

Quels modèles pour une recherche à double impact ? Entre recherche et innovation, organiser des couplages sans asservissements

Pascal Le Masson

Prof. MINES ParisTech – PSL, Chaire de théorie et méthodes de la conception innovante

Les défis et les menaces contemporaines, qu’il s’agisse des objectifs de développement durable ou les transitions de tous ordres (climatique, énergétique, digitale...), obligent à poser à nouveaux la question du rapport entre recherche et innovation – car si la question n’est pas nouvelle, les réponses apportées par le passé n’en semblent pas moins à leurs limites. Comment faire en sorte que la recherche ne soit pas trop éloignée des préoccupations socio-économiques (ce qui était la logique de l’open innovation ou des formes de recherche industrielle très intégrée au processus de développement de produit/services), sans pour autant lui faire perdre son autonomie d’exploration (ce qui était la logique du modèle linéaire) ? En quoi consiste cette « bonne distance », garante de serendipity, i.e. ces rencontres « de hasard » qui permettent des découvertes et des inventions originales ? Et finalement comment organiser ces hasards, comment organiser cette serendipity ?

La réponse à ces questions reste bien sûr largement à inventer aujourd’hui mais je voudrais montrer ici comment les derniers résultats obtenus en théorie de la conception permettent aujourd’hui d’ouvrir des perspectives originales et fécondes, de mieux comprendre certains couplages réussis, voire d’en organiser de nouveaux. On soulignera notamment comment cette approche apporte un éclairage nouveau sur les questions usuelles telles que : comment « synchroniser » les chercheurs et les innovateurs ? Comment combiner publications de haut rang et utilité économique ? Comment gérer les risques de la science fondamentale ?

Recherche et impact : de la double contrainte au double impact

Depuis au moins 150 ans se sont multipliées les organisations pour coupler science et innovation. Depuis la deuxième moitié du 19^{ème} siècle, l’entreprise a ainsi inventé des formes variées de recherche industrielle (voir les nombreux travaux sur le sujet, voir pour une synthèse (Le Masson et al. 2017; Le Masson and Weil 2016)). En parallèle apparaissaient des institutions de recherche originales, parfois à la suite de débats d’ampleur nationale – c’est le cas du CNRS, né notamment du débat entre partisans de la science industrielle et ceux de la science pure (voir (Eidelman 1986)), ou de la création des dispositifs fédéraux de soutien à la recherche fondamentale aux Etats-Unis suite au très célèbre rapport Bush ‘science the endless frontier’ (voir (Bush 1945 ; Godin 2006)). Au fil du temps, des contextes industriels et scientifiques variés ont conduit à inventer et faire évoluer des solutions de couplage entre science et innovation – avec quelques jalons notables comme la création du CEA en 1945, de

la Fraunhofer Gesellschaft en 1949, l'invention du modèle de recherche de l'Ecole des Mines de Paris dans les années 60, ou plus récemment la création des Instituts Carnot.

De cette riche histoire, une représentation simplifiée tend à retenir deux logiques opposées :

- 1- La première est celle du modèle dit « linéaire » dans lequel les conquêtes d'une science fondamentale autonome seraient ensuite « appliquées ». Ce modèle a rencontré d'importantes difficultés. Ce n'est pas que la science travaille mal, mais transformer une science en applications n'a rien d'évident. Et la difficulté ne tient pas (ou pas seulement) aux éventuelles tensions institutionnelles qui pourraient exister entre une recherche publique et celle des entreprises privées – en effet, au sein même des entreprises, la coordination entre les services de recherche centraux, en charge de la recherche fondamentale, et les bureaux d'études et les départements applicatifs a toujours été délicate, conduisant notamment dans les années 90 à ce que les journalistes ont appelé le « bain de sang de la recherche » dans les entreprises américaines (Buderl 2000). Bien que très critiqué, ce modèle de la recherche « appliquée » reste très présent, par exemple lorsqu'il est question d'entrepreneuriat à partir des résultats scientifiques des laboratoires de recherche. Mais force est de constater le succès limité de ces actions de type « valorisation de la recherche fondamentale ».
- 2- La seconde logique est celle d'une recherche résolutoire, travaillant à résoudre les problèmes posés par l'industrie : ce modèle correspond notamment à la vague de l'open innovation des années 2000-2010s. Il tend à représenter la relation entre science et industrie comme une relation « offre / demande » dans lequel la science offre des réponses aux demandes de l'industrie. On sait aujourd'hui que s'il peut prendre en charge des problèmes bien circonscrits, il n'est pas adapté aux enjeux de rupture et d'exploration de l'inconnu (Sieg et al. 2010).

Constatons que ces modèles fonctionnent de façon symétrique en termes de couplage : dans le premier cas la recherche « entraîne » (au sens mécanique du terme) l'innovation ; dans le second, symétriquement, l'innovation « entraîne » (on pourrait aussi dire, en restant dans le champ sémantique de la mécanique : « asservit ») la recherche. Constatons aussi qu'en termes d'impact, du point de vue de la recherche, ces modèles fonctionnent aussi de façon symétrique : le premier donne prééminence à l'impact scientifique (le progrès de la science), le second à l'impact industriel (l'innovation, le développement de produits et de services). Avec du coup un point commun des deux modèles : ils partagent l'hypothèse d'une forme d'opposition entre les deux impacts. L'impact scientifique semble se faire au prix de l'impact industriel et vice-versa.

Constatons encore que, même s'ils ont été opposés, ces deux modèles partagent, pour leurs critiques, un autre point commun : finalement ils sont jugés trop peu performants en termes d'exploration, en termes de découvertes et d'invention. En cela ils semblent insuffisants pour faire face aux enjeux évoqués en introduction : les transitions énergétiques, digitales,

écologiques supposent aujourd'hui d'importants efforts de recherche et d'innovation, des découvertes et des inventions de tous ordres – sauf à tomber dans des dilemmes insupportables. En sciences de gestion, on adore les dilemmes décisionnels, sacrificiels, du type : « Supposez que vous avez un véhicule autonome, les freins vont lâcher. Faut-il le programmer pour qu'il écrase les piétons ou qu'il tue les occupants ? » On peut débattre longtemps de cette question mais on peut aussi oser réclamer des explorations supplémentaires pour sortir du dilemme – les concepteurs répondront : « laissez-nous concevoir une alternative meilleure que les deux précédentes – nos anciens avaient bien déposé le brevet du ramasse-piéton dès 1907 ». Et aujourd'hui les dilemmes sacrificiels sont nombreux - le glyphosate ou la famine, la transition énergétique ou la paix sociale – et il ne s'agit pas de trancher mais bien plutôt d'inventer et de découvrir pour parvenir à une agriculture productive et sans glyphosate, ou à une transition énergétique et soutenable. Les besoins contemporains d'exploration sont donc importants. Or, par ailleurs, les progrès de la science de la conception ont aussi permis de développer des techniques pour analyser les biais et les fixations qui limitent certaines explorations – et ils mettent ainsi en évidence des formes de fixation voire d'innovation orpheline parfois inquiétantes (Agogué et al. 2012). Il est donc nécessaire d'inventer des formes de couplage entre recherche et innovation qui permettent d'aller au-delà de ce que les modèles évoqués précédemment peuvent faire.

Mais nous avons ici quelques raisons pour être optimistes. Car en remontant dans l'histoire on trouve aussi des anomalies, des cas singuliers illustrant finalement une forte capacité d'exploration et un double impact, à la fois scientifique et industriel. Certains cas sont même assez amusants. Ainsi, quand Max Planck se lance dans les travaux fameux que l'on connaît (et qui aboutiront au prix Nobel), c'est parce que Siemens lui a demandé de chercher une mesure originale de l'intensité lumineuse. Chacun connaît Pasteur travaillant sur une anomalie constatée par un fabricant d'alcool de betterave et découvrant ainsi le rôle des levures dans la fermentation (Debré 1994); ou la relation très féconde entre Fayol, Guillaume et Chevenard, qui conduira à la fois au prix Nobel pour Charles-Edouard Guillaume et à des percées technologiques dans les aciers spéciaux et leurs applications au début du 20^{ème} siècle (Hatchuel and Segrestin 2018 ; Le Masson and Weil 2016). Ou bien sûr les Bell Labs de l'après-guerre (Morton 1971), cumulant eux-aussi prix Nobel et percées technologiques.

Ces exemples montrent que l'opposition entre impact scientifique et impact industriel n'est peut-être pas inévitable, que le double impact n'est pas nécessairement un double fardeau et qu'au contraire, il pourrait y avoir des formes de synergie dans la recherche de double impact. Il est donc intéressant de se demander comment s'organiser de telle façon qu'il y ait double impact sans qu'il y ait double contrainte. Tout l'enjeu est là. Dans le cadre de ce séminaire, nous le traiterons plutôt du point de vue de la recherche : comment la recherche peut-elle viser des formes de double impact synergique, à la fois impact scientifique et impact industriel. Mais on peut symétriser - car du point de vue de l'industrie aussi cet effet de double impact peut être recherché, la recherche d'un impact scientifique pouvant conduire aussi à des impacts en termes d'innovation.

Nos propres institutions (le CEA, l'École des Mines, etc.) ne cessent de réfléchir à la manière d'inventer des formes qui permettent le double impact (voir par exemple (Blanc and Denis-Remis 2017)). Au niveau mondial, depuis un très petit nombre d'années, c'est aussi un vrai enjeu scientifique. Je vous renvoie, parmi d'autres études récentes, à l'excellent livre écrit par Venkatesh Narayanamurti (ancien *dean* de l'*engineering school* de Harvard) et Toluwalogo Odumosu, qui expliquent comment l'*engineering school* a contribué au dynamisme scientifique qui s'est traduit par tant de prix Nobel (Narayanamurti and Odumosu 2016). Un article cosigné par Venkatesh Narayanamurti et Anna Goldstein montre aussi que certaines branches du DoE (department of energy) ont cette puissance de double impact (Goldstein and Narayanamurti 2018). Du coup, on peut formuler les questions de la manière suivante : à quelles conditions a-t-on un couplage entre chercheurs et innovateurs qui permettent un double impact, à la fois en termes de science et d'innovation ? Peut-on imaginer d'organiser la relation entre sciences et industries comme un couplage vertueux, au lieu de se laisser enfermer dans les deux logiques opposées qui voient l'industrie dicter ses objectifs à la recherche, ou la recherche dicter ses applications à l'industrie ?

Imaginer un couplage sans asservissement : valeur de l'indépendance dans les raisonnements créatifs.

Il s'agit de modéliser la relation entre « recherche » et « industrie ». Et notre modélisation va prendre deux partis essentiels (qui la distinguent en fait, mais ce serait trop long à montrer ici, des approches habituelles) :

a) nous ne prenons pas la question au niveau institutionnel mais au niveau des raisonnements – les termes de « recherche » et « d'industrie » sont en fait assez ambigus, car il y a de la recherche dans l'industrie (depuis 150 ans au moins) et il y a de l'industrie dans la recherche (il suffit de voir l'anneau du CERN) ; en revanche il est intéressant de se demander ce qui distingue le raisonnement du *chercheur scientifique*, en charge d'explorer les inconnus du savoir scientifique, de celui d'un *innovateur*, en charge de développer de nouveaux produits ou services – ce sont ces deux acteurs, leurs raisonnements et leurs interactions, qui nous importent ;

b) ces deux acteurs ont une caractéristique commune : ils explorent l'inconnu – les inconnus de la science ou les inconnus désirés par nos sociétés en termes de produits et services ; et il s'agira précisément de rendre compte des spécificités du raisonnement dans l'inconnu. Grâce aux travaux de la science de la conception, et aux progrès récents de la théorie de la conception, il est aujourd'hui courant de modéliser le raisonnement du concepteur de produits et de services comme un raisonnement dans l'inconnu (Le Masson et al. 2018 ; Le Masson et al. 2013; Le Masson et al. 2017). En revanche le raisonnement du scientifique est plus souvent assimilé à la production de savoir qu'à l'exploration de l'inconnu – même si les scientifiques eux-mêmes ont parfois souligné cet enjeu dans leurs écrits (voir Poincaré

(Poincaré 1908 ; Hadamard 1945) ou la célèbre lettre d'Einstein à Solovine (Einstein 2011 ; Holton 1981)).

Les avancées récentes de la théorie de la conception (Hatchuel et al. 2018), et notamment de la théorie C-K (Hatchuel and Weil 2009), offrent aujourd'hui des éléments essentiels pour répondre aux deux enjeux mentionnés ci-dessus : d'une part il s'agit d'une théorie du raisonnement dans l'inconnu ; et d'autre part il a été montré que cette théorie du raisonnement dans l'inconnu pouvait s'appliquer à des situations de conception très variées, qu'il s'agisse de la conception de produits et services ou de la conception de résultats scientifiques (Hatchuel et al. 2013). On a donc aujourd'hui les moyens de modéliser deux concepteurs différents, avec leurs logiques conceptives propres : leurs connaissances (évidemment différentes), mais aussi leurs « inconnus désirables » (différents ou non), leurs exigences spécifiques en matière de preuve de vérité. Certes la réalité est souvent plus nuancée, le chercheur pouvant se comporter en innovateur de produit et vice-versa. Mais c'est précisément en partant d'archétypes « purs » qu'on pourra mieux comprendre à la fois les différences de logique et leurs interactions.

On modélise ainsi un concepteur ayant une logique conceptive d'« innovateur de produits et services » et un concepteur ayant une logique conceptive de « chercheur ». Dans ce second cas les connaissances sont notamment scientifiques, les inconnus désirables sont liés aux inconnus scientifiques tels que des anomalies ou des conjectures, la logique de preuve est liée aux régimes de contrôle de la production de savoir. Il s'agira pour ce concepteur de concevoir de nouvelles théories expliquant des anomalies, de nouveaux modèles, de nouvelles hypothèses, de nouvelles démonstrations pour prouver des conjectures, de nouveaux instruments scientifiques, de nouveaux protocoles, etc. Chacune de ces logiques provoquera un impact « simple » (impact scientifique pour le concepteur-chercheur ; impact industriel pour le concepteur-innovateur). Et on s'intéressera à l'interaction entre ces deux logiques : on regardera ainsi quelles connaissances sont échangées ; et aussi quels concepts sont partagés.

Sans entrer ici dans les détails de modélisation (nous renvoyons sur ce point à (Plantec et al. 2019)), soulignons quelques propriétés majeures du modèle (pour une vision plus large des implications, nous renvoyons à (Le Masson and Weil 2019)) :

- 1- La modélisation invite à distinguer deux situations très différentes : les deux concepteurs peuvent travailler sur un inconnu commun – et dans ce cas les formes de collaboration ont été déjà largement étudiées (voir les organisations RID, voir les méthodes KCP - voir aussi les méthodes de matching building consistant à élaborer cet inconnu commun, etc. (Gillier et al. 2010)) ; soit les deux concepteurs travaillent sur des inconnus différents – et dans ce cas les formes d'interaction sont nettement plus complexes et ont été plus rarement étudiées (on pourra se référer très utilement aux situations de type bio-inspiration (Freitas Salueiro and Hatchuel 2016 ; Nagel et al. 2016 ; Prabakaran et al. 2019)). Or dans le cas de la relation recherche / industrie, la première situation va donner aussi priorité à une forme d'impact sur l'autre (un

concept commun « scientifique » conduira préférentiellement à un impact scientifique, un concept commun « innovation » conduira préférentiellement à un impact industriel). *Et c'est la seconde situation, celle des concepts autonomes, qui peut offrir des formes de double impact.* Dans ce cas, on modélisera des situations où un chercheur explore des concepts relatifs uniquement aux frontières du savoir scientifiques, sans souci « d'application », mais pourtant en contact avec un concepteur « innovateur », travaillant lui sans souci de succès scientifiques.

- 2- Chacun de ces concepteurs aura des capacités d'exploration limitées par les connaissances disponibles et par les fixations cognitives. Les biais cognitifs du concepteur de produit ont souvent été énumérés : raisonnement sur les besoins à court terme, tendance à limiter la production de connaissance, etc. Le raisonnement du chercheur n'est pas exempt de biais : tendance à explorer dans des voies publiables, enjeu à tenir compte des moyens d'essais disponibles, etc. Ces fixations sont autant d'obstacles aux impacts recherchés.
- 3- Il est assez évident de voir comment le rapprochement entre les deux concepteurs peut provoquer un *accroissement* des fixations chez l'un des acteurs : par exemple en voulant tenir compte a priori des possibilités d'applications, le chercheur risque de restreindre le champ de ses explorations. En voulant utiliser des résultats scientifiques issus d'un laboratoire de recherche, l'entrepreneur risque de restreindre ses voies d'innovation. En ce sens, des modèles de relation de type « offre / demande » vont généralement conduire à un rétrécissement des explorations chez l'un des acteurs, tout en enrichissant éventuellement l'exploration de l'autre. Il faut bien sûr rappeler que c'est parfois l'objectif recherché : un pilotage par l'industrie pourra conduire à un plus fort impact industriel (qui pourra utiliser des résultats scientifiques), mais au prix d'un impact scientifique faible pour la recherche ; et réciproquement un pilotage par la science pourra conduire à un impact scientifique fort (parce qu'il pourra utiliser les capacités de conception de l'industrie) mais au prix d'un impact industriel parfois faible (car la conception sera par exemple limitée à de très petites séries, très spécifiques).
- 4- Il est aussi possible de voir comment le rapprochement entre les deux concepteurs peut provoquer une augmentation des capacités de générations d'alternatives. En effet la théorie de la conception indique que les capacités de conception s'étendent grâce à la maîtrise de nouvelles connaissances *indépendantes*, i.e. des connaissances qui ne peuvent se déduire des connaissances disponibles antérieurement (ni par déduction, ni par inférence). C'est une propriété majeure de la valeur de la connaissance en conception : nous avons tous été formés dans le cadre de la théorie de la décision statistique, et nous avons tendance à valoriser les connaissances dépendantes ; en effet, en théorie de la décision statistique, c'est le fait que Y dépende de X qui fait que la connaissance sur X a de la valeur si l'on doit décider sur Y – et inversement : si Y ne dépend pas de X, alors les décisions sur Y ne seront pas améliorées par une connaissance sur X ; or la conception valorise au contraire les

connaissances *indépendantes* car si X est indépendant des Y connus, alors X aidera d'autant plus à concevoir des Y différents des Y connus.

En pratique la science peut précisément apporter à l'industriel des voies inattendues (nouveaux phénomènes par exemple); l'industriel apporte à la science des connaissances originales (anomalies, nouvelles données, nouveaux instruments, nouvelles capacités de traitement, etc.). Ces connaissances indépendantes peuvent avoir notamment des effets défixant, en poussant l'industriel à explorer plus largement (au-delà de ses a priori sur le 'court terme') ou, réciproquement, en poussant le chercheur à s'intéresser à des questions scientifiques qui ne sont pas (encore) des sujets publiables dans une communauté scientifique.

Le modèle permet ainsi de comprendre qu'une relation de double impact synergique va supposer d'accepter deux logiques conceptrices autonomes, ne partageant pas nécessairement un inconnu commun ; et que l'enjeu sera dans la capacité à s'échanger des connaissances indépendantes des connaissances dont chacun dispose. Il faut donc préserver une étrangeté mutuelle tout en assurant un échange de « bonnes surprises ».

Observons ce que cela peut signifier en pratique. Comment la recherche produit-elle des connaissances scientifiques indépendantes mais intéressantes pour l'industrie ? Cela passe par le fait d'orienter l'exploration vers des solutions vers lesquelles l'industrie ne saurait pas aller spontanément. Il n'est pas toujours très utile d'espérer mieux optimiser que le bureau d'étude de l'entreprise (moins cher, plus rapide, etc.). En revanche il est souvent intéressant d'explorer des solutions alternatives auxquelles le bureau d'études n'a pas été en mesure de penser. La fameuse découverte du nylon tient au fait que la laboratoire de recherche central de Du Pont explorait les réactions de polymérisation alors que le département rayonne de l'entreprise continuait à optimiser les textiles cellulosiques (Hounshell and Smith 1988).

La science peut aussi aider l'industrie à raisonner sur des technologies génériques multi-applicatives, là où l'industrie pourrait être tentée de raisonner plutôt en termes de mono-industrie. Un raisonnement prouvant la validité d'une performance multi-applicative est un service rendu à un industriel. C'est par exemple le cas des travaux réalisés sur les fluides super-critiques, qui ont permis d'étendre progressivement le champ des applications de ce procédé (Hooge et al. 2016). Dans ce cas ce n'est pas seulement une entreprise, ni même un secteur mais des pans entiers de l'industrie qui seront impactés.

Troisième dimension : la science va proposer des dimensions nouvelles, des métriques, des capacités à mesurer qui indiqueront des axes de valeur, y compris la valeur négative des effets à éviter. Autant d'axes sur lesquels l'industrie devra trouver des positions. Il est ainsi étonnant de voir la multiplication des critères permettant de qualifier la qualité de l'eau – critères qui ont progressivement intégrés les formes de pollution découvertes par la recherche (bactérie, perturbateurs endocriniens bientôt des critères liés aux « effets cocktail ») (Beduneau-Wang 2017).

Interrogeons à présent la manière dont les chercheurs peuvent se mettre à l'écoute des connaissances indépendantes venues de l'industrie, et s'appuyer sur ces connaissances pour progresser ou imaginer de nouveaux axes de recherche. Prenons pour exemple la capacité à entendre les anomalies, les phénomènes bizarres. Dans ce contexte, la tentation peut être de dire aux opérateurs, en cas d'anomalie, qu'ils ont mal fait l'expérience ou qu'il ne s'agit que d'un « artefact ». Mais vient un moment où l'on s'aperçoit qu'il y a véritablement quelque chose de bizarre, et cela oblige à reprendre fondamentalement certaines théories. Cette capacité à être sensible aux anomalies prédispose évidemment à se laisser surprendre par les nouveaux instruments ou à se montrer capable d'aller chercher les nouveaux instruments qu'on n'avait pas pensé utiliser jusqu'à présent. L'anomalie est un cas un peu extrême (Fallen 2012) – plus généralement la science bénéficiera de connaissances « indépendantes » dès lors qu'elle sera amenée à prendre en compte des variables jusqu'à présent négligées dans ses modèles : découverte des effets du « vivant » dans les mécanismes de fermentation ou découverte de la chiralité par exemple, découverte de phénomènes d'échelle inattendus (comportements surprenant à l'échelle nano ou à des températures ou des pressions extrêmes)...

Parmi les exemples les plus illustres, on peut citer Galilée et la lunette – un instrument récemment inventé, d'abord utilisé par les seuls militaires, et que vers 1610 il fut le tout premier à avoir l'idée de tourner vers le ciel [armée, ciel, univers indépendants (méthodes d'investigation différentes ?...):]. Mesurer l'intensité lumineuse n'était pas forcément une question majeure en sciences à l'époque de Max Planck. Il a pris la question au sérieux et on voit où cela l'a conduit. L'ampoule électrique fut une mine de phénomènes tout à fait surprenants. Elle a conduit à la découverte des plasmas et a valu le prix Nobel à Coolidge, chercheur des laboratoires de General Electric. Cette capacité à rebondir sur le phénomène industriel a donc été une ressource pour la science – et symétriquement la capacité à écouter les résultats de la science, sans forcément chercher à l'asservir, a aussi conduit à des succès industriels majeurs.

Comment faire ? organisations, processus et formation pour des « couplages sans asservissement »

Ces quelques exemples illustrent bien la pertinence d'une approche faisant valoir l'apport réciproque de connaissances indépendantes, entre deux mondes – recherche, industrie – définis tout deux par leur logique de conception spécifique. Mais comment organiser cela ? Comment organiser deux logiques conceptives différentes, permettant l'échange de connaissances indépendantes – organiser donc un couplage (dont on sait maintenant qu'il doit être compris comme un échange de connaissances indépendantes) mais sans asservissement (au sens où chaque acteur préserve sa logique conceptive propre) ?

Même si les cas de double impact synergique ne sont sans doute pas très nombreux, il est intéressant de noter que les cas qui semblent relever de cette catégorie correspondent

effectivement au modèle de couplage sans asservissement. Je renvoie ici aux analyses qui ont pu être faites sur le fonctionnement des laboratoires de MINES ParisTech ou du CEA (voir notamment (Archambault 2017)) – et on retrouverait probablement des situations similaires en étudiant les fonctionnements de la Fraunhofer Gesellschaft, de certaines universités allemandes ou des programmes du DoE mentionnés par (Goldstein and Narayanamurti 2018), tous capables d’obtenir des résultats de type double impact synergique.

Un cas particulièrement exemplaire de double impact synergique sur très longue période et à une échelle mondiale est celui des semi-conducteurs : dans ce domaine, science et industrie sont en forte interaction et conduisent simultanément à des percées technologiques et à des percées scientifiques (ITRS 2007; Schaller 2004; Walsh 2004 ; Lange et al. 2013) ; nous avons pu montrer que la capacité d’exploration permet de surmonter les fixations et d’éviter tout effet « d’innovation orpheline » ; et nous avons aussi montré que ce succès repose largement sur une capacité de coordination dans l’inconnu remarquable, organisée au sein de l’ITRS, International Technology Roadmap for Semiconductors (Le Masson et al. 2012). Tous les quatre mois scientifiques et industriels de l’ensemble de la filière se réunissent pour réfléchir sur les grands défis auxquels la filière sera consacrée dans les années à venir si elle veut tenir la logique de la loi de Moore. Ils réfléchissent sur l’ensemble des questions ouvertes, les inconnus [différents ou communs ?] à explorer pour les vingt prochaines années. Les experts sont capables d’écrire dans la *roadmaps* de 2009, avec le plus grand sérieux : « il faudrait développer une presse de Gutenberg à l’échelle nanométrique », ou « une technique d’auto-positionnement des transistors à l’échelle nanométrique ». Quand le concept est formulé il ne renvoie encore à rien de précis. Et au fil du temps, scientifiques et industriels explorent les voies possibles autour de ces concepts, chacun à leur façon mais en toute connaissance des approches des uns et des autres. Dix ans plus tard, ces concepts fous conduisent à des développements technologiques surprenants et des percées scientifiques de très haut niveau. Cette coordination dans l’inconnu permet de rendre visible les différents concepts (les différents inconnus désirables) à explorer, que ce soit dans une logique d’impact scientifique ou d’impact industriel – elle permet aussi de repérer les complémentarités entre les voies et d’assurer une certaine circulation de « connaissance indépendantes ». Comment travaillent-ils ensemble ? Il n’y a pas de sélection, pas de décision ; tout est public, tout le monde peut télécharger la *roadmap* de l’ITRS. On passe beaucoup de temps à échanger sur les inconnus et la façon de les réagréger, de les rediscuter. L’organisation de l’ITRS est très étonnante du point de vue des sciences de gestion. Elle offre un remarquable exemple de réussite industrielle collective, marquée par une capacité à dialoguer sur les inconnus, les défis scientifiques et techniques, une capacité à se coupler sans s’asservir. Et on constate aussi que cela repose sur des logiques d’organisation très pointues : il y a des règles, des procédures, des mécanismes de coordination très sophistiqués qui tous concourent à l’exploration de l’inconnu. C’est très organisé : la dynamique de double impact synergique ne se réduit pas à une rencontre de hasard – on pourrait dire, comme on l’avait annoncé plus haut, qu’on a là très exactement une forme de serendipité organisée, une « rencontre de hasard » qui aurait été organisée !

Mais au-delà de ces cas exemplaires, quels seraient alors les moyens d'action en faveur d'un double impact synergique ? On ne peut que souligner immédiatement l'importance de mieux expliciter, valoriser et défendre les dispositifs qui obtiennent déjà des performances de double impact synergique – car les cas sont aussi rares que précieux. Comment en développer d'autres ? Il n'y a certes pas de 'one best way' ni de solution clé en main mais nous pouvons déjà évoquer quelques pistes.

Tout d'abord il est important de maîtriser les logiques de l'inconnu. On sait aujourd'hui que ce sont des raisonnements rigoureux, exigeants – et que les risques de biais et d'erreurs sont importants. En tant qu'enseignant, je ne peux qu'insister sur la nécessité de *former au raisonnement dans l'inconnu* ! Former les concepteurs de produits et de service au raisonnement de conception est devenue une évidence (dont témoigne la récente publication par les « Techniques de l'Ingénieur » d'un chapitre sur la théorie C-K (Le Masson et al. 2018)) – mais il s'agit aussi de former les chercheurs au raisonnement dans l'inconnu. Cela reste aujourd'hui beaucoup moins évident : les formations doctorales proposent certes des cursus pour se former aux « méthodes scientifiques », mais ils consistent le plus souvent en des formations aux statistiques et aux plans d'expériences (et aux data science). Pour l'inconnu, l'usage est de recommander au scientifique « liberté intellectuelle et curiosité » - mais les capacités innées ne suffisent pas forcément pour faire face aux complexités d'un raisonnement conceptif rigoureux (surtout s'il doit être partagé dans des programmes de recherche collectifs) ; et on pourrait dire que *se former au raisonnement conceptif, c'est s'émanciper intellectuellement et gagner en curiosité*.

Ces dernières années, des méthodes ont aussi été développées pour permettre des formes de double impact. L'INRA a ainsi joué un rôle pionnier, avec des succès remarquables (Vourch et al. 2018 ; Brun 2017) : dans le cadre des « métaprogrammes » (financement supportant la définition de projets de recherche interdisciplinaires), les chercheurs ont développé un processus dérivé de la théorie C-K qui permet de formaliser des voies de recherche plus originales, tirant mieux parti des interactions entre disciplines, notamment en intégrant des connaissances venues des pratiques des exploitants agricoles et des industriels.

Au-delà de la formation et des méthodes, il y a très probablement des *conditions institutionnelles* qui peuvent favoriser des logiques de double impact synergique. Nous travaillons aujourd'hui avec l'ANRT pour étudier les thèses CIFRE. Contrairement aux idées reçues, ce ne sont pas seulement des thèses de sciences appliquées. Les statistiques que nous avons commencé à établir avec l'ANRT montrent même plutôt l'inverse : on observe une proportion surprenante de thèses relevant de situations de co-exploration (Plantec 2019). Je renvoie ici à l'intervention de Clarisse Angelier qui donnera plus d'éléments sur ces travaux. Mais l'effet est tellement significatif qu'il ne semble pas être dû au hasard et il est possible que les conditions de contractualisation de la thèse CIFRE soient particulièrement favorables à des formes de co-exploration. On notera par exemple que la thèse CIFRE suppose un engagement sur longue période (3 ans) et que le processus de montage d'une thèse CIFRE impose d'organiser préalablement un dialogue entre un laboratoire de recherche et une

entreprise dans lequel chacun doit préciser ses intérêts propres et préciser aussi le processus de collaboration. De sorte qu'on systématise les opportunités d'échanger des connaissances jusqu'ici indépendantes et pourtant pertinentes. Ces éléments contribuent en fait à une forme de couplage sans asservissement.

Autre enjeu : l'évaluation. Il va de soi que l'évaluation du double impact suppose une évaluation multicritère permettant de saisir autant l'impact scientifique que l'impact en termes d'innovation. On sait aussi que les critères simplistes du type publication et brevets sont très largement insuffisants pour rendre compte de ces impacts – nous renvoyons ici à l'exposé de Valérie Archambault, dans cet ouvrage. Plus spécifiquement, la modélisation, en termes de raisonnements de conception, invite à évaluer la qualité de l'exploration – et il est intéressant de noter que la maximisation des publications ou des lancements de produits peut provoquer des effets de fixation et donc une baisse de la qualité d'exploration. Il est donc important d'avoir des critères d'évaluation qui soient adaptés aux enjeux d'exploration de l'inconnu. Cela permettrait d'évaluer non seulement la qualité des résultats mais aussi la qualité des processus en place : à l'heure où se multiplient les listes de « key enabling technologies » à développer ou les « agendas de recherche stratégiques » à financer, il serait ainsi possible d'évaluer la qualité de ces listes et de ces agendas en termes de structuration de l'exploration de l'inconnu. De premiers travaux en ce sens ont d'ailleurs été conduits avec succès avec Aeneas pour évaluer la qualité du « strategic research agenda » européen en matière de composants et de systèmes électroniques (Rémondeau et al. 2019).

De nouvelles pistes pour répondre aux questions récurrentes ?

Pour conclure, avant les tables rondes qui vont suivre et permettrons de rendre plus concrets ces propos généraux, revenons maintenant sur les questions récurrentes touchant au rapport science-industrie et voyons comment joue la logique des deux concepteurs :

- Question récurrente 1 : « comment synchroniser recherche et industrie ? ». On sent d'emblée que les réponses classiques vont conduire à des formes d'asservissement (l'une des deux temporalités s'impose : soit que la recherche « suive » les demandes de l'industrie, soit que l'industrie « attende » les résultats scientifiques) ou à des formes de découplages (ce sont deux temporalités inconciliables, il n'est pas question de les synchroniser). Le défi est donc réel. Mais la logique des deux concepteurs offre d'autres pistes : la conception rappelle d'abord que les horizons temporels sont contingents et construits par le concepteur lui-même, qui envisage des pistes plus ou moins originales, plus ou moins ambitieuses, plus ou moins exigeantes en termes de production de connaissances nouvelles. Un chercheur peut alors envisager de construire son agenda de recherche en fonction de ce qu'il sait de l'agenda de l'innovateur – non pas pour le suivre mais plutôt pour le challenger : explorer les voies que l'innovateur n'a pas vu mais aussi trouver plus rapidement des solutions sur des voies qui semblaient être de moyen terme - toujours dans une logique de produire les

connaissances indépendantes susceptibles de surprendre l'innovateur. *La synchronisation, c'est donc de connaître l'agenda pour s'en distinguer - et non pour s'y conformer.*

- Question récurrente 2 : « comment financer la recherche ? » Là aussi les réponses classiques tendent à pousser vers des formes d'asservissement ou de découplage (la recherche doit se faire financer par l'industrie vs la recherche doit être financée indépendamment de l'industrie). On sait aussi que les logiques de financement du « ressourcement » mises en place dans le cadre des instituts Carnot, ou les logiques de financement de la Fraunhofer Gesellschaft (un voire deux euro(s) publics pour un euro de contrat privé) peuvent aider à des formes de couplages sans asservissement, puisqu'elles vont permettre de financer la production de connaissances scientifiques qui peuvent le cas échéant, être construites pour venir surprendre les innovateurs industriels, pour leur apparaître comme indépendantes des connaissances dont ils disposent déjà. Plus fondamentalement, la logique d'exploration de l'inconnu invite aussi à raisonner non seulement au niveau du projet et au niveau de l'équipe de recherche mais aussi à *raisonner par grands espaces à explorer* : on pourrait imaginer que les financements aident à diversifier les explorations, favorisent les voies originales qui dépassent les fixations, permettent de contrecarrer les phénomènes d'innovation orpheline. C'est là que des outils d'évaluation de la qualité de l'exploration seraient utiles.
- Question récurrente 3 : « comment couvrir les risques liés à la recherche fondamentale ? » - la question sous-entend notamment que la logique court termiste industrielle ne permet pas d'explorer des voies de recherche fondamentale plus originales. A noter qu'il faut toutefois nuancer ce point car les entreprises ayant structurer des capacités de conception innovante sont tout à fait en mesure de lancer des projets de recherche très pointus sur des sujets dits fondamentaux – une conception innovante bien organisée est aussi une forme de gestion de risque extrêmement performante (voir ici par exemple les travaux d'Olga Kokshagina (Kokshagina 2014; Kokshagina et al. 2017; Kokshagina et al. 2015) et d'Agathe Gilain (Gilain et al. 2019)). Plus fondamentalement, ces travaux montrent que la couverture de ce type de risque suppose en fait des *formes de solidarité dans l'exploration de l'inconnu* : car le succès sur une voie d'exploration dépendra toujours des résultats parfois moins glorieux mais pourtant absolument critiques obtenus sur d'autres voies. Cela vaut bien sûr pour les bénéfices qu'une entreprise retirera d'une nouvelle technologie mobilisant des résultats de recherche ; mais cela vaut aussi pour un chercheur obtenant des résultats grâce aux multiples explorations de tous ses collègues (y-compris les explorations malheureuses !). L'exploration de l'inconnu et la gestion des risques associés supposent de nouvelles solidarités et des formes de collégialités, dont il faut bien reconnaître qu'elles sont difficiles à mettre en place à l'heure de l'individualisation des évaluations et de leur caractère fréquemment disciplinaire ou de la domination de la gestion par projet.

- Question récurrente 4 : « bien sûr il y a l'ITRS, mais on connaît aussi bien des formes de collaboration qui ne sont que des instances de lobbying, comment distinguer les plate-formes qui marchent et celles qui ne marchent pas ? ». Il faut admettre que tous les consortia ne sont pas nécessairement des collèges capables de structurer l'inconnu. Inversement il faut aussi rappeler que les collèges de type ITRS pourraient passer pour des formes d'ententes assez suspectes au regard du droit de la concurrence. C'est pourquoi il est essentiel *d'objectiver la qualité de l'exploration conduite par ces consortia*. C'est précisément parce que leurs agendas de recherche stratégiques ne présenteront pas (trop) de bais et de fixation qu'il sera possible de distinguer les consortia efficaces en termes d'exploration de ceux qui le sont moins (voire : ne cherchent pas à l'être !).
- Question récurrente 5 : « concrètement, comment réussir à publier dans des revues de rang A tout en ayant une utilité socio-économique ? ». Il n'y a probablement pas de recette miracle. Mais la modélisation en termes de logiques conceptives nous dit surtout que, précisément, dans les deux cas (conception d'un article scientifique ou conception d'un nouveau produit), le raisonnement de conception est toujours complexe. C'est le fait de le sous-estimer qui est peut-être le plus grand danger. Laisser croire à un innovateur que ce qu'il a fait est certainement publiable, c'est sous-estimer les exigences de la conception en science ; et symétriquement : laisser penser à un chercheur que son résultat scientifique a des applications simples, c'est sous-estimer les exigences de la conception industrielle. Donc il faut d'abord bien connaître les deux logiques conceptives pour éviter les désillusions amères. Ensuite, on aura compris aux exemples donnés ci-dessus, que le double impact ne doit pas forcément se penser au niveau individuel – le double impact synergiques suppose au moins deux concepteurs, souvent deux équipes de concepteurs, des réseaux complexes, des dispositifs lentement mis en place au fil des ans voire des générations. Concrètement, le succès est rarement celui d'un individu mais celui d'écosystèmes entiers, largement décrits dans la littérature (communautés épistémiques (Cohendet et al. 2000), sociétés proto-épistémiques (Cabanes 2017), etc.)
- Question récurrente 6 : « comment gérer les questions de confidentialité et de propriété ? » Là encore, il est clair que les réponses simples conduisent à des formes d'asservissement ou de découplage (les demandes de confidentialité pouvant faire obstacle à l'échange voire provoquer des formes d'appropriation rédhitoires pour la collaboration). On peut toutefois noter que l'approche conceptive permet de préciser les enjeux : il faut pouvoir gérer la confidentialité et la propriété avec l'objectif de maximiser les capacités de conception des acteurs. Et il faut bien admettre qu'un laboratoire de recherche peut parfois céder des droits de propriétés intellectuelles sans nuire à ses capacités d'exploration (en tenant compte toutefois du fait que préserver les capacités d'exploration peut aussi consister à préserver les capacités de contractualisation avec d'autres partenaires, ce qui peut compliquer la négociation !) ; en revanche, si l'on veut maximiser ces explorations, ces cessions de droits pourraient

aussi s'accompagner d'obligation d'exploitation, et d'obligation d'information sur les conséquences conceptives de ces exploitations de droits. Ces mécanismes amplifieraient les explorations et créeraient des connaissances indépendantes qui pourraient in fine intéresser les chercheurs (ainsi un résultat scientifique peut conduire à développer une technologie – et cette technologie peut à son tour révéler des phénomènes d'un grand intérêt scientifique).

- Question récurrente 7 : « et comment gérer les éventuels impacts négatifs ? (résultats scientifiques mobilisés à des fins destructrices, 'science sans conscience',...) ». Cette question appellerait de longs développements – et je préfère renvoyer ici aux travaux discutés lors d'un colloque de Cerisy récent. Je me contenterai d'indiquer que la relation entre science et entreprise est assez curieuse sur le plan des responsabilités : d'une part, dans une belle symétrie, la science et l'entreprise revendiquent à la fois une similaire liberté (liberté d'entreprise, liberté de définir ses programmes de recherche) et une forme de « responsabilité limitée » (responsabilité limitée de l'entreprise qui considère que sa responsabilité est limitée à ses actifs et à ses accords contractuels, responsabilité limitée de la science, qui considère qu'elle n'est pas comptable des usages qui sont faits de ses résultats) ; d'autre part on peut aussi constater que la déresponsabilisation de l'un est finalement gagée (garantie) par l'autre : la science peut se dédouaner des applications car l'entreprise s'en chargera – l'entreprise peut se dédouaner de certaines conséquences tant que la science n'a pas objectivé certains effets nocifs (effet de « perturbation endocrinienne », « effet cocktails », etc.). De sorte que cette question des impacts négatifs invite finalement d'un côté à mettre en évidence le risque de déresponsabilisation mutuelle – et de l'autre à examiner les conditions et les formes d'une responsabilité solidaire.

Références

- Agogué M, Le Masson P, Robinson DKR (2012) Orphan Innovation, or when path-creation goes stale: missing entrepreneurs or missing innovation? *Technology Analysis & Strategic Management* 24 (6):603-616.
- Archambault V (2017) La recherche collaborative à MINES ParisTech : quand recherche et industrie se rendent mutuellement inventives. In: Blanc I, Denis-Remis C (eds) *Histoires de sciences & entreprises*. Presses des Mines, Paris, pp 13-17
- Beduneau-Wang L (2017) *Valeur de l'eau et indicateurs de performance : tensions stratégiques et organisationnelles dans les métiers de l'eau (1853-2017)*. Université Paris-Saclay - Ecole Polytechnique, Saclay

- Blanc I, Denis-Remis C (eds) (2017) *Histoires de sciences & entreprises*, vol 1. Presses des Mines, Paris
- Brun J (2017) *Modéliser le pouvoir expansif de la structuration des connaissances en conception innovante : mise en évidence des effets génératifs du K-preordering grâce à l'étude du non-verbal*. MINES ParisTech - PSL Research University, Paris
- Buderi R (2000) *Engines of Tomorrow : how the world's best companies are using their research labs to win the future*. Simon & Schuster, New York
- Bush V (1945) *Science: the Endless Frontier: A Report to the President on a Program for Postwar Scientific Research*. Réédition 1960, National Science Foundation, Washington
- Cabanes B (2017) *Modéliser l'émergence de l'expertise et sa gouvernance dans les entreprises innovantes : des communautés aux sociétés proto-épistémiques d'experts*. MINES ParisTech - PSL Research University, Paris
- Cohendet P, Créplet F, Dupouët O (2000) *Organisational Innovation, Communities of Practice and Epistemic Communities : the Case of Linux*. In: *Economics with Heterogeneous Agents*. Springer, Berlin,
- Debré P (1994) *Louis Pasteur*. Grandes Biographies. Flammarion, Paris
- Eidelman J (1986) *Science industrielle contre science pure : la professionnalisation de la recherche dans les années 30*. In: Grelon A (ed) *Les ingénieurs de la crise, titre et profession entre les deux guerres*. Editions de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris,
- Einstein A (2011) *Letters to Solovine (1906-1955)*.
- Fallen C (2012) *L'anomalie créatrice*. Philosophie en cours. Kimé, Paris
- Freitas Salgueiredo C, Hatchuel A (2016) Beyond analogy: A model of bioinspiration for creative design. *AI EDAM* 30 (Special Issue 02):159-170.
- Gilain A, Le Masson P, Weil B (2019) The Hidden Feat Behind Development Cost Escalation - How Engineering Design Enables Functional Expansion in the Aerospace Industry. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design 1* (1):3011-3020.
- Gillier T, Piat G, Roussel B, Truchot P (2010) Managing Innovation Fields in a Cross-Industry Exploratory Partnership with C-K Design Theory. *Journal of product innovation management* 27 (6):883-896.
- Godin B (2006) The Linear Model of Innovation: The Historical Construction of an Analytical Framework. *Science, Technology, & Human Values* 31 (6):639-667.
- Goldstein AP, Narayanamurti V (2018) Simultaneous pursuit of discovery and invention in the US Department of Energy. *Research Policy* 47 (8):1505-1512.
- Hadamard J (1945) *The psychology of invention in the mathematical field*. Princeton University Press, New York
- Hatchuel A, Le Masson P, Reich Y, Subrahmanian E (2018) Design theory: a foundation of a new paradigm for design science and engineering. *Research in Engineering Design* 29:5-21.
- Hatchuel A, Reich Y, Le Masson P, Weil B, Kazakçi AO (2013) Beyond Models and Decisions: Situating Design through generative functions. Paper presented at the *International Conference on Engineering Design, ICED'13*, Séoul, Korea,
- Hatchuel A, Segrestin B (2018) A century old and still visionary: Fayol's innovative theory of management. *European Management Review* To be published.
- Hatchuel A, Weil B (2009) C-K design theory: an advanced formulation. *Research in Engineering Design* 19 (4):181-192.
- Holton G (1981) *L'imagination scientifique*. Bibliothèque des sciences humaines. Gallimard, Paris
- Hooge S, Kokshagina O, Le Masson P, Levillain K, Weil B, Fabreguette V, Popiolek N (2016) Gambling versus Designing: Organizing for the Design of the Probability Space in the Energy Sector. *Creativity and Innovation Management* 25 (4):464-483.
- Hounshell DA, Smith JK (1988) *Science and Corporate Strategy: Du Pont R&D, 1902-1980*. Studies in Economic History and Policy, the United States in the Twentieth Century. Cambridge University Press, Cambridge
- ITRS (2007) *International Technology Roadmap for Semiconductors - 2007 edition*.

- Kokshagina O (2014) *Risk Management in Double Unknown: Theory, Model and Organization for the Design of Generic Technologies*. MINES ParisTech, Paris
- Kokshagina O, Le Masson P, Bories F (2017) Fast-Connecting Search Practices: on the Role of Open Innovation Intermediary to Accelerate the Absorptive Capacity. *Technological Forecasting and Social Change* 120 (July 2017):232-239.
- Kokshagina O, Le Masson P, Weil B (2015) Portfolio management in double unknown situations: technological platforms and the role of cross-application managers *Creativity and Innovation Management* 25 (2):270-291.
- Lange K, Müller-Seitz G, Sydow J, Windeler A (2013) Financing innovations in uncertain networks—Filling in roadmap gaps in the semiconductor industry. *Research Policy* 42 (3):647-661.
- Le Masson P, Dorst K, Subrahmanian E (2013) Design Theory: history, state of the arts and advancements. *Research in Engineering Design* 24 (2):97-103.
- Le Masson P, Hatchuel A, Weil B (2018) Théorie C-K: fondements et implications d'une théorie de la conception. In: *Techniques de l'ingénieur*, vol J 8 115. Techniques de l'ingénieur, Paris, p 22
- Le Masson P, Weil B (2016) Fayol, Guillaume, Chevenard - la Science, l'Industrie et l'exploration de l'inconnu : logique et gouvernance d'une recherche conceptive. *Entreprises et Histoire* 83:79-107.
- Le Masson P, Weil B (2019) Histoire de l'entreprise et révolutions scientifiques : inventer des formes de liberté et de responsabilité face à l'inconnu. Paper presented at the *Colloque de Cerisy « entreprise, responsabilité et civilisation : un nouveau cycle est-il possible ?*, Cerisy, France,
- Le Masson P, Weil B, Hatchuel A (2017) *Design Theory - Methods and Organization for Innovation*. Springer Nature. doi:10.1007/978-3-319-50277-9
- Le Masson P, Weil B, Hatchuel A, Coge P (2012) Why aren't they locked in waiting games? Unlocking rules and the ecology of concepts in the semiconductor industry. *Technology Analysis & Strategic Management* 24 (6):617-630.
- Morton JA (1971) *Organizing for Innovation - A Systems Approach to Technical Management*. McGraw-Hill Book Company New York
- Nagel JK, Pittman P, Pidaparti R, Rose C, Beverly C (2016) Teaching bioinspired design using C-K theory. *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials* 6 (2):77-86.
- Narayanamurti V, Odumosu T (2016) *Cycles of Invention and Discovery - Rethinking the Endless Frontier*. Harvard University Press, Cambridge, MA
- Plantec Q (2019) Exploring practices in university - industry collaborations: the case of collaborative doctoral program in France. Paper presented at the *R&D Management 2019*, Palaiseau, France,
- Plantec Q, Le Masson P, Weil B (2019) The role of participating in user-driven research projects on scholar's academic performances: a model through C-K design theory. In: *EURAM 2019*, Lisbon, Portugal, 2019. European Academy of Management,
- Poincaré H (1908) La création mathématique. *Bulletin de l'Institut Général de Psychologie* 8 (3).
- Prabaharan GP, Nagel JK, Rose CS, Pidaparti RM (2019) Investigation of C-K Theory Based Approach for Innovative Solutions in Bioinspired Design. *Designs* 3 (3):39.
- Rémondeau E, Coge P, Le Masson P, Weil B (2019) Assessing and Improving the Coverage of a Strategic Research Agenda: A Design Theory Approach. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design* 1 (1):2785-2794.
- Schaller RR (2004) *Technological Innovation in the Semiconductor Industry: A Case Study of the International Roadmap for Semiconductors (ITRS)*. George Mason University, Fairfax, VA
- Sieg JH, Wallin MW, von Krogh G (2010) Managerial challenges in open innovation: a study of innovation intermediation in the chemical industry. *R&D Management* 40 (3):281-291.
- Vourch G, Brun J, Ducrot C, Cosson J-F, Le Masson P, Weil B (2018) Using design theory to foster innovative cross-disciplinary research: lessons learned from a research network focused on antimicrobial use and animal microbes' resistance to antimicrobials. *Veterinary and Animal Science* (accepted)

Walsh ST (2004) Roadmapping a disruptive technology: A case study: The emerging microsystems and top-down nanosystems industry. *Technological Forecasting and Social Change* 71 (1-2):161-185.