation en matière de défense était relativement isolé du système d'innovation civil national, en raison d'une séparation organisationnelle délibérée et de réglementations rigoureuses visant à restreindre la diffusion de technologies sensibles (Markusen 1992). La fin de l'opposition bipolaire Est-Ouest a ensuite contribué à brouiller progressivement la frontière entre le SID et le secteur civil. Cette transition est en grande partie due à la dépendance croissante des innovations militaires vis-à-vis des technologies à double usage et des avancées initialement conçues pour des applications civiles (Alic, Branscomb, et Brooks 1992; Meunier 2017).

Le cadre conceptuel du SID a été posé explicitement par Cheung (2021) et se définit comme un réseau d'organisations et d'institutions qui poursuivent de manière interactive des activités liées à la science, à la technologie et à l'innovation pour promouvoir les intérêts et les capacités de défense. Les organisations impliquées sont diverses, allant des instituts de recherche et des universités aux agences étatiques et aux entreprises privées, en passant par les unités militaires. Le fonctionnement et l'interaction entre ces organisations sont encadrés par des arrangements institutionnels bien définis, incluant des normes, des routines et d'autres

« règles du jeu ». Dans ce cadre, la performance des SID est influencée par un certain nombre de facteurs clefs qui peuvent être résumés comme suit : (i) les facteurs catalytiques, qui sont des éléments déclencheurs externes capables de stimuler une innovation radicale au sein du système comme un niveau élevé de menace géostratégique ou une opportunité de percée radicale de produits ou de procédés ; (ii) les facteurs d'entrée, qui comprennent les contributions matérielles, financières et technologiques provenant soit de sources externes, soit internes comme les transferts de technologie étrangers, le niveau d'investissement public et privé, le capital humain et l'intégration civilo-militaire ; (iii) les facteurs institutionnels, qui sont les règles, les normes et les routines formelles et informelles régissant les interactions entre les acteurs du système comme l'existence d'un plan et de stratégies politiques de long terme, d'un régime réglementaire et normatif efficace, et d'une protection de la propriété intellectuelle ; (iv) les organisations, qui sont les principales entités au sein du système, comme les entreprises, les agences étatiques, les universités et les instituts de recherche ; (v) les réseaux et sous-systèmes, qui sont des canaux de communication et de collaboration spécifiques, souvent plus efficaces que les structures institutionnelles traditionnelles ; (vi) les facteurs contextuels, qui sont les conditions environnementales, historiques et politiques influençant le système d'innovation de défense ; et enfin (vii) les facteurs de sortie, qui sont responsables de la nature des produits et des procédés qui émergent du système, incluant le processus de production, la maintenance, la commercialisation et la réponse à la demande des utilisateurs finaux

Parallèlement à la normalisation du secteur de la défense, les territoires nationaux accusent une part croissante d'intégration de leur SNI dans la mondialisation. Pour Carlsson (2006), les SNI, tout en étant ancrés dans des institutions nationales, s'internationalisent progressivement pour former des Systèmes d'Innovation Globaux (SIG). Ces structures englobent une variété d'acteurs transnationaux et permettent de catalyser l'innovation à échelle mondiale, notamment dans les domaines complexes intensifs en connaissances (Spencer 2003; Binz et Truffer 2017).

Ce phénomène d'internationalisation s'observe également dans l'industrie de défense pour laquelle Bitzinger (1994) anticipe l'érosion de la production d'armements purement nationale au profit d'un modèle de production multinationale. Hérault (2018) souligne la même trajectoire d'internationalisation dans l'industrie de la défense. Son analyse révèle que les contraintes budgétaires, l'accroissement de la complexité technique, et la globalisation de la demande encouragent la création de chaînes de valeur transnationales et de collaborations multilatérales, comme l'illustre le projet du F-35 *Joint Strike Fighter*, un avion développé,

financé et testé par neuf pays différents. Ces perspectives convergent vers un modèle dans lequel l'innovation et la production sont de moins en moins confinées à des territoires spécifiques, posant ainsi des questions cruciales sur l'autonomie et la souveraineté des territoires.

Ce phénomène d'internationalisation des systèmes d'innovation rejoint le contexte général d'une circulation accrue des connaissances. Ce contexte est notamment influencé par la mondialisation des systèmes de production et par le développement des TIC (Carlier et Le Goff 2002; Leydesdorff 2006). Dans ce contexte, Patel et Pavitt (2000) suggèrent que les flux scientifiques seraient plus susceptibles d'être délocalisables et causeraient un déséquilibre croissant entre les connaissances produites par la base scientifique d'une nation et les besoins du système technologique. Outre le phénomène de mondialisation, les auteurs évoquent les niveaux de développement technologique inégaux entre les pays, les pressions croissantes de la concurrence et l'éventail de plus en plus large des technologies mobilisables pour justifier un lien de plus en plus internationalisé entre les universités et les entreprises.

Ce chapitre s'intéresse aux performances des principaux SID nationaux dans le contexte d'une innovation de défense de plus en plus ouverte et internationalisée. Le rôle des États reste central dans le financement, la conduite et l'utilisation finale des productions en matière de défense. Cependant, leur capacité à profiter de leur propre investissement, notamment en matière scientifique, pose question dans la mesure où les connaissances créées sur le territoire sont susceptibles d'alimenter un développement technologique extraterritorial.

1.2.2 L'autonomie des systèmes

« On peut (...) considérer que le système militaro-scientifique et industriel est un élément important du système national d'innovation et constitue un axe de stratégie industrielle et d'indépendance nationale. » (Dupuy 2013, p.93)

Comme évoqué dans cette citation et dans les points précédents, la maîtrise des flux de connaissances scientifiques et technologiques au sein de SID ouverts, et internationalisés relève d'un enjeu de souveraineté économique pour les nations. Nous proposons d'éclairer cet enjeu de souveraineté par la mesure de l'autonomie stratégique des territoires. Cette autonomie se définit en deux points. Elle se compose premièrement d'une capacité à produire indépendamment les connaissances utiles à son développement technologique et dans un

second temps des capacités à influencer la création de connaissances à l'extérieur de son territoire. Ainsi, nous entendons mesurer le niveau de maîtrise des nations sur les flux de connaissances générés, émis et reçus par leur territoire dans les domaines technologiques et scientifiques intéressant la défense.

Ce travail s'appuie sur la littérature récente relative à l'autonomie stratégique, un concept particulièrement pertinent dans le contexte de l'Union européenne et sa quête d'une alternative à l'OTAN pour défendre les intérêts collectifs de ses États membres. L'autonomie stratégique, comme le souligne Kempin (2017), s'étend sur plusieurs dimensions, dont les aspects politiques, opérationnels et industriels. Du point de vue opérationnel, Charillon (2013) décrit l'autonomie stratégique comme la capacité d'un État à agir militairement de manière indépendante, tout en possédant les compétences pour intégrer et diriger ses alliés. Le Ministère de la Défense (2013) élargit cette définition en y incluant la capacité à prendre des initiatives et à agir de manière autonome, ainsi que la compétence pour entraîner les alliés dans ces actions.

Dans le domaine de l'innovation industrielle, l'autonomie stratégique est interprétée comme la capacité des nations à maîtriser les systèmes scientifiques et techniques essentiels à l'innovation dans leur Base Industrielle et Technologique de Défense (BITD). Cette autonomie se manifeste par le développement indépendant de technologies cruciales pour la défense et la capacité à influencer les autres nations par une position dominante dans le réseau d'innovation.

Lebert et Meunier (2020) sont à notre connaissance les premiers à proposer une méthode de mesure de cette autonomie stratégique en matière d'innovation. Ils ont quantifié les capacités des systèmes de connaissances de différents pays impliqués dans l'innovation de défense en utilisant des indicateurs d'introversion et d'extraversion. Ces indicateurs évaluent la proportion des flux de connaissances au sein d'un pays par rapport aux échanges de connaissances avec le monde extérieur. Ainsi, un pays atteint une autonomie stratégique sur le plan technologique lorsqu'il maintient un équilibre entre une certaine forme d'autarcie et une dépendance externe minimale pour la création de connaissances.

Ces indicateurs utilisent la Théorie de la Dominance Économique (TDE), introduite par Lantner (1974) et développée par Lantner et Lebert (2015). Cette théorie, qui mobilise la théorie mathématique des graphes, permet d'analyser les réseaux de flux de connaissances internationaux en innovation. Elle évalue l'influence « globale » d'une entité A sur une autre B en tenant compte des interactions avec d'autres entités (C, D, etc.). La TDE s'inscrit dans la logique de Perroux (1948), qui définit les « effets de domination » comme la capacité d'une économie dominante à influencer passivement d'autres économies, les forçant à s'adapter. Cette

approche structurale permet d'analyser les échanges mondiaux de connaissances comme un réseau de relations, parfois cachées, entre entités dominantes et dominées. Les recherches actuelles autour de l'autonomie stratégique par l'innovation demeurent largement exploratoires. Toutefois, des études préliminaires, notamment celles de Lebert et Meunier (2020), révèlent des tendances générales, telles que la prédominance des États-Unis dans le système global de connaissances technologiques liées à la défense. Ces travaux montrent que les États-Unis, de par leur forte intégration territoriale et leurs interactions internationales, jouent un rôle clef dans l'absorption des connaissances mondiales et la direction du système global d'innovation de défense.

Dans cette perspective, Kouakou et Szego (2022) ont étudié l'impact de la gouvernance des nations sur leur autonomie stratégique (AS). Ils ont conclu que la capacité de la société civile à exercer un contre-pouvoir, notamment dans la sélection des dirigeants et la liberté d'expression, est positivement corrélée à l'AS. Cette relation suggère que l'absence de contrôle politique sur l'échange d'informations et de connaissances stimule l'innovation, conformément aux observations de Lehmann et Seitz (2017). Une plus grande stabilité politique et une moindre exposition à la violence ou au terrorisme apparaissent comme des vecteurs de réduction de l'AS, indiquant que les pays moins menacés ont tendance à accorder moins d'importance à leur autonomie stratégique. L'intensité des dépenses militaires est également un facteur crucial pour l'AS à long terme.

Bien que ces études aient ignoré l'analyse des flux de connaissances scientifiques, ces derniers jouent un rôle fondamental dans le développement technologique de la défense. Cette recherche vise donc à combler cette lacune en examinant le rôle de l'activité scientifique dans le renforcement de la capacité de défense des nations.

En synthèse, l'autonomie stratégique illustre les besoins des nations de limiter leur dépendance vis-à-vis de grands acteurs mondiaux dans la production de biens et services essentiels à la protection de leurs intérêts et de leur souveraineté. L'application de cette notion à l'innovation industrielle de défense permet d'évaluer les relations de domination au sein du système global de connaissances et de dévoiler les hiérarchies en place. Son extension aux flux de connaissances scientifiques représente une démarche novatrice et exploratoire, et cette recherche entend enrichir la littérature sur le rôle crucial de l'activité scientifique dans le développement des capacités de défense.

L'étude du lien entre autonomie scientifique et technologique à l'échelle des territoires

pose la question de la diffusion internationale des productions scientifiques. Celle-ci peut être considérée comme un bien public mondial (Stiglitz 1999) auquel cas, elle peut être hypothétiquement exploitée par n'importe quel territoire. La connaissance scientifique est alors purement universelle et codifiée, ce qui lui permet d'être parfaitement mobile et d'être potentiellement appliquée loin de son territoire de développement. Cette vision plaide contre un financement public de la R&D de défense, qui serait une dépense profitant autant au territoire national qu'à d'autres territoires potentiellement rivaux. En suivant cette hypothèse, il est attendu qu'un pays puisse nourrir des capacités d'innovation de défense en se servant uniquement des avancées scientifiques financées et produites sur d'autres territoires. En cela, l'autonomie scientifique et l'autonomie technologique d'une nation ne sont pas attendues comme étant nécessairement indissociable.

La vision opposée d'une connaissance scientifique partiellement tacite permet de considérer une mobilité impure de cette dernière, se diffusant mondialement, mais profitant d'un ancrage géographique substantiel. Cet ancrage permet une transmission des connaissances scientifiques en priorité au territoire qui l'a financé et produite, et dans une moindre mesure aux territoires adjacents. L'existence d'une dimension tacite permet ainsi de justifier le financement public de la R&D de défense, qui permet à la fois d'alimenter le stock de connaissances mondial et un développement technologique localisé. Sous cette seconde hypothèse, l'autonomie scientifique d'un pays est attendue comme corrélée à ses capacités technologiques.

Notre approche méthodologique raisonne sous la première hypothèse d'une connaissance scientifique comme un bien public pur. Nos résultats seront interprétés de manière à affirmer ou infirmer cette hypothèse.

2 Méthodologie et Données

2.1 Données

Les données d'articles et de brevets utilisées dans ce chapitre proviennent intégralement de la base de données Lens. Pour les brevets, les sources agrégées incluent le WIPO, l'USPTO et l'EPO, tandis que pour les articles scientifiques, les données proviennent de Microsoft Academic, CrossRef et ORCID.

La base de données primaire utilisée dans ce chapitre est identique à celle présentée dans le troisième chapitre. Ainsi, les données de brevets que nous utilisons répondent aux exigences suivantes : (i) avoir fait l'objet d'une demande de dépôt initiale entre 1990 et 2019, (ii) comporter des citations technologiques ou scientifiques, (iii) intégrer au moins une technologie identifiée défense par les codes IPC issus de la littérature (voir Table 5.10 et Table 5.11 en annexe). Les brevets sont ensuite regroupés par *extended_family* correspondant à la classification INPADOC, afin d'identifier les inventions uniques. Les citations sont agrégées pour chaque membre de la famille de brevets, maximisant ainsi la couverture de l'état de l'art pour chaque invention. L'échantillon final se compose de 71 669 inventions et 12 100 articles scientifiques, formant respectivement les ensembles B_1 et A_1 .

Pour analyser les flux de connaissances internationaux, nous adoptons l'approche de Ahmadpoor et Jones (2017) en termes de distance à la frontière Science-Technologie. Le degré 1 ($D = 1$) comprend les brevets avec des références scientifiques et les articles scientifiques cités par ces brevets. Le degré 2 ($D = 2$) inclut des documents séparés par une citation supplémentaire, tels qu'un article cité par un autre article lui-même cité par un brevet ou une invention citée par une autre invention citant un article scientifique. Les ensembles B_2 et A_2 , constitués de 193 035 inventions et 121 626 articles respectivement, sont formés à partir des références citées dans les ensembles B_1 et A_1 .

Enfin, ces documents sont associés à un ou plusieurs territoires nationaux. La localisation des inventions technologiques se base sur les adresses des inventeurs, en accord avec une partie de la littérature (Berge et Weterings 2014; Breschi et Lissoni 2009; Krafft et al. 2011). Dans les rares cas où seule l'adresse du déposant est disponible, nous utilisons cette dernière. Les

articles scientifiques sont liés aux adresses des institutions affiliées aux auteurs au moment de la rédaction.

Comme pour le troisième chapitre nous ajoutons un traitement supplémentaire pour les inventions et les articles ne mentionnant aucune forme de localisations. Ainsi, pour les brevets de l'ensemble B_1 sans localisation, nous avons utilisé les informations disponibles sur les déposants, telles que leurs noms ou une partie de leurs adresses. De même, certains articles scientifiques non localisés de l'ensemble A_1 comprennent des noms d'institutions pouvant être associés à une localité spécifique comme une ville, une région, ou un pays, permettant d'ancrer territorialement les connaissances qui le composent.

Cette méthode est particulièrement pertinente pour les inventions du système d'innovation chinois qui représentent 91,6% des brevets ainsi localisés. Ces informations ont été comparées aux données de l'office de dépôt des brevets avant leur intégration dans notre échantillon. Un processus similaire a été appliqué aux articles scientifiques, aboutissant principalement à la localisation d'institutions américaines.

L'ensemble des données de citations localisées comprend 925 886 flux de connaissances technologiques (B_2-B_1) émanant de 147 nations à destination de 116 pays, et 311 950 flux de connaissances scientifiques (A_2-A_1) provenant de 131 nations vers 83 pays.

2.2 Calcul des indicateurs d'autonomie stratégique

Le calcul de l'autonomie stratégique utilisé dans ce chapitre repose sur la méthodologie mise au point et détaillée dans le troisième chapitre. Cette section vise à synthétiser cette approche avant d'introduire la méthodologie originale de construction de notre panel de données

Cette thèse propose une réinterprétation des indicateurs d'autonomie stratégique (AS), en s'appuyant sur la Théorie de la Dominance Économique (TDE) de Lantner (1974) et Lantner et Lebert (2015), et leur application à l'innovation (Lebert et Meunier 2020 ; Kouakou et Szego 2022). L'AS, dans ce contexte, est définie comme la capacité d'un pays à générer des inventions de défense, soit de manière autonome, soit en collaboration, en gardant un contrôle élevé sur le processus. Les travaux antérieurs sur l'AS se sont concentrés sur l'analyse des flux de connaissances technologiques issus des citations de brevets, en distinguant les inventions de

défense de celles du secteur civil. Cela a conduit à la création de multigraphes dirigés, pondérés et réflexifs.

Cependant, ces mesures préalables ne considèrent pas entièrement les relations de dépendance stricte dans les échanges cognitifs internationaux, car elles reposent toutes entières sur l'existence de circuits. De plus, elles sont relatives, car elles dépendent de l'équilibre entre les activités d'invention dans les domaines de la défense et du civil. Cette approche tend à mettre en avant certains petits pays qui, proportionnellement à leur taille, investissent fortement dans la R&D de défense.

Pour pallier ces lacunes, cet article propose une nouvelle mesure de l'AS qui tient compte des relations de dépendance stricte en plus de l'autarcie et des interdépendances, en se focalisant spécifiquement sur les inventions de défense. Cette mesure intègre l'influence et l'absorption de connaissances externes, soit de manière combinée dans le cas d'interdépendances, soit séparément dans le cas de dépendances.

Méthodologiquement, chaque nation est évaluée sur sa capacité à innover de manière autonome et sur son influence ou sa dépendance vis-à-vis du reste du système. Ce calcul repose sur une analyse matricielle des flux de connaissances, où chaque nation est représentée comme émettrice et réceptrice de ces flux.

En résumé, cette nouvelle approche de l'AS offre une perspective plus complète, intégrant les aspects de dépendance et d'interdépendance, et se focalisant sur les innovations dans le domaine de la défense. Cette nouvelle méthode s'articule autour du processus de calcul matriciel suivant :

L'ensemble des flux de connaissances entre le pays i et le pays j pour l'année t , noté $x_{ij,t}$ sont additionnés au sein d'une matrice de flux, notée X_t . Cette matrice de taille $n \times n$, avec n le nombre de pays, forment une structure carrée où chaque ligne représente un pays émetteur et chaque colonne un pays récepteur.

Afin de transformer les dépendances unilatérales en interdépendances, il est nécessaire de symétriser les flux de connaissances. Pour cela, nous définissons la matrice D_t comme contenant uniquement les éléments de la diagonale principale de X_t . Ensuite, la matrice Y_t est formée par l'addition de X_t et de sa transposée X'_t à laquelle est soustrait D_t .

Les valeurs de la matrice Y_t sont ensuite normalisées en divisant les valeurs $y_{ij,t}$ par la somme des lignes appelées marges. On définit la nouvelle matrice ainsi formée la matrice de

coefficients nommée C_t . Enfin cette dernière structure est transformée en matrice de Ghosh, notée M_t par soustraction de C_t à une matrice identité.

L'impact de chaque pays sur le réseau global est évalué en calculant la variation du déterminant de M_t après suppression des flux propres au pays (les flux autarciques) et ceux qu'il entretient avec d'autres pays (les interdépendances). Cette procédure aboutit logiquement à deux indicateurs distincts : autarcie et interdépendance. Le score d'AS pour chaque pays à l'année t est finalement calculé par addition de ces deux indicateurs.

La procédure précédemment décrite s'applique au réseau de connaissances scientifiques, à la différence notable que la littérature n'identifie pas de caractéristiques permettant de mesurer le niveau de dualité intrinsèque d'un article scientifique.

Dans cette optique, la classification d'un article comme relevant du domaine de la défense est déterminée par le brevet qui le référence. Ce processus implique l'attribution d'un score à chaque article, basé sur la proportion de classes technologiques de défense présentes dans le brevet le référençant. Par ailleurs, il est postulé que la dualité potentielle d'un article se manifeste uniquement lorsqu'il est référencé dans un brevet lié à la défense. Aussi les connaissances scientifiques sont rattachées à leur année de citation et non leur année de parution. Cette hypothèse nous permet de considérer les échantillons A1 et B1 sur la même période.

Finalement, ces mesures produisent deux indicateurs d'AS distincts : le premier pour le réseau de citations technologiques, abrégé TSA, et un indicateur d'AS pour le réseau de références scientifiques abrégé SSA.

2.3 Construction du panel

2.3.1 Variables de contrôle

Nous concentrons notre analyse sur les principales nations innovantes en matière de défense en raison de la disponibilité des données et de la forte concentration des flux de connaissances au sein d'un groupe réduit d'acteurs. Notre panel se limite ainsi à 25 pays, représentant, d'un point de vue technologique, 97.6% des flux de connaissances émis et 98.2% des flux absorbés, et du côté scientifique, 90.4% des flux émis et 94.2% des flux absorbés. La liste complète des pays inclus dans le panel figure dans la Table 5.12 en annexe.

Ce panel réduit autorise l'incorporation de cinq variables de contrôle (ou covariables)

dans notre modèle. Les deux premières, à savoir le nombre de chercheurs par millier d'actifs (NBCH) et les dépenses en recherche et développement (RD) en pourcentage du produit intérieur brut (PIB), servent des fonctions spécifiques. NBCH permet d'estimer la densité des acteurs engagés dans les activités d'innovation, tandis que la variable RD sert à évaluer les ressources financières allouées à ces acteurs. Collectivement, ces indicateurs visent à quantifier les capacités et les investissements en R&D des différents systèmes nationaux. La recherche et le développement jouent un rôle crucial dans la constitution des capacités d'innovation, comme l'indiquent Mairesse et Mohnen (2002). Ces variables de contrôle permettent de neutraliser les écarts en matière d'AS qui pourraient être attribuables à des niveaux hétérogènes d'engagement des pays dans les activités de R&D.

Nous intégrons par la suite deux autres variables de contrôle : l'intensité des dépenses militaires en pourcentage du PIB (MILI) et l'indicateur de tendance des exportations d'armes du SIPRI (Xarm). La variable MILI vise à contrôler la perception des menaces dans l'environnement sécuritaire d'un pays ainsi que l'intensité de son engagement en matière de défense. Quant à Xarm, elle sert à quantifier les capacités de production de l'industrie de la défense d'un pays et son rôle dans le commerce mondial d'équipements militaires. Ces deux indicateurs capturent des éléments relatifs au contexte géopolitique propre à chaque pays et à leur capacité de production dans le domaine de l'armement. Ces facteurs sont décisifs pour l'efficacité d'un système d'innovation de défense (Cheung 2021). La différence de dotation entre territoires peut expliquer les différences d'AS entre pays. Enfin, nous contrôlons la formation brute de capital fixe en pourcentage du PIB (INVINT). Cette mesure nous permet de contrôler les capacités globales d'investissement intérieur des nations, publiques ou privées, civiles ou militaires, susceptibles d'influencer la production d'innovation. Suivant Kouakou et Szego (2022), nous introduisons le carré de la variable INVINT dans le modèle afin de vérifier l'existence d'un effet de seuil dans les capacités d'investissement. Autrement dit, nous testons l'existence d'une relation en forme de « U » entre capacité d'investissement intérieur et l'autonomie technologique.

L'ensemble des indicateurs en question présente des ordres de grandeur distincts. Afin d'interpréter les coefficients de manière plus précise, chaque variable de contrôle est intégrée dans notre modèle par le biais d'un logarithme naturel (log). L'application du logarithme naturel aux variables explicatives continues et non négatives, parmi d'autres bénéfiques, permet de modérer leur variabilité et d'atténuer l'effet des valeurs extrêmes, contribuant ainsi à une analyse plus nuancée des données. Cette pratique est largement adoptée dans le domaine de l'économie (Acemoglu, Johnson, et Robinson 2001; Acemoglu, Gallego, et Robinson 2014). Afin de

répondre aux exigences de stationnarité nécessaires à l'utilisation de nos modèles économétriques, nous transformons la mesure de l'intensité de l'investissement intérieur par sa différence annuelle avec $d\log(INVINT)_t = \log(INVINT)_t - \log(INVINT)_{t-1}$.

La Table 5.1 à la suite résume la construction de notre échantillon de variables de contrôles en précisant leurs sources :

Table 5.1 : Description des variables

Variab les	Description	Modélisation	Proxy	Sources
NBCH	Nombre de chercheurs, par milliers d'employés.	$\log(NBCH)$	Niveau de capital humain et capacité d'innovation	OCDE (2022), Chercheurs
RD	Dépense en R&D, en pourcentage du PIB.	$\log(RD)$	Niveau d'engagement dans la R&D	OCDE (2022), Dépenses intérieures brutes de R-D
MILI	Dépenses militaires, en pourcentage du PIB.	$\log(MILI)$	Environnement sécuritaire, niveau d'engagement militaire	SIPRI Military Expenditure Database 2022
Xarm	Valeurs de l'indicateur de tendance des exportations d'armes par pays.	$\log(Xarm)$	Niveau d'engagement dans le commerce des armes	SIPRI Arms Transfers Database 2022
INVINT	Formation brute de capital fixe, en pourcentage du PIB.	$\frac{d\log(INVINT)}{d\log(INVINT)^2}$	Intensité de l'investissement intérieur	Banque Mondiale (2022)

2.3.2 Imputation des données

Notre panel accuse une quantité variable de données manquantes. Celles-ci sont négligeables (<1%) pour l'autonomie technologique ou les covariables des dépenses militaires et l'intensité de l'investissement intérieur, en revanche celles-ci dépassent les 5% pour les scores de SSA et certaines variables de contrôle. Bien que la constitution d'un panel cylindré ne soit pas strictement nécessaire pour mesurer une causalité sur notre modèle PVAR, nous allons imputer les données manquantes afin de maintenir la précision de nos estimations. Cette étape vise tout particulièrement les données récoltées sur la période 1990-2000, qui concentrent une partie importante des données manquantes comme illustré sur la Figure 5.1. L'imputation des données manquantes profite d'une littérature abondante détaillant une diversité de méthode importante. La méthode la plus couramment reconnue de procéder est l'imputation multiple (IM). L'approche par IM produit plusieurs ensembles de données complétés, applique un modèle d'analyse statistique à chaque ensemble, puis intègre tous les résultats d'analyse pour créer un résultat global.

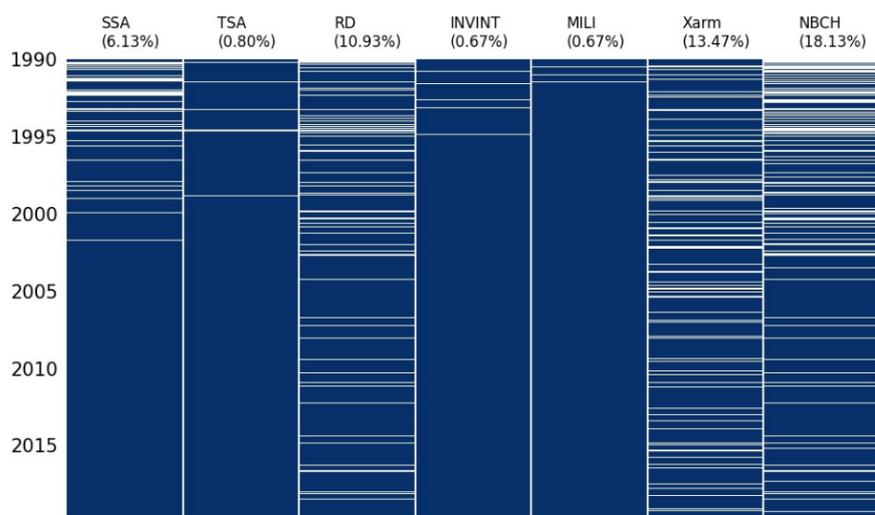


Figure 5.1 : *Missing map* des données de panel brutes

Si cette méthode n'est pas nouvelle en soi, son application à des données macro-économiques est relativement récente (Honaker et King 2010; Castellacci et Natera 2011). Khan (2022) distingue deux approches par IM pour compléter ce type de données de panel. La première repose sur l'algorithme d'*Expectation-Maximization* de Honaker et King (2010) qui utilise un processus itératif pour estimer les paramètres d'un modèle statistique de manière à maximiser la « vraisemblance » de ces paramètres, compte tenu des données observées. Cette méthode possède l'inconvénient de reposer sur une hypothèse de distribution normale des données disponibles. La seconde utilise une IM par équations enchaînées (*Multiple Imputation by Chained Equations, MICE*) de Rubin (1996). À l'opposé des techniques paramétriques comme l'IM basée sur la distribution normale multivariée, *MICE* ne suppose pas une distribution conjointe pour les variables imputées, mais envisage une distribution différente pour chaque variable. *MICE* utilise une approche séquentielle qui tient compte des relations fonctionnelles entre les variables et des caractéristiques des données. Au sein de *MICE*, la technique par appariement prédictif des moyennes (*PMM*) est particulièrement utilisée pour les variables continues. *PMM* impute une valeur manquante par la valeur observée d'une autre observation (le "donateur") ayant une moyenne prédite similaire. Ce processus est répété plusieurs fois, générant plusieurs jeux de données. Les résultats de chaque jeu sont ensuite analysés et combinés pour obtenir une estimation unique.

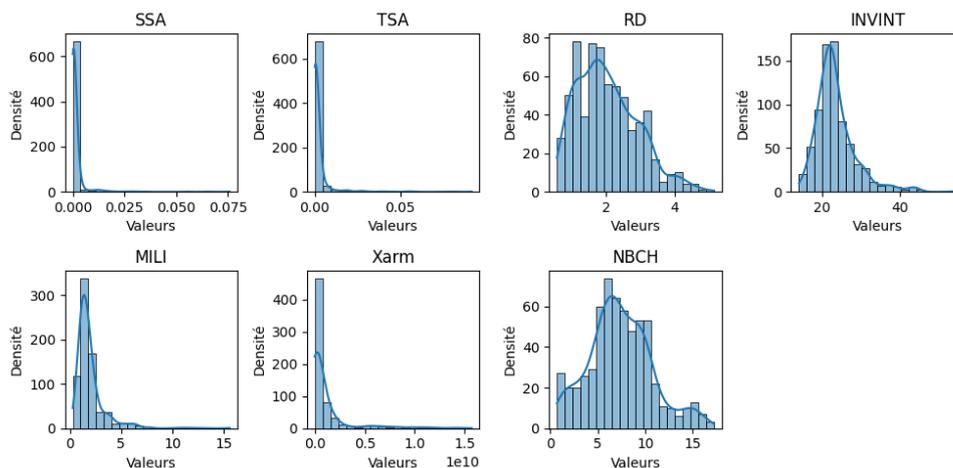


Figure 5.2 : Distributions des variables du panel.

Les études utilisant l'imputation multiple dans le cadre d'une analyse nationale de l'innovation supposent que les données manquantes sont *Missing at Random* (MAR, Castellacci et Natera 2011; Forner, Ozcan, et Bacon 2019; Khan 2022). Cette hypothèse avance que l'absence de données est due à des données observées et non à des données non-observées, mais que cette absence est aléatoire ou non-automatique. En d'autres termes, les données observées peuvent expliquer les absences spontanées de donnée. En suivant ces travaux, nous considérons que les variables absentes sont au moins en partie imputables au niveau de développement et à la taille du pays ou à l'ancienneté des données. Ces variables étant présentes dans notre panel nous estimons pouvoir expliquer et prédire le modèle de données manquantes pour les données sur d'autres variables. En suivant Khan (2022), et étant donné que nos variables sont continues, distribuées différemment et ne suivent pas strictement une loi normale (voir Figure 5.2), l'imputation *MICE* par *PMM* est la plus adaptée. Nous procédons à l'imputation via le package « *mice* » sur R avec un paramètre de 50 itérations suivant Khan (2022).

2.3.3 Statistiques descriptives

Table 5.2 : Statistiques descriptives avant imputation

Variables	Observations	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
pays_id	750	12	7.215	0	24
année	750	2004.5	8.661	1990	2019
TSA	744	2.15×10^{-3}	7.60×10^{-3}	5.87×10^{-7}	0.091
SSA	704	1.46×10^{-3}	5.35×10^{-3}	2.80×10^{-8}	0.075
RD	668	0.609	0.453	-0.574	1.637
MILI	745	0.506	0.546	-1.276	2.746
INVINT	721	-1.24×10^{-3}	0.058	-0.210	0.648
NBCH	614	1.859	0.594	-0.375	2.845
Xarm	649	19.163	2.166	0	23.478

Les Table 5.2 et Table 5.3 présentent les statistiques descriptives du panel avant et après imputation. On constate que l'imputation n'a pas introduit de distorsions majeures, les moyennes et écart-types des données n'ont ainsi pas sensiblement variés. Ce respect de la distribution des données est crucial pour garantir la validité des analyses ultérieures. Cette étape nous permet de disposer d'un échantillon de panel cylindré de taille 750 composé de 25 pays sur la période 1990-2019.

Table 5.3 : Statistiques descriptives après imputation

Variables	Observations	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
pays_id	750	12	7.215	0	24
année	750	2004.5	8.661	1990	2019
TSA	750	2.13×10^{-3}	7.57×10^{-3}	5.87×10^{-7}	0.091
SSA	750	1.39×10^{-3}	5.20×10^{-3}	2.80×10^{-8}	0.075
RD	750	0.599	0.458	-0.574	1.637
MILI	750	0.509	0.546	-1.276	2.746
INVINT	725	-1.34×10^{-3}	0.058	-0.210	0.648
NBCH	750	1.861	0.605	-0.375	2.845
Xarm	750	18.948	2.229	0	23.478

2.4 Stratégie économétrique

Notre approche économétrique a pour objectif d'analyser le rôle de l'activité scientifique dans l'élaboration des innovations de défense au sein des différents SID. Plus précisément, nous entendons mesurer l'influence des capacités de production et de diffusion de connaissances scientifiques intéressant la défense sur les capacités de production et de diffusion des connaissances technologiques à usage militaire et aérospatial. Cette influence va dans le sens du modèle linéaire classique de l'innovation et rejoint des travaux précédents ayant souligné l'importance des connaissances scientifiques pour le développement technologique (Gaetani et Bergolis 2015; Ahmadpoor et Jones 2017).

Notre stratégie économétrique se décompose en trois étapes distinctes. Premièrement, nous tentons d'élucider le sens de la causalité entre l'autonomie scientifique et l'autonomie technologique au travers de tests de causalité au sens de Granger (Granger 1969). Cette causalité pouvant être bidirectionnelle, c'est-à-dire aller de la science vers la technologie ou de la technologie vers la science, nous effectuons le test de Granger à partir des estimations d'un modèle vectoriel autorégressif pour données de panel (PVAR, Holtz-Eakin, Newey, et Rosen 1988). Ce modèle est approprié pour tester la causalité bidirectionnelle du fait notamment de son caractère vectoriel. Ce modèle prend pour variable explicative des valeurs retardées et permet de tenir compte de la simultanéité artificielle créée par notre collection de données. En

effet, nous avons par construction temporalisé les articles scientifiques et donc l'AS qui en découle sur les mêmes années que les inventions qui les référencent. Ce modèle nous permet de tenir compte de cette simultanéité en mesurant uniquement les corrélations entre une mesure en t et une mesure en $t - p$, p étant le retard du modèle. La valeur de p optimale est fixée à la majorité des critères d'évaluation AIC, BIC et QIC.

Dans notre approche, les séries de données doivent répondre à une exigence de stationnarité. Aussi nous commençons par rejeter l'hypothèse de non-stationnarité pour l'ensemble des variables considérées dans notre recherche. Nous utilisons pour cela le test de racine unitaire de seconde génération proposé par Pesaran (2007).

Dans une seconde étape, nous analysons l'effet de l'autonomie scientifique sur l'autonomie technologique par une méthode d'*Entropy Balancing* permettant une mesure complémentaire de causalité. Cette méthode permet de décorréler la variable explicative (SSA) des effets propres à chaque unité du panel à partir des valeurs de ses covariables, à savoir le niveau de capital humain, l'intensité en R&D, les capacités d'investissement, les dépenses militaires et le volume d'exportations d'armes. Nous mesurons ensuite l'effet de traitement (SSA) sur le résultat (TSA) par les estimations d'une régression par WLS (*Weighted Least Squares*). Nous contrôlons également les effets temporels et régionaux.

Enfin, nous vérifions la robustesse de nos résultats en utilisant un modèle à variables instrumentales, estimé séparément à travers des régressions à effets fixes et à effets aléatoires. Le test de causalité de Granger étant concluant, le recours à la méthode des variables instrumentales nous permet de corriger l'endogénéité potentielle entre les scores d'autonomie scientifique et technologique. Cette endogénéité peut être due à la simultanéité, à un biais de variables omises, ou à des erreurs de mesures. Nous adoptons tout d'abord une spécification à effets fixes qui a, entre autres, l'avantage de tenir compte de la possible corrélation entre les régresseurs et les variables omises qui sont invariantes dans le temps, et donc spécifiques aux pays. Par la suite, nous appliquons une spécification à effets aléatoires pour tenir compte des effets non observés qui, bien que variant d'une entité à l'autre, sont supposés être exogènes par rapport aux variables explicatives. Le renforcement de nos estimations au moyen d'un modèle à variables instrumentales est complété par une série de tests de robustesse, lesquels sont exposés en détail dans la section dédiée.

La suite de cette section formalise en détail les différentes étapes de notre stratégie économétrique.

2.4.1 Test causalité au sens de Granger

Désignons par TSA_{it} et SSA_{it} deux variables mesurant respectivement l'autonomie technologique et l'autonomie scientifique du pays i à la date t . Notre modèle PVAR est décrit comme suit :

$$\begin{cases} TSA_{i,t} = \sum_{p=1}^P \phi_{1p} TSA_{i,t-p} + \sum_{q=1}^Q \beta_{1q} SSA_{i,t-q} + u_{1i} + \varepsilon_{1i,t} \\ SSA_{i,t} = \sum_{p=1}^P \phi_{2p} SSA_{i,t-p} + \sum_{q=1}^Q \beta_{2q} TSA_{i,t-q} + u_{2i} + \varepsilon_{2i,t} \end{cases} \quad (1)$$

où les u_{ki} sont les effets fixes spécifiques aux pays, les $\varepsilon_{ki,t}$ désignent les termes d'erreurs variant en fonction des pays et du temps, les ϕ_{kp} renvoient aux coefficients autorégressifs, et les β_{kq} sont les paramètres de causalité au sens de Granger, avec $k = 1 ; 2$. La valeur du retard optimal est déterminée à l'aide des critères d'informations d'Akaike (AIC), bayésien (BIC) et de Hannan-Quinn (HQIC).

Rappelons que, dans cette recherche, l'intérêt du PVAR réside en la réalisation des tests de causalité au sens de Granger. La causalité allant de l'autonomie scientifique vers l'autonomie technologique est testée à partir de l'hypothèse nulle suivante :

$$H_0: \beta_{1q} = 0 \quad (2)$$

Le rejet de H_0 suggère que l'autonomie scientifique cause l'autonomie technologique au sens de Granger. De manière similaire, la causalité au sens de Granger allant de l'autonomie technologique vers l'autonomie scientifique est testée à partir de l'hypothèse nulle suivante :

$$H_0: \beta_{2q} = 0 \quad (3)$$

Le rejet de H_0 suggère la causalité. Un rejet de (2) et (3) à la fois traduit une causalité bidirectionnelle.

2.4.2 Méthode par *Entropy Balancing*

L'approche par *Entropy Balancing* (EB) nécessite de considérer le niveau d'autonomie scientifique des pays comme un traitement continu dont nous souhaitons mesurer l'effet sur l'autonomie technologique. Nous souhaitons ainsi mesurer la fonction de réponse à la dose (ou *Dose Response Function*, DRF) pour l'ensemble des pays de notre panel. Pour cela, la méthode par EB nous permet de corriger les caractéristiques individuelles des pays en fonction de leur niveau de traitement estimé. Cette étape permet de décorrélérer les covariables de l'intensité du traitement, et donc de corriger l'hétérogénéité entre les pays étudiés. Les covariables sont le niveau de capital humain, l'intensité en R&D, les capacités d'investissement, les dépenses militaires et le volume d'exportations d'armes. Ces variables permettent de corriger l'intensité du traitement SSA des caractéristiques individuelles des pays influençant son intensité.

Cette méthode, introduite par Hainmueller (2012), a été largement utilisée dans la littérature récente, notamment par Neuenkirch et Neumeier (2016) pour évaluer l'impact des sanctions américaines sur la pauvreté, par Apeti et Edoh (2023) pour évaluer l'effet de l'adoption des monnaies mobiles sur les recettes fiscales dans les pays en développement ou encore par Bol et al. (2021) pour étudier l'impact d'une décision politique de confinement sur le soutien politique au parti au pouvoir dans les pays d'Europe de l'Ouest.

La méthode utilisée dans ces travaux répond à une méthode de traitement binaire, avec un groupe traité et un groupe de contrôle, non traité. Cette méthode produit un ensemble de données pondérées de telle manière que la distribution des covariables satisfasse un certain nombre de conditions de moments. La méthode implique la génération de pondérations destinées à constituer un échantillon équilibré, lequel sera utilisé dans l'estimation ultérieure des effets du traitement. Il ressort de la littérature précédemment citée que l'équilibrage entropique présente plusieurs avantages par rapport à certaines des techniques classiques d'évaluation d'impact. Entre autres, l'EB permet d'atteindre un haut niveau d'équilibre des covariables, minimise la perte d'information en maintenant les pondérations aussi proches que possible des pondérations de base, et réduit la dépendance au modèle, ce qui est avantageux pour pouvoir estimer ensuite des effets de traitement.

La méthode que nous utilisons applique la méthode par EB aux traitements continus (EBCT, pour *Entropy Balancing for Continuous Treatments*). Cette variation, introduite par Tübbicke (2022) permet un équilibrage des covariables à notre variable de traitement. Les valeurs mesurées pour chaque pays étant continue, l'EBCT nous permet d'estimer un effet d'impact de l'autonomie scientifique sur l'autonomie technologique.

Cette dernière méthode a également gagné en popularité dans la littérature récente. Elle est par exemple utilisée par Hoang, Hoang, et Anh (2023) pour évaluer l'impact du risque géopolitique intercoréen sur la prise de risque des entreprises sud-coréennes, par Baráth et Fertő (2023) pour évaluer l'impact de l'écologisation sur la productivité des exploitations agricoles ou encore par Lavigne et al. (2022) pour mesurer l'impact des fausses croyances relatives à la pandémie de COVID-19 sur la confiance dans la transparence du gouvernement.

Les différentes méthodes par EB s'appuient sur le cadre des résultats potentiels (Rubin 1974) et les scores de propension généralisés (*General Propension Score*, GPS) pour aborder les problèmes d'endogénéité dans les études observationnelles. Pour cela, trois hypothèses doivent être remplies : (i) l'indépendance conditionnelle des résultats potentiels et de l'intensité du traitement, conditionnelle aux covariables observées. Cette hypothèse est également connue sous le nom d'hypothèse de sélection sur les variables observables (Heckman et Robb 1985) et exige que le chercheur observe toutes les covariables X qui déterminent simultanément la sélection dans les différentes intensités de traitement T ainsi que le résultat d'intérêt Y . Nous considérons que la quantité et la qualité des covariables présentes dans notre panel permettent d'approximer correctement les facteurs externes influençant le niveau de traitement par pays.

(ii) Le support commun conditionnel de l'intensité du traitement doit être positif. Cette condition assure que pour chaque niveau de traitement, il y a une probabilité non nulle d'observer des individus avec différentes covariables. La distribution des valeurs de traitement étant relativement homogène et sans valeur nulle, nous considérons cette hypothèse comme valide.

(iii) L'hypothèse de la valeur de traitement unitaire stable (*Stable-Unit Treatment Value Assumption*, SUTVA) est assumée, excluant les effets d'équilibre général et de débordement. En accord avec une partie de la littérature, nous supposons la connaissance scientifique comme universelle et largement codifiée. Aussi, elle possède des caractéristiques proches de l'information, lui conférant une mobilité parfaite. Chaque territoire n'est ainsi influencé que par son propre traitement scientifique, et n'est pas supposé atteint par les capacités des autres territoires.

Pour étendre la méthode de l'EB aux traitements continus, Tübbicke (2022) se concentre sur un ensemble de conditions de non-corrélation basées sur les corrélations de Pearson. L'objectif est de minimiser une fonction de perte $H(w)$ sous des contraintes d'équilibre. La forme standard du problème est alors formalisée comme suit :

$$\min_w H(w) = \sum_{i|T_i>0} h(w_i) \tag{4}$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{i|T_i>0} w_i g(p, \tilde{X}_i, \tilde{T}_i) = 0; \sum_{i|T_i>0} w_i = 1; w_i > 0 \forall i | T_i > 0 \tag{5}$$

$g(p, \tilde{X}_i, \tilde{T}_i)$ est alors un vecteur colonne contenant les covariables centrées \tilde{X} , les intensités de traitement centrées \tilde{T} et leurs termes d'ordre p . La valeur de p permet d'ajuster le niveau de complexité des conditions visant à éliminer toute corrélation entre les variables de traitement T_i et les covariables X_i . Il est ainsi possible de contrôler les interactions entre T_i et X_i au niveau quadratique ($p = 2$) ou cubique ($p = 3$). $h(w_i)$ est une métrique entropique, comme pour la méthode de Hainmueller (2012), Tübbicke (2022) utilise la métrique d'entropie de Kullback (1959), définie comme $h(w_i) = w_i \ln(w_i/q_i)$. Ici, q_i représente les poids de base, qui sont uniformes sous la forme $q_i = \frac{1}{N}$, pour N la taille de l'échantillon, si non-spécifié. La fonction de perte associée au problème d'optimisation atteint son minimum lorsque $w_i = q_i$ pour chaque i et est indéfinie pour des poids non-positifs. L'objectif est de minimiser la différence entre la pondération w_i et les poids de référence q_i , tout en obtenant une corrélation nulle entre traitement et covariables, dans l'échantillon repondéré.

Pour résoudre le problème d'optimisation avec contraintes, l'auteur utilise la méthode de Lagrange. Le problème optimisé peut alors être exprimé comme :

$$\min_{w,\lambda,\gamma} \mathcal{L}(w, \lambda, \gamma) = \sum_{i=1}^N w_i \ln\left(\frac{w_i}{q_i}\right) - \lambda \left\{ \sum_{i=1}^N w_i - 1 \right\} - \gamma' \left\{ \sum_{i=1}^N w_i g(p, \tilde{X}_i, \tilde{T}_i) \right\} \tag{6}$$

où λ et γ sont les multiplicateurs de Lagrange. La fonction de pondération qui en dérive est alors :

$$w_i = \frac{q_i \exp\{\gamma' g(p, \tilde{X}_i, \tilde{T}_i)\}}{\sum_{i=1}^N q_i \exp\{\gamma' g(p, \tilde{X}_i, \tilde{T}_i)\}} \tag{7}$$

Pour obtenir les meilleures valeurs de γ , une approche d'optimisation quasi-Newton est employée. Une fois ces valeurs trouvées, elles sont utilisées pour déduire les poids

d'équilibrage.

La méthode par EBCT permet, après obtention des poids d'équilibre, d'estimer la DRF par des méthodes de régression paramétriques ou non-paramétriques sur l'échantillon pondéré. Nous estimons la DRF, soit $E[Y(t)]$, par un modèle WLS. Nous contrôlons également les effets temporels pour chaque année et les effets régionaux pour les différentes régions continentales au sens de la Banque Mondiale (Amérique du Nord, Europe de l'Ouest, Asie du Sud-est, etc.).

3 Résultats

3.1 Résultats descriptifs

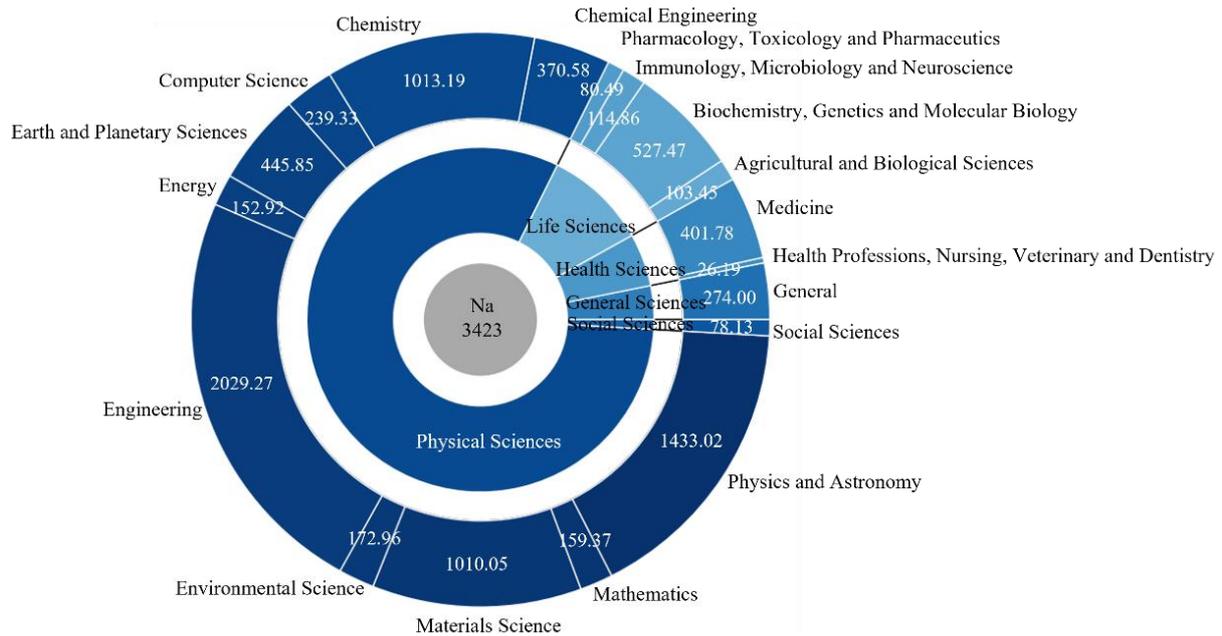


Figure 5.3 : Détails des domaines scientifiques présents dans A₁, au niveau 1 et 2 de la classification ASJC.

Les sujets scientifiques référencés au sein de l'échantillon A₁ peuvent être détaillés à l'aide de la classification *All Scientific Journal Classification (ASJC)* développée par Scopus et fournie dans la base Lens. Cette classification est basée sur la nature du journal publiant l'article. Elle permet de détailler 4 grands domaines majeurs (Sciences Physiques, Sociales, de la Santé et du Vivant), un domaine multidisciplinaire (General), et jusqu'à 334 sous-domaines au niveau le plus fin. La Figure 5.3 détaille l'ensemble A₁ sur une vingtaine de sous-domaines au niveau 2 digits. Chaque article est pondéré par la quantité de domaine auquel il est identifié.

Ce diagramme permet d'illustrer une concentration à plus 81% des sujets dans le domaine des sciences physiques. L'intérêt de l'industrie de défense est ainsi concentré sur les domaines scientifiques touchant à l'ingénierie, à l'astrophysique, à la chimie et à l'étude des matériaux. Ces sujets concentrent environ 80% des références en sciences physiques et plus de 63% des références totales.

Des recherches précédentes ont révélé une augmentation notable des citations de littérature scientifique (NPL) dans les brevets de défense depuis les années 1980. Parmi ces études, Fauconnet (2019) analyse en détail ces tendances en fonction des différentes technologies. Les résultats indiquent une augmentation principalement attribuable aux technologies de l'armement (F41), dont l'accroissement notable à partir de 2002 a conduit à une hausse du volume de la NPL. Parallèlement, cette croissance est soutenue par les innovations technologiques dans le domaine de l'aéronautique (véhicules et équipements, B64G), qui ont engendré une augmentation en intensité, c'est-à-dire une plus grande fréquence de références scientifiques dans le temps pour un nombre constant d'inventions déposées. Les technologies relatives aux installations offensives et défensives des navires (B63G) ont également connu une hausse en intensité, bien que de manière plus fluctuante. Enfin, les technologies chimiques liées aux explosifs (C06) ont vu une augmentation modérée mais constante de leurs citations scientifiques.

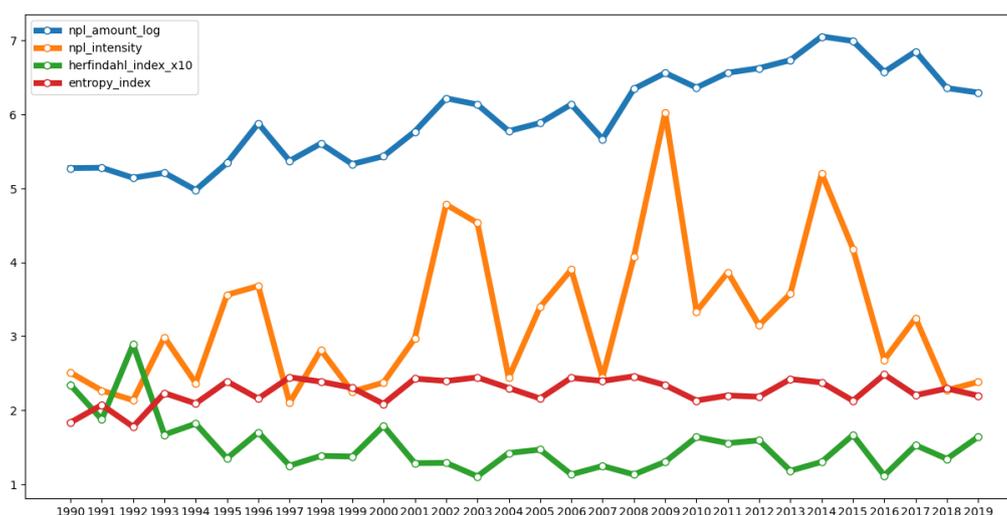


Figure 5.4 : Evolution de la concentration des sujets, de l'intensité et du volume de citations scientifiques dans les brevets à usage militaire et aérospatial.

La Figure 5.4, détaille sur une même échelle l'évolution de différents indicateurs liés à notre échantillon A_1 : (i) la quantité de références scientifiques présentes par année exprimée en logarithme naturel (npl_amount_log), (ii) l'intensité de ce référencement mesurée par le rapport du nombre de références sur le nombre d'inventions (npl_intensity), (iii) deux indices de concentration des sujets scientifiques, un indice d'Herfindahl, multiplié par 10 (herfindahl_index_x10) et un indice d'entropie (entropy_index). Le traitement des résultats par log ou multiplication vise uniquement à les présenter sur une même échelle.

Les résultats illustrent une augmentation du référencement NPL depuis les années 1990.

Cette hausse est cependant moins importante que dans les travaux précédemment cités. Ceci s'explique largement par notre utilisation d'une base de données différente enregistrant des références uniquement consolidées, ainsi que par un protocole d'échantillonnage différent. L'intensité du référencement NPL accuse également une tendance croissante, quoique volatile, exprimant à la fois une exigence d'exhaustivité accrue dans le référencement scientifique des inventions déposées et une incorporation accrue des apports scientifiques dans les inventions en matière de défense. La relative stabilité des indices d'Herfindahl et d'entropie sur la concentration des sujets scientifiques traduit une stabilité dans la diversité des domaines intéressant la défense. Autrement dit, les technologies identifiées comme ayant un usage principalement militaire et aérospatial ne montrent pas une tendance à mobiliser une diversité plus importante de sujets scientifiques au cours de la période.

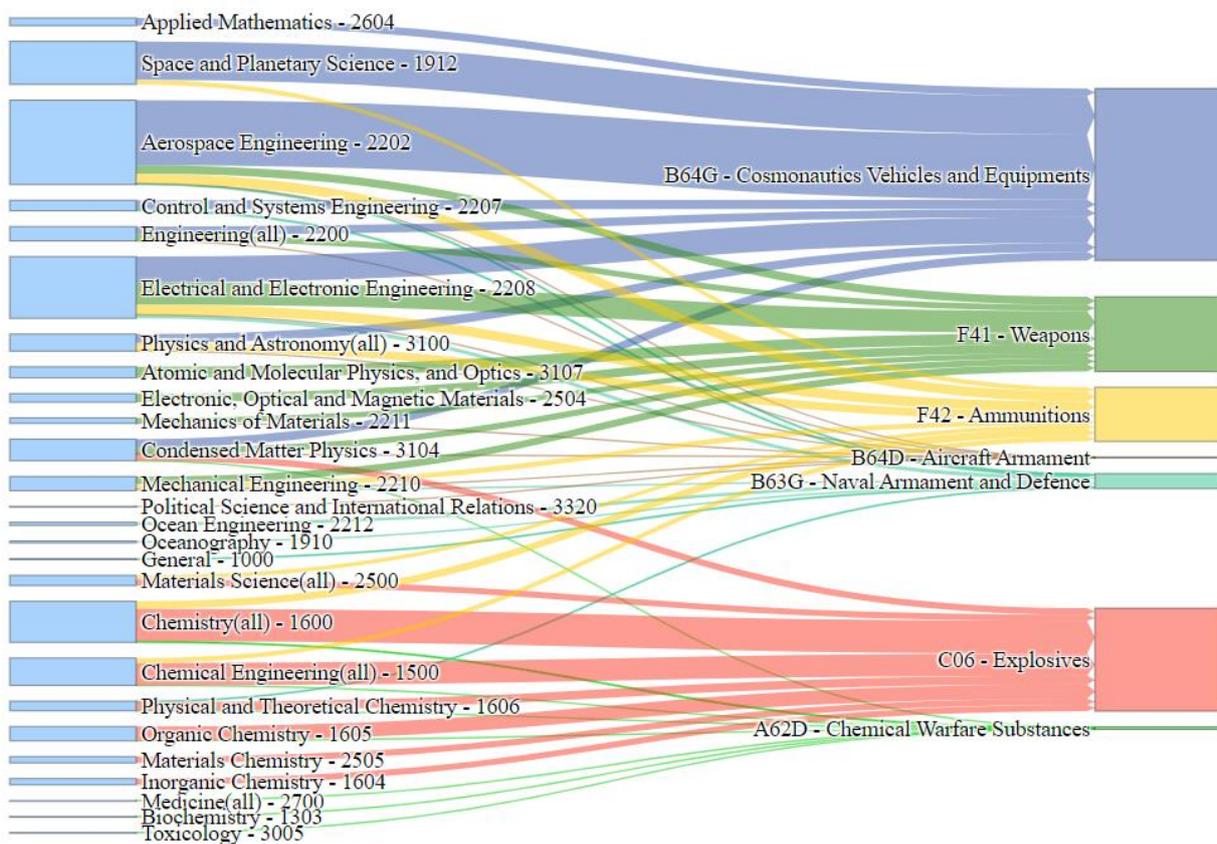


Figure 5.5 : Flux de connaissances en volume entre sujets scientifiques (codes ASJC) et technologies à usage militaire et aérospatial (codes IPC)

Notre échantillon de données nous permet également de réaliser un couplage entre les technologies identifiées et les sujets scientifiques référencés. Une démarche similaire a notamment été utilisée par Bassecoulard et Zitt (2004) ou plus récemment par Ba et Liang (2021). Les résultats illustrés dans la Figure 5.5 regroupent les principaux sujets référencés et

nous permettent d'observer une cohérence entre les domaines scientifiques et les technologies sélectionnées. Ceci appuie une certaine pertinence du référencement NPL au niveau macroscopique.

Le couplage IPC-ASJC pour les domaines militaires et aérospatiaux montre des liens intuitifs entre les technologies développées et les sujets scientifiques référencés. Ainsi, les technologies liées aux véhicules et aux équipements spatiaux (B64G) référencent des connaissances en génie aérospatial (2202) ou en planétologie et sciences spatiales (1912). De la même manière, les technologies liées aux explosifs (C06) et aux substances de guerre chimique (A62D), sont logiquement liées à des sujets scientifiques en chimie générale (1600 et 1500), organique et inorganique (1605 et 1604) et en toxicologie (3005). Certains sujets scientifiques sont au contraire plus éclectiques, intéressant le développement d'équipements aérospatiaux, de systèmes d'armes, de munitions, et d'armements naval et aérien. Ces sujets sont notamment le génie électrique et électronique (2208) et le génie aérospatial. Au niveau le plus fin de la nomenclature, ces domaines scientifiques sont les plus mobilisés par le développement technologique intéressant la défense.

Ces résultats permettant d'illustrer les principales sources scientifiques des technologies en matière de défense. Il convient cependant de rappeler que notre échantillon se concentre sur des domaines technologiques « traditionnels » comme l'armement et l'aéronaval, mais reste aveugle aux technologies plus récentes, souvent issues de développements civils, comme les TIC ou l'intelligence artificielle par exemple.

La section suivante éclaire les liens existants entre la maîtrise des connaissances scientifiques présentées ici et les performances technologiques à l'échelle des territoires.

3.2 Résultats économétriques

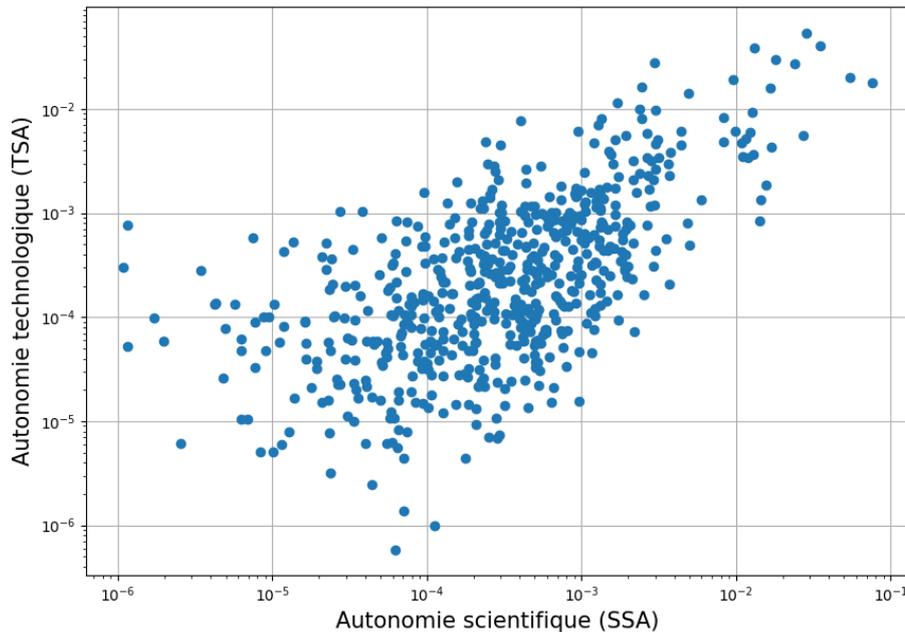


Figure 5.6 : TSA × SSA sur une échelle logarithmique

La Figure 5.6 illustre visuellement la distribution des scores TSA en fonction des scores SSA pour chaque nation sur l'ensemble de la période. Ces résultats nous permettent d'envisager une corrélation importante entre les capacités scientifiques des territoires et leurs capacités technologiques. Afin de consolider cette intuition visuelle, nous divisons notre approche économétrique en trois étapes distinctes : (i) un test de causalité de Granger afin de vérifier l'influence croisée de la science et de la technologie telle que décrite par la littérature ; (ii) une approche par *balancing entropy* (EB) prenant l'autonomie scientifique comme traitement affectant le niveau d'autonomie technologique ; (iii) la consolidation des résultats par l'implémentation de variables de contrôle additionnelles, de panels restreints, d'un modèle de régression alternatif et d'une mesure de l'autonomie scientifique alternative.

3.2.1 Granger-causalité

Pour tester la causalité entre nos variables d'autonomie scientifique et technologique, nous utilisons un test de causalité de Granger (1969) sur les estimations d'un modèle PVAR. Avant d'effectuer ce test de causalité, nous vérifions si les indices doivent être différenciés afin de les rendre stationnaires. La Table 5.4 montre les résultats d'un test de racine unitaire de seconde génération de Pesaran (2007) qui rejette l'hypothèse nulle de non-stationnarité.

Table 5.4 : Test de racine unitaire de Pesaran

H₀	Statistiques standardisées Z
SSA non stationnaire	-3.220***
TSA non stationnaire	-3.469***
RD non stationnaire	-2.263***
INVINT non stationnaire	-3.338***
MILI non stationnaire	-2.101**
NBCH non stationnaire	-2.298***
Xarm non stationnaire	-2.417***

Notes : *: $p < 0.10$; **: $p < 0.05$; ***: $p < 0.01$.

Pour chacune des variables, les résultats permettent de rejeter l'hypothèse nulle de la présence d'une racine unitaire, ce qui nous permet de conclure que toutes les variables sont stationnaires en niveau. Ces résultats nous permettent de valider l'hypothèse de stationnarité nécessaire au test de causalité.

Les résultats suivants concernent l'utilisation du modèle PVAR et commencent par fixer le niveau de retard optimal à inclure dans le modèle. Dans la Table 5.5 le retard optimal, selon les critères BIC et QIC, est de 1, le critère AIC suggère que le retard optimal est de 2. Nous fixons le nombre de retards optimal à une année à la majorité des critères d'évaluation.

Table 5.5 : Choix de la valeur optimale de retard

Lag	MBIC	MAIC	MQIC
1	-101.860*	-14.773	-48.739*
2	85.380	-15.710*	-42.883
3	-57.942	-5.689	-26.068
4	-33.845	0.990	-12.596

Notes : avec * indiquant la valeur la plus basse

Les résultats du modèle PVAR, disponibles en annexe, fournissent des informations initiales sur les relations entre l'autonomie scientifique et l'autonomie technologique. Cette dernière apparaît comme réciproque. Ce constat est renforcé par le test de causalité de Granger présenté sur la Table 5.6. Les résultats nous permettent de rejeter les deux hypothèses nulles de non-causalité au sens de Granger entre les variables d'autonomie scientifique (SSA) et technologiques (TSA) au seuil de 1%. Ces résultats confirment notre hypothèse de lien de causalité entre les capacités scientifiques des territoires et leurs capacités d'innovation technologiques. Cependant, nous constatons également une rétroaction de l'autonomie technologique au travers de la causalité au sens de Granger de TSA vers SSA.

Table 5.6 : Causalité au sens de Granger

H₀	Statistique de Wald
TSA ne Granger-cause pas SSA	9.048***
SSA ne Granger-cause pas TSA	16.119***

Notes : *: $p < 0.10$; **: $p < 0.05$; ***: $p < 0.01$.

Si ces résultats suggèrent une prévalence du modèle linéaire au sein des territoires impliqués dans l'innovation de défense, ils ne nous permettent pas d'écarter l'influence de variables exogènes qui seraient susceptibles d'expliquer à la fois les capacités scientifiques et technologiques. En effet, la Granger-causalité entre nos indicateurs est susceptible de traduire une endogénéité. Cette endogénéité peut être due à l'absence de variable de contrôle ou d'une éventuelle simultanéité.

Afin de pallier cela, la partie suivante détaille les résultats d'une approche complémentaire par *Entropy Balancing* permettant de corriger les effets individuels des pays sur leur niveau d'autonomie scientifique. Cette méthode nous permet également d'isoler un potentiel effet de causalité de SSA sur l'autonomie TSA en corrigeant les effets individuels à l'aide des caractéristiques des différentes unités du panel.

3.2.2 *Entropy Balancing*

Les résultats suivants intègrent une méthode par EB qui équilibre l'influence des covariables sur l'intensité du traitement par l'autonomie scientifique SSA afin de mesurer leurs effets sur l'autonomie technologique TSA, tout en neutralisant les effets contextuels, tels que ceux liés aux pays, aux périodes temporelles et aux régions. Cette approche permet une évaluation plus robuste de l'effet de l'autonomie scientifique sur l'autonomie technologique.

La Table 5.7 illustre la qualité de la pondération des covariables après résolution de la fonction de perte sous contrainte. Les poids appliqués aux vecteurs de variables de contrôle réduisent à zéro la corrélation précédemment existante entre la variable de traitement et les variables de contrôle.

Table 5.7 : Qualité de l'équilibrage dans la méthodologie par EBCT
- SSA comme traitement

	R^2	Statistique-F	p-valeur
Avant équilibrage	0.125	19.823	0
Après équilibrage	0	0	1

Notes : Résultats d'une régression pondérée (WLS) de la variable de traitement continue sur les covariables.

La Table 5.7 présente ainsi la proportion de R^2 explicable par notre échantillon de variables de contrôle passant de 12.5% à 0. Ceci permet de réduire l'endogénéité entre les covariables et l'intensité du traitement et d'écarter les effets fixes propres à chaque unité du panel.

Une fois ce pré-traitement effectué, nous estimons l'effet de l'autonomie scientifique (SSA) sur l'autonomie technologique (TSA) dans les 25 pays composant notre panel en utilisant la méthode des moindres carrés pondérés (WLS). Les résultats sont présentés dans la Table 5.8. Les colonnes (1)-(4) montrent le résultat de la régression sans les covariables. La colonne (1) exclut les effets fixes de pays et de temps. Les colonnes (2)-(3) incluent les effets fixes de pays et de temps, respectivement, tandis que la colonne (4) inclut ces deux effets conjointement. Enfin, les colonnes (5)-(8) reprennent l'exercice des colonnes (1)-(4), à l'exception de l'ajout, dans chaque régression de deuxième étape, des covariables utilisées dans la première étape, à savoir le niveau de capital humain, l'intensité en R&D, les capacités d'investissement, les dépenses militaires et le volume d'exportations d'armes. L'inclusion des covariables dans la deuxième étape par EBCT augmente la qualité de l'ajustement tout en contrôlant le nombre de variables.

Table 5.8 : Estimation de l'effet de traitement par *Entropy Balancing*

Expliquée : TSA	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
SSA	0.228*** (0.109)	0.318*** (0.100)	0.226** (0.105)	0.311*** (0.104)	0.228** (0.100)	0.194** (0.079)	0.209** (0.105)	0.143** (0.071)
Covariables dans la deuxième étape	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Effets fixes temporels dans la deuxième étape	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui
Effets fixes régionaux dans la deuxième étape	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui
R^2 (ajusté)	0.039	0.226	0.038	0.223	0.113	0.344	0.136	0.361
Observations	700	700	700	700	700	700	700	700

Notes : Erreurs standard robustes entre parenthèses ; * : $p < 0.10$; ** : $p < 0.05$; *** : $p < 0.01$.

Nos résultats illustrent une DFR positive, continue et significative concernant le traitement des individus « pays » par l'autonomie scientifique sur leur niveau d'autonomie technologique en matière de défense. Nous pouvons observer que l'introduction des covariables et des effets régionaux réduit la significativité de la corrélation de SSA sur TSA. Ceci traduit une certaine hétérogénéité entre les pays quant à la causalité entre l'autonomie scientifique et l'autonomie technologique. Nous pouvons également constater que cet effet est indépendant de potentiels effets temporels ou régionaux.

La section suivante confronte nos résultats à une série de contrôles de robustesse afin de consolider nos conclusions et interprétations.

3.3 Robustesse

Nos estimations indiquent que l'autonomie scientifique des nations dans la production d'articles intéressant le développement des innovations en matière de défense exerce une influence positive sur leur capacité à produire des innovations militaires et aérospatiales de manière autonome. Dans cette section, nous cherchons à vérifier la robustesse de ce résultat principal. À cette fin, nous procédons à quatre analyses différentes. Premièrement, nous testons la sensibilité de nos résultats à d'éventuelles variables omises en considérant quatre variables de contrôle supplémentaires. Deuxièmement, nous estimons l'effet de l'autonomie scientifique sur l'autonomie technologique en matière de défense à l'aide d'une méthode de régression

alternative, un modèle avec variables instrumentales combinant effets fixes et effets aléatoires. Troisièmement, nous estimons l'effet des capacités scientifiques en considérant des échantillons restreints. Quatrièmement, nous considérons une mesure alternative des capacités scientifiques intéressant la défense. Nous le verrons, ces éléments de robustesses tendent à consolider notre résultat principal et plaident en faveur de la solidité de nos conclusions.

3.3.1 Variables de contrôle additionnelles

Nous étendons notre spécification de base à un ensemble de quatre variables de contrôle supplémentaires. Ces variables sont : le niveau de développement économique, le niveau d'éducation, l'attractivité économique et le besoin en armement²¹. Ces variables saisissent les aspects institutionnels, politiques et économiques des déterminants de la création de connaissances scientifiques et technologiques en matière de défense. Cette analyse nous permet de tester la robustesse de nos résultats par rapport à un éventuel biais de variables omises. Pour atténuer les problèmes potentiels de multicollinéarité, les covariables supplémentaires sont introduites une à la fois dans l'analyse par EB. Les résultats sont présentés dans la Table 5.20. Pour chacune des estimations, les résultats sur la qualité de l'équilibrage sont concluants. Par souci de concision, elles sont présentées en Annexe E, à la Table 5.18. Ces tableaux montrent que, quelle que soit la variable de contrôle supplémentaire, l'autonomie scientifique a un effet positif et significatif sur l'autonomie technologique, c'est-à-dire que l'effet d'une activité scientifique autonome reste positif et robuste et ne dépend pas de l'inclusion de variables de contrôles supplémentaires. Cela suggère que nos résultats restent robustes, même en tenant compte d'un éventuel biais lié à l'omission de certaines variables.

Il est important de noter que le contrôle du besoin en armement améliore la significativité de nos résultats, principalement au travers de l'exclusion de la variable d'exportation d'armes largement corrélée avec nos variables expliquées et explicatives. Le détail des corrélations pour l'ensemble des échantillons est disponible en Annexe D3.

3.3.2 Modèle à effet fixe avec variables instrumentales

Nous consolidons nos estimations de l'effet de l'autonomie scientifique sur l'autonomie technologique à l'aide d'une méthode alternative. Cette méthode utilise un modèle à effet fixe

²¹ La description complète des variables de contrôle additionnelles est disponible en Annexe 5.D1.

et aléatoire avec des variables instrumentales. L'utilisation de ce modèle répond à une double nécessité.

Tout d'abord, l'utilisation d'un modèle à effets fixes permet de contrôler l'hétérogénéité non-observée au sein des pays, en supprimant les effets spécifiques constants dans le temps. En complément, l'utilisation d'un modèle à effets aléatoires permet de contrôler l'existence d'effets non observés, variant selon les pays et potentiellement indépendants des variables explicatives. L'utilisation de ces modèles à des données de panel est courante en raison d'observations collectées pour potentiellement de longues périodes temporelles sur les mêmes territoires.

Ensuite, l'utilisation de variables instrumentales permet de contrôler l'endogénéité existante entre les variables explicatives et expliquées. L'utilisation d'instruments permet de corriger la corrélation de la variable explicative avec le terme d'erreur. Les variables instrumentales (VI) sont utilisées pour résoudre ce problème en fournissant des instruments qui sont corrélés avec les variables explicatives endogènes mais non corrélées avec l'erreur du modèle. Les VI servent à isoler la variation exogène de la variable endogène, permettant ainsi une estimation plus fiable de son effet sur la variable dépendante.

Ce modèle peut être formalisé comme suit :

$$TSA_{i,t} = \gamma SSA_{i,t} + X_{1i,t}\beta + \mu_i + \epsilon_{i,t} = Z_{i,t}\delta + \mu_i + \epsilon_{i,t} \quad (8)$$

où γ est un paramètre à estimer, $X_{1i,t}$ est un vecteur de variables exogènes de dimension $1 \times k_1$, β est un vecteur de paramètres à estimer de dimension $k_1 \times 1$, μ_i représente les effets fixes. $SSA_{i,t}$ est corrélé au terme d'erreur $\epsilon_{i,t}$. $Z_{i,t} = (SSA_{i,t} \quad X_{1i,t})$. δ est un vecteur de paramètres à estimer de dimension $K \times 1$, avec $K = k_1 + 1$. Désignons par $X_{2i,t}$ un vecteur de dimension $k_2 \times 1$ contenant k_2 variables instrumentales. La condition d'ordre est satisfaite pour $k_2 \geq 1$.

Le modèle (9) est estimé par la méthode des doubles moindres carrés. Les instruments utilisés sont l'intensité de l'investissement dans les sciences fondamentales en fonction du PIB (FUNDS) et le nombre de chercheurs publics en équivalent temps plein (GOVR)²². Ces mesures permettent d'approximer l'implication du territoire dans les sciences plus fondamentales, celles-ci permettant, dans une logique linéaire, d'accroître l'innovation au travers du progrès dans les sciences appliquées. Ces mesures sont ainsi supposées influencer TSA uniquement au travers de SSA. Nous utilisons également les valeurs retardées d'ordre 2 des variables de

²² Une description complète des variables instrumentales est disponible en Annexe 5.D1.

contrôles desquels nous retirons NBCH pour des raisons de colinéarité évidente avec les instruments. Nous effectuons le test de sur-identification des restrictions de Hansen pour tester la validité de ces instruments.

Notons, par ailleurs, qu'afin de résoudre le problème de simultanéité existant entre l'autonomie scientifique et l'autonomie technologique, avant d'estimer le modèle décrit en (9), $SSA_{i,t}$ est retardé d'ordre un. De manière similaire, pour mitiger les possibles problèmes d'endogénéité des variables de contrôle, nous les retardons également à l'ordre un. Le modèle à estimer devient comme suit :

$$TSA_{i,t} = \gamma SSA_{i,t-1} + X_{1i,t-1}\beta + \mu_i + \epsilon_{i,t} = Z_{i,t-1}\delta + \mu_i + \epsilon_{i,t} \quad (9)$$

Les résultats du modèle avec VI, disponibles dans la Table 5.9, vont dans le sens d'une influence de l'autonomie scientifique sur l'autonomie technologique en matière de défense, comme observé dans les résultats antérieurs. L'analyse des coefficients individuels indique que les capacités scientifiques des nations ont un effet positif et statistiquement significatif sur leur capacité à innover. Les dépenses militaires ont également un effet positif et significatif sur les capacités d'innovation en matière de défense.

Il est intéressant de noter que le niveau d'investissement décrit une relation « U » avec l'autonomie technologique lorsque l'on spécifie des effets fixes. Dans la continuité des travaux de Kouakou and Szego (2022), nous constatons l'existence d'un effet de seuil dans l'influence des capacités d'investissement intérieur sur le niveau d'autonomie stratégique. Nous estimons que ce seuil se situe en moyenne à environ 24% du PIB, ce qui concorde avec les estimations des auteurs précédents situées entre 23 et 27%.

Table 5.9 : Modèle à effets fixes avec variables instrumentales

Dépendante : TSA	Estimations par effets fixes	Estimations par effets aléatoires
SSA	1.986*** (0.975)	1.222*** (0.248)
RD	0.001 (0.001)	-0.000 (0.000)
MILI	0.003* (0.002)	0.000** (0.000)
INVINT	-0.002* (0.002)	-0.003** (0.001)
INVINT ²	0.018** (0.002)	0.008 (0.005)
Xarm	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)
Statistiques de Wald	54.26***	126.43***
R ²	0.42	0.42
Statistiques de Sargan-Hansen	0.031	0.031
Observations	700	700

Notes : *: $p < 0.10$; **: $p < 0.05$; ***: $p < 0.01$.

Dans l'étude des relations entre capacités scientifiques et capacités technologiques, l'utilisation de variables mesurant les capacités en sciences fondamentales ainsi que les variables de contrôle du panel retardées d'ordre 2 comme instruments pour SSA retardée d'ordre 1 s'avère méthodologiquement robuste. Ces instruments sont à la fois valables, car ils sont exogènes sous l'hypothèse de chocs transitoires, et puissants, en raison de leur forte corrélation avec SSA retardée. Ce choix instrumental est également justifié théoriquement, car il reflète les délais inhérents à la diffusion du savoir scientifique et son impact subséquent sur la capacité technologique. Cette démarche accroît la crédibilité de nos estimations, comme corroborée par le test de Sargan-Hansen, qui ne permet pas de rejeter l'hypothèse nulle de validité des instruments utilisés, ce qui soutient la validité de nos instruments.

3.3.3 Échantillons restreints du panel

Dans cette sous-section, nous restreignons l'échantillon complet en nous concentrant sur des groupes de pays spécifiques ou en excluant des régions ou des ensembles de pays particuliers. Nous examinons ensuite si notre résultat principal reste cohérent. Cette approche nous permet d'évaluer la robustesse de notre résultat principal par rapport aux échantillons restreints. Plus précisément, nous considérons trois cas. Premièrement, nous excluons les deux nations hégémoniques profitant d'un poids très important sur le réseau de connaissances. La

taille relative de ces pays est susceptible d'influencer le résultat global du panel. Deuxièmement, nous nous concentrons sur le sous-échantillon des 18 pays les moins développés. Nous excluons ainsi l'influence des pays membres du G7 capable d'orienter l'effet de l'autonomie scientifique sur l'autonomie technologique. Ces pays sont en effet les plus capables de produire des connaissances en matière de défense et pourraient concentrer une part disproportionnée de l'effet du traitement SSA sur TSA. Troisièmement, nous retirons les pays membres de l'OTAN. Comme présenté dans le chapitre précédent, l'alliance militaire nord-atlantique possède une capacité particulière d'interdépendance en matière d'échange de connaissances. Ce cluster cognitif des membres de l'OTAN est susceptible de concentrer une proportion relativement importante des interactions S&T. En retirant les pays membres de cette alliance, nous espérons ainsi conforter nos résultats en dehors de ce groupe de relation privilégiées.

Les effets de l'autonomie scientifique obtenus à partir de la méthode par EB sont présentés dans la Table 5.19. Les résultats sur la qualité de l'équilibrage se trouvent à la Table 5.18 et sont concluants. Ces tableaux montrent que, quelle que soit la variable de contrôle supplémentaire, l'autonomie scientifique garde un effet positif et significatif sur l'autonomie technologique. Ceci consolide nos résultats précédents.

Les résultats sur les différents sous-échantillons illustrent une certaine sensibilité de l'effet du traitement au niveau de développement économique. L'exclusion successive de la Chine et des États-Unis puis des membres de G7 réduit graduellement la significativité de l'influence de l'autonomie scientifique sur l'autonomie technologique. Ceci place le développement économique comme vecteur de transmission facilitant le lien S&T dans l'industrie de défense. Il convient de noter également que l'exclusion de la Chine et des États-Unis augmente l'effet de 0.143 à 0.254 ce qui signifie qu'une augmentation de 1% du niveau d'autonomie scientifique accroît l'autonomie technologique de 0,143% à 0.254%. Cependant, l'exclusion des membres du G7 (dont la Chine ne fait pas partie) réduit l'effet à 0.089. Ce qui traduit une part importante du lien S&T par les membres du G7 et un effet négatif de la Chine dans l'évaluation de l'effet moyen.

On peut noter également que l'exclusion des membres de l'OTAN n'accroît que très légèrement l'effet moyen de SSA sur TSA avec une baisse de significativité, ce qui ne traduit pas un effet particulier des membres de l'OTAN sur le lien S&T comparativement au reste du panel.

3.3.4 Mesure alternative de l'autonomie stratégique scientifique

Dans cette sous-section, nous évaluons la robustesse de nos résultats en examinant une mesure alternative de l'autonomie scientifique en matière de défense. Pour cela, nous utilisons le détail des sujets scientifiques présents dans notre échantillon A_1 afin de sélectionner les principaux sujets intéressants la défense. Comme identifié sur la Figure 5.3, plus de 81% des références scientifiques identifiables concernent des sujets en science physique. Plus précisément, l'attention des inventions à usage militaire et aérospatial se concentre sur quatre grands domaines des sciences physiques : la Chimie (1600), l'ingénierie générale (2200), la science des matériaux (2500) et l'astrophysique (3100). Ces sujets constituent 63.5% des flux de citations identifiables. Une mesure alternative de l'autonomie des territoires en matière de production scientifique intéressant la défense consiste à mesurer l'expertise générale des nations sur ces quatre domaines en utilisant la quantité d'articles publiés annuellement. Un recensement de la quantité de publication annuelle par pays et pour chaque domaine de la classification ASJC est mis à disposition par Scopus sur la période 1996-2023²³. Cette mesure recense une moyenne de 41 471 publications annuelles par pays membre du panel, agrégées sur les quatre sujets identifiés. L'ensemble des statistiques descriptives liées à cet indicateur sont disponibles en Table 5.15. Cet indicateur permet d'élargir notre mesure de l'autonomie afin d'exclure d'éventuels biais de sélection, intrinsèquement liés au référencement des sources scientifiques comme les effets de Matthieu ou de Halo (MacRoberts et MacRoberts 1989; Larivière et Gingras 2010) ou les différences de motivations dans le référencement, qui peuvent être superficielles ou fondamentales (Chubin et Moitra 1975).

Pour cet indicateur, la période d'analyse est réduite à 1996-2019, ce qui a pour effet d'éliminer potentiellement les impacts négatifs liés à l'imputation des variables de contrôle, telles que décrites dans la section 2.3.2. Il convient de rappeler que cette imputation concernait principalement des données de la période 1990-2000.

Les quantités brutes de publications annuelles par pays pour chacun des quatre sujets sont additionnées et exprimées en logarithme naturel. Cet indicateur est désigné sous l'abréviation « AltSSA ».

Les estimations de l'effet de traitement par EB obtenues avec cette variable comme traitement sont présentées en Annexe F3, à la Table 5.21. Pour chacune des estimations, les résultats sur la qualité de l'équilibrage sont concluants, elles sont présentées en Table 5.18. Les résultats illustrent un effet du volume de production scientifique ciblé sur nos quatre domaines

²³ <https://www.scimagojr.com/countryrank.php>

est positif et invariablement significatif au seuil de 1%. Cela démontre la robustesse de notre résultat principal, indiquant qu'il n'est pas sensiblement influencé par des biais de citations et des erreurs potentielles dans la mesure de l'autonomie scientifique en matière de défense.

Il convient cependant de noter que l'influence de notre variable alternative est plus significative que notre indicateur principal, suggérant ainsi que la significativité d'AltSSA est non seulement plus constante, mais également plus robuste, bien que l'effet moyen soit radicalement plus faible. Cette situation reflète une influence tangible de la production scientifique dans ces domaines d'activité. Ces domaines constituent le noyau scientifique de la technologie militaire et aérospatiale, mais ils ne sont pas exclusifs. L'intérêt de l'innovation de défense pour les productions issues de ces domaines d'activité est ainsi largement hétérogène, les articles référencés directement par les inventions sont ainsi supposés plus proches des applications militaires et aérospatiales. Une étude plus poussée des caractéristiques de ces articles, notamment au travers d'une analyse sémantique, permettrait de cibler plus précisément les productions scientifiques susceptibles d'intéresser la défense.

L'inclusion dans notre échantillon des citations provenant d'autres disciplines enrichit la compréhension de la diversité des sources qui intéressent le secteur de la défense. Cependant, cela introduit aussi une forme de bruit en raison des limitations inhérentes au référencement scientifique.

Les contrôles de robustesse précédents confirment que l'autonomie scientifique est un facteur déterminant d'une certaine autonomie en matière d'innovation de défense. Les contrôles de robustesse, y compris l'utilisation de mesures alternatives et de sous-échantillons, valident cette association significative. Ceci nous permet d'interpréter nos résultats avec confiance. Aussi la section suivante discute des implications théoriques de nos résultats ainsi que des vecteurs de transmission potentielle liant les activités scientifiques et technologiques au sein d'un même territoire.

4 Interprétation et Discussion

La convergence des résultats obtenus par nos modèles nous confère une base quantitative relativement solide pour constater une influence significative des capacités scientifiques sur les capacités technologiques au sein du domaine de l'innovation en matière de défense. Les dispositions d'un territoire à produire et à diffuser des connaissances scientifiques, notamment en science des matériaux, en astrophysique, en ingénierie ou en chimie, exercent une influence déterminante sur ses dispositions à produire des innovations technologiques. Malgré le caractère codifié et universel de la connaissance scientifique, celle-ci apparaît sujette à un ancrage territorial. Le territoire produisant des connaissances scientifiques apparaît comme profitant d'une capacité accrue d'application de ces dernières, permettant l'acquisition *in fine* d'un avantage technologique. Ces résultats nous permettent de rejeter l'hypothèse d'une connaissance scientifique comme un bien public global. Elle comporte au contraire une dimension locale qui limite sa diffusion à une dimension géographique.

Nous interprétons ces résultats comme soulignant l'importance d'une dimension implicite dans la production et la diffusion des connaissances scientifiques. Cette interprétation implique que l'activité scientifique, malgré les fortes incitations à la codification qu'elle suppose, entraîne une quantité non-négligeable de connaissances tacites. Cette interprétation rejoint Balconi, Pozzali, et Viale (2007) pour qui les connaissances méthodologiques spécifiques des scientifiques en matière de procédures et de techniques expérimentales ou leur expertise en matière d'instruments physiques et d'équipements de laboratoire sont partiellement tacites. Lorsque ces connaissances sont codifiées, elles ne le sont pas de manière à être largement partagée comme le reste des connaissances scientifiques. La raison évoquée tient au fait que les organismes de recherches seraient moins incités à protéger ces connaissances appliquées.

L'hypothèse de connaissances tacites générées par l'activité scientifique permet d'interpréter l'autonomie scientifique d'un territoire comme relevant avant tout d'une capacité d'absorption (Cohen et Levinthal 1990; Niosi et Bellon 2002; Schillaci, Romano, et Nicotra 2013). Le déplacement et les interactions sociales des chercheurs permettent une diffusion localisée des connaissances tacites et allouent au territoire une capacité accrue à comprendre, reproduire et améliorer les connaissances se diffusant entre les territoires. Ceci peut également souligner l'importance du « savoir-qui », défini selon Lundvall et Johnson (1994) comme une

connaissance tacite, incarnée dans les individus et leurs réseaux d'interactions sociales. Cette forme de connaissance relève d'une compétence sociale, qui implique la connaissance de qui sait quoi et de qui sait comment faire quoi. L'existence de ce savoir-qui détermine les capacités à accéder et à mobiliser les connaissances d'un individu au travers d'un réseau d'interactions et de collaborations.

La présence locale de cette capacité à identifier et à mobiliser les connaissances incarnées dans les individus favorise l'existence de *gatekeepers* - membres de l'organisation particulièrement exposés à la littérature (Taylor 1975) - qui facilitent l'intégration des connaissances extérieures, qu'elles soient techniques ou scientifiques. La colocalisation des capacités de développement technologique et des expertises scientifiques potentiellement intéressantes pour soutenir ce développement permet aux ingénieurs d'interagir avec des individus capables de leur indiquer les connaissances dont ils ont besoin. Autrement dit, ce ne sont pas tant les connaissances directement créées sur le territoire qui vont soutenir le développement technologique, mais la connaissance de l'état de l'art par les acteurs présents au sein du réseau d'interactions territorial.

Cette interprétation permet d'expliquer la colocalisation des capacités scientifiques et technologiques et justifie l'investissement public dans les domaines intéressant la défense. Malgré le caractère mobile des productions scientifiques codifiées, l'existence d'une production irrémédiablement tacite justifie le bénéfice local des investissements publics.

Ainsi, nos résultats plaident en faveur d'un investissement dans des programmes de recherches ciblés comme levier pour accroître l'autonomie stratégique des systèmes nationaux d'innovation de défense. Les grands domaines scientifiques intéressant la défense concernent entre autres la science des matériaux, l'ingénierie aérospatiale, les sciences spatiales et planétaires, le génie électrique et électronique, la physique de la matière condensée ou le génie chimique. Il convient de rappeler ici que notre échantillonnage se concentre sur les domaines technologiques « traditionnels » du secteur de la défense : armement balistique, véhicule militaire terrestre, armement naval et aéronautique, équipement aérospatial, etc. Il ne comprend pas les technologies plus récentes, largement issues de développements civils comme les TIC ou l'intelligence artificielle qui joue un rôle croissant dans les stratégies de défense. Aussi, la liste des sujets scientifiques intéressant la défense serait susceptible d'être élargie à l'ingénierie des systèmes ou aux mathématiques par exemple. Une étude complémentaire permettrait ainsi d'établir une liste plus exhaustive.

Conclusion

Ce chapitre compare l'autonomie scientifique et technologique des territoires dans la production, l'utilisation et la diffusion des connaissances intéressant l'innovation de défense. Pour cela, nous mobilisons des données de brevets et d'articles scientifiques au sein d'un panel de 25 pays observés de 1990 à 2019. Les estimations économétriques, basées sur la méthode de *Balancing Entropy* pour les traitements continus, démontrent que l'autonomie scientifique soutient l'autonomie technologique dans l'élaboration des technologies à usage militaire et aérospatial. Ce résultat reste solide après avoir effectué une série de vérifications de robustesse. L'absence de liens explicites entre nos indicateurs scientifiques et technologiques ainsi que l'utilisation d'un indicateur scientifique alternatif nous permet d'interpréter le lien S&T comme relevant d'une forme d'expertise territoriale, traduisant la présence de connaissances tacites.

Il ressort que les productions scientifiques, malgré une codification avancée, comportent une dimension tacite qui restreint leur diffusion géographique. Cette étude avance que le progrès technologique dans le secteur de la défense d'une nation est influencé par les compétences scientifiques des individus présents sur son territoire. Les connaissances incarnées dans les individus, en termes de savoir-faire, de connaissances de la littérature et de réseau d'interactions sont susceptibles de faciliter la diffusion intraterritoriale des connaissances et d'ainsi intermédiaire la production scientifique internationale avec les besoins théoriques des inventeurs locaux.

Ainsi, et en dépit de l'importance stratégique des connaissances en matière de défense, il est observé que les territoires bénéficient directement d'une portion limitée des connaissances scientifiques codifiées générées à l'intérieur de leurs frontières. Néanmoins, l'investissement dans des programmes de recherche, en particulier dans les domaines de la science des matériaux, de la chimie, de l'astrophysique et de l'ingénierie théorique, se révèle être un levier significatif pour augmenter l'autonomie stratégique par l'innovation d'un pays en matière militaire et aérospatiale.

Cependant, l'innovation intéressant la défense inclut un spectre de plus en plus de large de technologies, comme les TIC et l'IA, dont le développement est principalement guidé par le domaine civil. L'élargissement de nos conclusions à ces nouveaux enjeux d'innovation stratégique reste subordonné à l'obtention de résultats ultérieurs.

Annexes

Annexe A : Liste des IPC liés à des usages défense.

Table 5.10: liste des IPC militaires (Acosta et al. 2011)

Code IPC militaire pur :	4-digits	8-digits
Armes	F41A, B, C, F, G, H et J	tous
Munitions	F42B, C et D	tous
Code IPC duaux		
Articles de campement à usage militaire	A45F	3/06
Figurines permettant des exercices militaires	A63H	13/08
Substances de guerre chimique	A62D	101/02
Dispositions offensives ou défensives sur les navires	B63G	tous
Disposition d'éjection d'explosif, de bombes et support d'armement pour aéronef	B64D	1/04, 1/06, 7/00
Abris anti-bombe, balistique, nucléaire etc.	E04H	9/04
Porte et fenêtre pour abris	E06B	5/10

Table 5.11: liste des IPC aérospatiaux (OST28 de Schmoch (2008))

Code IPC	4-digits	8-digits
Astronautique, véhicules ou équipements à cet effet.	B64G	tous
Compositions explosives ou thermiques, leur fabrication, emploi d'une substance, utilisée seule, comme explosif.	C06B	tous
Dispositifs détonants ou d'amorçage, cordons ou mèches, allumeurs chimiques, compositions pyrophoriques.	C06C	tous
Moyens pour produire de la fumée ou du brouillard, compositions pour gaz de combat, production de gaz pour le sautage ou la propulsion.	C06D	tous
Allumettes, fabrication des allumettes	C06F	tous

Annexe B : liste des pays du panel

Table 5.12: Pays membres du panel

Rang	Pays
1	États-Unis
2	Allemagne
3	Chine
4	France
5	Royaume-Uni
6	Japon
7	Canada
8	Fédération de Russie
9	Corée du Sud
10	Israël
11	Suède
12	Australie
13	Italie
14	Autriche
15	Espagne
16	Suisse
17	Pays-Bas
18	Norvège
19	Afrique du Sud
20	Belgique
21	Finlande
22	Irlande
23	Danemark
24	République Tchèque
25	Nouvelle-Zélande

Annexe C : Résultats modèle PVAR

Table 5.13: Estimation du modèle PVAR

Variables	Coefficients
SSA	
SSA	-0.345 (0.532)
TSA	0.896*** (0.298)
TSA	
SSA	1.260*** (0.314)
TSA	0.158 (0.477)
Observations	575

Notes : Les valeurs entre parenthèses représentent les erreurs standards.

*: $p < 0.10$; **: $p < 0.05$; ***: $p < 0.01$.

Annexe D : Variables additionnelles pour contrôles de robustesse

Table 5.14: Description des variables additionnelles

Variables	Description	Proxy	Sources
Marm	Valeurs de l'indicateur de tendance des importations d'armes par pays (en log).	Besoin en armement / dépendance de la BITD	SIPRI Arms Transfers Database 2022
PIBHAB	PIB par habitant, en US dollars courant (en log).	Niveau de développement économique	Banque Mondiale, Données des comptes nationaux, 2023
EDULVL	Taux de scolarisation dans l'enseignement supérieur, en pourcentage du total de la population (en log).	Niveau de capital humain	Institut de statistique de l'UNESCO, 2023
FDI	Investissement direct étrangers, en flux annuel net.	Attractivité économique du pays	FMI, base de données de la balance des paiements, 2023
AltSSA	Nombre d'articles publiés annuellement dans les 4 principaux sujets scientifiques intéressant la défense sur 1996-2020 (normalisé min-max).	Capacités scientifiques intéressant la défense	Scimago Journal & Country Rank – Scopus, 2023
FUNDS	Intensité du financement de la recherche fondamentale, en pourcentage du PIB.	Intensité de la recherche fondamentale	OCDE, Science and Technology indicators, 2023
GOVR	Effectif de la recherche publique, en équivalent temps plein (en log).	Intensité de la recherche fondamentale	OCDE, Science and Technology indicators, 2023

Notes : les données additionnelles ont été imputées, lorsque nécessaire, de manière similaire au panel original. log : Logarithme naturel. Chacune des séries de variables additionnelle est stationnaire au sens de Pesaran (2007), les résultats des tests de stationnarité sont disponibles sur demande.

Table 5.15: Description statistique des variables

	Variables	N	Moyenne	Écart-type	min	25%	50%	75%	max
(1)	TSA	750	2.139×10^{-3}	7.574×10^{-3}	5.870×10^{-7}	7.915×10^{-5}	3.096×10^{-4}	0,00103079	0,092
(2)	SSA	750	1.388×10^{-3}	5.197×10^{-3}	$2,801 \times 10^{-8}$	$6,836 \times 10^{-5}$	2.747×10^{-4}	8.779×10^{-4}	0,076
(3)	AltSSA	600	0,067 [41471,053]	0,115 [68704,778]	0,000 [1142]	0,010 [7219,750]	0,025 [16292,500]	0,072 [44152,750]	0,976 [586490]
(4)	RD	750	0,599 [2,009]	0,458 [0,869]	-0,574 [0,563]	0,230 [1,259]	0,632 [1,881]	0,955 [2,598]	1,637 [5,140]
(5)	INVINT	725 750	-0,001 [23,460]	0,058 [5,131]	-0,210 [14,027]	-0,026 [20,377]	0,002 [22,449]	0,025 [25,366]	0,648 [54,304]
(6)	MILI	750	0,509 [1,968]	0,546 [1,454]	-1,276 [0,279]	0,156 [1,169]	0,454 [1,574]	0,771 [2,161]	2,746 [15,587]
(7)	NBCH	750	1,861 [7,421]	0,605 [3,442]	-0,375 [0,687]	1,694 [5,441]	1,965 [7,137]	2,222 [9,229]	2,846 [17,2102]
(8)	Xarm	750	18,948 [976301333]	2,229 [2167612005]	0,000 [0]	17,406 [36250000]	19,158 [209000000]	20,429 [745000000]	23,478 [15714000000]
(9)	Marm	750	18,762 [358209333]	1,825 [484648497]	0,000 [0]	17,859 [57000000]	19,025 [183000000]	19,927 [451000000]	21,992 [3558000000]
(10)	FDI	750	3,929	8,038	-36,081	0,775	1,960	4,100	71,348
(11)	EDULVL	750	3,981 [59,269]	0,527 [21,747]	1,037 [2,820]	3,843 [46,686]	4,086 [59,477]	4,312 [74,581]	4,785 [119,683]
(12)	PIBHAB	750	10,107 [32186,961]	0,918 [18842,539]	5,762 [317,885]	9,910 [20121,265]	10,316 [30207,785]	10,688 [43838,355]	11,548 [103553,844]
(13)	FUNDS	750	0,369	0,177	0,028	0,254	0,375	0,462	1,358
(14)	GOVR	750	8,823 [25872,672]	1,657 [53571,719]	5,525 [251,000]	7,666 [2134,000]	8,867 [7094,000]	10,056 [23287,811]	12,874 [390179,188]

Notes : Pour les variables exprimées en logarithme naturel, normalisées ou différenciées, les valeurs brutes sont présentées entre crochets.

Table 5.16 : Coefficients de corrélation

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
(1) TSA	1														
(2) SSA	0,58	1													
(3) AltSSA	0,39	0,40	1												
(4) RD	0,15	0,13	0,14	1											
(5) INVINT²				-0,16	1										
(6) INVINT					0,08	1									
(7) MILI	0,26	0,23	0,24		-0,08	-0,09	1								
(8) NBCH				-0,17	0,68		-0,10	1							
(9) Xarm	0,34	0,31	0,44	0,08	-0,09		0,44	-0,11	1						
(10) Marm	0,15	0,15	0,33	0,11	-0,07		0,40	-0,13	0,28	1					
(11) FDI				-0,13		0,19	0,16	-0,26	0,14		-0,14	1			
(12) EDULVL		0,10			0,51	-0,13		0,81		-0,08	0,12	1			
(13) PIBHAB				-0,14	0,61	-0,11		-0,31	0,75	-0,13	-0,18	0,24	0,74	1	
(14) FUNDS				-0,14	0,64	-0,15		0,44		-0,09	0,15	0,37	0,57	1	
(15) GOVR	0,25	0,23	0,63	-0,14			0,26	-0,19	0,54	0,41	-0,18		-0,39	-0,38	1

Notes : Seuls les coefficients de corrélation significatifs à hauteur de 5% (p-valeur < 0.05) ont été rapportés.

Table 5.17 : Facteurs d'inflation des variances (VIF) pour les différentes spécifications du panel

Variables	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(1) SSA	1,765503	1,77836	1,779154	1,765791	1,743768		1,767288
(2) AltSSA						1,487009	
(3) RD	2,0411	2,168701	2,106011	2,041824	2,114982	2,131207	1,760684
(4) INVINT²	1,05082	1,068278	1,096168	1,087513	1,049647	1,102536	1,052624
(5) INVINT	1,015427	1,015595	1,016716	1,035441	1,023291	1,047589	1,016423
(6) MILI	1,292808	1,549514	1,298393	1,382647	1,286226	1,329698	1,300282
(7) NBCH	1,993513	3,008593	4,644767	2,009857	2,055164	2,125725	
(8) Xarm	1,390127	1,390689	1,391462	1,41768		1,538718	1,837558
(9) PIBHAB		2,994037					
(10) EDULVL			3,195668				
(11) FDI				1,166926			
(12) Marm					1,292057		
(13) FUNDS							2,139821
(14) GOVR							1,877377
Moyenne	1,543054	1,863393	2,035942	1,522638	1,54139	1,500491	1,617118

Notes : Dans (5) nous excluons les exportations d'armes (Xarm) pour atténuer les problèmes de colinéarité avec les importations d'armes (Marm). Dans (7) nous excluons le nombre de chercheurs (NBCH) pour atténuer les problèmes de colinéarité avec les variables instrumentales mesurant les capacités en science fondamentale (FUNDS & GOVR). De même, l'introduction de variables supplémentaires, une à la fois, dans la spécification de base permet de résoudre les problèmes de colinéarité.

Annexe E : Qualité de l'équilibrage entropique

Table 5.18 : Qualité de l'équilibrage dans la méthodologie par EBCT -SSA comme traitement

A. Sous-ensemble sans les acteurs hégémoniques (USA et Chine)			
	R^2	Statistique-F	p-valeur
Avant équilibrage	0.090	12.692	0
Après équilibrage	0	0	1
B. Sous-ensemble sans les pays les plus développés (G7)			
Avant équilibrage	0.112	12.608	0
Après équilibrage	0	0	1
C. Sous-ensemble sans les membres de l'OTAN			
Avant équilibrage	0.074	5.874	0
Après équilibrage	0	0	1
D. Contrôle du niveau de développement économique (PIB par habitant)			
Avant équilibrage	0.139	18.645	0
Après équilibrage	0	0	1
E. Contrôle du niveau d'éducation (Accès à l'enseignement supérieur)			
Avant équilibrage	0.135	18.036	0
Après équilibrage	0	0	1
F. Contrôle de l'attractivité économique (Investissement direct de l'étrangers)			
Avant équilibrage	0.126	16.636	0
Après équilibrage	0	0	1
G. Contrôle du besoin en armement (Importation d'armes)			
Avant équilibrage	0.074	11.122	0
Après équilibrage	0	0	1
H. Variable explicative alternative			
Avant équilibrage	0.272	44.330	0
Après équilibrage	0	0	1

Notes : Résultats de régressions pondérées (WLS) de la variable de traitement continue (SSA) sur les covariables.

Annexe F : Résultats des contrôles de robustesse

Table 5.19: Contrôles de robustesse – Sous-ensembles restreints

A. Sous-ensemble sans les acteurs hégémoniques (USA et Chine)								
Expliquée : TSA	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
SSA	0.309*** (0.113)	0.365*** (0.137)	0.312*** (0.113)	0.364** (0.150)	0.309*** (0.111)	0.260** (0.124)	0.276** (0.115)	0.254** (0.129)
Covariables dans la deuxième étape	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Effets fixes temporels dans la deuxième étape	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui
Effets fixes régionaux dans la deuxième étape	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui
R^2 (ajusté)	0.022	0.176	0.018	0.172	0.077	0.254	0.103	0.350
Observations	644	644	644	644	644	644	644	644
B. Sous-ensemble sans les pays les plus développés (G7)								
Expliquée : TSA	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
SSA	0.178*** (0.057)	0.137** (0.054)	0.169*** (0.060)	0.120** (0.055)	0.178*** (0.065)	0.109** (0.049)	0.186*** (0.069)	0.089* (0.048)
Covariables dans la deuxième étape	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Effets fixes temporels dans la deuxième étape	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui
Effets fixes régionaux dans la deuxième étape	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui
R^2 (ajusté)	0.034	0.291	0.053	0.314	0.148	0.406	0.168	0.417
Observations	504	504	504	504	504	504	504	504
C. Sous-ensemble sans les membres de l'OTAN								
Expliquée : TSA	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
SSA	0.273*** (0.103)	0.303*** (0.107)	0.250** (0.101)	0.274** (0.106)	0.273** (0.107)	0.272*** (0.101)	0.255** (0.108)	0.188* (0.096)
Covariables dans la deuxième étape	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Effets fixes temporels dans la deuxième étape	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui
Effets fixes régionaux dans la deuxième étape	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui
R^2 (ajusté)	0.078	0.260	0.084	0.264	0.143	0.362	0.149	0.401
Observations	371	371	371	371	371	371	371	371

Notes : Ce tableau présente l'effet des capacités scientifiques intéressant la défense sur les capacités d'innovation de cette industrie, obtenu en utilisant la méthode d'EBCT sur des échantillons restreints de notre panel. La variable de traitement est l'autonomie scientifique stratégique. L'ensemble des covariables comprend le niveau de capital humain, l'intensité en R&D, les capacités d'investissement, les dépenses militaires et le volume d'exportations d'armes. Il s'agit de l'ensemble de covariables de base, toutes les covariables étant décalées d'un an pour éviter les problèmes potentiels de causalité inverse. En suivant Balima, Combes, et Minea (2021), nous incluons des effets fixes annuels et régionaux dans la deuxième étape de la méthodologie d'EB. Les effets fixes annuels contrôlent les chocs macroéconomiques ou les facteurs liés au temps qui ont un impact sur l'activité scientifiques et technologique intéressant la défense. Les effets fixes régionaux contrôlent les facteurs spécifiques aux macro-régions affectant potentiellement l'activité scientifique et technologique. Constante non déclarée incluse. Les erreurs standard robustes sont entre parenthèses. * : $p < 0,10$; ** : $p < 0,05$; *** : $p < 0,01$.

Table 5.20: Contrôles de robustesse – variables de contrôles additionnelles

A. Contrôle du niveau de développement économique (PIB par habitant)								
Expliquée : TSA	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
SSA	0.220** (0.108)	0.269*** (0.095)	0.207** (0.102)	0.252*** (0.090)	0.220** (0.101)	0.174** (0.077)	0.185* (0.109)	0.174** (0.071)
Covariables dans la deuxième étape	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Effets fixes temporels dans la deuxième étape	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui
Effets fixes régionaux dans la deuxième étape	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui
R^2 (ajusté)	0.040	0.235	0.040	0.233	0.110	0.349	0.137	0.499
Observations	700	700	700	700	700	700	700	700
B. Contrôle du niveau d'éducation (Accès à l'enseignement supérieur)								
Expliquée : TSA	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
SSA	0.238** (0.113)	0.347*** (0.111)	0.244** (0.113)	0.335*** (0.115)	0.238** (0.096)	0.224** (0.088)	0.185* (0.103)	0.174** (0.082)
Covariables dans la deuxième étape	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Effets fixes temporels dans la deuxième étape	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui
Effets fixes régionaux dans la deuxième étape	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui
R^2 (ajusté)	0.042	0.225	0.041	0.223	0.127	0.341	0.166	0.358
Observations	700	700	700	700	700	700	700	700
C. Contrôle de l'attractivité économique (Investissement direct de l'étrangers)								
Expliquée : TSA	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
SSA	0.313** (0.137)	0.394*** (0.096)	0.347*** (0.131)	0.401*** (0.099)	0.313** (0.124)	0.252*** (0.086)	0.325*** (0.122)	0.210** (0.086)
Covariables dans la deuxième étape	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Effets fixes temporels dans la deuxième étape	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui
Effets fixes régionaux dans la deuxième étape	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui
R^2 (ajusté)	0.058	0.260	0.061	0.257	0.136	0.372	0.160	0.387
Observations	700	700	700	700	700	700	700	700
D. Contrôle du besoin en armement (Importation d'armes)								
Expliquée : TSA	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
SSA	0.719*** (0.210)	0.943*** (0.202)	0.710*** (0.209)	0.939*** (0.206)	0.719*** (0.209)	0.877*** (0.184)	0.639*** (0.202)	0.816*** (0.182)
Covariables dans la deuxième étape	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Effets fixes temporels dans la deuxième étape	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui
Effets fixes régionaux dans la deuxième étape	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui
R^2 (ajusté)	0.178	0.329	0.185	0.335	0.239	0.391	0.281	0.536
Observations	700	700	700	700	700	700	700	700

Notes: Ce tableau présente l'effet des capacités scientifiques intéressant la défense sur les capacités d'innovation de cette industrie, obtenu en utilisant la méthode d'EBCT en contrôlant respectivement le niveau de développement économique, le niveau d'éducation, l'attractivité économique et le besoin en armement. Les statistiques résumant la qualité de l'équilibrage sont présentées à l'annexe E. La variable de traitement est l'autonomie scientifique stratégique. L'ensemble des covariables comprend les variables de base et les variables de contrôle supplémentaires considérées, toutes les covariables étant décalées d'un an pour éviter les problèmes potentiels de causalité inverse. En (D), nous supprimons les exportations d'armes des covariables pour éviter les problèmes de colinéarité. En suivant Balima, Combes, et Minea (2021), nous incluons des effets fixes annuels et régionaux dans la deuxième étape de la méthodologie d'EB. Les effets fixes annuels contrôlent les chocs macroéconomiques ou les facteurs liés au temps qui ont un impact sur l'activité scientifiques et technologique intéressant la défense. Les effets fixes régionaux contrôlent les facteurs spécifiques aux macro-régions affectant potentiellement l'activité scientifique et technologique. Constante non déclarée incluse. Les erreurs standard robustes sont entre parenthèses. *: $p < 0,10$; **: $p < 0,05$; ***: $p < 0,01$.

Table 5.21 : Contrôles de robustesse – variable explicative alternative

Expliquée : TSA	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
AltSSA	0.005*** (0.001)	0.007*** (0.001)	0.006*** (0.001)	0.010*** (0.002)	0.005*** (0.001)	0.007*** (0.001)	0.005*** (0.001)	0.009*** (0.001)
Covariables dans la deuxième étape	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Effets fixes temporels dans la deuxième étape	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui
Effets fixes régionaux dans la deuxième étape	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui
R^2 (ajusté)	0.052	0.267	0.051	0.295	0.087	0.367	0.099	0.388
Observations	600	600	600	600	600	600	600	600

Notes : Ce tableau présente l'effet des capacités scientifiques intéressant la défense sur les capacités d'innovation de cette industrie, obtenu en utilisant la méthode d'EBCT, avec une mesure alternative des capacités scientifiques. Cette mesure alternative utilise le Scimago Country Rank de Scopus et mesure la quantité annuelle d'article publiés par pays dans les domaines de la Chimie (1600), de l'ingénierie générale (2200), de la science des matériaux (2500) et de l'astrophysique (3100). Les statistiques résumant la qualité de l'équilibrage sont celles présentées en annexe E1.H. La variable de traitement est donc AltSSA L'ensemble des covariables comprend les variables de base, toutes les covariables étant décalées d'un an pour éviter les problèmes potentiels de causalité inverse. La période couverte par notre échantillon est réduite à [1996 ; 2019] à cause de la disponibilité des données. En suivant Balima, Combes, et Minea (2021), nous incluons des effets fixes annuels et régionaux dans la deuxième étape de la méthodologie d'EB. Les effets fixes annuels contrôlent les chocs macroéconomiques ou les facteurs liés au temps qui ont un impact sur l'activité scientifiques et technologique intéressant la défense. Les effets fixes régionaux contrôlent les facteurs spécifiques aux macro-régions affectant potentiellement l'activité scientifique et technologique. Constante non déclarée incluse. Les erreurs standard robustes sont entre parenthèses. * : $p < 0,10$; ** : $p < 0,05$; *** : $p < 0,01$.

Conclusion générale

Cette thèse prend pour objet la relation entre science et technologie dans la perspective d'une évaluation des capacités et des déterminants de l'autonomie stratégique des territoires en matière d'innovation. Ce travail permet de documenter le fonctionnement des réseaux de connaissances internationaux en termes d'interactions, de dépendances et d'incorporation des connaissances scientifiques dans le développement technologique. Nous adoptons pour cela une approche institutionnaliste, intégrant l'innovation dans un processus systémique d'échange de connaissances entre acteurs dans lequel la nature et l'intensité de ces échanges est largement dépendantes d'une dimension géographique et territoriale. Nous évaluons ainsi les capacités des territoires à placer la production, l'utilisation et la diffusion des connaissances stratégiques sous l'autorité d'une souveraineté nationale. Nos travaux empiriques reposent largement sur l'utilisation de bases de données de brevets et d'articles scientifiques. Nous intégrons les liens de citations en tant que flux de connaissances au sein de réseaux internationaux dans le cadre d'une approche structurale.

Les questions de recherche abordées dans cette thèse couvrent successivement l'évolution des structures d'échanges internationale depuis la fin de la guerre froide, la nature du lien entre science et technologie et le lien entre la maîtrise de certaines connaissances technologiques et les capacités d'innovation de défense d'un pays. Ces trois questions complémentaires permettent d'explorer les différentes visions de la relation science-technologie et leur lien avec les dynamiques historiques et géopolitiques ayant permis aux territoires de se doter plus ou moins efficacement en actifs permettant la création et l'absorption de connaissances stratégiques.

Notre première approche empirique, dans le chapitre 3, traite de l'évolution des structures d'échange de connaissances en matière d'innovations de défense depuis la fin de la guerre froide. L'analyse met en évidence une augmentation significative des échanges de connaissances, dominés par les États-Unis mais aussi marqués par l'émergence de nouveaux acteurs tels que la Chine, la Russie et la Corée du Sud. Ces dynamiques reflètent un système mondial de connaissances de plus en plus interconnecté, où l'intégration dans des réseaux de connaissances globaux est cruciale pour le développement technologique en matière de défense. Les acteurs émergents montrent une propension croissante à créer sur leur sol les connaissances

scientifiques et techniques utiles à l'innovation de défense. Cependant cette capacité s'accompagne d'une dépendance plus ou moins forte de ces acteurs vis-à-vis des acteurs extérieurs et notamment des États-Unis. Ceci traduit un régime d'innovation de défense de rattrapage encourageant principalement des adaptations créatives et des innovations incrémentales. La volonté politique, les capacités socio-économiques et les nécessités géostratégiques incitent en interne les acteurs nationaux à adopter une position plus centrale dans le réseau d'échange global, à l'image de la Chine et de la Russie qui ont quittés leur position d'innovateur relativement isolé pour intégrer le cluster principal longtemps dominé par les acteurs de l'OTAN et leurs alliés. Nos résultats illustrent également une circulation des connaissances scientifiques moins dépendante des contraintes géographiques et des alliances géopolitiques. Ceci est interprété comme relevant de la nature plus codifiée et duale des productions scientifiques. Plus globalement, nos résultats soulignent la complexité des interactions internationales et la difficulté pour certains acteurs de développer une autonomie complète en matière d'innovation de défense.

Le chapitre 4 met en lumière la complémentarité des méthodologies sémantiques et citationnelles dans l'étude des interactions entre science et technologie. Alors que les liens par citations illustrent un réseau déterministe de références, la proximité sémantique souligne la proximité cognitive et thématique entre les articles scientifiques et les brevets. Cette dualité méthodologique révèle les différentes facettes de l'intégration scientifique dans le développement technologique. D'une part, les liens citationnels montrent comment les inventions s'inscrivent dans les trajectoires scientifiques et technologiques préexistantes. Ce phénomène s'exerce sur le temps long et traduit l'intégration progressive des avancées scientifiques dans le développement technologique. Il traduit une relation asymétrique et linéaire de dépendance de la technologie envers la science.

D'autre part, la proximité sémantique indique des convergences thématiques pouvant signaler des innovations émergentes ou des déviations par rapport aux paradigmes établis. Cette relation capture une interaction analysable sur le court terme et traduisant l'appartenance des chercheurs à une communauté épistémique proche des applications technologiques. Cette relation, moins dépendante des délais de citations, peut être décrite comme réciproque, traduisant une co-évolution entre la recherche et le développement technologique. Cette dimension est plus à même de capturer l'existence d'interactions et de collaboration entre acteurs sans être influencée par les limites liées aux citations directes.

Ces deux approches apparaissent complémentaires en cela qu'elles fournissent toutes deux une explication statistiquement solide des futures références scientifiques dans les brevets. Leur faible corrélation indique la présence de deux phénomènes liés mais distincts. Nous observons que ces deux phénomènes jouent un rôle hétérogène en fonction des régions territoriales concernées. Alors que ces derniers montrent un effet comparable sur le référencement des articles européens par des inventions, le référencement des articles nord-américains apparaît bien plus guidé par la proximité bibliographique que sémantique. Ceci traduit une proximité épistémique plus faible des inventeurs et examinateurs nord-américains dans le choix du référencement. Ce résultat appuie les apports de la littérature (Webb et al. 2005; Callaert et al. 2006) dénotant un référencement scientifique plus abondant mais moins qualitatif dans le dépôt des inventions nord-américaines. Plus largement, nos résultats dépeignent une relation science-technologie à la fois linéaire et interactive. L'intégration des connaissances scientifiques apparaît influencée par l'échelle temporelle utilisée ainsi que la région étudiée.

Le chapitre 5 aborde l'impact des connaissances scientifiques sur les capacités d'innovation de défense d'un pays. Nous concentrons notre analyse sur les technologies de l'armement et de l'aérospatial, constituant les domaines technologiques historiques de la défense, peu duaux et facilement identifiables. Les sources scientifiques des technologies déposées dans ces domaines apparaissent très largement concentrées sur les sciences physiques. Nous constatons une correspondance cohérente entre les technologies brevetées et les domaines scientifiques référencés. Nous constatons également une augmentation régulière du nombre de références depuis 1990, comme identifié dans Fauconnet (2019). Néanmoins, nous observons une stabilité relative dans la concentration de ces citations dans certains domaines. Ces derniers incluent notamment la chimie, l'ingénierie générale, la science des matériaux et l'astrophysique.

Pour mesurer l'impact des capacités scientifiques territoriales sur les capacités d'innovation, nous utilisons les mesures d'autonomie stratégiques développées dans le troisième chapitre. La robustesse de nos résultats économétriques nous permet de conclure à une potentielle causalité entre nos indicateurs scientifiques et technologiques. Il est ainsi démontré que les territoires dotés de fortes capacités scientifiques sont mieux disposés à développer des innovations technologiques. Cette influence est renforcée pour le cas des domaines scientifiques constituant le cœur des sources scientifiques. Ceci souligne l'importance de la dimension territoriale dans la diffusion et l'application des connaissances scientifiques. Malgré leur nature codifiée et universelle, les connaissances scientifiques possèdent une

composante tacite qui favorise le développement technologique local. En d'autres termes, bien que les productions scientifiques codifiées dans les publications puissent être considérées comme des biens publics globaux, profitables à tous, les territoires à l'origine de ces connaissances conservent une base de connaissances tacites. Cette base est composée d'un ensemble de savoir-faire, d'expérience, de connaissance de la littérature et de réseaux d'interactions propre à chaque territoire, favorisant l'augmentation des échanges de connaissances et, *in fine*, l'innovation.

Ces résultats impliquent que l'investissement dans la recherche scientifique est crucial pour renforcer l'autonomie stratégique en matière de défense, et réfutent la possibilité d'un processus d'innovation pérenne uniquement alimenté par les connaissances scientifiques développées au-delà des frontières nationales.

L'ensemble des résultats de ces chapitres contribue à éclairer les dynamiques complexes de la relation entre science et technologie dans le contexte de l'innovation en matière de défense. Les interactions, les dépendances et l'intégration des connaissances scientifiques dans le développement technologique, telles que révélées par cette thèse, mettent en exergue les nuances et les spécificités territoriales qui caractérisent ce processus. Nous mettons ainsi en lumière une dynamique complexe et nuancée de la relation entre science et technologie. Cette interaction, bien que largement internationalisée, reste fortement ancrée dans un contexte territorial où les capacités locales en science et technologie jouent un rôle déterminant dans l'autonomie stratégique des nations.

Nos résultats nous permettent ainsi de concevoir l'innovation de défense comme résultant de l'interaction d'un double réseau de connaissances international, de manière analogue à celle décrite par Liu, Chaminade, et Asheim (2013). Ce double réseau globalisé se compose, en premier lieu, d'une composante à forte dimension internationale, où circulent des connaissances codifiées. La diffusion et l'absorption de ces connaissances ne nécessitent pas d'interactions directes entre individus. Ces dernières sont dites « omniprésentes » (ou *ubiquitous*, Asheim et Isaksen 2002) et relèvent d'un savoir principalement théorique, facilement explicitable. Les productions scientifiques, en raison de leur propension plus marquée à la codification et au partage que les productions technologiques (Cozzens et al. 2005), circulent de manière privilégiée au sein de ce réseau. Cependant, ce réseau intègre également des connaissances technologiques rendues explicites grâce aux droits de propriété intellectuelle qui protègent leur exploitation. Ce premier réseau constitue le principal sujet

d'analyse empirique de cette thèse, le caractère codifié des flux de connaissances en jeu permettant l'utilisation d'approches quantitatives et structurales dans lesquelles chaque territoire est considéré comme le nœud d'un large réseau, exerçant une influence sur l'ensemble de la structure.

Ce réseau global explicite est complété par un réseau plus implicite, ayant une composante plus localisée. Les connaissances qui y circulent sont considérées comme davantage tacites, incarnées dans les individus et les organisations. Cette forme de connaissance, non explicitable en raison de son caractère strictement personnel, ineffable (Grant 2007), ou non explicitée par manque d'incitation ou de ressources consacrées (Cowan, David, et Foray 2000), est dite « collante » (ou *sticky*, Asheim et Isaksen 2002). Elle possède une capacité plus limitée à être reproduite et donc diffusée, nécessitant une forme de collaboration et d'interaction entre individus. Ce réseau comporte plus volontiers des connaissances technologiques, plus appliquées et dépendantes de l'expérience des individus. Comme démontré dans notre Chapitre 5, les connaissances générées par l'activité scientifique possèdent également une dimension tacite, intégrant ces dernières au sein de ce second réseau. La diffusion des connaissances au sein de ce réseau implicite repose sur les interactions et les déplacements des individus. Ce réseau est globalisé grâce aux déplacements internationaux des individus au sein de différentes filiales d'une organisation, entre diverses organisations ou lors de réunions, de congrès ou de conférences internationales. En outre, le développement des TIC a augmenté la quantité d'interactions à distance possibles pour un individu. Comme l'a souligné Le Goff (2014), leur développement a aussi facilité la transmission de connaissances tacites sans interaction physique. Par conséquent, l'ancrage territorial de ce type de réseau pourrait s'atténuer davantage à l'avenir.

Les Chapitres 4 et 5 de cette thèse soulignent l'influence potentielle de ce réseau à travers la proximité sémantique et l'existence d'un lien entre l'autonomie scientifique d'un territoire et ses capacités d'innovation. Cependant, l'analyse d'un tel réseau de connaissances doit être centrée sur les individus ou les organisations et leurs réseaux d'interactions. Une étude complémentaire utilisant le vecteur des auteurs-inventeurs doit être menée afin d'évaluer plus solidement son influence. Comme dit précédemment, l'utilisation d'un tel vecteur comporte un certain nombre de limites liées à l'identification d'individus uniques. Une solution à cette limitation pourrait résider dans la collecte automatisée de données publiques sur les individus afin de les lier à un ensemble d'organisations. Le lien entre les brevets et les articles scientifiques à l'aide de la dénomination de l'auteur et de ses organisations affiliées pourrait constituer un vecteur de désambiguïsation permettant la collecte de données à plus grande

échelle. Une telle approche représente une suite largement envisageable aux travaux présentés ici.

Cette approche permettrait de pallier les limites de ce travail de thèse, qui se concentrent sur l'utilisation des brevets et des articles scientifiques comme *proxy* de l'innovation technologique. Ce dernier est un phénomène multifacette qui ne peut être entièrement compris par l'utilisation des méthodes quantitatives exposées dans cette thèse. Au-delà de l'approche par auteur-inventeur, l'application au domaine de la défense de méthodes sémantiques permettant des analyses approfondies du contenu des documents, tel qu'utilisé par Hou et al. (2023), ou encore d'approches plus qualitatives développées par Liu, Chaminade, et Asheim (2013), constituent des pistes de recherche crédibles pour enrichir notre compréhension du processus d'innovation dans les domaines stratégiques.

L'apport de ce travail de thèse réside dans l'étude des flux de connaissances scientifiques et technologiques à grande échelle dans les domaines technologiques intéressant l'innovation de défense. Nos résultats plaident pour une compréhension élargie de l'intégration des apports scientifiques dans le processus d'innovation à travers des influences tacites, ancrées territorialement et permettant d'expliquer une certaine persistance des expertises nationales sur le long terme. Nos résultats plaident également en faveur d'un financement des programmes de recherche ciblés comme vecteur d'accroissement de l'autonomie stratégique par l'innovation. Nous soulignons par ailleurs le rôle clef joué par les transferts de connaissances internationaux dans les trajectoires de rattrapage technologiques de certaines nations émergentes.

Bibliographie

- Abramo, Giovanni, Ciriaco Andrea D'Angelo, et Flavia Di Costa. 2022. « Revealing the Scientific Comparative Advantage of Nations: Common and Distinctive Features ». *Journal of Informetrics* 16 (1): 101244
- Acemoglu, Daron, Francisco A. Gallego, et James A. Robinson. 2014. « Institutions, Human Capital, and Development ». *Annual Review of Economics* 6 (1): 875-912.
- Acemoglu, Daron, Simon Johnson, et James A. Robinson. 2001. « The Colonial Origins of Comparative Development: An Empirical Investigation ». *American Economic Review* 91 (5): 1369-1401.
- Acosta, Manuel, Daniel Coronado, Esther Ferrandiz, M. Rosario Marin, et Pedro J. Moreno. 2018. « Patents and Dual-Use Technology: An Empirical Study of the World's Largest Defence Companies ». *Defence and Peace Economics* 29 (7): 821-39.
- Acosta, Manuel, Daniel Coronado, et Rosario Marín. 2011. « Potential Dual-Use of Military Technology: Does Citing Patents Shed Light on This Process? ». *Defence and Peace Economics* 22 (3): 335-49.
- Acosta, Manuel, Daniel Coronado, Rosario Marín, et Pedro Prats. 2013. « Factors Affecting the Diffusion of Patented Military Technology in the Field of Weapons and Ammunition ». *Scientometrics* 94 (1): 1-22.
- Adams, Gordon. 1968. *The Politics of Defense Contracting: The Iron Triangle*. Routledge.
- Adda, Jacques. 2012. *La mondialisation de l'économie*. 8e édition. Paris: La Découverte.
- Agrawal, Ajay, Iain Cockburn, et John McHale. 2006. « Gone but not forgotten: knowledge flows, labor mobility, and enduring social relationships ». *Journal of Economic Geography* 6 (5): 571-91.
- Ahmadpoor, Mohammad, et Benjamin F. Jones. 2017. « The Dual Frontier: Patented Inventions and Prior Scientific Advance ». *Science* 357 (6351): 583-87.
- Alic, John A. 2007. *Trillions for Military Technology: How the Pentagon Innovates and Why It Costs So Much*. Springer.
- Alic, John A., Lewis M. Branscomb, et Harvey Brooks. 1992. *Beyond Spinoff: Military and Commercial Technologies in a Changing World*. Harvard Business Press.
- Allen, Thomas J. 1977. *Managing the Flow of Technology*. Cambridge, MA, USA: MIT Press.
- Almeida, Paul, et Bruce Kogut. 1997. « The Exploration of Technological Diversity and Geographic Localization in Innovation: Start-Up Firms in the Semiconductor Industry ». *Small Business Economics* 9 (1): 21-31.

- Amable, Bruno. 2001. « Les Systèmes d'Innovation ». *Encyclopédie de l'innovation, Economica*, pp. 367–382, 2003.
- An, David, Matt Schrader, et Ned Collins-Chase. 2018. « Taiwan's Indigenous Defense Industry: Centralized Control of Abundant Suppliers ».
- Ancori, B, A Bureth, et P Cohendet. 2000. « The economics of knowledge: the debate about codification and tacit knowledge ». *Industrial and Corporate Change* 9 (2): 255-87.
- Anghel, Suzana, Beatrix Immenkamp, Elena Lazarou, Jérôme Leon Saulnier, et Alex Benjamin Wilson. 2020. « Sur le chemin de l'autonomie stratégique: l'Union européenne dans un environnement géopolitique en mutation. » Bruxelles: EPRS | Service de recherche du Parlement européen.
- Antonelli, Cristiano, Francesco Crespi, et Francesco Quatraro. 2022. « Knowledge complexity and the mechanisms of knowledge generation and exploitation: The European evidence ». *Research Policy*, Special Issue on Economic Complexity, 51 (8): 104081.
- Antonelli, Cristiano, Jackie Krafft, et Francesco Quatraro. 2010. « Recombinant Knowledge and Growth: The Case of ICTs ». *Structural Change and Economic Dynamics* 21 (1): 50-69.
- Apeti, Ablam Estel, et Eyah Denise Edoh. 2023. « Tax Revenue and Mobile Money in Developing Countries ». *Journal of Development Economics* 161 (mars): 103014.
- Arnould, Claude-France. 2020. « L'autonomie stratégique et la souveraineté: » *Hors les murs* N° 498 (2): 54-55.
- Aron, Raymond. 1962. *Paix et guerre entre les nations*. Nouv. éd édition. Calmann-Lévy.
- Arora, Ashish, Sharon Belenzon, et Lia Sheer. 2021. « Knowledge Spillovers and Corporate Investment in Scientific Research ». *American Economic Review* 111 (3): 871-98.
- Arora, Ashish, et Alfonso Gambardella. 1994. « The Changing Technology of Technological Change: General and Abstract Knowledge and the Division of Innovative Labour ». *Research Policy*, Special Issue in Honor of Nathan Rosenberg, 23 (5): 523-32.
- Arrow, Kenneth J. 1962. « The Economic Implications of Learning by Doing ». *The Review of Economic Studies* 29 (3): 155.
- Arts, Sam, Jianan Hou, et Juan Carlos Gomez. 2021. « Natural Language Processing to Identify the Creation and Impact of New Technologies in Patent Text: Code, Data, and New Measures ». *Research Policy* 50 (2): 104144.
- Asheim, Bjørn. 2007. « Differentiated Knowledge Bases and Varieties of Regional Innovation Systems ». *Innovation: The European Journal of Social Science Research* 20 (3): 223-41.
- Asheim, Bjørn T., Ron Boschma, et Philip Cooke. 2011. « Constructing Regional Advantage: Platform Policies Based on Related Variety and Differentiated Knowledge Bases ». *Regional Studies* 45 (7): 893-904.

- Asheim, Bjørn T., et Lars Coenen. 2005. « Knowledge Bases and Regional Innovation Systems: Comparing Nordic Clusters ». *Research Policy* 34 (8): 1173-90.
- Asheim, Bjørn T., et Arne Isaksen. 2002. « Regional Innovation Systems: The Integration of Local ‘Sticky’ and Global ‘Ubiquitous’ Knowledge ». *The Journal of Technology Transfer* 27 (1): 77-86.
- Audretsch, David B, Barry Bozeman, Kathryn L Combs, Maryann Feldman, Albert N Link, Donald S Siegel, Paula Stephan, Gregory Tassej, et Charles Wessner. 2002. « The Economics of Science and Technology ». *The Economics of Science and Technology*, 49.
- Audretsch, David B., et Maryann P. Feldman. 1996. « R&D Spillovers and the Geography of Innovation and Production ». *The American Economic Review* 86 (3): 630-40.
- Avadikyan, Arman, et Patrick Cohendet. 2005. « L’émergence d’une économie de la défense fondée sur la connaissance : quelques leçons tirées des réformes au Royaume-uni ». *Revue d’économie industrielle* 112 (1): 65-82.
- Azoulay, Pierre, Waverly Ding, et Toby Stuart. 2009. « The Impact of Academic Patenting on the Rate, Quality and Direction of (Public) Research Output* ». *The Journal of Industrial Economics* 57 (4): 637-76.
- Azoulay, Pierre, Joshua S. Graff Zivin, et Bhaven Sampat. 2011. « The Diffusion of Scientific Knowledge Across Time and Space: Evidence from Professional Transitions for the Superstars of Medicine ». w16683. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research.
- Ba, Zhichao, et Zhentao Liang. 2021. « A novel approach to measuring science-technology linkage: From the perspective of knowledge network coupling ». *Journal of Informetrics* 15 (3)
- Bagnasco, Arnaldo. 1977. *Tre Italie : la problematica territoriale dello sviluppo italiano*. Il Mulino. Bologna.
- Bakhtiar, Asieh, Seyed Sepehr Ghazinoory, Alireza Aslani, et Vahid Mafi. 2021. « Efficiency-effectiveness assessment of national innovation systems: comparative analysis ». *Journal of Science and Technology Policy Management* ahead-of-print (ahead-of-print).
- Balconi, M., Stefano Brusoni, et Luigi Orsenigo. 2010. « In defence of the linear model: An essay ». *Research Policy* 39 (1): 1-13.
- Balconi, M., A. Pozzali, et R. Viale. 2007. « The “Codification Debate” Revisited: A Conceptual Framework to Analyze the Role of Tacit Knowledge in Economics ». *Industrial and Corporate Change* 16 (5): 823-49.
- Balima, Hippolyte Wenéyam, Jean-Louis Combes, et Alexandru Minea. 2021. « The “Dark Side” of Credit Default Swaps Initiation: A Close Look at Sovereign Debt Crises ». *Macroeconomic Dynamics* 25 (1): 124-53.

- Balland, Pierre-Alexandre. 2010. « Proximity and the Structure of Knowledge Networks: Evidence from the GNSS industry ». l'Université de Toulouse 1 - Capitole.
- Barabási, Albert-László, et Réka Albert. 1999. « Emergence of Scaling in Random Networks ». *Science* 286 (5439): 509-12.
- Baráth, Lajos, et Imre Fertő. 2023. « The Relationship between the Ecologisation of Farms and Total Factor Productivity: A Continuous Treatment Analysis ». *Journal of Agricultural Economics* n/a (n/a).
- Barbaroux, Pierre. 2011. « A design-oriented approach to organizational change: insights from a military case study ». *Journal of Organizational Change Management* 24 (5): 626-39.
- . 2020. « The Transformation of the Defense Innovation System: Knowledge Bases, Disruptive Technologies, and Operational Capabilities ».
- Baruffaldi, Stefano, Brigitte van beuzekom, Hélène Dernis, Dietmar Harhoff, Nandan Rao, David Rosenfeld, et Mariagrazia Squicciarini. 2020. « Identifying and measuring developments in artificial intelligence: Making the impossible possible OECD Science, Technology and Industry Working Papers », mai.
- Bassecoulard, Elise, et Michel Zitt. 2004. « Patents and Publications: The Lexical Connection ». In *Handbook of Quantitative Science and Technology Research*, édité par Henk F. Moed, Wolfgang Glänzel, et Ulrich Schmoch, 665-94. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Bavelas, Alex. 1948. « A Mathematical Model for Group Structures ». *Human Organization* 7 (3): 16-30.
- Becattini, Giacomo. 1979. « Dal settore industriale al distretto industriale : alla ricerca dell'unità d'indagine della economia industriale. » *Rivista di economia e politica industriale*.
- . 1989. « Riflessioni sul distretto industriale marshalliano come concetto socio-economico ». *Stato e mercato*, n° 25 (1): 111-28.
- . 1990. « The Marshallian Industrial District as a Socio-Economic Notion. » In *Industrial Districts and Inter-Firm Cooperation in Italy.*, IILS. Geneva.
- Behera, Laxman Kumar. 2018. « Examining India's Defense Innovation Performance ». *SITC Research Briefs* Series 10 (2018-10).
- Belenzon, Sharon, et Mark Schankerman. 2013a. « Spreading the Word: Geography, Policy, and Knowledge Spillovers ». *Review of Economics and Statistics* 95 (3): 884-903.
- . 2013b. « Spreading the Word: Geography, Policy, and Knowledge Spillovers ». *The Review of Economics and Statistics* 95 (3): 884-903.
- Belin, Jean, et Marianne Guille. 2008. « Defence and Firm Financial Structure in France ». *Review of Financial Economics* 17 (1): 46-61.

- Belin, Jean, Marianne Guille, Nathalie Lazaric, et Valérie Mérindol. 2019. « Defense Firms Adapting to Major Changes in the French R&D Funding System ». *Defence and Peace Economics* 30 (2): 142-58.
- Bellais, Renaud. 2005. « Recherche et défense, vers un nouveau partenariat ? » *Innovations* 21 (1): 145-66.
- . 2013. « Technology and the Defense Industry: Real Threats, Bad Habits, or New (Market) Opportunities? » *Journal of Innovation Economics* 12 (2): 59.
- . 2018. « The Economic Imperative of Europeanizing Defense Innovation ». In *The Emergence of EU Defense Research Policy: From Innovation to Militarization*, édité par Nikolaos Karampekios, Iraklis Oikonomou, et Elias G. Carayannis, 93-109. Innovation, Technology, and Knowledge Management. Cham: Springer International Publishing.
- . 2022. « MBDA's Industrial Model and European Defence ». *Defence and Peace Economics* 33 (7): 876-93.
- Bellais, Renaud, et Fanny Coulomb. 2013. « Le Complexe militaro-industriel, cinquante ans après Eisenhower ». *Liber Amicorum. Hommage en l'honneur du Professeur Jacques Fontanel*, L'Harmattan, 2013, La Librairie des Humanités.
- Bellais, Renaud, et Josselin Droff. 2014. « Innovation, technology, and defence procurement: Reform or paradigmatic shift? » Post-Print. HAL. <https://econpapers.repec.org/paper/haljournal/hal-01160618.htm>.
- Bellais, Renaud, Martial Foucault, et Jean-Michel Oudot. 2014. *Économie de la défense*. Paris: La Découverte.
- Bellais, Renaud, et Renelle Guichard. 2006. « Defense Innovation, Technology Transfers and Public Policy ». *Defence and Peace Economics* 17 (3): 273-86.
- Benkeltoum, Nordine. 2016. « Adoption de l'open source pour la conception de systèmes d'information critiques : le cas Thales ». *Systemes d'information management* 21 (4): 71-98.
- Berge, Martijn van den, et Anet Weterings. 2014. « Relatedness in Eco-Technological Development in European Regions ». 1413. *Papers in Evolutionary Economic Geography (PEEG)*. Papers in Evolutionary Economic Geography (PEEG). Utrecht University, Department of Human Geography and Spatial Planning, Group Economic Geography.
- Bergek, Anna, Staffan Jacobsson, Bo Carlsson, Sven Lindmark, et Annika Rickne. 2008. « Analyzing the Functional Dynamics of Technological Innovation Systems: A Scheme of Analysis ». *Research Policy* 37 (3): 407-29.
- Berger, Suzanne. 2013. *Made in Monde. Les nouvelles frontières de l'écono*. Points.
- Bernardes, Américo Tristão, et Eduardo da Motta e Albuquerque. 2003. « Cross-over, Thresholds, and Interactions between Science and Technology: Lessons for Less-Developed Countries ». *Research Policy* 32 (5): 865-85.

- Bertalanffy, Ludwig Von. 1968. *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. Revised édition. New York, NY: George Braziller Inc.
- Besancenot, Damien, et Radu Vranceanu. 2015. « Fear Of Novelty: A Model Of Scientific Discovery With Strategic Uncertainty ». *Economic Inquiry* 53 (2): 1132-39.
- Bikard, Michaël, et Matt Marx. 2020. « Bridging Academia and Industry: How Geographic Hubs Connect University Science and Corporate Technology ». *Management Science* 66 (8): 3425-43.
- Binz, Christian, et Bernhard Truffer. 2017. « Global Innovation Systems—A Conceptual Framework for Innovation Dynamics in Transnational Contexts ». *Research Policy* 46 (7): 1284-98.
- Binz, Christian, Bernhard Truffer, et Lars Coenen. 2016. « Path Creation as a Process of Resource Alignment and Anchoring: Industry Formation for On-Site Water Recycling in Beijing ». *Economic Geography* 92 (2): 172-200.
- Bitzinger, Richard A. 1994. « The Globalization of the Arms Industry: The Next Proliferation Challenge ». *International Security* 19 (2): 170-98.
- . 2011. « China's Defense Technology and Industrial Base in a Regional Context: Arms Manufacturing in Asia ». *Journal of Strategic Studies* 34 (3): 425-50.
- . 2014. « The State of Defense Innovation in India: Can It Catch Up with Global Leaders? », *IGCC Defense Innovation Briefs*, 2014(7)
- . 2016. « Reforming China's Defense Industry ». *Journal of Strategic Studies* 39 (5-6): 762-89.
- . 2018. « Military-Technological Innovation in Small States: The Cases of Israel and Singapore », *SITC Research Briefs*, Series 10(2018-4)
- Bitzinger, Richard A., Michael Raska, Collin Koh Swee Lean, et Kelvin Wong Ka Weng. 2011. « Locating China's Place in the Global Defense Economy ». *SITC 2011 (Policy Brief 28)*.
- Blin, Arnaud. 2006. *1648, la paix de Westphalie ou la naissance de l'Europe politique moderne*. Editions Complexe.
- Blind, Knut, Jakob Edler, Rainer Frietsch, et Ulrich Schmoch. 2006. « Motives to Patent: Empirical Evidence from Germany ». *Research Policy* 35 (5): 655-72.
- Bol, Damien, Marco Giani, André Blais, et Peter John Loewen. 2021. « The Effect of COVID-19 Lockdowns on Political Support: Some Good News for Democracy? » *European Journal of Political Research* 60 (2): 497-505.
- Bonzi, Susan, et H. Snyder. 2005. « Motivations for Citation: A Comparison of Self Citation and Citation to Others ». *Scientometrics* 21 (2): 245-54.
- Boschma, Ron. 2005. « Proximity and Innovation: A Critical Assessment ». *Regional Studies* 39 (1): 61-74.

- . 2008. « Constructing Regional Advantage: Related Variety and Regional Innovation Policy ».
- Bouba-Olga, Olivier. 2017. *Dynamiques territoriales Éloge de la diversité*. Éditions de L'Actualité scientifique Nouvelle-Aquitaine. Poitiers.
- Bouba-Olga, Olivier, et Michel Grossetti. 2008. « Socio-économie de proximité ». *Revue d'Économie Régionale & Urbaine* octobre (3): 311-28.
- Bowen, Andrew S. 2020. « Russian Armed Forces: Military Modernization and Reforms », *Congressional Research Service Reports*, 20 July 2020.
- Boyack, Kevin W., et Richard Klavans. 2010. « Co-Citation Analysis, Bibliographic Coupling, and Direct Citation: Which Citation Approach Represents the Research Front Most Accurately? » *Journal of the American Society for Information Science and Technology* 61 (12): 2389-2404.
- Branstetter, Lee G, Douglas Hanley, et Huiyan Zhang. 2023. « Unleashing the Dragon: The Case for Patent Reform in China », mars.
- Braudel, Fernand. 1967. *Civilisation matérielle, économie et capitalisme, XVe-XVIIIe siècle. 1 - Les Structures du quotidien*. Le Livre de Poche édition. Paris: Le Livre de Poche.
- Brauer, Jurgen, et Paul Dunne. 2004. *Arms Trade and Economic Development: Theory, Policy and Cases in Arms Trade Offsets*. Routledge.
- Breizman, Anthony, et Patrick Thomas. 2015. « The Emerging Clusters Model: A Tool for Identifying Emerging Technologies across Multiple Patent Systems ». *Research Policy* 44 (1): 195-205.
- Breschi, S. 2001. « Knowledge Spillovers and Local Innovation Systems: A Critical Survey ». *Industrial and Corporate Change* 10 (4): 975-1005.
- Breschi, S., et F. Lissoni. 2009. « Mobility of Skilled Workers and Co-Invention Networks: An Anatomy of Localized Knowledge Flows ». *Journal of Economic Geography* 9 (4): 439-68.
- Breschi, Stefano, et Franco Malerba. 1997. « Sectoral Innovation Systems: Technological Regimes, Schumpeterian Dynamics, and Spatial Boundaries ». In *Systems of innovation: technologies, institutions, and organizations*, 130-56.
- Briani, Valerio. 2013. « The Costs of Non-Europe in the Defence Field. », Centre for Studies on Federalism, Moncalieri, and Istituto Affari Internazionali, Rome., avril.
- Broekel, Tom. 2018. « Measuring technological complexity - Current approaches and a new measure of structural complexity ».
- Brooks, Harvey. 1994. « The Relationship between Science and Technology ». *Research Policy*, Special Issue in Honor of Nathan Rosenberg, 23 (5): 477-86.

- Brouwer, Erik, Hana Budil-Nadvornikova, et Alfred Kleinknecht. 1999. « Are Urban Agglomerations a Better Breeding Place for Product Innovation? An Analysis of New Product Announcements ». *Regional Studies* 33 (6): 541-49.
- Bryan, Kevin A., et Yasin Ozcan. 2021. « The Impact of Open Access Mandates on Invention ». *The Review of Economics and Statistics* 103 (5): 954-67.
- Bryan, Kevin A., Yasin Ozcan, et Bhaven Sampat. 2020. « In-Text Patent Citations: A User's Guide ». *Research Policy* 49 (4): 103946.
- Buckley, Peter J., et Niron Hashai. 2020. « Skepticism toward Globalization, Technological Knowledge Flows, and the Emergence of a New Global System ». *Global Strategy Journal* 10 (1): 94-122.
- Bush, Vannevar. 1945. « The Endless Frontier ». *A Report to the President, 75th Anniversary Edition*.
- Callaert, Julie, Bart Van Looy, Arnold Verbeek, Koenraad Debackere, et Bart Thijs. 2006. « Traces of Prior Art: An Analysis of Non-Patent References Found in Patent Documents ». *Scientometrics* 69 (1): 3-20.
- Callaert, Julie, Maikel Pellens, et Bart Van Looy. 2014. « Sources of Inspiration? Making Sense of Scientific References in Patents ». *Scientometrics* 98 (3): 1617-29.
- Campbell, I., Olaf Diegel, J. Kowen, et T. Wohlers. 2018. *Wohlers Report 2018: 3D printing and additive manufacturing state of the industry: Annual Worldwide Progress Report*. Wohlers Associates.
- Cao, Cong, Jeroen Baas, Caroline S Wagner, et Koen Jonkers. 2020. « Returning scientists and the emergence of China's science system ». *Science and Public Policy* 47 (2): 172-83.
- Caraça, João, Bengt-Åke Lundvall, et Sandro Mendonça. 2009. « The changing role of science in the innovation process: From Queen to Cinderella? ». *Technological Forecasting and Social Change* 76 (juillet): 861-67.
- Carlsson, B., et R. Stankiewicz. 1991. « On the Nature, Function and Composition of Technological Systems ». *Journal of Evolutionary Economics* 1 (2): 93-118.
- Carlsson, Bo. 2006. « Internationalization of Innovation Systems: A Survey of the Literature ». *Research Policy* 35 (1): 56-67.
- Carluer, Frédéric, et Richard Le Goff. 2002. « NTIC et apprentissage localisé : Vers la constitution d'un « espace serviciel » ». *Economie appliquée*, janvier, 135-71.
- Carpenter, Mark P., et F. Narin. 1983. « Validation Study: Patent Citations as Indicators of Science and Foreign Dependence ». *World Patent Information* 5 (3): 180-85.
- Castellacci, Fulvio, et Jose Miguel Natera. 2011. « A New Panel Dataset for Cross-Country Analyses of National Systems, Growth and Development (CANA) ». *Innovation and Development* 1 (2): 205-26.

- Castillo, Jose. 2002. « A Note on the Concept of Tacit Knowledge ». *Journal of Management Inquiry* 11 (1): 46-57.
- Chakrabarti, A.K., I. Dror, et N. Eakabuse. 1993. « Interorganizational transfer of knowledge: an analysis of patent citations of a defense firm ». *IEEE Transactions on Engineering Management* 40 (1): 91-94.
- Chan, Minnie. 2018. « Chinese Military Warns Researchers on Forged Data and Plagiarism ». *South China Morning Post*. 28 septembre 2018.
- Charillon, Frédéric. 2013. « La puissance, doctrine et pratique ». *Lettre 1 IRSEM*.
- Chesbrough, Henry William. 2003. *Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*. Harvard Business Press.
- Cheung, Tai Ming. 2009. « Dragon on the Horizon: China's Defense Industrial Renaissance ». *Journal of Strategic Studies* 32 (1): 29-66.
- Cheung, Tai Ming. 2021. « A conceptual framework of defence innovation ». *Journal of Strategic Studies* 44 (6): 775-801.
- Chinworth, Michael W. 2000. « Perception Gaps : An Assessment of Dual-Use Technology Models in Japan and the United States ». Ph.D., Cranfield University.
- Chubin, Daryl E., et Soumyo D. Moitra. 1975. « Content Analysis of References: Adjunct or Alternative to Citation Counting? ». *Social Studies of Science* 5 (4): 423-41.
- Cimini, Giulio, Andrea Gabrielli, et Francesco Sylos Labini. 2014. « The Scientific Competitiveness of Nations ». *PLOS ONE* 9 (12): e113470.
- Claval, Paul. 2003. « La géographie du XXI^e siècle », L'Harmattan, Paris.
- Cockburn, Iain, et Rebecca M. Henderson. 1998. « Absorptive Capacity, Coauthoring Behavior, and the Organization of Research in Drug Discovery ». *The Journal of Industrial Economics* 46 (2): 157-82.
- Cockburn, Iain, Rebecca Henderson, et Scott Stern. 1999. « Balancing Incentives: The Tension Between Basic and Applied Research ». Working Paper. Working Paper Series. National Bureau of Economic Research.
- Coe, Neil M., et Timothy G. Bunnell. 2003. « 'Spatializing' Knowledge Communities: Towards a Conceptualization of Transnational Innovation Networks ». *Global Networks* 3 (4): 437-56.
- Cohen, Wesley M., et Daniel A. Levinthal. 1990. « Absorptive Capacity: A New Perspective on Learning and Innovation ». *Administrative Science Quarterly* 35 (1): 128-52.
- Cohen, Wesley M., Richard R. Nelson, et John P. Walsh. 2000. « Protecting Their Intellectual Assets: Appropriability Conditions and Why U.S. Manufacturing Firms Patent (or Not) ». Working Paper 7552. Working Paper Series. National Bureau of Economic Research.

- . 2002. « Links and Impacts: The Influence of Public Research on Industrial R&D ». *Management Science* 48 (1): 1-23.
- Colletis, Gabriel. 2010. « Co-évolution des territoires et de la technologie : une perspective institutionnaliste ». *Revue d'Économie Régionale & Urbaine* mai (2): 235-49.
- Colletis, Gabriel, Jean-Pierre Gilly, Isabelle Leroux, Bernard Pecqueur, Jacques Perrat, Frédéric Rychen, et Jean-Benoît Zimmermann. 1999. « Construction territoriale et dynamiques économiques ». *Sciences de la Société* 48 (1): 25-47.
- Collier, Paul, et Anke Hoeffler. 2002. « Military Expenditure: Threats, Aid, and Arms Races ». World Bank.
- Conseil Européen. 2013. « Conclusions du Conseil Européen ». EUCO 217/13. Bruxelles: Conseil Européen.
- Cooke, Philip, Mikel Gomez Uranga, et Goio Etxebarria. 1997. « Regional Innovation Systems: Institutional and Organisational Dimensions ». *Research Policy* 26 (4-5): 475-91.
- Costas, Rodrigo, Thed N. van Leeuwen, et María Bordons. 2012. « Referencing Patterns of Individual Researchers: Do Top Scientists Rely on More Extensive Information Sources? ». *Journal of the American Society for Information Science and Technology* 63 (12): 2433-50.
- Coulomb, Fanny. 2011. « La production de défense dans les pays émergents : vers un renouveau? ». *Géoéconomie* 57 (2): 71-82.
- Courlet, C. 2008. « Les systèmes productifs localisés : Un bilan de la littérature ». *Études et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*, 2002, pp.27-40.
- Courlet, C, et Bernard Pecqueur. 2013. *L'économie territoriale*. Presses universitaires de Grenoble. Grenoble. 144p.
- Cowan, Robin, et Dominique Foray. 1995. « Quandaries in the Economics of Dual Technologies and Spillovers from Military to Civilian Research and Development ». *Research Policy* 24 (6): 851-68.
- . 1997. « The Economics of Codification and the Diffusion of Knowledge ». *Industrial and Corporate Change* 6 (3): 595-622.
- Cozzens, Susan, Sonia Gatchair, Jongseok Kang, Kyung-Sup Kim, Hyuck Jai Lee, Gonzalo Ordóñez, et Alan Porter. 2005. « Emerging Technologies: Quantitative Identification and Measurement ». *Technology Analysis & Strategic Management* 22 (3): 361-76.
- Crevoisier, Olivier. 2001. « L'approche par les milieux innovateurs : état des lieux et perspectives ». *Revue d'Economie Regionale Urbaine*, n° 1: 153-65.
- Daim, Tugrul, Mitali Monalisa, Pranabesh Dash, et Neil Brown. 2007. « Time lag assessment between research funding and output in emerging technologies ». *Foresight* 9 (4): 33-44.

- Dasgupta, Partha, et Paul A. David. 1994. « Toward a New Economics of Science ». *Research Policy* 23 (5): 487-521.
- Daumas, Jean-Claude. 2007. « Districts industriels : du concept à l'histoire. Les termes du débat ». *Revue économique* 58 (1): 131-52.
- Davezies, Laurent. 2008. *La République et ses territoires: La circulation invisible des richesses*. Paris: SEUIL.
- David, Paul A., David Mowery, et W. Edward Steinmueller. 1992. « Analysing The Economic Payoffs From Basic Research ». *Economics of Innovation and New Technology* 2 (1): 73-90.
- Davidson, George S., Bruce Hendrickson, David K. Johnson, Charles E. Meyers, et Brian N. Wylie. 1998. « Knowledge Mining With VxInsight: Discovery Through Interaction ». *Journal of Intelligent Information Systems* 11 (3): 259-85.
- Davies, Andrew, et Michael Hobday. 2005. *The Business of Projects: Managing Innovation in Complex Products and Systems*. Cambridge University Press.
- Décret du gouvernement de la Fédération de Russie du 06.03.2022 n° 299 · Publication officielle · Portail Internet officiel d'informations juridiques*. s. d. Consulté le 25 août 2022.
- Democratic Progressive Party. 2015. « Defense Policy Blue Paper No. 12 : Preparing the Development of Indigenous Defense Industry ».
- Depeyre, Colette, et Hervé Dumez. 2007. « Le rôle du client dans les stratégies de coopération ». *Revue française de gestion* 176 (7): 99-110.
- Doloreux, D. 2002. « What We Should Know about Regional Systems of Innovation ». *Technology in Society* 24 (3): 243-63.
- Doloreux, David. 2004. « Regional Innovation Systems: A Critical Review », *Discussion Paper Series*.
- Doloreux, David, et Régis Guillaume. 2005. « Le système régional d'innovation: outil de développement pour les territoires », 3th International Conference of Territorial Intelligence "Territory, wellbeing and social inclusion" REIT, October 19th-21th 2005, Liège, Oct 2005, Liège, Belgique.
- Dosi, Giovanni. 1982. « Technological Paradigms and Technological Trajectories: A Suggested Interpretation of the Determinants and Directions of Technical Change ». *Research Policy* 11 (3): 147-62.
- Dosi, Giovanni, Patrick Llerena, et Mauro Sylos Labini. 2006. « The Relationships between Science, Technologies and Their Industrial Exploitation: An Illustration through the Myths and Realities of the so-Called 'European Paradox' ». *Research Policy*, Triple helix Indicators of Knowledge-Based Innovation Systems, 35 (10): 1450-64.
- Dosi, Giovanni, et Richard R. Nelson. 2010. « Chapter 3 - Technical Change and Industrial Dynamics as Evolutionary Processes ». In *Handbook of the Economics of Innovation*,

- édité par Bronwyn H. Hall et Nathan Rosenberg, 1:51-127. *Handbook of The Economics of Innovation*, Vol. 1. North-Holland.
- Dosi, Giovanni, Luigi Orsenigo, et Mauro Sylos Labini. 2002. « 29. Technology and the Economy ». In *The Handbook of Economic Sociology, Second Edition*, édité par Neil J. Smelser et Richard Swedberg, 678-702. Princeton University Press.
- Dosso, Mafini, et Didier Lebert. 2020. « The Centrality of Regions in Corporate Knowledge Flows and the Implications for Smart Specialisation Strategies ». *Regional Studies* 54 (10): 1366-76.
- Droff, Josselin, et Julien Malizard. 2014. « Cohérence entre politique budgétaire et budget de défense en France ». *Revue Défense Nationale*, février, 116-21.
- . 2019. « Quand l'armée s'en va ! Analyse empirique de la cohérence de l'accompagnement des territoires par le ministère des Armées ». *Revue d'Économie Régionale & Urbaine* Janvier (1): 97-123.
- Droff, Josselin, et Benoît Rademacher. 2020. « L'innovation dans la politique de soutien des équipements militaires en France : l'apport des technologies de l'industrie 4.0 ». *Revue Defense Nationale* 832 (7): 103-9.
- Dunne, J. Paul. 1995. « Chapter 14 The Defense Industrial Base ». In *Handbook of Defense Economics*, 1:399-430. Elsevier.
- Dunne, John, et Elisabeth Skons. 2009. « The Military Industrial Complex ». *University of the West of England, Department of Economics, Discussion Papers*, janvier.
- Dupuy, Romuald. 2013. « L'industrie européenne de défense : changements institutionnels et stratégies de coopération des firmes ». *Innovations* 42 (3): 85-107.
- Edquist, Charles, éd. 1997. *Systems of Innovation: Technologies, Institutions, and Organizations*. Science, Technology and the International Political Economy Series. London ; Washington: Pinter.
- . 2001. « The Systems of Innovation Approach and Innovation Policy: An Account of the State of the Art », 24.
- Ernst, Dieter. 2002. « Global production networks and the changing geography of innovation systems. Implications for developing countries ». *Economics of Innovation and New Technology* 11 (6): 497-523.
- Ernst, Dieter, et Linsu Kim. 2002. « Global Production Networks, Knowledge Diffusion, and Local Capability Formation ». *Research Policy*, 31 (8): 1417-29.
- Fabrizio, Kira R., et Alberto Di Minin. 2008. « Commercializing the Laboratory: Faculty Patenting and the Open Science Environment ». *Research Policy* 37 (5): 914-31.
- Fauconnet, Cécile. 2018. « L'innovation dans l'Aérospatial et la Défense : contribution scientifique et qualité des brevets ». *Technologie et innovation* 3 (3).

- . 2019. « La structuration des bases de connaissances des entreprises de défense », Ph.D. thesis, Economies et finances. Paris 1 Panthéon-Sorbonne. 202.
- . 2021. « Spécificités des entreprises de défense et processus d'innovation : une approche empirique par les références scientifiques contenues dans les brevets ». *Revue d'économie industrielle*, n° 175 (décembre): 63-97.
- Fauconnet, Cécile, Didier Lebert, Célia Zyla, et Sylvain Moura. 2018. « Les entreprises aérospatiales de défense : quelles cohérences technologiques de leur R&D ? », 16.
- Fauconnet, Cécile, et Julien Malizard. 2016. « Rétrospective des exportations d'armement en France (1958-2015): » *Revue Défense Nationale* N° 795 (10): 76-82.
- Feldman, Maryann P. 1994. *The Geography of Innovation*. Economics of Science, Technology and Innovation 2.
- Ferreira, Anderson A., Marcos André Gonçalves, et Alberto H.F. Laender. 2012. « A Brief Survey of Automatic Methods for Author Name Disambiguation ». *ACM SIGMOD Record* 41 (2): 15-26.
- Ferry, Timothy. 2016. « The Future of Taiwan's Defense Industry Part 1: Politics, Aircraft, and Missiles ». *Taiwan Business TOPICS* (blog). 16 février 2016.
- Filippi, Maryline, Frédéric Wallet, et Étienne Polge. 2018. « L'école de la proximité : naissance et évolution d'une communauté de connaissance ». *Revue d'Economie Regionale Urbaine*, n° 5: 939-66.
- Finardi, Ugo. 2011. « Time Relations between Scientific Production and Patenting of Knowledge: The Case of Nanotechnologies ». *Scientometrics* 89 (1): 37-50.
- Fleming, Lee, et Olav Sorenson. 2004. « Science as a Map in Technological Search ». *Strategic Management Journal* 25 (8-9): 909-28.
- Fontanel, Jacques. 1983. *L'économie des armes*. La Découverte/Maspero, Paris, 128.
- . 1994. *La conversion économique du secteur militaire*. Economica, Paris.
- . 2004. « La conversion économique du secteur militaire dans le monde ». *ARES*, 2004, XXI (53), pp.59-73.
- Foray, Dominique. 2009. « L'économie de la connaissance ». La Découverte, Paris.
- Foray, Dominique, et Bengt Åke Lundvall. 1998. « The knowledge-based economy : from economics of knowledge to the learning economy ». In *The Economic Impact of Knowledge*, Routledge.
- Forest, Joëlle. 2014. « Petite histoire des modèles d'innovation ». In *Principes d'économie de l'innovation*, Peter Lang, pp.45-57.
- Forest, Joëlle, et Bénédicte Serrate. 2011. « Diffusion et production des connaissances : les deux faces d'une action territoriale réussie ». *Revue d'Économie Régionale & Urbaine* avril (2): 295-312.

- Forner, Dominik, Sercan Ozcan, et David Bacon. 2019. « Machine Learning Approach for National Innovation Performance Data Analysis »: In *Proceedings of the 8th International Conference on Data Science, Technology and Applications*, 325-31. Prague, Czech Republic
- Forrester, Jay Wright. 1961. *Industrial Dynamics*. M.I.T. Press.
- Foucault, Martial. 2012. « Les budgets de défense en France entre déni et déclin ». *Focus Stratégique de l'IFRI*, n° 36.
- Fracasso, Andrea, et Giuseppe Vittucci Marzetti. 2015. « International trade and R&D spillovers ». *Journal of International Economics* 96 (1): 138-49.
- Franke, Ulrike, et Tara Varma. 2019. « Independence Play: Europe's Pursuit Of Strategic Autonomy », *European Council of Foreign Relation Report*, Flash scorecard. 84.
- Freeman, Christopher. 1987. *Technology, Policy, and Economic Performance: Lessons from Japan*. Pinter Publishers.
- Freeman, Linton C. 2004. *The Development of Social Network Analysis: A Study in the Sociology of Science*. Empirical Press.
- Fritsch, Michael. 2001. « Co-operation in Regional Innovation Systems ». *Regional Studies* 35 (4): 297-307.
- Gaetani, Ruben, et Matteo Li Bergolis. 2015. « The Economic Effects of Scientific Shocks ».
- Galbraith, John Kenneth. 1967. *The new industrial state*. The new industrial state. Boston, MA, US: Houghton, Mifflin and Company.
- . 1973. *Economics and the Public Purpose*. Boston: Houghton Mifflin Harcourt.
- Gallié, Emilie-Pauline, et Renelle Guichard. 2002. « The impact of ICT sophistication on geographically distant networks: the case of space physics as seen from France », janvier.
- Gallo, Jérôme. 2006. « Information et pouvoir dans les organisations: un essai de quantification par la théorie des graphes d'influence ».
- Ganguli, Ina. 2015. « Immigration and Ideas: What Did Russian Scientists "Bring" to the United States? » *Journal of Labor Economics* 33 (S1): S257-88.
- Gans, Joshua S., Fiona E. Murray, et Scott Stern. 2017. « Contracting over the Disclosure of Scientific Knowledge: Intellectual Property and Academic Publication ». *Research Policy* 46 (4): 820-35.
- Garfield, E. 1979. « Is Citation Analysis a Legitimate Evaluation Tool? » *Scientometrics* 1 (4): 359-75.
- Geiger, Roger L. 1992. « Science, Universities, and National Defense, 1945-1970 ». *Osiris* 7 (1): 26-48.

- Gholz, Eugene, et Harvey M. Sapolsky. 2021. « The Defense Innovation Machine: Why the U.S. Will Remain on the Cutting Edge ». *Journal of Strategic Studies* 44 (6): 854-72.
- Gittelman, Michelle, et Bruce Kogut. 2003. « Does Good Science Lead to Valuable Knowledge? Biotechnology Firms and the Evolutionary Logic of Citation Patterns ». *Management Science* 49 (4): 366-82.
- Glänzel, Wolfgang, et Martin Meyer. 2003. « Patents Cited in the Scientific Literature: An Exploratory Study of “reverse” Citation Relations », 14.
- Godin, Benoît. 1996. « Research and the Practice of Publication in Industries ». *Research Policy* 25 (4): 587-606.
- . 2006. « The Linear Model of Innovation: The Historical Construction of an Analytical Framework ». *Science, Technology, & Human Values* 31 (6): 639-67.
- Gorman. 2002. « Types of Knowledge and Their Roles in Technology Transfer ». *The Journal of Technology Transfer* 27 (3): 219-31.
- Gorman, Siobhan, August Cole, et Yochi Dreazen. 2009. « Computer Spies Breach Fighter-Jet Project ». *Wall Street Journal*, 21 avril 2009, sect. Tech.
- Government Accountability Office. 2019. « Defense Acquisitions: Information on Workforce, Organizational Structure, and Budgeting for Selected Programs ». GAO-19-209. U.S. Government Accountability Office.
- Graf, Holger, et Jens J. Krüger. 2011. « The Performance of Gatekeepers in Innovator Networks ». *Industry and Innovation* 18 (1): 69-88.
- Granger, C. W. J. 1969. « Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods ». *Econometrica* 37 (3): 424-38.
- Granovetter, Mark S. 1973. « The Strength of Weak Ties ». *American Journal of Sociology* 78(6), 1360-1380.
- Grant, Kenneth A. 2007. « Tacit Knowledge Revisited - We Can Still Learn from Polanyi ». *Electronic Journal of Knowledge Management* 5 (2): pp173-180.
- Griliches, Zvi. 1990. « Patent Statistics as Economic Indicators: A Survey ». w3301. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research.
- Griliches, Zvi, et Jacob Schmookler. 1963. « Inventing and Maximizing ». *The American Economic Review* 53 (4): 725-29.
- Grillitsch, Markus, et Michaela Tripl. 2014. « Combining Knowledge from Different Sources, Channels and Geographical Scales ». *European Planning Studies* 22 (11): 2305-25. <https://doi.org/10.1080/09654313.2013.835793>.
- Gross, Daniel P. 2022. « The Hidden Costs of Securing Innovation: The Manifold Impacts of Compulsory Invention Secrecy », 80.

- Guilluy, Christophe. 2015. *La France périphérique : Comment on a sacrifié les classes populaires*. Flammarion, Paris.
- Gulbrandsen, Magnus, et Stig Slipersæter. 2007. « The Third Mission and the Entrepreneurial University Model ». in: Andrea Bonaccorsi & Cinzia Daraio (ed.), *Universities and Strategic Knowledge Creation*, chapter 4, Edward Elgar Publishing.
- Hainmueller, Jens. 2012. « Entropy Balancing for Causal Effects: A Multivariate Reweighting Method to Produce Balanced Samples in Observational Studies ». *Political Analysis* 20 (1):
- Han, Yoo-Jin. 2007. « Linking Science and Technology with Industry ». *Journal of Technology Management & Innovation* 2 (2): 7-17.
- Hartley, Keith. 2006. « Defence Industrial Policy in a Military Alliance ». *Journal of Peace Research* 43 (4): 473-89.
- . 2012. *The Economics of Defence Policy: A New Perspective*. Routledge.
- Hébert, J.-P. 1995. « Production d'armement. Mutation du système français ». *Recherches Internationales*, n°41-42, 1995.
- Heckman, James J., et Richard Robb. 1985. « Alternative methods for evaluating the impact of interventions: An overview ». *Journal of Econometrics* 30 (1): 239-67.
- Helleiner, Eric. 1999. « Sovereignty territoriality and the globalization of finance ». In *States and Sovereignty in the Global Economy*, pp.138-157. Routledge, London.
- Henderson, Rebecca, et Iain Cockburn. 1994. « Measuring Competence? Exploring Firm Effects in Pharmaceutical Research ». *Strategic Management Journal* 15 (S1): 63-84.
- Hérault, Paul. 2018. « L'internationalisation des chaînes de valeur dans l'industrie de défense : le cas du naval ». These de doctorat, Paris Sciences et Lettres (ComUE).
- Hoang, Khanh, Huy Viet Hoang, et Dao Le Trang Anh. 2023. « The Watchers on the Wall: Inter-Korean Geopolitical Risk and Firm Risk-Taking ». *BRQ Business Research Quarterly*, juillet.
- Hobday, Mike. 1998. « Product Complexity, Innovation and Industrial Organisation ». *Research Policy* 26 (6): 689-710.
- . 2000. « The project-based organisation: an ideal form for managing complex products and systems? ». *Research Policy* 29 (7): 871-93.
- Holgersson, Marcus, et Ove Granstrand. 2017. « Patenting motives, technology strategies, and open innovation ». *Management Decision* 55 (6): 1265-84.
- Holtz-Eakin, Douglas, Whitney Newey, et Harvey S. Rosen. 1988. « Estimating Vector Autoregressions with Panel Data ». *Econometrica* 56 (6): 1371-95.
- Honaker, James, et Gary King. 2010. « What to Do about Missing Values in Time-Series Cross-Section Data ». *American Journal of Political Science* 54 (2): 561-81.

- Hou, Jianhua, Shiqi Tang, Yang Zhang, et Haoyang Song. 2023. « Does prior knowledge affect patent technology diffusion? A semantic-based patent citation contribution analysis ». *Journal of Informetrics* 17 (2): 101393.
- Hsiao, Tzu-Kun, et Vetle I. Torvik. 2019. « Knowledge Transfer from Technology to Science: The Longevity of Paper-to-Patent Citations ». *Proceedings of the Association for Information Science and Technology* 56 (1): 417-21.
- . 2020. « Technology Footprints in Scientific Discovery: Citation Contexts of Paper-to-Patent Citations ». *Proceedings of the Association for Information Science and Technology* 57 (1): e337.
- Hu, Daning, Hsinchun Chen, Zan Huang, et Mihail C. Roco. 2007. « Longitudinal Study on Patent Citations to Academic Research Articles in Nanotechnology (1976–2004) ». *Journal of Nanoparticle Research* 9 (4): 529-42.
- Hussinger, Katrin, et Lorenzo Palladini. 2022. « Information accessibility and knowledge creation: the impact of Google's withdrawal on Chinese academic publications ». *EPIP 22 conference*, September 2022, Cambridge, United Kingdom
- Inoue, Hiroyasu, Kentaro Nakajima, et Yukiko Umeno Saito. 2017. « Localization of knowledge-creating establishments ». *Japan and the World Economy* 43 (septembre): 23-29.
- Isard, Walter. 1956. *Location and Space-Economy: A General Theory Relating to Industrial Location, Market Areas, Land Use, Trade, and Urban Structure*. The Technology Press of Massachusetts Institute of Technology and John Wiley&Sons. New-York.
- Jacobs, Jane. 1969. *The Economy of Cities*. Knopf Doubleday Publishing Group.
- Jaffe, Adam B. 1989. « Real Effects of Academic Research ». *The American Economic Review* 79 (5): 957-70.
- Jaffe, Adam B., Manuel Trajtenberg, et Michael S. Fogarty. 2000. « Knowledge Spillovers and Patent Citations: Evidence from a Survey of Inventors ». *American Economic Review* 90 (2): 215-18.
- Jaffe, Adam B., Manuel Trajtenberg, et Rebecca Henderson. 1993. « Geographic Localization of Knowledge Spillovers as Evidenced by Patent Citations* ». *The Quarterly Journal of Economics* 108 (3): 577-98.
- Jagoda, Jeneé, Brandy Diggs-McGee, Megan Kreiger, et Steven Schuldt. 2020. « The Viability and Simplicity of 3D-Printed Construction: A Military Case Study ». *Infrastructures* 5 (4): 35.
- James, Andrew D. 2009. « Reevaluating the Role of Military Research in Innovation Systems: Introduction to the Symposium ». *The Journal of Technology Transfer* 34 (5): 449-54.
- Jensen, Morten Berg, Björn Johnson, Edward Lorenz, et Bengt Åke Lundvall. 2007. « Forms of Knowledge and Modes of Innovation ». *Research Policy* 36 (5): 680-93.

- Johnson, Björn, Edward Lorenz, et Bengt Åke Lundvall. 2002. « Why all this fuss about codified and tacit knowledge? » *Industrial and Corporate Change* 11 (2): 245-62.
- Kajikawa, Yuya, et Yoshiyuki Takeda. 2008. « Structure of research on biomass and bio-fuels: A citation-based approach ». *Technological Forecasting and Social Change* 75 (9): 1349-59.
- Kajikawa, Yuya, Osamu Usui, Kazuaki Hakata, Yuko Yasunaga, et Katsumori Matsushima. 2008. « Structure of knowledge in the science and technology roadmaps ». *Technological Forecasting and Social Change* 75 (1): 1-11.
- Kashin, Vasilii. 2021. « Defense innovation in Russia in the 2010s ». *Journal of Strategic Studies* 44 (6): 901-21.
- Kelley, Maryellen R., et Todd A. Watkins. 1994. « The myth of the specialized military contractor ». *Technology Review* 98 (3): 52-58.
- Kempin, Ronja, Barbara Kunz. 2017. « France, Germany, and the Quest for European Strategic Autonomy : Franco-German Defence Cooperation in A New Era », Notes du Cerfa, No.141, Ifri. 34.
- Khan, Muhammad Salar. 2022. « Estimating a Panel MSK Dataset for Comparative Analyses of National Absorptive Capacity Systems, Economic Growth, and Development in Low and Middle Income Countries ». *PLOS ONE* 17 (10): e0274402.
- Kim, Jong-Min, et Sunghae Jun. 2016. « Zero-inflated poisson and negative binomial regressions for technology analysis ». *International Journal of Software Engineering and its Applications* 10 (12): 431-48.
- King, David A. 2004. « The Scientific Impact of Nations ». *Nature* 430 (6997): 311-16.
- Kirat, Thierry, et Yannick Lung. 1999. « Innovation and Proximity: Territories as Loci of Collective Learning Processes ». *European Urban and Regional Studies* 6 (1): 27-38.
- Klepach, A. N., L. B. Vodovatov, et E. A. Dmitrieva. 2022. « Russian Science and Technology: Rise or Progressive Lag (Part I) ». *Studies on Russian Economic Development* 33 (6): 631-44.
- Kline, Stephen J., et Nathan Rosenberg. 1986. « An Overview of Innovation ». In *Studies on Science and the Innovation Process*, par Nathan Rosenberg, 173-203.
- Kong, Dongmin, Chen Lin, Lai Wei, et Jian Zhang. 2022. « Information Accessibility and Corporate Innovation ». *Management Science*, janvier.
- Kouakou, Dorgyles C M, et Eva Szego. 2022. « Gouvernance et autonomie stratégique par l'innovation : Une étude exploratoire ». *Économie appliquée* (3): 83-113.
- Krafft, Jackie, Francesco Quatraro, et Pier Paolo Saviotti. 2011. « The knowledge-base evolution in biotechnology: a social network analysis ». *Economics of Innovation and New Technology* 20 (5): 445-75.

- Krasner, Stephen D. 1999. « Sovereignty: Organized Hypocrisy ». In *Sovereignty*. Princeton University Press.
- Krugman, Paul. 1991a. *Geography and Trade*. MIT Press.
- . 1991b. « Increasing Returns and Economic Geography ». *Journal of Political Economy*, n° 99(3) (juin): 483-99.
- Kullback, Solomon. 1959. *Information Theory and Statistics*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Kuo, Kendrick. 2022. « Dangerous Changes: When Military Innovation Harms Combat Effectiveness ». *International Security* 47 (2): 48-87.
- Kuzminov, Ilya, Pavel Bakhtin, Elena Khabirova, Maxim Kotsemir, et Alina Lavrynenko. 2018. « Mapping the Radical Innovations in Food Industry: A Text Mining Study ». *SSRN Electronic Journal*.
- Lantner, Roland. 1974. *Théorie de la dominance économique*. Dunod, Paris.
- Lantner, Roland, et Didier Lebert. 2015. « Dominance et Amplification Des Influences Dans Les Structures Linéaires ». *Université Paris1 Panthéon-Sorbonne (Post-Print and Working Papers)*.
- Laperche, Blandine. 2005. « Les inventions, la science et la guerre : la place du secret ». *Innovations* 21 (1): 109-43.
- Larivière, Vincent, et Yves Gingras. 2010. « The Impact Factor's Matthew Effect: A Natural Experiment in Bibliometrics ». *Journal of the American Society for Information Science and Technology* 61 (2): 424-27.
- Larousse, Éditions. 2023. « Définitions : souveraineté - Dictionnaire de français Larousse ».
- Lavigne, Mathieu, Éric Bélanger, Richard Nadeau, Jean-François Daoust, et Erick Lachapelle. 2022. « Hide and seek: The connection between false beliefs and perceptions of government transparency ». *Harvard Kennedy School Misinformation Review*, mars.
- Lazaric, Nathalie, Valerie Merindol, et Sylvie Rochhia. 2009. « La nouvelle architecture de l'industrie de la Défense en France: Évolution du rôle du maître d'ouvrage ». *Économie et Institutions*, octobre, 31-60.
- Le Goff, Richard. 2000. « Mutation informationnelle et politique territoriale - éléments de théorie des marchés et des organisations appliqués au département de la Manche (Normandie - France) ». Thèse de Doctorat, Université Panthéon-Sorbonne - Paris I.
- . 2013. « Territoires, Industries, Innovations Et Réseaux ». Thèse HDR, Université Panthéon-Sorbonne - Paris I.
- . 2014. « "Territorialisation" des formations a l'innovation et learning by commuting : les enseignements d'une etude de cas internationale ». *Innovations* 44 (2): 33-55.
- Le Pesant, Tanguy. 2013. « Les relations Chine-Taïwan sous la présidence de Ma Ying-jeou : l'impossible statu quo ». *Hérodote* 150 (3): 67-86.

- Lebert, Didier. 2016. « Théorie de la dominance économique et flux intra- et inter-territoriaux de connaissances technologiques ». *Innovations* 50 (2): 43-63.
- . 2019. « Essais sur la théorie de la dominance économique ». *Economies et finances*. Université du Littoral-Côte d'Opale.
- Lebert, Didier, et Hafida El Younsi. 2013. « Les trajectoires d'insertion des pays africains au commerce mondial de biens industriels entre 1980 et 2004 ». *Colloque International sur le "Développement et Transformations structurelles et institutionnelles des économies nord africaines et méditerranéennes"*. novembre 2013, Rabat, Maroc.
- Lebert, Didier, et François-Xavier Meunier. 2017. « Dynamique d'interaction des systèmes régionaux d'innovation en Europe ». Post-Print. HAL.
- . 2020. « L'autonomie stratégique d'un pays : une analyse en termes de technologies: » *Revue Défense Nationale* N° 832 (7): 85-90.
- Lebert, Didier, et Hafida El Younsi. 2015. « Théorie de La Dominance Économique : Indicateurs Structuraux Sur Les Relations Interafricaines ». *Post-Print*, Post-Print, novembre.
- Lebert, Didier, Hafida El Younsi, Jérôme Gallo, Fabrice Lequeux, et Eric Zyla. 2008. « Les échanges industriels entre les pays du bassin méditerranéen ». *Colloque International sur le "Ouverture et émergence en Méditerranée"*. octobre 2008, Rabat, Maroc. Rabat.
- Lee, Kyung Hyun, Claudia Pedroza, Elenir B. C. Avritscher, Ricardo A. Mosquera, et Jon E. Tyson. 2023. « Evaluation of negative binomial and zero-inflated negative binomial models for the analysis of zero-inflated count data: application to the telemedicine for children with medical complexity trial ». *Trials* 24 (1): 613.
- Lee, Sabin H. 1997. « Protecting the Private Inventor Under the Peacetime Provisions of the Invention Secrecy Act ». *Berkeley Technology Law Journal* 12 (2): 345-411.
- Lee, Woo Hyung. 2008. « How to Identify Emerging Research Fields Using Scientometrics: An Example in the Field of Information Security ». *Scientometrics* 76 (3): 503-25.
- Lehmann, Erik E., et Nikolaus Seitz. 2017. « Freedom and Innovation: A Country and State Level Analysis ». *The Journal of Technology Transfer* 42 (5): 1009-29.
- Leloup, Fabienne. 2010. « Le développement territorial et les systèmes complexes : proposition d'un cadre analytique ». *Revue d'Économie Régionale & Urbaine* octobre (4): 687-705.
- Leloup, Fabienne, Laurence Moyart, et Bernard Pecqueur. 2005. « La gouvernance territoriale comme nouveau mode de coordination territoriale ? » *Géographie, économie, société* 7 (4): 321-32.
- Leonard, Mark, Jean Pisani-Ferry, Elina Ribakova, Jeremy Shapiro, et Guntram Wolff. 2019. « Redefining Europe's economic sovereignty ». Bruegel.

- Lequeux, Fabrice. 2002. « Concurrence et effets de dominance économique dans l'industrie multimédia ». Thèse de doctorat, Paris 1.
- Levin, Richard C., Alvin K. Klevorick, Richard R. Nelson, Sidney G. Winter, Richard Gilbert, et Zvi Griliches. 1987. « Appropriating the Returns from Industrial Research and Development ». *Brookings Papers on Economic Activity* 1987 (3): 783-831.
- Levitt, Jonathan M. 2015. « What Is the Optimal Number of Researchers for Social Science Research? » *Scientometrics* 102 (1): 213-25.
- Levresse, Estelle. 2022. « Coûteuse lutte des places à l'université en Russie ». *Le Monde Diplomatique*, août 2022, Août 2022 édition.
- Lew, Linda. 2021. « How US\$400 Could Get a Bogus Paper Placed in a Chinese Academic Journal ». *South China Morning Post*. 15 mai 2021.
- Leydesdorff, Loet. 2006. *The Knowledge-Based Economy: Modeled, Measured, Simulated*. Universal-Publishers.
- Liao, Chien Hsiang. 2021. « The Matthew effect and the halo effect in research funding ». *Journal of Informetrics* 15 (1): 101108.
- Libaers, Dirk. 2009. « Industry Relationships of DoD-Funded Academics and Institutional Changes in the US University System ». *The Journal of Technology Transfer* 34 (5): 474-89.
- Libek, Elina. 2019. « European Strategic Autonomy: A Cacophony of Political Visions ». *ICDS*.
- Liu, Ju, Cristina Chaminade, et Bjørn T. Asheim. 2013. « The Geography and Structure of Global Innovation Networks: A Knowledge Base Perspective ». In *Global and Regional Dynamics in Knowledge Flows and Innovation*. Routledge.
- Lo, Szu-chia S. 2010. « Scientific linkage of science research and technology development: a case of genetic engineering research ». *Scientometrics* 82 (1): 109-20.
- Locke, Scott. 2019. « The Invention Secrecy Act: The USPTO as a Gatekeeper of National Security » 8: 18.
- Longhi, C., et M. Quéré. 1991. « Les microsystèmes productifs ». In *Traité d'économie industrielle*, Economica, 356-372. Paris.
- Looy, Bart Van, Tom Magerman, et Koenraad Debackere. 2007. « Developing Technology in the Vicinity of Science: An Examination of the Relationship between Science Intensity (of Patents) and Technological Productivity within the Field of Biotechnology ». *Scientometrics* 70 (2): 441-58.
- Łubiński, Piotr. 2022. « Hybrid Warfare or Hybrid Threat – The Weaponization of Migration as an Example of the Use of Lawfare – Case Study of Poland ». *Polish Political Science Yearbook* 51 (1): 43-55.

- Luce, R. Duncan, et Albert D. Perry. 1949. « A Method of Matrix Analysis of Group Structure ». *Psychometrika* 14 (2): 95-116.
- Lundmark, Martin. 2018. « A Quest for Autonomy and Excellence : The Defense Innovation Systems of France and Sweden ». *Study Of Innovation And Technology In China*, Research Brief, may.
- Lundvall, Bengt Åke. 1988. « Innovation as an interactive process: from user-producer interaction to the national system of innovation ». In *Technical Change and Economic Theory*, Pinter, 349-69. London.
- . 1992. *National Systems of Innovation: Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning*. Pinter Publishers.
- Lundvall, Bengt Åke, et Björn Johnson. 1994. « The Learning Economy ». *Journal of Industry Studies* 1 (2): 23-42.
- Macfarlane, Bruce, et Ming Cheng. 2008. « Communism, Universalism and Disinterestedness: Re-Examining Contemporary Support among Academics for Merton's Scientific Norms ». *J Acad Ethics* (2008) 6: 67-78
- MacRoberts, Michael H., et Barbara R. MacRoberts. 1989. « Problems of Citation Analysis: A Critical Review ». *Journal of the American Society for Information Science* 40 (5): 342-49.
- Magerman, Tom, Bart Van Looy, et Xiaoyan Song. 2009. « Exploring the Feasibility and Accuracy of Latent Semantic Analysis Based Text Mining Techniques to Detect Similarity between Patent Documents and Scientific Publications ». *Scientometrics* 82 (2): 289-306.
- Maillat, Denis. 1995. « Territorial dynamic, innovative milieus and regional policy ». *Entrepreneurship & Regional Development* 7 (2): 157-65.
- Maillat, Michel, Lanfranco Senn, et Denis Quévit. 1993. « Réseaux d'innovation et milieux innovateurs: un pari pour le développement régional », GREMI/EDES, Neuchâtel.
- Mairesse, Jacques, et Pierre Mohnen. 2002. « Accounting for Innovation and Measuring Innovativeness: An Illustrative Framework and an Application ». *American Economic Review* 92 (2): 226-30.
- Malerba, Franco. 2002. « Sectoral Systems of Innovation and Production ». *Research Policy*, 18.
- Malizard, Julien. 2020. « L'impact économique de la défense : une approche globale ». *Revue Défense Nationale* 832 (7): 43-48.
- Mampaey, Luc, et Claude Serfati. 2004. « 9. Les groupes de l'armement et les marchés financiers : vers une convention "guerre sans limites" ? » In *La finance mondialisée*, 223-51. TAP / Economie. La Découverte, Paris.
- Mansfield, Edwin, Mark Schwartz, et Samuel Wagner. 1981. « Imitation Costs and Patents: An Empirical Study ». *The Economic Journal* 91 (364): 907-18.

- Markusen, Ann. 1992. « Dismantling the Cold War Economy ». *World Policy Journal* 9 (3): 389-99.
- Markusen, Ann, et Sean S. Costigan, éd. 1999. *Arming the Future: A Defense Industry for the 21st Century*. Illustrated edition. New York, NY : Washington, D.C.: Council on Foreign Relations Press.
- Markusen, Ann, Peter Hall, Scott Campbell, et Sabina Deitrick. 1991. *The Rise of the Gunbelt: The Military Remapping of Industrial America*. 1st edition. New York: Oxford University Press.
- Marshall, Alfred. 1890. *Principles of Economics: an introductory volume*. Macmillan, Londres.
- . 1919. *Industry and Trade: A Study of Industrial Technique and Business Organization*. Macmillan and Company, limited.
- . 1920. *Principles of Economics*. 8th edition. New York: Macmillan.
- Martens, John A. 2021. « Secrecy in the USSR and German Democratic Republic Patent Systems », 49.
- Martin, Roman, et Jerker Moodysson. 2013. « Comparing Knowledge Bases: On the Geography and Organization of Knowledge Sourcing in the Regional Innovation System of Scania, Sweden ». *European Urban and Regional Studies* 20 (2): 170-87.
- Martinez, Wendy. 2018. « How science and technology developments impact employment and education ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115 (50): 12624-29.
- Marx, Matt, et Aaron Fuegi. 2020. « Reliance on Science by Inventors: Hybrid Extraction of In-text Patent-to-Article Citations ». Working Paper 27987. Working Paper Series. National Bureau
- Maskell, Peter, Harald Bathelt, et Anders Malmberg. 2006. « Building global knowledge pipelines: The role of temporary clusters ». *European Planning Studies* 14 (8): 997-1013.
- Masson, Hélène. 2017. « « Impact économique de la filière industrielle “Composante océanique de la dissuasion” - Volet 1-SNLE », ». *Recherches & Documents, Fondation pour la recherche stratégique*, n° n° 01.
- Matelly, Sylvie, et Marcos Lima. 2016. « The influence of the state on the strategic choices of defence companies: the cases of Germany, France and the UK after the Cold War ». *Journal of Innovation Economics & Management* 20 (2): 61-88.
- Maurseth, Per, et Bart Verspagen. 1999. « Europe: one or several systems of innovation? An analysis based on patent citations ». *Maastricht University, Open Access publications from Maastricht University*, janvier.

- Mayer, Michael. 2023. « The Future of Military Force – the Impact of Emerging Technologies and Defense Innovation on State Force Structures », *Norwegian Defense Research Establishmant FFI Rapport*.
- Mazzanti, Maria. 2013. « From State Sovereignty to Responsibility to Protect ». Phd Thesis, Institut d'études politiques de Paris - Sciences Po.
- Mazzucato, Mariana. 2015. « The entrepreneurial state ». *Soundings* 49 (49): 131-42.
- . 2018. « Mission-Oriented Innovation Policies: Challenges and Opportunities ». *Industrial and Corporate Change* 27 (5): 803-15.
- Melo, Regiane de. 2015. « La base industrielle de défense brésilienne : projet ou réalité ? » *Outre-Terre* 42 (1): 197-203.
- Mérindol, Valérie. 2004. « Chapitre 4. R&D de défense et coordination civile-militaire ». In *L'innovation et l'économie contemporaine*, 85-113. De Boeck Supérieur.
- . 2015. « Technologies de l'information et variété des formes de co-crédation : vers un nouveau paradigme pour la Défense américaine ». *Annales des Mines - Gérer et comprendre* N° 119 (1): 42-52.
- . 2016. « Knowledge Capacities Realignment in the Context of Technological Change: An Exploration of the French and US Military Ecosystems », 29.
- Mérindol, Valérie, David-W. Versailles, et Patrice Cardot. 2003. *La recherche et la technologie, enjeux de puissance*. Paris: Economica.
- Merton, Robert K. 1942. « The Normative Structure of Science ». *The University of Chicago Press, Chicago 60637 The University of Chicago Press, Ltd., London*.
- Merton, Robert K. 1957. « Priorities in Scientific Discovery: A Chapter in the Sociology of Science ». *American Sociological Review* 22 (6): 635.
- . 1968. « The Matthew Effect in Science ». *Science* 159 (3810): 56-63.
- Meunier, François-Xavier. 2017. « Innovation Technologique Duale: Une Analyse En Termes d'influence et de Cohérence ».
- Meunier, François-Xavier, et Célia Zyla. 2016. « Firm growth and knowledge flows: comparative analysis between defence and civil areas ». *Journal of Innovation Economics & Management* 20 (2): 89-108.
- Meyer, Martin. 2000. « What Is Special about Patent Citations? Differences between Scientific and Patent Citations ». *Scientometrics* 49 (1): 93-123.
- . 2002. « Tracing Knowledge Flows in Innovation Systems ». *Scientometrics* 54 (2): 193-212.
- Meyer-Krahmer, Frieder, et Ulrich Schmoch. 1998. « Science-Based Technologies: University–Industry Interactions in Four Fields ». *Research Policy* 27 (8): 835-51.

- Ministère de la Défense. 2013. *Défense et sécurité nationale 2013: livre blanc*. Édité par France et France. Paris: Documentation française.
- Mitchell, Michael G. 2010. « Globalization, Internationalization And Economic Sovereignty In The Small European States ». University of Georgia.
- Mohanty, Deba R. 2014. « A Dismal Show Amid Pockets of Excellence: The State of Defense Innovation in India ».
- Moine, Alexandre. 2006. « Le territoire comme un système complexe : un concept opératoire pour l'aménagement et la géographie ». *L'Espace géographique* 35 (2): 115-32.
- Mouhoud, El Mouhoub. 2006. *Mondialisation et délocalisation des entreprises*. Repères 413. Paris: La Découverte.
- Moura, Sylvain. 2012. « La base industrielle et technologique de défense : identification et caractéristique », n° 58 (janvier).
- . 2014. « La dualité dans la base industrielle et technologique de défense », n° 66 (janvier).
- Moussa, Inès. 2012. « Proximité géographique, diffusion des connaissances et innovation : une étude sur les départements français métropolitains ». Université Toulouse 1 Capitole.
- Mowery, David C. 2009. « National Security and National Innovation Systems ». *The Journal of Technology Transfer* 34 (5): 455-73.
- . 2010. « Chapter 29 - Military R&D and Innovation ». In *Handbook of the Economics of Innovation*, édité par Bronwyn H. Hall et Nathan Rosenberg, 2:1219-56. *Handbook of the Economics of Innovation*, Volume 2. North-Holland.
- . 2012. « Defense-related R&D as a model for “Grand Challenges” technology policies ». *Research Policy*, The need for a new generation of policy instruments to respond to the Grand Challenges, 41 (10): 1703-15.
- Nadaud, Emmanuel. 2019. « La prise en compte des interdépendances dans les processus de développement des territoires. De la gouvernance à la coopération territoriale ». Université de Poitiers.
- Narin, F., Kimberly S. Hamilton, et Dominic Olivastro. 1997. « The Increasing Linkage between U.S. Technology and Public Science ». *Research Policy* 26 (3): 317-30.
- Narin, F., et E. Noma. 1985. « Is Technology Becoming Science? » *Scientometrics* 7 (3-6): 369-81.
- Nelson, Richard R., éd. 1993. *National Innovation Systems: A Comparative Analysis*. New York: Oxford University Press.
- . 2001. « Observations on the Post-Bayh-Dole Rise of Patenting at American Universities ». *The Journal of Technology Transfer* 26 (1): 13-19.

- Nelson, Richard R., et Sidney G. Winter. 1982. *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Digitally reprinted. Cambridge, Mass.: The Belknap Press of Harvard Univ. Press.
- Neuenkirch, Matthias, et Florian Neumeier. 2016. « The impact of US sanctions on poverty ». *Journal of Development Economics* 121 (juillet): 110-19.
- Nicolaisen, Jeppe, et Tove Faber Frandsen. 2019. « Zero Impact: A Large-Scale Study of Uncitedness ». *Scientometrics* 119 (2): 1227-54.
- Niosi, Jorge, et Bertrand Bellon. 1994. « The global interdependence of national innovation systems: Evidence, limits, and implications ». *Technology in Society* 16 (2): 173-97.
- . 2002. « The Absorptive Capacity of Regions ». *Colloque « Economie Méditerranée Monde Arabe » GDRI CNRS*. Septembre 2002, Sousse - Port El Kantaoui, Tunisie
- Niosi, Jorge, Bertrand Bellon, Pier-Paolo Saviotti, et Michaël Crow. 1992. « Les systèmes nationaux d'innovation : à la recherche d'un concept utilisable ». *Revue française d'économie* 7 (1): 215-50.
- Nonaka, Ikujiro, et Hirotaka Takeuchi. 1995. *The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*. Oxford, New York: Oxford University Press.
- Nonaka, Ikujiro, Ryoko Toyama, et Noboru Konno. 2000. « SECI, Ba and Leadership: A Unified Model of Dynamic Knowledge Creation ». *Long Range Planning* 33 (1): 5-34.
- Nooteboom, Bart. 2000. *Learning and Innovation in Organizations and Economies*. OUP Oxford.
- Norel, Philippe. 2004. *L'Invention du marché. Une histoire économique de la mondialisation*. Du Seuil.
- Nouwens, Meia, et Helena Legarda. 2018. « China's Declassification of Defence Patents: novel, but not (yet) a game changer », *International Institute for Strategic Studies Report*, 20.
- Noyons, E. C. M., A. F. J. van Raan, H. Grupp, et U. Schmoch. 1994. « Exploring the Science and Technology Interface: Inventor-Author Relations in Laser Medicine Research ». *Research Policy* 23 (4): 443-57.
- Ogawa, Takaya, et Yuya Kajikawa. 2015. « Assessing the Industrial Opportunity of Academic Research with Patent Relatedness: A Case Study on Polymer Electrolyte Fuel Cells ». *Technological Forecasting and Social Change* 90 (janvier): 469-75.
- Olsson, Ola. 2000. « Knowledge as a Set in Idea Space: An Epistemological View on Growth ». *Journal of Economic Growth* 5 (3): 253-75.
- OST. 2018. « La position scientifique de la France dans le monde 2000-2015 ». Observatoire des Sciences et Techniques. Paris

- Ostrom, Vincent, et Elinor Ostrom. 1977. « Public Goods and Public Choices ». In *Alternatives for Delivering Public Services*, par Emanuel S. Savas, édité par E. S. Savas, 1^{re} éd., 7-49. Routledge.
- Paarlberg, Robert L. 2004. « Knowledge as Power: Science, Military Dominance, and U.S. Security ». *International Security* 29 (1): 122-51.
- Pan, Raj Kumar, Kimmo Kaski, et Santo Fortunato. 2012. « World Citation and Collaboration Networks: Uncovering the Role of Geography in Science ». *Scientific Reports* 2 (1): 902.
- Paquot, Thierry. 2011. « Qu'est-ce qu'un « territoire » ? ». *Vie sociale* 2 (2): 23-32.
- Park, Incha, et Byungun Yoon. 2018. « Identifying Promising Research Frontiers of Pattern Recognition through Bibliometric Analysis ». *Sustainability* 10 (11): 40-55.
- Patel, Pari, et Keith Pavitt. 2000. « National systems of innovation under strain: the internationalisation of corporate R&D », Productivity, innovation and economic performance, 217-235
- Patelli, Aurelio, Giulio Cimini, Emanuele Pugliese, et Andrea Gabrielli. 2017. « The scientific influence of nations on global scientific and technological development ». *Journal of Informetrics* 11 (4): 1229-37.
- Pavitt, Keith. 1991. « What Makes Basic Research Economically Useful? ». *Research Policy* 20 (2): 109-19.
- Pearce, Joshua M. 2020. « Economic savings for scientific free and open source technology: A review ». *HardwareX* 8 (octobre): e00139.
- Pecqueur, Bernard. 2006. « Le tournant territorial de l'économie globale ». *Espaces et sociétés* 124-125 (1-2): 17-32.
- . 2007. « L'économie territoriale : une autre analyse de la globalisation ». *L'Economie politique* 33 (1): 41-52.
- Pecqueur, Bernard, et Zimmermann, Jean-Benoît. 2004. « Economie de proximités », Paris, Hermès.
- Penrose, Edith Tilton. 1959. *The Theory of the Growth of the Firm*. 4th ed., Rev. ed. Oxford ; New York: Oxford University Press.
- Perroux, François. 1948. « Esquisse d'une théorie de l'économie dominante, ». *Économie Appliquée*, n° 1: 243-300.
- Pesaran, M. Hashem. 2007. « A Simple Panel Unit Root Test in the Presence of Cross-Section Dependence ». *Journal of Applied Econometrics* 22 (2): 265-312.
- Polanyi, Michael. 1958. *Personal Knowledge: Towards a Post-Critical Philosophy*. Routledge, London.
- . 1966. *The Tacit Dimension*. Library of congress catalog card number 66-21015.

- Porter, Michael E. 1990. « The Competitive Advantage of Nations ». *Harvard Business Review*.
- Porter, Michael E. 1998. « Clusters and the New Economics of Competition ». *Harvard Business Review*, novembre.
- . 2003. « The Economic Performance of Regions ». *Regional Studies* 37 (6-7): 549-78.
- Qin, Lingui, Dervis Kirikkaleli, Yao Hou, Xu Miao, et Muhammad Tufail. 2021. « Carbon Neutrality Target for G7 Economies: Examining the Role of Environmental Policy, Green Innovation and Composite Risk Index ». *Journal of Environmental Management* 295 (octobre): 113119.
- Quiggin, John. 2000. « Globalization and Economic Sovereignty ». *Journal of Political Philosophy* 9 (1): 56-80.
- Raan, Anthony F. J. van. 2015. « Dormitory of Physical and Engineering Sciences: Sleeping Beauties May Be Sleeping Innovations Part 1: Basic Properties, Cognitive Environment, Characteristics of the Princes ».
- . 2017. « Sleeping Beauties Cited in Patents: Is There Also a Dormitory of Inventions? » *Scientometrics* 110 (3): 1123-56.
- Raan, Anthony F. J. van van. 2004. « Sleeping Beauties in Science ». *Scientometrics* 59 (3): 467-72.
- Rallet, Alain, et André Torre. 1995. *Economie industrielle et économie spatiale*. Paris: Economica.
- . 1999. « Is Geographical Proximity Necessary in the Innovation Networks in the Era of Global Economy? » *GeoJournal* 49 (4): 373-80.
- . 2005. « Proximity and Localization ». *Regional Studies* 39 (1): 47-59.
- Raska, Michael, Bruce E. Bechtol, Hyeong-wook Boo, In-bum Chun, Chung Min Lee, Seongwon Lee, Daniel A. Pinkston, Mira Rapp-Hooper, et Michael Raska. 2016. « South Korea's Military-Innovation Trajectories ». Breakthrough On The Peninsula. Center for a New American Security.
- Rassenfosse, Gaétan de, Gabriele Pellegrino, et Emilio Raiteri. 2020. « Do Patents Enable Disclosure? Evidence from the Invention Secrecy Act ». *SSRN Electronic Journal*.
- Ratti, Remigio, Alberto Bramanti, et Richard Gordon. 1997. *The Dynamics of Innovative Regions: The GREMI Approach*. London: Routledge.
- Rayna, Thierry, et Ludmila Striukova. 2016. « From Rapid Prototyping to Home Fabrication: How 3D Printing Is Changing Business Model Innovation ». *Technological Forecasting and Social Change* 102 (janvier): 214-24.
- Reslinger, Coralie. 2013. « La Diversité Des Modèles Socio-Économiques D'émergence Technologique ».

- Romer, Paul M. 1986. « Increasing Returns and Long-Run Growth ». *Journal of Political Economy* 94 (5): 1002-37.
- Rosenberg, Nathan. 1982. *Inside the Black Box: Technology and Economics*. Cambridge [Cambridgeshire] ; New York: Cambridge University Press.
- . 1990. « Why do firms do basic research (with their own money)? » In *Studies on Science and the Innovation Process*, 225-34.
- Rosenberg, Nathan, et Richard R. Nelson. 1994. « American Universities and Technical Advance in Industry ». *Research Policy* 23 (3): 323-48.
- Rubin, Donald B. 1974. « Estimating causal effects of treatments in randomized and nonrandomized studies ». *Journal of Educational Psychology* 66 (5): 688-701.
- . 1996. « Multiple Imputation after 18+ Years ». *Journal of the American Statistical Association* 91 (434): 473-89.
- Ruttan, Vernon W. 2006. *Is War Necessary for Economic Growth?: Military Procurement and Technology Development*. Oxford University Press.
- Sack, Robert David. 1986. *Human Territoriality: Its Theory and History*. CUP Archive.
- Sasaki, H., S. Yamamoto, A. Agchbayar, et N Nkhbayasgalan. 2020. « Extracting Problem Linkages to Improve Knowledge Exchange between Science and Technology Domains Using an Attention-Based Language Model ». *Engineering, Technology & Applied Science Research* 10 (4): 5903-13.
- Savanovic, Aleksandar. 2014. "Economic Sovereignty". In Proceedings of international academic conferences. International Institute of Social and Economic Sciences.
- Saxenian, AnnaLee. 1994. *Regional Advantage: Culture and Competition in Silicon Valley and Route 128, With a New Preface by the Author*. Harvard University Press.
- Scherer, F. M. 1982. « Demand-Pull and Technological Invention: Schmookler Revisted ». *The Journal of Industrial Economics* 30 (3): 225-37.
- Schillaci, Carmela Elita, Marco Romano, et Melita Nicotra. 2013. « Territory's Absorptive Capacity ». *Entrepreneurship Research Journal* 3 (1): 109-26.
- Schmid, Jon. 2017. « The Diffusion of Military Technology ». *Defence and Peace Economics*, février, 1-19.
- Schmoch, Ulrich. 2008. « Concept of a Technology Classification for Country Comparisons ». *Final report to the world intellectual property organisation WIPO*.
- Schumpeter, Joseph A. 1939. *Business Cycles: A Theoretical, Historical, And Statistical Analysis of the Capitalist Process. 2 Vol. Set*. First Edition. Chevy Chase, Md.: Martino Publishing.
- . 1942. *Capitalism, Socialism and Democracy*. Routledge.

- Schwartz, Charles A. 1997. « The Rise and Fall of Uncitedness » The rise and fall of uncitedness. *College & Research Libraries*, 58(1), 19-29.
- Scott, Allen-J. 2001. *Les régions et l'économie mondiale*. Editions L'Harmattan.
- Sempere, Carlos Martí. 2015. « A Survey of Performance Issues in Defence Innovation ». *Defence and Peace Economics* 28 (3): 319-43.
- . 2016. « What Is Known About Defence Research And Development Spill-Overs? » *Defence and Peace Economics* 29 (3): 225-46.
- Serfati, Claude. 2005. « Défense et politique technologique. Quelques questions en débat ». *Innovations* 21 (1): 21-42.
- . 2008. « Le rôle de l'innovation de Défense dans le système national d'innovation de la France ». *Innovations* 28 (2): 61.
- Shibata, Naoki, Yuya Kajikawa, et Ichiro Sakata. 2011. « Detecting potential technological fronts by comparing scientific papers and patents ». Édité par Tugrul U. Daim. *Foresight* 13 (5): 51-60.
- Shibata, Naoki, Yuya Kajikawa, Yoshiyuki Takeda, et Katsumori Matsushima. 2008. « Detecting Emerging Research Fronts Based on Topological Measures in Citation Networks of Scientific Publications ». *Technovation* 28 (11): 758-75.
- Shibata, Naoki, Yuya Kajikawa, Yoshiyuki Takeda, Ichiro Sakata, et Katsumori Matsushima. 2011. « Detecting emerging research fronts in regenerative medicine by the citation network analysis of scientific publications ». *Technological Forecasting and Social Change, Using Technological Intelligence for Strategic Decision Making in High Technology Environments*, 78 (2): 274-82.
- Simkin, M. V., et V. P. Roychowdhury. 2003. « Copied citations create renowned papers? »
- SIPRI. 2020. « Trends in World Military Expenditure, 2019 », avril.
- Sjöholm, Fredrik. 1996. « International Transfer of Knowledge: The Role of International Trade and Geographic Proximity ». *Weltwirtschaftliches Archiv* 132 (1): 97-115.
- Small, Henry, et Eugene Garfield. 1985. « The geography of science: disciplinary and national mappings ». *Journal of Information Science* 11 (4): 147-59.
- Smith, David A., Dorothy J. Solinger, et Steven C. Topik. 1999. *States and Sovereignty in the Global Economy*. Routledge.
- Smith, Keith. 2000. « Innovation as a Systemic Phenomenon: Rethinking the Role of Policy ». *Enterprise and Innovation Management Studies* 1 (1): 73-102.
- Smith, Michael E. 2018. « Transatlantic security relations since the European security strategy: what role for the EU in its pursuit of strategic autonomy? » *Journal of European Integration* 40 (5): 605-20.

- Solla Price, Derek J. de. 1965a. « Is Technology Historically Independent of Science? A Study in Statistical Historiography ». *Technology and Culture* 6 (4): 553.
- . 1965b. « Networks of Scientific Papers ». *Science*, juillet.
- . 1976. « A General Theory of Bibliometric and Other Cumulative Advantage Processes ». *Journal of the American Society for Information Science* 27 (5): 292-306.
- Spencer, Jennifer W. 2003. « Firms' Knowledge-Sharing Strategies in the Global Innovation System: Empirical Evidence from the Flat Panel Display Industry ». *Strategic Management Journal* 24 (3): 217-33.
- Squicciarini, Mariagrazia, Hélène Dernis, et Chiara Criscuolo. 2013. « Measuring Patent Quality: Indicators of Technological and Economic Value », juin.
- Steinbock, Dan. 2014. « The Erosion of America's Defense Innovation ». *American Foreign Policy Interests* 36 (6): 366-74.
- Stephan, Paula. 2012. « How Economics Shapes Science ». In *How Economics Shapes Science*. Harvard University Press.
- Stern, Scott. 2004. « Do Scientists Pay to Be Scientists? » *Management Science* 50 (6): 835-53.
- Stiglitz, Joseph E. 1999. « Knowledge as a global public good ». *Global public goods: International cooperation in the 21st century*, 308, 308-325.
- Stokes, Donald E. 1997. *Pasteurs Quadrant: Basic Science and Technological Innovation*. Washington, D.C: Brookings Institution.
- Storper, Michael. 1995. « Regional Technology Coalitions an Essential Dimension of National Technology Policy ». *Research Policy* 24 (6): 895-911.
- Stowsky, Jay. 2004. « Secrets to Shield or Share? New Dilemmas for Military R&D Policy in the Digital Age ». *Research Policy* 33 (2): 257-69.
- Swanson, Don R. 1986. « Undiscovered Public Knowledge ». *The Library Quarterly* 56 (2): 103-18.
- Tahamtan, Iman, et Lutz Bornmann. 2018. « Creativity in science and the link to cited references: Is the creative potential of papers reflected in their cited references? » *Journal of Informetrics* 12 (3): 906-30.
- Taylor, Robert L. 1975. « The Technological Gatekeeper ». *R&D Management* 5 (3): 239-42.
- Tertrais, Bruno. 2015. « Budget nucléaire et « retombées » de la dissuasion ». *Recherches & Documents, Fondation pour la recherche stratégique*, n° 13.
- Thomas, Patrick, et Anthony Breitzman. 2006. « A method for identifying hot patents and linking them to government-funded scientific research ». *Research Evaluation* 15 (2): 145-52.

- Thumm, Nikolaus. 2004. « Motives for patenting biotechnological inventions: an empirical investigation in Switzerland ». *International Journal of Technology, Policy and Management* 4 (3): 275-85.
- Tijssen, R. J. W., R. K. Buter, et Th. N. van Leeuwen. 2000. « Technological Relevance of Science: An Assessment of Citation Linkages between Patents and Research Papers ». *Scientometrics* 47 (2): 389-412.
- Tijssen, Robert J.W. 2004. « Measuring and Evaluating Science—Technology Connections and Interactions: Towards International Statistics ». In *Handbook of Quantitative Science and Technology Research*, édité par Henk F. Moed, Wolfgang Glänzel, et Ulrich Schmoch, 695-715. Dordrecht: Springer Netherlands.
- . 2010. « Discarding the ‘Basic Science/Applied Science’ Dichotomy: A Knowledge Utilization Triangle Classification System of Research Journals ». *Journal of the American Society for Information Science and Technology* 61 (9): 1842-52.
- Torre, André. 2015. « Théorie du développement territorial ». *Geographie, économie, société* 17 (3): 273-88.
- Torre, André, et Jean-Benoît Zimmermann. 2015. « Des clusters aux écosystèmes industriels locaux ». *Revue d'économie industrielle*, n° 152 (décembre): 13-38.
- Tübbicke, Stefan. 2022. « Entropy Balancing for Continuous Treatments ». *Journal of Econometric Methods* 11 (1): 71-89.
- Van Looy, Bart, Koenraad Debackere, Julie Callaert, Robert Tijssen, et Thed van Leeuwen. 2006. « Scientific Capabilities and Technological Performance of National Innovation Systems: An Exploration of Emerging Industrial Relevant Research Domains ». *Scientometrics* 66 (2): 295-310.
- van Raan. 2017. « Patent Citation Analysis and Its Value in Research Evaluation: A Review and A New Approach to Map Technology-Relevant Research ». *Journal of Data and Information Science* 2 (1): 13-50.
- Vanier, Martin. 2005. « L'interterritorialité : des pistes pour hâter l'émancipation spatiale ». In *Le territoire est mort, vive les territoires !*, édité par Benoît Antheaume et Frédéric Giraut, 317-36. IRD Éditions.
- . 2008. *Le pouvoir des territoires*. Economica-Anthropos.
- . 2015. « Réforme territoriale et espace rural ». *Pour* 228 (4): 147-53.
- Veltz, Pierre. 1996. *Mondialisation, villes et territoires: l'économie d'archipel / Pierre Veltz*. Economie en liberté. Paris: Presses universitaires de France.
- Verberne, Suzan, Ioannis Chios, et Jian Wang. 2019. « Extracting and Matching Patent In-Text References to Scientific Publications », In *BIRNDL@ SIGIR* (pp. 56-69).14.
- Versailles, David. 2005. « Le maître d'œuvre dans les programmes d'armement. De l'émergence à la consolidation des réseaux de connaissances ». *Revue d'économie industrielle* 112 (1): 83-105.

- Veugelers, Reinhilde, et Jian Wang. 2016. « Novel science for industry? » In *2016 IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology (ICMIT)*, 270-74.
- Voiron-Canicio, Christine, Jerome Dutozia, Reine-Maria BASSE, Nathalie DUBUS, Gilles Maignant, Pascale SAINT-AMAND, et Marie Sevenet. 2010. « L'imbrication spatiale dans l'analyse des territoires : formalisation, modélisation, simulation ». *Revue d'économie régionale et urbaine* octobre (octobre): 707-28.
- Wallerstein, Immanuel. 1974. « The Rise and Future Demise of the World Capitalist System: Concepts for Comparative Analysis ». *Comparative Studies in Society and History* 16 (4): 387-415.
- Walsh, Kathleen A., et Ed Francis. 2011. « China's Defense Innovation System: Making the Wheels Spin ». *SITC 2011* 2011 (Policy Brief 23).
- Waltman, Ludo, et Nees Jan van Eck. 2015. « Field-normalized citation impact indicators and the choice of an appropriate counting method ». *Journal of Informetrics* 9 (4): 872-94.
- Wang, Gangbo, et Jiancheng Guan. 2011. « Measuring Science–Technology Interactions Using Patent Citations and Author-Inventor Links: An Exploration Analysis from Chinese Nanotechnology ». *Journal of Nanoparticle Research* 13 (12): 6245-62.
- Wang, Ming-Yeu, Shih-Chieh Fang, et Yu-Hsuan Chang. 2015. « Exploring Technological Opportunities by Mining the Gaps between Science and Technology: Microalgal Biofuels ». *Technological Forecasting and Social Change* 92 (mars): 182-95.
- Warnke, Philine, Bernd Beckert, Antje Bierwisch, Anselm Geserer, Victoria Kayser, Sven Rung, et Elna Schirrmeister. 2016. « OBSERVE Horizon Scanning Methodology Report ». 1.3.
- Wasserman, Stanley, Garry Robins, et Douglas Steinley. 2007. « Statistical Models for Networks: A Brief Review of Some Recent Research ». In *Statistical Network Analysis: Models, Issues, and New Directions*, édité par Edoardo Airoldi, David M. Blei, Stephen E. Fienberg, Anna Goldenberg, Eric P. Xing, et Alice X. Zheng, 45-56. *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Webb, Colin, Hélène Dernis, Dietmar Harhoff, et Karin Hoisl. 2005. « L'analyse Des Citations de Brevets Européens et Internationaux: Une Selection de Modules de La Base de Données de Brevets de L'&OEB ». Paris: OCDE.
- Wieviorka, Michel. 2007. *Les Sciences sociales en mutation*. Sciences Humaines.
- Wilson, Paul. 2015. « The misuse of the Vuong test for non-nested models to test for zero-inflation ». *Economics Letters* 127 (février): 51-53.
- Wuylens, Nathalie. 1999. *Défense Nationale et Brevet d'Invention*. Le droit en Poche. CEDAT.
- Xu, Guannan, Yuchen Wu, Tim Minshall, et Yuan Zhou. 2018. « Exploring Innovation Ecosystems across Science, Technology, and Business: A Case of 3D Printing in China ». *Technological Forecasting and Social Change* 136 (novembre): 208-21.

- Yamashita, Yasuhiro. 2020. « An Attempt to Identify Technologically Relevant Papers Based on Their References ». *Scientometrics* 125 (2): 1783-1800.
- Yamauchi, Isamu, et Sadao Nagaoka. 2015. « The Use of Science for Inventions and Its Identification: Patent Level Evidence Matched with Survey », 28.
- Yang, Li, Keng Hsu, Brian Baughman, Donald Godfrey, Francisco Medina, Mamballykalathil Menon, et Soeren Wiener. 2017. « Introduction to Additive Manufacturing ». In *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*, édité par Li Yang, Keng Hsu, Brian Baughman, Donald Godfrey, Francisco Medina, Mamballykalathil Menon, et Soeren Wiener, 1-31. Springer Series in Advanced Manufacturing. Cham: Springer International Publishing.
- Yu, Fei, et Yanrui Wu. 2014. « Patent citations and knowledge spillovers: an analysis of Chinese patents registered in the USA ». *Asian Journal of Technology Innovation* 22 (1): 86-99.
- Zhang, Zhongheng, et Sven Van Poucke. 2017. « Citations for Randomized Controlled Trials in Sepsis Literature: The Halo Effect Caused by Journal Impact Factor ». *PLOS ONE* 12 (1): e0169398.
- Zhu, Rong-hui, et Shu-lin Liu. 2020. « Identifying Tacit University-Industry Collaborations in Chinese Patents Based on Inventor-Author Analysis ». *World Patent Information* 62 (101986).
- Zimmermann, Jean-Benoît. 2008. « Le territoire dans l'analyse économique. Proximité géographique et proximité organisée ». *Revue française de gestion* 34 (184): 105-18.
- Zuo, Mandy. 2019. « How Chinese Universities Are Trapping Academic Copycats ». *South China Morning Post*. 2 juin 2019.

Table des figures

Figure 3.1: Exemple d'un multigraphe de flux de connaissances et sa matrice de flux	129
Figure 3.2 : Evolution des importations (a) et exportations (b) de connaissances technologiques sur la période 1990-2019 pour le top 12 mondial	134
Figure 3.3 : Evolution des exportations nettes de connaissances technologiques sur la période 1990-2019 pour le top 8 mondial	135
Figure 3.4 : Evolution des importations (a) et exportations (b) de connaissances scientifiques sur la période 1990-2019 pour le top 12 mondial	136
Figure 3.5 : Evolution des exportations nettes de connaissances scientifiques sur la période 1990-2019 pour le top 8 mondial	137
Figure 3.6 : Dendrogrammes des clusters d'interdépendances dans les échanges de connaissances technologiques par période de cinq années.	139
Figure 3.7 : Dendrogrammes des clusters d'interdépendances dans les échanges de connaissances scientifiques par période de cinq années.	142
Figure 3.8 : Évolution hiérarchique des scores de TSA pour top 10 mondial, période 1990-2019	143
Figure 3.9 : Trajectoires des acteurs émergents dans le top 40 des scores TSA sur 1990-2019	144
Figure 3.10 : Évolution hiérarchique des scores de SSA pour top 10 mondial, période 1990-2019	145
Figure 4.1: Diagram adapted from Yamashita (2020)'s indirect citation index	177
Figure 4.2: Diagram of semantic proximity index	178
Figure 4.3 : Example of semantic vectors and proximity computation	180
Figure 4.4 : Volume of article (a) and patent (b) respectively published and filed on 3D printing.	181
Figure 4.5: Weighted rolling mean of backward citation lag.....	182
Figure 4.6: Indirect Patent Citation Count (a) and Semantic Proximity Mean (b)	191
Figure 4.7: Indicator results by regions.....	192
Figure 5.1 : <i>Missing map</i> des données de panel brutes	236
Figure 5.2 : Distributions des variables du panel.	237
Figure 5.3 : Détails des domaines scientifiques présents dans A ₁ , au niveau 1 et 2 de la classification ASJC.	245
Figure 5.4 : Evolution de la concentration des sujets, de l'intensité et du volume de citations scientifiques dans les brevets à usage militaire et aérospatial.....	246
Figure 5.5 : Flux de connaissances en volume entre sujets scientifiques (codes ASJC) et technologies à usage militaire et aérospatial (codes IPC)	247
Figure 5.6 : TSA × SSA sur une échelle logarithmique	249

Liste des tableaux

Table 3.1 : Ensembles de l'échantillon de données	126
Table 3.2 : liste des IPC militaires (Acosta et al. 2011).....	160
Table 3.3 : liste des IPC aérospatiaux (Fauconnet et al. 2018, OST28).....	160
Table 3.4 : Tableau de correspondance de la norme ISO 3166-1	161
Table 4.1 : Goodness-of-fit tests for Poisson regression.....	188
Table 4.2 : Main model regression results	190
Table 4.3: List of keywords in scholar query	200
Table 4.4: Keywords to identify the three types of affiliation of focal papers.	200
Table 4.5: List of scientific domains	200
Table 4.6: Summary statistics	201
Table 4.7: Correlation coefficients	201
Table 4.8: Variance inflation factors (VIF) in different dataset specifications.....	202
Table 4.9: Poisson regression results	203
Table 4.10: Robustness results for categorial control variables alternative computation	204
Table 4.11: Results of the robustness of threshold variations on the ICC indicator	205
Table 4.12: Regression results for zero excess control	206
Table 4.13: Regression results for zero excess control with strong identification.....	207
Table 4.14: Regression results for selection bias control.....	208
Table 4.15: Results of the robustness for new control variables integration	209
Table 5.1 : Description des variables	235
Table 5.2 : Statistiques descriptives avant imputation	237
Table 5.3 : Statistiques descriptives après imputation	238
Table 5.4 : Test de racine unitaire de Pesaran.....	250
Table 5.5 : Choix de la valeur optimale de retard	250
Table 5.6 : Causalité au sens de Granger	251
Table 5.7 : Qualité de l'équilibrage dans la méthodologie par EBCT - SSA comme traitement	252
Table 5.8 : Estimation de l'effet de traitement par Entropy Balancing	253
Table 5.9 : Modèle à effets fixes avec variables instrumentales.....	257
Table 5.10: liste des IPC militaire (Acosta et al. 2011)	264
Table 5.11: liste des IPC aérospatiaux (OST28 de Schmoch (2008)).....	264
Table 5.12: Pays membres du panel.....	265
Table 5.13: Estimation du modèle PVAR.....	265
Table 5.14: Description des variables additionnelles.....	266
Table 5.15: Description statistique des variables	267
Table 5.16 : Coefficients de corrélation	267
Table 5.17 : Facteurs d'inflation des variances (VIF) pour les différentes spécifications du panel	268
Table 5.18 : Qualité de l'équilibrage dans la méthodologie par EBCT -SSA comme traitement	269
Table 5.19: Contrôles de robustesse – Sous-ensembles restreints	270
Table 5.20: Contrôles de robustesse – variables de contrôles additionnelles	271
Table 5.21 : Contrôles de robustesse – variable explicative alternative	272

Titre : Les relations entre sciences, technologies et territoires au cœur de la souveraineté nationale : une approche structurale sur longue période.

Mots clés : réseau de connaissances global, autonomie stratégique, innovation de défense

Résumé : Cette thèse explore la dimension territoriale des échanges de connaissances scientifiques et technologiques essentiels au processus d'innovation sur des domaines technologiques intéressant la défense, tels que l'armement, l'équipement aérospatial et l'impression 3D. Elle explore l'intégration des avancées scientifiques dans le développement technologique et analyse l'autonomie stratégique des territoires en tant que capacité à produire, utiliser et diffuser des connaissances de manière indépendante. Cette autonomie dans les secteurs stratégiques de l'innovation de défense est au cœur des enjeux contemporains de souveraineté nationale.

Adoptant une perspective institutionnaliste, cette recherche positionne le processus d'innovation au sein d'un système d'innovation national, envisageant le territoire comme une entité sociale, politique et culturelle qui facilite l'échange de connaissances. Notre démarche empirique repose sur l'utilisation de données de brevets d'invention et d'articles scientifiques à grande échelle pour créer des réseaux de connaissances mondiaux, fondés sur les citations et la proximité sémantique. Nous adoptons pour cela une approche structurale qui mobilise la théorie des graphes d'influence, combinée à des méthodes économétriques robustes pour interpréter nos mesures.

Nous observons l'existence de deux réseaux de connaissances à l'échelle mondiale. Le premier, composé de connaissances explicites, facilement diffusables et assimilables par les différents territoires. L'analyse de ces réseaux permet de comparer la maîtrise des connaissances stratégiques entre territoires, identifiant des situations de domination ou de dépendance vis-à-vis des productions extérieures.

Le second réseau, plus ancré localement, inclut des connaissances tacites, incarnées dans les individus et leurs réseaux d'interactions sociales et donc géographiquement bornées. Ce réseau permet d'expliquer la persistance des expertises nationales à long terme, malgré l'internationalisation des échanges de connaissances facilitée par la mondialisation et le développement des technologies de l'information et de la communication.

Nous démontrons que la coexistence de ces réseaux est cruciale dans le processus de maturation des connaissances. Bien que l'activité scientifique soit plus codifiée et globalisée que l'activité technologique, elle présente un fort ancrage territorial, stimulant l'innovation locale par des échanges de connaissances tacites. Ces résultats soutiennent le financement de certains domaines scientifiques comme vecteur pour renforcer la souveraineté nationale sur les innovations stratégiques.

Title: Relationships between Science, Technology, and Territories at the Heart of National Sovereignty: A Structural Approach over a Long Period

Keywords: global knowledge network, strategic autonomy, defense innovation

Abstract: This thesis delves into the territorial dimension of scientific and technological knowledge exchange, a pivotal aspect of the innovation process. It focuses on defense-related technological fields, such as weaponry, aerospace equipment, and 3D printing, to scrutinize how scientific advancements are integrated into technological development. Furthermore, our analysis focuses on measuring strategic autonomy of national territories, assessing their capacity to independently produce, use, and disseminate knowledge. This form of autonomy in critical defense innovation sectors is a key factor in current discussions on national sovereignty.

From an institutionalist viewpoint, this manuscript situates the innovation process within the national innovation system framework. In this context, territory is understood as a social, political, and cultural construct that facilitates interactions and the exchange of knowledge.

Our empirical method mobilizes quantitative methods using a large number of patent data and scientific publications to establish global knowledge networks, based on citations and semantic proximity. In this regard, we employ a structural approach, integrating influence graph theory consolidated with econometric models.

Our findings reveal two distinct global knowledge networks. The first, encompassing explicit knowledge, can be easily disseminated, and assimilated across various territories. The analysis of these networks permits a comparative evaluation of the control over strategic knowledge among different territories, highlighting situations of dominance or dependence on external sources of knowledge. The second network, with more local roots, comprises tacit, applied knowledge that is intrinsic to individuals and their social interaction networks, thereby being geographically bounded. This network accounts for the sustained presence of national expertise over an extended period, notwithstanding the globalized nature of knowledge exchange driven by globalization and the advancement of information and communication technologies.

Our study shows that the coexistence of these networks is essential in knowledge maturation. Despite the more codified and globalized nature of scientific activity compared to technological, it retains strong territorial ties, fostering local innovation through tacit knowledge exchange. These insights suggest that investments in specific scientific domains are crucial for enhancing national sovereignty in strategic innovations.