

SCIENCE, TECHNIQUE ET ECONOMIE

Pour une problématique de la traduction

Hugh AITKEN

© 1985 - Princeton University Press, translated and reprinted by permission
of Princeton University Press

© Réseaux n° 60 CNET - 1993 pour la version française.

Notre objectif* est de concevoir un modèle explicatif assez précis pour couvrir tous les détails de notre étude de cas sur la naissance de la radio, mais permettant également une généralisation. On peut procéder par approximations successives. Ce que nous recherchons est un cadre de référence permettant d'identifier les types d'interaction essentiels entre la science, la technique et l'économie afin de parvenir à comprendre comment, d'un point de vue historique, les changements intervenus dans un domaine donné ont influé sur les deux autres.

Le modèle déterministe (première approximation)

Le modèle le plus simple consiste à identifier la science comme la source de savoir nouveau, puis à définir les mutations technologiques et économiques comme les phases d'un processus permettant de convertir ces connaissances et de leur donner des formes adaptées à la satisfaction des besoins humains. De nombreux spécialistes considèrent ce modèle comme un paradigme approprié expliquant les changements techniques, du moins depuis

le milieu du XIX^e siècle. Dans sa version la plus simple, il correspond à la vision populaire du monde actuel. Dans ce sens, la technique actuelle, « fondée sur la science », est souvent opposée aux techniques traditionnelles et artisanales d'autrefois. De même, les taux de croissance économique des nations industrialisées au XIX^e et XX^e siècles sont souvent expliqués par les découvertes scientifiques et les structures institutionnelles plus efficaces apparues afin d'exploiter rapidement et pleinement ce savoir nouveau.

Ce modèle considère implicitement qu'il ne peut y avoir d'ambiguïté entre ce qui est et n'est pas la « science ». Cela peut n'être qu'un détail sans importance pour des études sur le monde contemporain, mais ce n'est pas le cas pour des études historiques. Ce modèle se heurte en effet à quelques difficultés lorsqu'on l'applique à des périodes antérieures au XVIII^e siècle, ou à des sociétés dans lesquelles le rôle social du scientifique n'est pas aussi clairement différencié que dans la nôtre. Pour résoudre ce problème, il suffit de recourir à la sémantique, et de définir comme science toute activité générant des connaissances nouvelles. Cela réduit le modèle explicatif à une tautologie.

On peut souligner d'autres difficultés. Selon ce modèle, les résultats scientifiques (les « découvertes ») se transforment en apports à la technologie qui les convertit en instruments ou procédés utiles (les « inventions »). Le modèle se fonde sur l'hypothèse que l'unique source de savoir nouveau technologiquement intéressant est générée par un ensemble d'activités regroupées, sur le plan social, sous le nom de « science ». Le modèle postule également que les nouvelles découvertes scientifiques sont indispensables à l'apparition de nouvelles inventions techniques et qu'elles déterminent, en outre, leur apparition dans le temps et leur contenu. De même, il postule que les innovations économiques découlent uniquement des inventions techniques, qui en définissent, à

* Ce texte constitue l'essentiel de l'épilogue du livre de Hugh AITKEN
Syntony and Spak - The origins of radio
Les intertitres sont de la rédaction

leur tour, l'apparition dans le temps et le contenu. En résumé, pour prendre une métaphore économique, ce modèle ne met l'accent que sur l'offre et non sur la demande. Il faut accepter beaucoup d'hypothèses pour qu'un tel point de vue soit plausible. Mais surtout – car des hypothèses peu probables peuvent malgré tout générer des conclusions utiles – ce modèle trop simple omet de poser bon nombre de questions, et en laisse beaucoup sans réponse.

L'origine du problème vient de ce que, dans ce modèle, les apports à chaque domaine ne sont pas définis entièrement et de l'idée que le niveau d'activité de chaque domaine est totalement déterminé par l'offre. On nous demande en effet de croire que la seule transaction entre la science et la technique est un transfert unilatéral (l'apport de connaissances scientifiques nouvelles) et que le rythme des inventions techniques dépend entièrement de cet apport. Il en va de même en ce qui concerne les interactions entre la technologie et l'économie : on suppose implicitement que le niveau et le contenu de l'innovation en économie dépendent totalement des inventions. Il est ici inutile de s'appesantir sur le côté artificiel de ces hypothèses. Sans vouloir diminuer l'importance de la technique, il est bien clair que le niveau d'activité d'un système économique et son taux de croissance sont influencés par d'autres variables, telles que la démographie, l'accumulation de capital et les changements institutionnels. En fait, il faudrait rejeter aux oubliettes la majeure partie des théories modernes de macroécono-

mie si l'on essayait de raisonner différemment. Le changement technique n'est pas le seul facteur à influencer sur un système économique, il existe d'autres forces exogènes, ainsi que des processus endogènes propres au système qui affectent son niveau d'activité et, par conséquent, son besoin d'apports émanant d'autres domaines, notamment un apport technologique. De même, il existe des processus internes similaires dans le domaine technologique, qui nécessitent des apports scientifiques, mais ne se limitent pas à ceux-ci. La technique possède sa propre logique immanente et ses propres « lois de mouvement », encore que nous les connaissions moins bien que la structure et la dynamique de l'économie (1).

Les découvertes

Ces considérations préliminaires sont largement étayées par notre étude de cas. S'il est une industrie que l'on peut en toute confiance décrire comme « fondée sur la science », c'est bien le domaine des communications radio. Pourtant, le contenu du système technique né des travaux de Hertz, de Lodge et de Marconi n'a, en aucun cas, été uniquement déterminé par la nature des découvertes scientifiques de Faraday et de Maxwell (2).

Cela est exact en ce qui concerne les détails : la mise au point de détecteurs de fréquences radio, pour ne prendre qu'un seul exemple, tels que la boucle de détection de Hertz ou la valve à diode de Fleming, a été un processus strictement technique, de nature hautement empirique, résultant d'une

(1) Cela en dépit du fait que l'Occident a développé une sensibilité extrême à l'impact social et écologique des technologies nouvelles, tandis qu'en Union soviétique, selon une étude récente, « aucune recherche n'a été effectuée dans la théorie marxiste-léniniste dans un domaine aussi essentiel que celui des « lois » technologiques postulées en permanence – la logique interne et la nécessité du progrès technologique ». Voir Reinhard RÜRUP, 1974, pp. 161-193, à la page 181 et HEILBRONER, 1967, pp. 333-345.

(2) L'influence de la demande sur le taux de production et les orientations des inventions, et de la recherche scientifique, a été clairement mise en évidence dans le remarquable travail empirique de Jacob Schmookler. La demande, selon le modèle postulé par Schmookler, est à l'origine des inventions qui viennent la satisfaire. On se reportera à Schmookler 1966 et 1972. Toutefois, comme l'a fait observer Nathan Rosenberg, « le rôle des forces d'influence de la demande n'a qu'une valeur explicative restreinte sauf si l'on parvient à les définir et les identifier indépendamment de la preuve que cette demande a bien été satisfaite ». ROSENBERG, 1974, pp. 90-108. Selon Rosenberg, pour pouvoir expliquer la succession historique des inventions, il faut accorder une attention toute particulière aux caractéristiques spécifiques du savoir scientifique à une période donnée. Les forces de la demande peuvent déboucher sur une invention réussie, mais les forces de l'offre déterminent la probabilité du succès et le coût éventuel de celui-ci. Cela paraît en tous points compatible avec les conclusions de notre étude de cas.

méthodologie d'essais/erreurs et dépendant bien plus des progrès techniques (par exemple la production de métaux plus purs et de vides poussés) que de nouvelles découvertes scientifiques. Il en va de même en ce qui concerne la mise au point des antennes (3). Il est possible d'appliquer une généralisation similaire au système tout entier (4).

Le système technologique de la « télégraphie sans fils » apporté par Marconi à l'Angleterre en 1896 faisait, bien entendu, usage des nouvelles connaissances scientifiques dues à Maxwell, Hertz et Righi, mais il utilisait également beaucoup d'autres éléments. Il faisait ainsi appel à toutes la technologie déjà existante de la télégraphie câblée, s'appuyait sur le savoir pratique accumulé par des générations entières sur l'électricité statique et les courants électriques, à tout cela, l'on peut ajouter une bonne dose d'intuition profane inspirée. Les nouvelles connaissances scientifiques étaient certes essentielles, et jouaient le rôle de catalyseur, mais le système technologique qui leur permettait de prendre une forme concrète s'avérait un mélange hautement créatif d'éléments anciens et nouveaux. Il suffit d'énumérer les composants typiques de la technique « sans fils » : les bouteilles de Leyden, les bobines d'induction, les codes Morse, les buzzers et les piles. Ils n'avaient rien de nouveau. Ils faisaient partie de ces connaissances courantes qui constituaient, pour ainsi dire, le capital-actions du XIX^e siècle. Le processus de mutation technologique ne consistait donc pas, dans ce cas précis, à recevoir passivement de nouvelles connaissances scientifiques, mais à intégrer de façon créative ce savoir dans un domaine qui avait autrefois été novateur, mais qui faisait désormais partie de « l'état de l'art » de tous les jours, c'est-à-dire d'un ensemble d'appareils connus et de méthodes éprouvées.

Il serait donc absurde de prétendre, du moins dans cet exemple, que les nouveaux apports scientifiques ont été les seuls à déterminer le contenu du système technologique dans lequel ils ont été utilisés. En revanche, peut-on affirmer qu'ils ont influencé l'apparition dans le temps de ce processus ? C'est une idée à laquelle on ne peut répondre sans observer une grande prudence. Ainsi, si l'on considère 1865, date de la parution de l'ouvrage de Maxwell, « *Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* », comme la date de la première exposition d'une théorie scientifique sur la radio-télégraphie, on constate qu'il a fallu attendre vingt ans encore avant que Hertz ne concrétise cette théorie en mettant au point des appareils de laboratoire permettant d'effectuer des mesures et de confirmer les hypothèses émises. Toutefois, neuf ans seulement se sont écoulés entre la publication des travaux de Hertz et de Lodge et le dépôt de brevet de Marconi. A quelle date peut-on dire que le nouveau savoir scientifique est devenu « disponible » pour la technologie ? Tout est question de définitions : où s'arrête la science pure, où commence la technologie ? Hertz et Lodge testaient tous deux le modèle de Maxwell, mais ne devaient parvenir à la découverte proprement dite que grâce à une nouvelle technique permettant de mesurer les ondes stationnaires. Il ne s'agit pas ici de remettre en question le côté remarquable de l'expérience. Le point qui nous intéresse est de déterminer dans quelle mesure leur succès peut raisonnablement être décrit comme technologique – une technologie hautement raffinée et sophistiquée, certes, mais qui reste néanmoins de la technologie. C'est un appareil, la boucle de détection de Hertz, qui a impressionné Lodge. Ce sont les câbles longs – application en réduction de la technologie du télégraphe – qui lui ont permis de réaliser ses mesures. Et c'est le fait

(3) Au sujet de l'importance des progrès accomplis au sein du système technologique lui-même, on peut consulter SCHMOOKLER, 1966, chapitre 4, et ROSENBERG, 1972.

(4) Les découvertes scientifiques de Maxwell et de Hertz auraient, bien entendu, pu être utilisées à des fins tout à fait différentes – par exemple en radiothérapie, de la même façon que les premières « machines électriques » avaient été utilisées à des fins médicales, fausses ou authentiques. La raison pour laquelle la première application de ces nouvelles données fut les communications est un problème d'ordre historique qui demande une explication. Que les communications en aient été la première, et pendant longtemps la plus importante utilisation, n'est pas un fait inhérent à la découverte elle-même. Sans doute, si les Occidentaux n'avaient pas éprouvé le besoin de « se faire entendre très loin », pour reprendre une expression de Lodge, les applications de ce nouveau savoir auraient-elles été tout autres.

que les deux hommes aient démontré comment il était possible de détecter les radiations électromagnétiques – il s’agissait donc d’un progrès technologique – qui a déclenché la découverte de Marconi

Il est inutile de s’attarder sur ce point. La trentaine d’années qui s’est écoulée entre la publication de la théorie de Maxwell et le brevet de Marconi a été consacrée à la mise au point d’appareils permettant de reproduire et de détecter les phénomènes définis par les équations de Maxwell. Que l’on choisisse de mettre l’accent sur le caractère technique du travail créatif qui a permis à ces recherches d’aboutir, ou, au contraire, de souligner que les connaissances implicites dans la théorie de Maxwell n’ont pas été disponibles en tant que connaissances exploitables avant 1888, reste largement une question de goût. Mais c’est précisément en raison de cette incertitude que l’idée que la chronologie de la découverte scientifique détermine celle de la découverte technique paraît un peu trop hardie, au vu des preuves dont on dispose.

C’est donc seulement dans un cadre très large et compte tenu d’un grand nombre de facteurs que l’on peut dire, dans ce cas précis, que la découverte scientifique a déterminé le contenu et l’apparition dans le temps de la découverte technologique. Il est clair qu’il faut tenir compte d’autres variables. De même, la découverte technique n’a pas été la seule à influencer la nature et l’apparition de l’innovation économique. Oliver Lodge en fournit l’exemple le plus flagrant. Dès 1894, il avait assemblé un système de radio complet et prouvé son bon fonctionnement, mais il n’en avait pas perçu l’utilité immédiate et le considérait tout au plus comme une curiosité intéressante. Pourtant, en 1892, Crookes avait pensé à la communication par ondes hertziennes et le futur partenaire de Lodge, Alexander Muirhead, lui avait explicitement fait observer le potentiel économique de son invention. Mais pourquoi se donner la peine de communiquer sans fils alors qu’on pouvait tout aussi bien le faire avec ? Lodge n’est pas le seul exemple de ce type, si c’était le cas, on pourrait expliquer son comportement par un trait de personnalité. Popov connaissait aussi bien que Lodge les travaux de Hertz et

était au courant des expériences de Lodge. Cependant, la seule utilité qu’il avait trouvée à la nouvelle technologie était une application météorologique.

Et que peut-on dire de Marconi ? Certainement avait-il perçu le potentiel économique des ondes hertziennes ? On peut se dire que, dans son cas, la science, transposée en une technique exploitable, avait dicté la forme et l’apparition dans le temps d’une innovation économique. Et pourtant, il n’en est rien. Exprimer le problème dans ces termes revient à se méprendre sur le génie de Marconi et l’importance de son rôle historique. Ce qui le différenciait de ses rivaux contemporains n’était pas sa compétence scientifique ni, à l’origine, un savoir-faire technique particulier. C’était son sens du marché, son aptitude à percevoir la demande existante ou potentielle d’une technique nouvelle. Marconi peut certes avoir été un inventeur de génie en électronique, mais il a aussi été un brillant entrepreneur. C’est ce talent qui a joué un rôle essentiel dans la naissance d’une industrie de la radio, précisément parce que la nature de cette technique n’indiquait pas en elle-même et sans ambiguïté ses potentiels économiques. Marconi, lui, avait compris quel créneau cette technologie pouvait se ménager dans le système économique, mieux, il est parvenu à gagner les autres à son point de vue. Son sens de la mise en scène, qui, parfois, agace les scientifiques, son don pour les relations publiques, qui a fait de son nom et de la TSF presque des synonymes, n’étaient pas des hasards, ni des caractéristiques inutiles d’une personnalité idiosyncratique. Au contraire, ils avaient une fonction, et cela prouve clairement que la nouvelle technique ne pouvait trouver son rôle économique de façon inévitable ou automatique. Il fallait lui dénicher ce créneau.

Créneau bien étroit, il faut ici le souligner. A qui servait donc cette technologie ? Jusqu’à la Première Guerre mondiale, la réponse tenait sans erreur en deux mots : à la marine et aux phares. L’idée de radio est aujourd’hui si étroitement associée à la communication de loisir qu’il est rétrospectivement presque choquant de penser que cet usage n’avait nullement été envisagé par ses inventeurs ni par les fondateurs de l’indus-

trie de la radio. C'est, en fait, une utilisation qui est venue se greffer sur une technique déjà créée. Quant aux communications longue distance point à point, on a déjà vu qu'elles représentaient une application marginale et très improbable. Jusqu'à la redécouverte des ondes courtes en 1920, la technologie traditionnelle de la télégraphie câblée, terrestre et sous-marine, avait peu de choses à redouter de la radio.

Le point principal est indéniable. Les communications marines, civiles et militaires, représentaient virtuellement le seul débouché de la nouvelle technique. Et encore fallait-il faire face à un fort scepticisme pour démontrer qu'elle convenait à ces applications. Sa diffusion, même pour des usages aussi restreints, demandait de grandes compétences commerciales. La nouvelle technique ne s'est pas muée en une innovation économique, pas plus que la découverte scientifique n'avait donné naissance à une technique nouvelle.

La temporalité

Abordons à présent la question chronologique. Il est clair que le développement commercial a suivi de très près le stade de la faisabilité technique. La société Marconi a été créée en juillet 1897, soit trois ans à peine après les expériences de Lodge sur les signaux à Oxford et quelques semaines après le dépôt du premier brevet de Marconi. Si, de façon plus réaliste, l'on fait remonter le développement commercial à 1901, époque de la conclusion des premiers grands contrats de la société Marconi, ceci nous mène à dix ans d'expériences d'Oxford et cinq ans du dépôt de brevet. Le développement a donc été très rapide. Le marché était restreint, mais a été exploité avec énergie et succès.

Cela ne signifie pas que l'aspect de la demande n'ait pas joué un rôle. Si on la considère dans une perspective large, l'apparition de la radio a sans nul doute été une réponse à un besoin croissant de communications à longue distance vers la fin

du XIX^e siècle. En particulier, la rapidité du développement commercial laisse clairement à penser que la nouvelle technique a surgi dans une conjoncture économique et technique favorable. Sans surestimer le rôle de William Preece, il faut bien admettre que, vers 1895, la futilité de la poursuite des travaux sur la télégraphie inductive était établie. D'un autre côté, les besoins en communications définis par Preece, la Lloyd's (5), et l'amirauté britannique ne pouvaient être satisfaits par une évolution marine de la technique désormais mature de la télégraphie par fil. Il existait donc une demande insatisfaite à laquelle la nouvelle technique pouvait répondre. Vers 1895, cette demande commençait à être explicitement reconnue, certes pas par le commun des mortels, mais par des personnes occupant des postes-clés et des responsables gouvernementaux chargés des communications. Jusqu'ici, notre récit s'est concentré sur l'Angleterre. Mais, en Allemagne, les brevets de Slaby, d'Arco et de Braun ont été exploités presque aussi rapidement et ont fait l'objet d'une aide officielle beaucoup plus importante. Aux Etats-Unis, le développement commercial a été plus spéculatif et chaotique, mais des hommes comme De Forest, Fessenden, Stone et Shoemaker avaient bien perçu la demande potentielle des systèmes qu'ils proposaient. La marine américaine avait, elle aussi, vite compris l'importance de la nouvelle technique dans le domaine du déploiement stratégique et des manœuvres tactiques. A cette époque, il y avait donc un besoin net d'une forme de communication capable de dépasser les limites des systèmes optiques ou par fil. L'opiniâtreté avec laquelle on avait poursuivi les expériences en télégraphie inductive et la rapidité des réactions d'institutions, telles que la poste britannique et plusieurs départements de la marine à l'apparition de la technique "sans fils", lorsque Marconi en eut démontré les possibilités, en témoignent.

La conjoncture économique était égale-

(5) PREECE était directeur technique du Post office; la compagnie d'assurance maritime Lloyd's s'intéressait également à la transmission avec les navires.

ment favorable en d'autres aspects 1896 marque l'un des points tournants de ce récit c'est l'année de l'arrivée de Marconi à Londres et du début de la phase commerciale Mais les années qui précèdent 1896 sont bien connues des économistes pour des raisons tout à fait différentes elles marquent la fin de ce que l'on a appelé – quelque peu incorrectement – la Grande Dépression de la fin du XIX^e siècle, une période d'une vingtaine d'années caractérisée par la chute des prix, des taux d'intérêt, la baisse des bénéfices dans la plupart des secteurs industriels, le marasme commercial et des tendances de marché baissières (6) Cette période n'a toutefois pas été une époque de chômage massif ni même de baisse des salaires Les salaires réels en Angleterre et aux Etats-Unis sont même en augmentation à cette période Il n'y a aucune preuve de baisse du revenu individuel ni d'une diminution du niveau de vie des classes ouvrières et moyennes (7)

En raison de ces caractéristiques apparemment paradoxales, les économistes ont manifesté un vif intérêt pour cette période Il est ici inutile d'analyser les ramifications de l'analyse, on laissera à d'autres le soin de conclure si 1895 a marqué un point culminant dans les économies anglaises et américaines et, si c'est le cas, quelles ont

été les raisons du retard apparent du taux de croissance économique (8)

Dans le cadre de cet article, il nous intéresse uniquement de noter que les prix ont commencé à monter au cours de 1896 et que le monde des affaires retrouvait un souffle nouveau (9) L'arrivée de Marconi à Londres, précisément cette année-là, était une coïncidence, mais la date a une signification symbolique indéniable Mais, tout symbolisme mis à part, l'industrie de la radio a été lancée à une époque où le taux de rendement du capital était faible et où, avec le changement des perspectives commerciales, il était plus aisé d'obtenir un capital risqué pour financer de nouvelles opérations que par le passé Ceci a fait une grande différence pour Marconi sur le plan personnel Le capital familial qui avait permis de financer initialement la société et de mener ses expériences récentes provenait d'une industrie qui, contrairement aux autres, avait prospéré au cours des dernières dizaines d'années La distillation d'alcool pouvait être un secteur intéressant en cas de déprime économique, et, tant qu'il n'y avait pas de chômage de masse, l'augmentation des salaires réels se doublait d'un accroissement des ventes du whisky de qualité Ce qui était vrai de Marconi en tant qu'individu l'était également, dans un contexte plus

(6) Voir SAUL, 1969 Tous les auteurs ne s'accordent pas sur les dates C H FEINSTEIN fait remonter le point tournant cyclique de la production totale (produit national brut) entre 1892 et 1893 En ce qui concerne les tendances des prix, son facteur de déflation des prix pour le produit national brut (1913 = 100) atteint une pointe de 109,2 en 1873, puis baisse de façon irrégulière jusqu'à 86 en 1896 Voir FEINSTEIN, 1972, p 16 et p T132, tableau 61

(7) Selon les estimations de FEINSTEIN, le pourcentage de la population active des chômeurs en Grande-Bretagne a dépassé 5 % au cours de six ans, seulement dans la période comprise entre 1870 et 1896 Le produit national brut, exprimé en facteur de coût constant (prix de 1913) était de 34 £ par individu en 1876 et n'est tombé en dessous de ce chiffre (33 £) qu'une seule fois avant 1896, année où il s'élevait à 41 £ par individu Voir FEINSTEIN, 1972, p T125, tableau 57, et p T142, tableau 17

(8) On trouvera une analyse sérieuse de ce problème dans un article novateur de PHELPS BROWN et de HANDFIELS-JONES, 1952, pp 266-307 Un certain nombre de généralisations, autrefois largement répandues, concernant le taux de la croissance économique et sa chronologie à cette époque n'ont pas résisté à des analyses critiques ultérieures, aidées de données statistiques plus solides Joseph SCHUMPETER donne la date de 1897 pour la fin de son « second Kondratieff » ou onde longue, suggérant que, « symboliquement », cette année peut être considérée comme marquant la fin d'une période L'industrie électrique (y compris la radio) était selon lui « l'innovation porteuse » majeure du Troisième Kondratieff, ce long élan de croissance économique qui aurait débuté en 1898, le deuxième ayant été marqué par l'apparition du chemin de fer Voir SCHUMPETER, 1939, vol 1, pp 304 et 397 Les estimations de Feinstein du taux de croissance du produit national brut exprimé en facteur de coût constant (pourcentage annuel composé) font état d'un pic de 2,4 pour 1866-1873, d'un net déclin (1,9) pour 1873-1882, et d'une reprise partielle (2) pour 1882-1890 et de 2,1 pour 1890-1900 Le retard de la croissance économique semble avoir été le plus nettement ressenti, dans le Royaume-Uni, dans la première décennie du XX^e siècle Voir FEINSTEIN, 1972, p 19, tableau 17 On pourra faire une comparaison avec l'ouvrage de MCCLOSKEY, 1971 et 1970, pp 446-459 Le retard de la croissance économique aux Etats-Unis à la même période semble avoir été à peu près du même ordre de grandeur Voir WILLIAMSON, 1973, pp 581-607

(9) Comparer avec THORP, 1926, p 172

étendu, de la nouvelle industrie qu'il a contribué à créer Celle-ci est apparue dans les premières phases d'une période où les affaires commençaient à reprendre, où la longue chute des prix semblait enfin se terminer, alors que les taux d'intérêt étaient bas et que l'espoir renaissait Si l'économie a connu, en termes de tendances à longue échéance, un point culminant en 1895, il s'est aussi produit, du point de vue de l'entrepreneur et de l'investisseur, un regain de confiance, un désir de prises de risques, une ouverture vers la nouveauté Ce n'est pas un hasard si, lorsque l'on dresse la liste des technologies qui ont le plus influencé la culture du XX^e siècle – l'électronique, l'automobile, l'aviation, le béton armé, pour n'en nommer que quelques-unes – on s'aperçoit qu'elles ont vu le jour entre 1896 et le début de la Première Guerre mondiale Les statistiques laissent peut-être conclure à un ralentissement économique, mais les industries qui devaient, par la suite, renforcer le développement se sont créées juste au moment où les potentiels des anciennes technologies – celles du fer, du charbon et de la vapeur – commençaient à s'épuiser

Pour compléter le tableau, il faut également se souvenir que l'apparition de la radio a coïncidé avec un mouvement de regain nationaliste L'adoption et la diffusion de la nouvelle technologie ont été accélérées par des aides et des contrats de l'Etat, accordés, non parce que la radio était un peu moins coûteuse que les autres solutions, mais en raison des possibilités militaires uniques qu'elle offrait Les considérations de prix ne jouaient pas un grand rôle sur ce marché, seules comptaient les possibilités entièrement nouvelles Les marines anglaise, allemande, italienne et américaine ont, pour cette raison, été les premières à comprendre les potentialités de la radiotélégraphie et, malgré l'opposition de nombreux officiers, à insister sur son utilisation à des fins de contrôle stratégique et tactique L'Angleterre mise à part, bien sûr, elles ont également été les premières à souligner le danger que représentait, pour la sécurité nationale, le fait de dépendre d'une seule société, britannique de surcroît Il s'en est suivi une aide offi-

cielle aux systèmes concurrents et une opposition au « monopole » Marconi En différenciant et en fragmentant le marché, ce processus a peut-être stimulé de nouvelles expériences sur des variantes de la technique de base et ainsi accéléré les améliorations technologiques Le nationalisme a également conduit, en Angleterre, à d'ambitieux projets d'un système de télécommunications impérial, et, en Allemagne, avec plus de succès, à la construction, avant la Première Guerre mondiale, de centrales à haute tension permettant de conserver les communications avec les Etats-Unis et les colonies africaines au cas où les câbles sous-marins seraient coupés lors d'un conflit armé La demande ne provenait donc pas seulement des services que la radio pouvait rendre au commerce maritime, mais aussi de son importance pour la suprématie navale et la défense des empires

Première approche épistémologique

Quelles sont les implications de ce modèle explicatif ? Nous avons trouvé plusieurs raisons valables de douter de plusieurs des affirmations et conclusions de notre « première approximation » Tout d'abord, considérer la science comme la seule source de connaissances nouvelles exige d'élargir le sens du terme « science » de telle façon que cette affirmation devienne tautologique, ou de restreindre le sens de « connaissances nouvelles » à tel point qu'il prend la même signification que ce type de savoir abstrait et systématique qui correspond à la production scientifique dans sa définition conventionnelle On a également vu qu'il n'y a pas de frontière entre science et technologie il existe une zone floue où technique scientifique et science technologique se chevauchent, et c'est dans cette zone que se produisent certaines des interactions les plus fructueuses entre les deux domaines

En deuxième lieu, on a vu que ni le contenu ni l'apparition dans le temps des découvertes techniques ne sont uniquement déterminés par des modifications

dues à l'apport de connaissances scientifiques nouvelles. La technique ne se contente pas de recevoir passivement de nouvelles données. Elle est aussi la gardienne d'un savoir accumulé, que les apports de la science ne font qu'accroître de façon marginale. Les transferts d'informations nouvelles entre science et technique sont déterminés à part égale par la demande technique et l'offre scientifique.

En troisième lieu, il y a des raisons de penser que les interactions entre les mutations technique et économiques, loin d'être simples et unilatérales, sont complexes et réciproques. Ce que nous appelons une innovation économique est, dans le plus typique des cas, une synthèse créative de techniques anciennes et nouvelles : une fusion d'apports nouveaux avec les éléments hérités d'un fond plus ancien. On peut comprendre que les nouveaux éléments paraissent souvent plus spectaculaires et, sur le plan historique, plus importants, car ce sont eux qui donnent un caractère distinctif à l'innovation. Mais tous les nouveaux apports ne sont pas forcément inventés, et tous ceux qui le sont ne sont pas forcément adoptés. Il en va des interactions entre technique et économie comme de celles entre science et technique : il est impossible d'ignorer le rôle de la demande dans la relation. Les facteurs économiques exercent un effet sélectif de « tamis » sur la mutation technique, en déterminant les types de techniques demandés et le moment où ils doivent intervenir. La demande d'une technique nouvelle change dans le temps selon les variations du taux de croissance des industries utilisatrices. Le prix des facteurs relatifs, dans certains cas, les déséquilibres structurels engendrés par d'autres innovations faussent le choix de techniques nouvelles dans certaines orientations. Et, lorsque la défense ou un conflit armé entre en jeu, une technologie nouvelle peut être introduite, assimilée et diffusée à une vitesse que des considérations purement économiques n'auraient jamais rendu possible. Les techniques nouvelles peuvent, en effet, exercer un impact phé-

noménal sur les systèmes économiques et sur des sociétés toutes entières, mais il ne s'agit pas d'une force totalement exogène, aux retombées aveugles et imprévisibles. Le type de technique introduite, et le moment de son introduction, dépendent en partie de la nature et de l'époque de la demande (10).

Le modèle du marché des influences réciproques (deuxième approximation)

Notre modèle a donc, de toute évidence, besoin d'être affiné. Pour élaborer une deuxième approximation, on peut l'élargir en prenant explicitement en compte le fait que les transactions entre science, technique et économie sont de types différents et non unilatérales. La technique, par exemple, reçoit des apports scientifiques, mais transfère également une partie de ses résultats à la science. De même, elle transmet des résultats à l'économie et absorbe en retour les ressources que lui fournit cette dernière. Par ailleurs, comme on le verra, les « marchés » (ce terme étant utilisé dans son sens le plus général) dans lesquels des échanges s'effectuent entre les trois systèmes sont, eux aussi, de types différents et obéissent à des règles différentes. Les résultats de la science ne sont pas une propriété dans le sens où le sont ceux de la technique, et leur transfert ne s'exécute pas de la même façon. Quels sont les apports et les résultats appropriés ? Quel facteur détermine le volume des transactions ? Comment chaque système parvient-il à mettre sur pied une « balance des paiements » viable ? Comment sélectionne-t-il les apports et produit-il ses résultats ? Comment réagit-il aux modifications de la demande concernant ses résultats ou à l'offre d'apports ? Quels sont les décalages nécessaires pour les mises au point ? Quels facteurs influencent la productivité de chaque système et l'efficacité avec laquelle il transforme les apports en résultats ? Comment chaque système s'oriente-t-il, c'est-à-dire choisit une direc-

(10) Comparer avec SCHMOOKLER, 1966

tion particulière de changement et s'y tient ?

Deux marchés, ou domaines d'interaction entrent en jeu celui de la science et de la technique, et celui de la technique et de l'économie. On part de l'hypothèse qu'il n'existe pas d'interaction directe entre la science et le système économique, la technique servant d'intermédiaire. Il ressort clairement de notre analyse que, dans chacun de ces marchés, on ne constate pas uniquement des transferts directs, décrits dans notre « première approximation », mais également un important effet de boucle de rétroaction. Par exemple, dans le marché des interactions entre technique et économie, on constate un transfert d'appareils, produits et procédés nouveaux, mais aussi deux flots inverses. La première de ces boucles est constituée d'informations concernant la demande et les coûts, c'est-à-dire déterminant quels éléments ont un sens dans le système économique de calcul des profits et pertes (On pourrait appliquer des hypothèses analogues, en modifiant adéquatement la terminologie, à une économie socialiste, puisque les règles de l'attribution optimale de ressources faibles sont les mêmes). Grâce à ce flot inverse d'informations, il se produit un phénomène de tamisage et de filtrage séparant les appareils et procédés dont les chances de profit sont raisonnables de ceux que l'on rejette comme des « concepts de savant fou » ou, tout au mieux, comme des idées dont le temps n'est pas encore venu. En renfort de ce flot d'informations, s'ajoute un deuxième flot inverse : une attribution partielle des ressources économiques, accordées libéralement et sans difficulté aux inventions à fort potentiel économique, mais au compte-gouttes à toutes les autres. Ce marché, outre le transfert des droits de propriété, dessert deux autres fonctions importantes. Pour l'économie, il établit une distinction entre le « bruit » technique et l'information à pro-

prement parler, pour la technique, il fournit des signaux lui indiquant quelles sont les grandes lignes d'activité à poursuivre et étendre et celles qui, étant considérées comme non profitables économiquement, doivent être réduites. Le marché sert en fait de filtre.

En y apportant quelques modifications, on peut appliquer les mêmes concepts généraux au marché des interactions entre la science et la technique. On a déjà décrit les transferts directs : il s'agit ici de la production de connaissances nouvelles par la science, ce qui constitue sa fonction spécifique. Un même phénomène de filtrage et de tamisage se produit, car la technique distingue alors les résultats qu'elle peut utiliser et assimiler à son fonds de connaissances utiles, et ceux qu'elle ne peut pas exploiter. La nature des droits de propriété qui y sont transférés est toutefois très différente, de même que les réglementations institutionnelles qui gouvernent le comportement de ce marché.

La majeure partie des informations produites par la science – le nouveau savoir engendré – est renvoyée vers la science. Ce savoir n'est pas généré en réponse à une demande technique ou économique, mais aux demandes scientifiques internes. Une fois produit, ce savoir est ensuite réinvesti dans la science. Il s'agit d'une forme de boucle interne, de régénération dans le sens électronique, qui permet d'expliquer, dans une large mesure, pourquoi le savoir scientifique, sur des périodes très longues, tend à s'accroître de façon exponentielle. Les scientifiques découvrent de nouvelles connaissances, en grande partie pour répondre à des problèmes soulevés par d'autres scientifiques, et ce savoir est, pour la majeure partie, réutilisé par les scientifiques eux-mêmes (11).

L'acceptation de ce fait est cohérente avec l'idée que le cours de la recherche scientifique est relativement indépendant du système de prix. Dans un cas, on parle

(11) Il ne s'agit toutefois pas d'affirmer que les différents niveaux d'aide à la science ne sont pas influencés par des espoirs, nourris par les scientifiques et autres, que le nouveau savoir engendré par la science donnera des résultats utiles sur le plan pratique. Une fois de plus, Schmookler nous fournit un rectificatif utile permettant d'éviter des interprétations trop simplistes. On peut consulter « Catastrophe and Utilitarianism in the Development of Basic Science », in SCHMOOKLER 1972, pp 47-59.

du flot des apports à la science, dans l'autre, des caractéristiques des résultats produits. S'il y avait une relation étroite entre les deux, l'histoire de la science serait bien plus simple.

Ce système a des conséquences profondes pour l'organisation et le développement de la science et ses relations avec les autres secteurs de la société. Dans la mesure où il existe une exportation de connaissances nouvelles de la science vers la technique, il s'agit en général d'un dérivé du processus scientifique lui-même. Il y a, bien sûr, des exceptions à cette généralisation, surtout dans les cas où une demande militaire urgente se répercute directement via la technique et s'intègre au système d'impératifs auquel répondent les scientifiques. Ces cas sont toutefois exceptionnels et les scientifiques sont les premiers à le faire remarquer. Une façon d'exprimer cette situation consiste à dire que, dans la plupart des cas, le savoir nouveau issu de la science est un doublon gratuit de résultats générés par la science et réinvestis dans celle-ci. Il est gratuit, car il aurait été produit quel que soit le cas de figure et qu'il soit ou non utilisable par la technique. C'est un doublon, car les exportations de connaissances nouvelles vers la technique et, indirectement, vers le système économique, ne font pas décroître la taille des flots internes de savoir nouveau au sein de la science.

Les connaissances scientifiques nouvelles entrent en outre dans la catégorie des biens publics. Elles ne sont et ne peuvent probablement pas être définies, sur le plan institutionnel, comme des biens privés, et ne peuvent être vendues ou chiffrées. Une découverte scientifique est mise à la disposition de la technique lorsqu'elle est publiée et entre dans le domaine public. Une découverte technique, en revanche, n'est disponible économiquement que lorsqu'elle est brevetée et devient alors un bien privé.

Ces réflexions permettent d'expliquer pourquoi la recherche scientifique – l'orientation de la science – est largement indépendante des besoins technologiques ou économiques. Les signaux auxquels la science répond sont des signaux

internes, générés par elle-même, et non externes. La science se trouve ainsi en grande partie isolée des demandes d'utilisation finale qui, par l'intermédiaire du système de prix, exercent une si forte influence sur la technologie. L'une des fonctions de la technologie est, en fait, de servir de tampon protecteur entre la science pure et les demandes pressantes, au jour le jour, de l'industrie. Il existe aussi d'autres tampons, notamment les sciences appliquées et l'association institutionnelle de la science pure avec le système d'éducation.

Au niveau humain, ces différences dans les structures des marchés se reflètent par des différences flagrantes dans les modes de comportement. Comme l'a suggéré Hirschschleifer, le vendeur de résultats opérant sur le marché de la nouvelle technologie est un « arriviste », prêt à subir des pertes à court terme – voire à distribuer gratuitement son produit – dans l'espoir de constituer un marché à long terme. En revanche, ce comportement est inhabituel sur le marché de la science et de la technique. La science n'est pas autarcique, elle fournit des résultats à la technique et dépend du système économique. Mais elle est relativement autonome dans le sens où elle n'est pas conçue pour réagir aux signaux externes. Ainsi, selon le mode typique de transfert sur le marché de la science et de la technologie, il faut aller chercher les informations, et non s'attendre à les voir s'imposer. Les sociétés modernes ont, en fait, mis au point des professions spécialisées – les sciences appliquées – chargées d'exercer cette fonction.

L'éthique professionnelle de la science pure et les processus qui lui permettent de conserver son statut contribuent à l'isoler plus encore, dans des circonstances normales, des demandes techniques et économiques. Il n'en va pas de même dans le monde de la technique. Le cas d'Oliver Lodge, montre que la confusion entre les modes de comportement sur les deux marchés pouvait mener à une détresse personnelle et à l'indécision. En tant que producteur de nouveau savoir scientifique, Lodge avait le sentiment qu'il avait fait tout ce que l'on attendait de lui, lorsque ses dé-

couvertes seraient publiées et mises à la libre disposition de tous. En tant que producteur d'une technique nouvelle, en revanche, il ne pouvait pas se permettre de publier tant qu'il n'avait pas breveté sa découverte et par-là même obtenu les droits de propriété qui le protégeaient contre les utilisations non autorisées. Mais, comme il était conditionné à accepter les règles de la science pure, Lodge s'est retrouvé sur le marché technique où les règles et les valeurs sont différentes. Le long délai qu'il lui a fallu patienter avant de pouvoir faire respecter son brevet provient certainement de l'ambivalence qui en a résulté.

Il existe également des flots inverses importants sur le marché de la science et de la technique. On en distingue deux grands types : des flots d'informations et des flots concernant des dispositifs techniques. Les premiers ont une grande importance historique. Jusqu'au XIX^e siècle, une des fonctions principales de la science était de codifier, rationaliser et expliquer les découvertes techniques, et non de fournir à la technologie des informations exploitables. Une encyclopédie des arts et métiers était un ouvrage scientifique, car il classifiait et organisait systématiquement les informations héritées de la pratique technique, de la même façon qu'un botaniste classerait des espèces végétales. La technique était le professeur, la science l'observateur et l'étudiant (12).

Au cours du XIX^e siècle, la science s'est timidement transformée en une activité professionnelle et spécialisée, possédant une méthodologie rigoureuse d'établissement de preuves qui exigeaient des expériences systématiques et une observation dans des conditions contrôlées. Les sources d'information sur lesquelles elle s'appuyait ont de plus en plus souvent tendu à être générées par elle-même. Les scientifiques se sont mis à n'attacher d'importance qu'aux preuves apportées par d'autres scientifiques. Les sciences appliquées se sont alors développées, leur rôle

étant de transmettre à la technique les résultats produits par la science pure, mais non de signaler à la science les informations engrangées par la technique.

Toutefois, les flots d'informations inverses entre technologie et science n'ont jamais complètement disparu. Ce que l'on peut appeler le flot inverse général – le transfert d'informations routinières sur les techniques d'usine, le savoir-faire des corps de métier et le savoir technique dans son sens le plus large s'est atténué et a perdu de sa valeur, sauf dans certains domaines tels que la chimie et l'agronomie. De façon plus significative, la science n'a jamais pu s'isoler complètement d'un type de renvoi d'informations particulier. Il s'agit de la détection d'anomalies – de fragments d'informations empiriques entrant en contradiction avec les théories scientifiques admises ou qui, même si elles ne les contredisaient pas, demandaient un développement, une élaboration ou un affinage de ces dernières. Thomas Kuhn a souligné l'importance du rôle joué par les anomalies dans le déclenchement de changements fondamentaux dans les paradigmes scientifiques. Il nous a également rappelé l'aisance avec laquelle la science normale peut parfois ignorer les anomalies générées par les travaux de certains scientifiques, ou, dans une certaine mesure, les « assimiler » grâce à des modifications appropriées de la théorie reconnue (13). Les scientifiques ont, de même, pu ignorer ou mal interpréter avec plus de facilité encore les anomalies signalées par la science extérieure, constatées « sur le terrain » au cours d'expériences techniques, lorsqu'elles ne confirmaient pas leurs attentes. En agissant ainsi, la science ne faisait qu'obéir à ses propres règles de conduite : les données provenant d'expériences non contrôlées incorrectement décrites et, souvent, non reproductibles, constituaient des signaux auxquels elle n'avait pas l'habitude de réagir. Les informations en provenance

(12) David FELIX fait ainsi remarquer « la théorisation scientifique au XIX^e siècle était toujours mue par des progrès autonomes de la pratique technologique, un peu comme les sciences sociales actuelles ajustent leurs théories aux innovations en cours, avec un certain décalage ». Voir FELIX, 1970 et David LANDES, 1969, p. 104.

(13) KUHN, 1962.

de la technique ont donc été fréquemment rejetées. Au-delà d'un certain point, il n'était cependant plus possible de les ignorer, et, une fois ce seuil franchi, elles pouvaient alors amorcer des changements importants dans l'orientation de la recherche scientifique.

Le sens des affaires...

Nous avons constaté un certain nombre d'exemples de ce processus dans notre étude de cas, et il est intéressant d'observer qu'ils se sont produits plus fréquemment dans le cas des travaux de Marconi, qui n'avait pas suivi une formation scientifique classique, que dans ceux de Lodge, issu, lui, de la filière académique. Le sens des affaires de Marconi, sa détermination à faire de la radio un succès commercial, l'ont entraîné dans des domaines où la science de son époque ne pouvait pas lui servir de guide. S'il avait été plus scientifique, plus strictement conditionné par les habitudes de prudence systématique caractéristiques de la science, s'il avait pensé que sa réputation dépendait principalement du respect des scientifiques, sans doute aurait-il accompli moins de choses. Cela est particulièrement vrai de ses travaux sur les antennes et la diffusion à longue distance. Les antennes de Marconi, jusqu'en 1914, n'étaient pas étayées par une logique scientifique : il les utilisait parce que, pour des raisons imparfaitement comprises, elles lui permettaient d'obtenir les résultats souhaités, surtout sur de grandes distances. Les innombrables variations de tailles et de configurations qu'il leur a fait subir témoignent de l'empirisme pragmatique qui a présidé à leur mise au point. Lodge, au contraire, avait élaboré une théorie des antennes, bien qu'incomplète, d'après ses recherches sur les bouteilles de Leyde. Ses réalisations pratiques découlaient de cette théorie. Il savait d'avance ce qui était susceptible de fonctionner et ce qui ne l'était pas, les variantes de ses modèles d'antennes étaient donc, par conséquent, très limitées. La théorie et la conception des an-

tennes sont un domaine dont on n'a pas encore écrit l'histoire, mais même une connaissance superficielle des modèles d'antennes les plus récentes laisse à conclure que les modèles de Marconi en ont inspiré beaucoup, contrairement à ceux de Lodge. C'est Marconi et non Lodge qui, grâce à ses antennes, a abouti à des résultats inattendus et anormaux exigeant de repenser la théorie des antennes. Livrés à eux-mêmes, privés des apports de l'expérience technologique et commerciale, les scientifiques n'auraient guère progressé au-delà de la théorie du dipôle linéaire hertzien, facile à exploiter sur le plan mathématique et parfaitement adapté à toutes les expériences de laboratoire habituelles. Les problèmes engendrés par l'utilisation commerciale de la radio ont bénéficié, dès le départ, de solutions technologiques appropriées, c'est par la suite seulement que les scientifiques ont élaboré de façon systématique l'explication rationnelle de ces solutions.

La diffusion à longue distance nous fournit un exemple plus explicite encore. Dans ce cas précis, les résultats obtenus par Marconi relevaient clairement de l'anomalie, pour utiliser la terminologie des théories scientifiques couramment admises. On citera ici Lodge : « Pour le public, non au fait des travaux de Clerk Maxwell et de Hertz [la télégraphie sans fils à courte distance] fut une grande surprise et parut très nouvelle et mystérieuse. Pour les physiciens, il ne s'agissait que d'une application naturelle de faits déjà connus. Mais lorsque Marconi découvrit expérimentalement que les ondes s'incurvaient autour du globe terrestre pour atteindre le continent américain, les physiciens furent à leur tour surpris. C'était là une découverte importante » (14). Important aux yeux de la science, précisément parce que le phénomène était anormal. L'apport technologique venait défier sans ambiguïté les affirmations scientifiques reconnues, obligeait à repenser les théories, et demandait à la science de fournir une réponse en termes de recherches sur les radiations so-

(14) LODGE, 1925, pp 60-61

lares, le géomagnétisme et l'ionosphère terrestre qui se poursuivent encore de nos jours

Les instruments

Le second composant des flots inverses de la technique vers la science concerne les instruments, outils et matériaux utilisés par les scientifiques. On ne fait pas ici référence aux appareils et matériaux courants du marché, qui sont des produits du système économique, mais aux instruments spécialisés dont l'importance est cruciale pour la réussite des expériences. Les instruments de mesure en constituent une sous-catégorie particulièrement intéressante : on citera notamment le galvanomètre de Faraday et l'interféromètre de Michelson (15). Outre les instruments de mesure, le système technologique fournit une foule de procédés, matériaux et instruments qui rendent possible l'entreprise scientifique : bobines de Ruhmkorff, bouteilles de Leyde, flacons de Dewar, tubes à klystron, pompes à vide au mercure, cyclotrons, accélérateurs linéaires – la liste est longue. Ces instruments ne sont pas, à l'origine, des produits normaux du système économique, mais des produits spécialisés de la technologie, créés, conçus et souvent inventés spécifiquement pour servir la science (16). Les instruments ne sont pas les seuls à entrer en jeu : l'invention du transistor aurait été impossible si l'on n'avait pas disposé de matériaux d'une pureté auparavant jamais égalée (le germanium et le silicium). La réalisation de cette pureté est due à la technique et non à la science. L'histoire de la recherche astronomique, chimique et physique abonde en

exemples similaires. La technique créative a sans cesse été la clé qui a permis à la science ses découvertes, ses mesures et l'établissement de ses preuves.

Le capital humain

On peut enfin ajouter un troisième composant à notre liste de flots inverses : la main-d'œuvre qualifiée, ou ce que les économistes appellent aujourd'hui le capital humain. Le flux de ressources humaines de la technique vers la science n'a jamais été important. La ségrégation moyen-âgeuse, qui distinguait l'homme instruit de l'artisan, possède sa contrepartie moderne dans la distinction entre le scientifique et le « simple ingénieur » ou technicien. Le « tissu de liens d'osmose », qui, pour reprendre l'expression de Rostow, unissait les scientifiques, les inventeurs et les innovateurs de l'Angleterre du XVIII^e siècle, prend de plus en plus, rétrospectivement, l'aspect d'un phénomène tout à fait inhabituel issu de circonstances historiques (17). La professionnalisation génère toujours des barrières, qui sont renforcées par la longueur toujours croissante des cursus éducationnels très structurés requis pour atteindre la compétence professionnelle. Il est aujourd'hui difficile d'imaginer Michael Faraday parvenir au même succès. Dans le monde contemporain, le flux des ressources humaines se fait de la science vers les sciences appliquées ou la technique, rarement dans le sens inverse. Certains scientifiques réussissent comme inventeurs et même comme hommes d'affaires, mais peu suivent le parcours inverse. Il existe néanmoins un type de flot inverse de compétences humaines qui ne

(15) L. WILLIAMMS, 1965, voir en particulier les pages 168-183, SWENSON, 1972. DEREK DE SOLLA PRICE a été l'un des partisans les plus ardents d'une étude plus poussée de l'instrumentation scientifique et de « l'art spécial de la science expérimentale », qu'il décrit comme « une technologie qui a joué un rôle plus crucial dans le progrès scientifique et qui a peut-être constitué un domaine d'interaction plus important que « l'application » faible et peu fréquente de la science pour la création d'une technologie nouvelle ». Selon lui, cette technologie a joué un rôle essentiel en déclenchant la révolution scientifique du XVII^e siècle. Voir PRICE, 1974, pp. 42-48, à la page 47. Voir également LILLEY, 1951 et 1966, COOPER, 1946 et BEDINI, 1964.

(16) Ils sont souvent d'une utilité directe pour les inventeurs. ROSTOW argumente ainsi que « la méthode expérimentale, intégrée à la révolution scientifique, a directement contribué à l'accroissement des inventions, grâce au lien bilatéral entre scientifiques et concepteurs d'instruments. Les scientifiques avaient besoin de pompes et de télescopes, du microscope, du thermomètre, du baromètre, d'horloges exactes. Les inventeurs et d'autres en avaient également l'usage ». Voir ROSTOW, 1973, pp. 541-544.

(17) ROSTOW, 1973, p. 561, MUSSON, ROBINSON, 1969, 1972.

doit pas être ignoré. Il s'agit des concepteurs d'instruments, des assistants de laboratoire et des techniciens – talents anonymes qui, on le devine, ont joué un rôle crucial, mais guère reconnu, dans l'histoire de la découverte scientifique. Ce ne sont pas eux qui remportent les prix Nobel, mais, sans eux, beaucoup ne l'auraient pas obtenu. Il n'est pas de grand laboratoire scientifique qui n'ait son équipe de techniciens qualifiés, qui, de par leurs compétences personnelles, ont apporté le savoir-faire, les connaissances spécialisées et l'héritage technologique nécessaire à l'utilisation des appareils et à la conduite des expériences.

Une théorie plus fine

Il est temps de résumer notre « deuxième approximation ». Son rôle majeur a été de préciser la nature des flots inverses ou des boucles dans chacun des domaines d'interaction. En ce qui concerne la science et la technique, outre le flot direct de savoir systématisé, on a attiré l'attention sur les flots inverses d'informations, d'instruments techniques et, dans une certaine mesure, des ressources humaines. En ce qui concerne la technique et l'économie, il existe un flot direct d'inventions nouvelles, et un flot inverse de ressources et d'informations sur la demande et les coûts. Du point de vue économique, ces domaines d'interaction sont des marchés dans lesquels se produisent des échanges, bien que ceux-ci ne soient pas forcément exprimés en termes de prix ou de droits de propriété. Mais, en termes d'information, il existe des zones où se déroulent des processus de recherche, de sélection et d'orientation. Ainsi, l'économie trie les résultats technologiques afin de décider ce qui est utilisable et ce qui ne l'est pas, et renforce son choix en attribuant les ressources aux résultats retenus. De même, la technologie trie les nouvelles connaissances scientifiques afin de déterminer celles qui peuvent être intégrées à son fonds de savoir existant, dans le but de gé-

nerer de nouveaux produits techniques.

Malgré leurs ressemblances formelles, les deux marchés présentent des différences importantes de structure et de fonctionnement. Le système technique est organisé de façon à réagir rapidement aux signaux transmis par l'économie. Il s'oriente en fonction des demandes du marché. La science, par contre, s'oriente principalement en fonction de signaux internes – même si elle n'est pas totalement isolée des indications des « besoins » techniques (et donc économiques), elle reste dans une large mesure autonome. Pour influencer l'orientation du progrès scientifique, l'information technique doit être reconnue comme une anomalie posant un problème à la science, ou alors comme un besoin technique d'une importance primordiale, bénéficiant du soutien de l'autorité gouvernementale.

Ces différences sont répercutées par des modes de soutien économique différents. Le système technique, dans une économie capitaliste, tire principalement ses revenus des ventes de sa production, les aides financières et subventions ne constituant qu'un revenu secondaire. En tant que vendeur et acheteur, il participe au système de prix, fait dû en grande partie à sa réaction rapide aux exigences économiques, dans la mesure où le système de prix les répercute. La science, en revanche, tire essentiellement son revenu économique de subventions et presque pas de la vente de sa production. Pour reprendre une expression de Kenneth Boulding, elle fait partie de « l'économie des subventions », vivant d'aides financières accordées par des personnes privées, des fondations, des entreprises ou par l'Etat, de façon directe ou indirecte grâce à son étroite association avec le système éducatif (18). Ceci est dû au fait que la production scientifique n'est pas une propriété dans le sens légal du terme. Il s'agit de biens publics, auxquels on ne peut attribuer un prix, même si leur production est très onéreuse.

Ce système a derrière lui une longue histoire. Le désir des scientifiques de pro-

(18) BOULDING, 1973. Voir également BOULDING et PFAFF, éd., 1972.

téger leurs décisions des pressions du marché reflète la conviction que la science améliore son niveau de productivité lorsqu'elle bénéficie de cette protection. Dire que la science ne répond pas, à court terme, au besoin social n'est donc pas une critique, mais une description des structures institutionnelles mises au point dans l'intérêt scientifique. Dans les pays capitalistes, l'influence de ces structures a contribué à limiter ce que Harold Innis a appelé le pouvoir d'ingérence du système de prix, dans les économies où le pouvoir est centralisé, elles servent une fonction analogue, constituant à limiter le pouvoir d'ingérence du système de planification (19). Une association étroite avec les institutions académiques procure enfin à la science une protection supplémentaire. Surtout, la technique et les sciences appliquées ont joué le rôle de tampons, amortissant l'impact des demandes sociales en fournissant des réponses tirées de leur héritage de connaissances exploitables.

La technique, c'est donc un fait, peut être orientée vers la production de résultats précis requis par l'économie, par le biais du système de prix qui agit à la fois comme un diffuseur efficace de l'information et comme un instrument d'attribution de ressources. Quant à savoir si la science peut être orientée de la même façon afin de produire des connaissances particulières ou une solution à des problèmes précis soulevés par la technique, le débat reste ouvert. Le marché des interactions entre science et technique ne transmet pas de signaux auxquels la science réagisse rapidement et n'alloue pas les ressources qui lui permettent de vivre. Certes, les subventions attribuées à certains domaines de la science pure peuvent leur valoir des facilités matérielles et attirer des ressources humaines. Mais il n'est pas évident qu'une attribution de ressources économiques aussi différentielle puisse, de façon prévisible, augmenter la probabilité de la découverte d'une solution scientifique précise à un problème donné. Si c'était le cas, il y a longtemps que l'on saurait guérir le

cancer. L'augmentation des ressources allouées à un domaine de recherche scientifique peut très bien ne produire que des versions plus affinées de solutions partielles déjà existantes : des poumons de fer perfectionnés permettant de traiter la polio plutôt qu'un vaccin de Salk. La science insiste sur son droit à l'autonomie, non parce que les scientifiques sont insensibles aux problèmes économiques et sociaux, mais parce que les découvertes scientifiques ne peuvent être produites sur commande, et ne sont pas, par nature, prévisibles à l'avance. Le soutien accordé par l'économie à la science pure est, dans ce sens, une profession de foi, reposant sur le souvenir de réussites antérieures, mais non sur des contrats garantissant des résultats futurs bien précis.

C'est pourquoi si, lors du développement d'un secteur donné de l'économie, des problèmes surgissent qui ne peuvent être résolus dans le cadre de la pratique existante, ou alors uniquement à un coût considéré comme excessif, l'on se tourne non pas vers la science pure, mais d'abord vers la technologie, puis vers les sciences appliquées vers la technologie, parce qu'elle est la gardienne du fonds de connaissances utiles de la société, vers les sciences appliquées, parce que leur fonction spéciale consiste à examiner les résultats actuels et passés de la science pure et à les convertir en formes exploitables par la technologie. Ces deux domaines peuvent demander des compétences créatives très élevées. Les solutions techniques, même lorsque de nouvelles connaissances scientifiques n'entrent pas en jeu, exigent de créer de nouvelles combinaisons d'éléments déjà connus. Les sciences appliquées, précisément parce qu'elles assurent une médiation entre des domaines de connaissances organisés et orientés différemment, doivent établir des relations entre des éléments d'information auparavant sans rapport. Il s'agit de fonctions créatives qui permettent de réorganiser le savoir en lui donnant des formes nouvelles et différentes.

Cette idée correspond bien à celle selon laquelle la science pure est un secteur de la société dont la spécialité consiste à découvrir des connaissances nouvelles et à les organiser systématiquement en structures logiques et formelles appelées théories. Mais la méthode de connaissance scientifique n'est pas la seule et unique méthode, le savoir scientifique n'est pas le seul corpus d'informations organisées systématiquement et la créativité scientifique n'est pas l'unique forme de créativité. La technique constitue, elle aussi, un tel corpus, et il existe des procédures techniques de résolution de problèmes qui ne sont pas celles de la science. Certes, il est peut-être vrai que le mode de pensée et d'action de la technique, qui repose essentiellement sur l'intuition, la création, sur les solutions que l'on pressent être correctes, qui en donnent l'impression et qui fonctionnent – a plus de points communs avec l'art qu'avec la science. Quoi qu'il en soit, les sociétés humaines ont possédé la technique et connu les changements techniques bien avant de découvrir la science. La technique moderne est peut-être fondée sur la science et diffère en ce sens des techniques antérieures, cela reflète surtout le fait que le niveau des résultats scientifiques est plus important et que les transferts directs de savoir nouveau de la science vers la technique sont mieux organisés et plus institutionnalisés que par le passé. Cela ne signifie pas que la technique, jadis professeur de la science, se soit réduite à un simple instrument de traitement des produits dérivés de la science.

Ces idées sont amplement étayées par notre étude de cas, mais il faut garder à l'esprit que nous traitons d'une époque à laquelle les sciences appliquées étaient beaucoup moins organisées qu'aujourd'hui, et que les activités de recherche et de développement au sein des entreprises étaient peu courantes, en particulier en Grande-Bretagne. Néanmoins, il est clair que, alors que la science a joué un rôle crucial en rendant possible la radiotélégraphie, elle a, par la suite, peu contribué

au développement de cette technique jusqu'à la fin de la période traitée. Les ouvrages de référence datant de la première décennie du XX^e siècle, tels que « Principles of Electric Wave Telegraphy » de Fleming, qui fait autorité en la matière, ou « Maxwell's Theory and Wireless Telegraphy » de Poincaré et Vreeland, abondent en détails sur la conception des appareils et des circuits, mais ne disent rien des contributions scientifiques, hormis la description des phénomènes fondamentaux, des radiations et de la résonance. Notre description de l'évolution des instruments mis au point par Marconi, et de ceux de Lodge et de Muirhead, témoignent de découvertes techniques, mais non scientifiques. Les véritables générateurs d'ondes continues, tels que l'arc oscillant et l'alternateur à haute fréquence, représentaient un travail de génie pour un technicien, mais n'exigeaient pas de nouvelles connaissances scientifiques. Même la valve à diode, invention cruciale qui a inauguré la deuxième phase de l'histoire des communications radio, ne nécessitait pas l'apport de connaissances scientifiques nouvelles. Le soi-disant « effet Edison » des ampoules électriques avait été observé des années auparavant, le génie de Fleming a consisté à savoir utiliser ce phénomène connu pour créer un détecteur moins sensible aux parasites que le cohéreur ou le redresseur à cristal. On peut faire la même généralisation en ce qui concerne le tube triode à vide de De Forest, un instrument d'une importance technologique majeure dont l'inventeur lui-même ne comprenait pas les principes de fonctionnement et qui n'a pourtant pas exigé le recours à de nouvelles connaissances scientifiques (20). Les améliorations de la technique des pompes à vide et des soudures verre-métal ont joué un rôle d'une bien plus grande importance dans le développement du tube à vide qu'aucune autre découverte scientifique. Il s'agit donc ici de créativité technique de recombinaisons ingénieuses d'éléments déjà connus, après la découverte initiale – qui est, elle-même, largement due au progrès de la technique des expériences

(20) J. A. FLEMING, 1934, pp. 140-143 ; LODGE, 1931, pp. 333-334 ; CARNEAL, 1930, pp. 185-196 ; CHIPMAN, 1965, pp. 92-100 ; SHIERS, 1969, pp. 104-112

en laboratoire – la science n'a plus produit de nouvelles connaissances durant la période traitée par notre étude de cas

Si le modèle proposé par notre « deuxième approximation » a réussi à dégager clairement ces considérations, cela constitue déjà une amélioration notable par rapport à la première

Toutefois, les implications en sont plus profondes. Ce modèle suppose l'existence de trois systèmes spécialisés d'action sociale – la science, la technique et l'économie – et de points d'interaction que nous avons décrits comme des flots réciproques d'apports et de résultats. Ces flots fournissent un soutien mutuel, les niveaux d'activité des trois systèmes et le rythme de changement de ces niveaux sont dans une certaine mesure interdépendants. Ils sont liés ensemble, comme le seraient des partenaires dans une entreprise. Mais ces flots jouant également le rôle de processus de recherche et d'orientation, parce qu'ils transmettent un support, mais aussi des signaux, les orientations du changement sont elles aussi interdépendantes. Ces flots, enfin, servent à canaliser les communications ainsi que les échanges. Les trois systèmes ne s'orientent pas indépendamment au cours du processus historique. L'orientation de la technique n'est pas indépendante des caractéristiques particulières des nouvelles connaissances scientifiques, car des modifications de ces caractéristiques peuvent altérer radicalement le coût probable d'inventions d'un type donné et leurs chances de succès. D'un autre côté, comme l'a démontré Schmookler, la nature des inventions, ainsi que leur nombre dans chaque domaine spécifique, sont de toute évidence influencés par des évaluations de leur valeur économique probable. Ainsi, la demande et les fluctuations des connaissances guident la technologie, la première en lui signalant une valeur probable, la seconde en précisant les probabilités de faisabilité et de coût (21)

Postuler l'idée d'interdépendance sans préciser la forme prise par celle-ci et les moyens de la mesurer revient à une généralisation qui ne peut guère être réfutée et qui n'est, par conséquent, pas d'un grand intérêt. Cette interdépendance ne revêt pas la simple forme mécanique proposée dans notre premier modèle, dans lequel les transferts unilatéraux de la science vers la technique et, partant, l'économie, assujétissaient directement le niveau d'innovation économique au rythme des inventions techniques et des découvertes scientifiques. Les liens sont, en réalité, plus complexes. Les marchés dans lesquels s'opèrent ces transferts présentent d'importantes différences structurelles, et il existe, dans chaque système, des fonds de connaissances immédiatement disponibles. En particulier, le fonds de connaissances techniques sert de réservoir dans lequel l'économie peut puiser même en l'absence de nouveaux apports scientifiques. En d'autres termes, le niveau des transactions entre technique et économie n'est pas une simple fonction du niveau des transactions entre science et technique.

Pour aller au-delà de conclusions de ce type, il faut plus qu'une simple analyse des facteurs endogènes déterminant le niveau d'activité de chaque système. Dans le cas du système économique, par exemple, nous disposons déjà d'un corpus théorique très sophistiqué mis au point précisément dans ce but. Ce corpus, toutefois, à quelques exceptions près, considère les changements techniques comme une influence exogène, non déterminée par l'un des processus internes du système mais s'imposant à lui « de l'extérieur » et ne demandant pas d'explication en termes économiques (22). De même, les historiens et les sociologues spécialisés dans la science ont clairement mis en évidence les processus internes du progrès scientifique, et, dans la plupart des cas, ont fait preuve d'une plus grande sensibilité que les éco-

(21) Comparer avec SCHMOOKLER, 1966, pp 165-188 et ROSENBERG, 1974

(22) Ainsi, en 1966, Schmookler désignait le changement technologique comme la « terra incognita » de l'économie moderne, un facteur qu'il fallait introduire dans l'analyse traditionnelle de façon appropriée, « comme une guerre ou un séisme ». Voir SCHMOOKLER, 1966, pp 1-7, et, pour des commentaires plus étendus, 1965, pp 333-341

nomistes aux relations entre le système étudié et la société dans laquelle il vit et fonctionne. Mais on ne peut guère dire qu'il existe une théorie appropriée de ces relations, ou même une structure de concepts dans laquelle une telle théorie serait susceptible d'être formulée. Quant à la technique, nous commençons seulement à comprendre (comme Marx l'avait observé il y déjà longtemps) qu'il existe un système technique dans toute société, de même qu'il existe un système économique de tel ou tel type, que ce système possède une structure qui peut être analysée, et que ses relations avec la société, dans son ensemble, peuvent être étudiées de façon systématique, pour le bénéfice mutuel du spécialiste de la technique et de celui du changement social en général (23)

Si une théorie unifiée des relations entre la science, la technique et l'économie voit jamais le jour, elle inclura certainement une description plus complète des flots entre les trois systèmes que ne l'a fait notre « deuxième approximation ». Elle comprendra également une analyse de la façon dont ces flots ont été influencés par d'autres systèmes sociaux auxquels il n'a ici été fait référence qu'indirectement, tels que l'Etat, la religion et les arts. La conception d'une telle théorie est une lourde tâche, bien trop vaste pour ce présent essai. Il n'y a toutefois aucune raison de la croire impossible. En fait, certains des processus essentiels et des facteurs qui les influencent sont déjà apparents (24)

Le modèle de la traduction (troisième approximation)

Peut-on aller au-delà de ce point ? D'un certain point de vue, oui. Notre « deuxième approximation » était un schéma formel, décrivant des flots et des interactions, des marchés aux organisa-

tions différentes. Aux yeux d'un historien, ce modèle peut être un guide utile pour une analyse systématique, mais il peut aussi paraître un peu fade et impersonnel. L'histoire, en effet, est plus riche et plus humaine que cela. Un modèle d'une « troisième approximation » doit aller au-delà de ce système formel et admettre que nous avons ici affaire à des vies humaines, aux espoirs, aux craintes, aux frustrations et aux déceptions d'êtres humains. Tout modèle analytique utilisé ici doit pouvoir montrer non seulement la signification des événements décrits pour les processus sociaux en général, mais aussi pour les individus qui y ont pris part.

Notre modèle a, jusqu'ici, été décrit en termes de systèmes spécialisés d'action sociale et de marchés dans lesquels ils se rencontrent. Chacun de ces systèmes, toutefois, est aussi une sorte de sous-culture. Il fournit une structure de valeurs partagées, de façons de penser, de percevoir et d'agir, admises et reconnues, en fonction desquelles les hommes organisent leurs vies. Les marchés dans lesquels la science, la technique et l'économie se rencontrent sont des domaines d'interaction entre des sous-cultures, entre des modes de vie possédant leurs propres valeurs différenciées, leurs propres modes de comportement reconnus, leurs propres systèmes d'attribution de récompenses ou de punitions, et surtout leurs propres langages.

De ce point de vue, l'intérêt principal de notre étude de cas a été le mode de transfert des idées d'une sous-culture à l'autre. Si l'on devait réaliser une étude similaire aujourd'hui, on se tournerait principalement vers les institutions qui jouent désormais le rôle de médiateurs entre la science, la technique et l'économie : les organismes officiels – entreprises, Etat, éducation – qui se sont spécialisés dans le transfert d'informations entre ces trois systèmes.

(23) Les anthropologues ont toujours été au fait de ces relations, mais il est décevant de constater que leurs découvertes et leurs institutions ont très peu contribué aux autres sciences sociales ou à l'histoire, en partie parce que leurs travaux concernent essentiellement les cultures préindustrielles ou non parvenues au stade de l'écriture. Lewis Mumford constitue, bien entendu, une exception de taille.

(24) Si on voulait y inclure d'autres sous-systèmes sociaux, notre modèle finirait par ressembler à une matrice d'entrée-sortie de type Leontief, dont les lignes et les colonnes représenteraient les résultats fournis par chaque secteur aux autres, et les apports qu'il en reçoit. BERLINGER, 1972, a fait des recherches novatrices dans cette direction. Il fait remarquer très justement que la taille de la matrice dépend des intérêts et des hypothèses du chercheur.

Notre étude de cas s'est attachée à une période plus ancienne, dans laquelle ces fonctions étaient moins institutionnalisées qu'elles ne le sont aujourd'hui. Pour cette raison, les problèmes de contacts culturels et le transfert d'idées entre les sous-cultures ressortent plus clairement. A cette époque, ces fonctions désormais officialisées et bureaucratisées étaient à la charge d'individus qui devaient trouver eux-mêmes quels rôles ils devaient jouer et comment les tenir.

Il ne faut, bien sûr, pas exagérer la tendance à l'institutionnalisation de ces relations. Il est bien évident que, derrière l'organisation officielle ou en dehors de celle-ci, les interventions individuelles ont toujours un rôle essentiel à jouer dans le transfert des idées. Il ne s'agit pas non plus de surestimer la différenciation de ces sous-cultures. Il existe aujourd'hui une masse importante de valeurs et de modèles de comportement partagés, que l'individu concerné soit chercheur, ingénieur de terrain ou cadre dans le service des relations publiques d'une grande entreprise. Ceci était probablement plus vrai encore à l'époque de notre étude, lorsque les spécialisations des fonctions étaient moins ramifiées et que les organismes bureaucratiques étaient plus rares dans les trois domaines.

Toutefois, de même qu'il existe une différenciation de fonction entre les trois sous-cultures, il existe aussi des différences dans les schémas approuvés de pensée et d'action. Le transfert efficace d'informations entre les deux dépend de la présence d'individus ou d'institutions capables d'agir selon ces deux schémas, d'être, dans une certaine mesure, acceptés dans les deux, de parler deux langages différents et de les traduire. Les flots d'informations réciproques soulignés dans notre « deuxième approximation » ne se produisent pas spontanément ou sans intervention humaine. L'efficacité avec laquelle ils ont lieu, et, à vrai dire, le fait même qu'ils aient lieu, dépend du comportement de ces individus et institutions médiateurs. Ils sont les agents du transfert, les traducteurs qui permettent à la science, la technique et l'économie de se « parler » l'une à l'autre.

Cette fonction de traduction peut prendre diverses formes : revues techniques, conférences, association professionnelle, institutions, organismes gouvernementaux (postes, ministères), écoles techniques, universités et instituts de technologie, amitiés personnelles, relations familiales et contingences de la vie quotidienne. Ce ne sont là que quelques-uns des moyens, qui, dans les sociétés modernes, permettent les transferts d'informations entre les trois sous-cultures. Certains de ces moyens ont joué un rôle important dans notre étude de cas. Mais certains individus – Hertz, Lodge et Marconi – se sont particulièrement distingués, chacun à leur manière, ils ont été des traducteurs, prélevant des informations générées dans une sous-culture et les transformant en données compréhensibles pour une autre.

Si l'on exprime le sujet dans ces termes, nous voulons souligner l'existence d'un rôle social particulier, qui, en tout cas dans l'histoire de la radio, et sans doute dans d'autres domaines, a été essentiel pour la création d'une nouvelle technique et son assimilation et sa diffusion économiques. Ce rôle social échappe à une identification dans le langage de tous les jours, précisément parce qu'il n'entre dans aucune des catégories classiques de spécialisation par fonction. Nous pensons à des scientifiques, comme Lodge, qui étaient plus que des scientifiques, et à des inventeurs comme Marconi, qui étaient plus que des inventeurs. Dans le cas de Marconi, la difficulté n'est pas mince. Était-il un scientifique ? On ne peut guère le dire. Était-il un homme d'affaires ? Il ne l'était pas dans le sens conventionnel. Était-il un inventeur ? On peut répondre oui, si l'on définit ce terme avec soin. Ces difficultés sémantiques sont révélatrices : elles nous indiquent que nous traitons d'un rôle social que la société ne reconnaît pas en tant que métier ou profession. Et, pourtant, il ne fait guère de doute que, dans l'histoire de la technologie, ce rôle a joué une grande importance.

Les individus capables de tenir efficacement ce rôle ne peuvent être des spécialistes. Ce sont des traducteurs. Ils doivent

manier couramment plus d'un « langage », être à l'aise dans plusieurs environnements, s'adapter à plusieurs jeux de règles. Il est probable que ce type d'individus ne possède ni les compétences, ni les qualités requises pour se mouvoir avec aisance et efficacité dans les limites d'un système unique. Une personne très à l'aise dans le domaine de la science pure ne le sera sans doute pas dans la zone où science et technique se rencontrent. Pour évoluer efficacement dans cette zone, il faut que ces individus puissent tolérer un certain degré d'ambivalence, reconnaître deux ensembles différents de signaux et être capable, d'y répondre, vivre de compromis permanents avec la rigueur logique et abstraite de la science et les impératifs pragmatiques de la technique, orientés vers la résolution de problèmes. Il leur faut aussi, à moins que leurs succès scientifiques n'appartiennent déjà au passé, accepter le fait qu'en agissant comme interprètes entre deux systèmes, il est peu probable qu'ils puissent y remporter les prix les plus convoités dans l'un et l'autre.

Ces ambiguïtés et ces ambivalences sont très probables dans la zone floue qui sépare science et technique. Les raisons en sont implicites dans notre première analyse : les droits de propriété dans ce domaine sont mal définis et les informations transmises par la technique à la science tendent à être systématiquement ignorées. Une sensibilité extrême aux différences de statut est l'un des symptômes des tensions pouvant en résulter. Mais l'interprétation entre technique et économie n'est pas non plus sans difficultés, notamment parce qu'à ce stade, les considérations de prix, de coûts et de bénéfices deviennent dominantes. Les annales de la technique abondent en histoires de virtuoses qui se sont avérés incapables de faire face aux tensions du marché économique. Reginald Fessenden en est l'exemple le plus flagrant dans l'histoire de la radio, mais Howard Armstrong en offre un exemple plus tragique. Les individus qui rassemblent les aptitudes requises – tels qu'Edison, Marconi, Elmer Sperry, Edwin Land – sont des cas inhabituels dans le processus historique. Les cas les plus courants sont ceux

qui, par le biais d'un partenariat ou d'une intégration, entrent dans une équipe réunissant des compétences à la fois techniques et commerciales. Boulton et Watt en sont des exemples classiques, Lodge et Muirhead, encore qu'avec moins d'efficacité, en sont un autre.

En partie en raison des exigences requises des individus, et des économies d'échelle dans le traitement de l'information, ces rôles d'interprètes se sont très institutionnalisés dans le monde contemporain : dans les sciences appliquées, dans la recherche menée par les entreprises ou l'Etat, dans les laboratoires de développement. Nous nous sommes sensibilisés au fait que la nouvelle technique est « fondée sur la science », qu'une entreprise, si elle souhaite conserver sa part de marché, doit systématiquement exploiter les potentiels techniques nouveaux, que les progrès de la science pure influencent la technique de façon imprévisible, et, via la technique, la structure et les performances économiques. En un mot, nous avons, petit à petit, pris conscience d'une partie des transactions qui relient ces trois domaines et avons essayé, avec un succès mitigé, de les contrôler délibérément.

Conclusion

Notre étude concernait une époque plus ancienne, lorsque les enjeux eux-mêmes n'étaient perçus que de façon vague et que les institutions chargées de les prendre en main avaient à peine commencé à évoluer. Le problème se pose donc en termes plus humains. Hertz, Lodge et Marconi étaient des traducteurs, des intermédiaires entre l'univers de la science pure – celui des équations de Maxwell – et celui du commerce, où des systèmes de communications concurrents rivalisaient entre eux. Hertz, c'est ce que nous disent les documents historiques, ne s'intéressait aucunement à quelque sorte d'applications techniques ou commerciales que ce soit. Le problème qu'il s'était attaché à résoudre était uniquement d'ordre scientifique. Les signaux auxquels il réagissait et les gratifications qu'il considérait comme valables étaient déterminés par la structure interne

de la science, non par les demandes du monde extérieur. C'est pourtant Hertz qui a franchi le premier pas indispensable pour transposer la théorie du champ électromagnétique de Maxwell en un système de technique de laboratoire permettant d'émettre, de détecter et de mesurer les radiations. Lodge, dont la position scientifique était très proche, mais qui s'était toujours intéressé aux « applications pratiques », est allé plus loin, en 1894, il avait construit, sous une forme embryonnaire, un système de radiotélégraphie permettant d'échanger des signaux, et démontré son fonctionnement. Le transfert de la science pure vers une technique exploitable était accompli. Lodge n'a cependant pas franchi le pas suivant. Les raisons en sont, en partie, claires – son intérêt croissant pour un problème purement scientifique, la mesure de la dérive de l'éther – et en partie sujettes à conjecture – une orientation dominante vers les valeurs et les traditions de la science et non vers le côté commercial. A Marconi, il restait à parachever l'œuvre – il n'avait qu'une formation scientifique minimale, mais son association avec Righi lui permettait d'accéder aux connaissances, à la littérature et aux matériels scientifiques. De même, il n'avait aucune expérience personnelle du monde des affaires – mais, par la famille de sa mère, il pouvait se faire conseiller et accéder à un capital. Surtout, comme on l'a déjà observé, Marconi n'a, à l'origine, que peu contribué à la nouvelle technique, hormis quelques petites améliorations. Mais il avait fait preuve de davantage de clairvoyance en comprenant comment elle pouvait s'intégrer au système économique de son époque. Lodge avait transposé des équations mathématiques en appareils expérimentaux permettant d'effectuer des mesures et de tester des hypothèses, Lodge en avait tiré les possibilités d'une technique de la radio, Marconi, enfin, en avait fait un secteur économiquement viable dont est issue l'industrie électronique d'aujourd'hui. A chaque étape du processus, les informations générées dans un système ont été converties dans une forme qui avait un « sens » dans les termes du système suivant, et, à chaque étape, les

nouvelles informations étaient fusionnées aux données déjà existantes pour en créer d'entièrement nouvelles.

Aucune étude de cas ne peut établir de généralisation, et un ensemble d'études de cas ne doit pas forcément aboutir à une théorie. Néanmoins, l'analyse d'un épisode particulier dans les interactions entre science, technique et économie peut suggérer des relations applicables à un plus vaste domaine. Un ensemble d'idées rendant justice aux détails de ce cas, mais se prêtant, en même temps, à une généralisation, doit reconnaître l'existence d'une créativité dans chacun des niveaux d'action abordés. La science moderne est indéniablement un segment de la société qui se spécialise dans la production de connaissances nouvelles organisées systématiquement, et il ne fait pas de doute que le savoir nouveau généré par la science devient de plus en plus essentiel à l'apparition de technologies nouvelles. Mais la technique est, elle aussi, un ensemble de connaissances organisées systématiquement, et la façon dont elle combine et recombine ses éléments et leur ajoute des apports scientifiques témoigne de sa grande créativité. De même, la façon dont les nouvelles techniques sont filtrées, modifiées pour un usage économique et intégrées à un système économique opérationnel, demande aussi une grande créativité. Pour comprendre ces processus de changement créatifs, et, en particulier, pour exercer sur eux un certain contrôle, il faut s'attacher au mode de transfert des connaissances. Les individus et les institutions, qui jouent ce que l'on a appelé le rôle de traducteurs, sont essentiels pour ces transferts. Il décrochent les informations d'un système donné et les transforment en données utilisables dans un autre système. Sur le plan historique, ils ont été les agents du changement technique. A l'avenir, peut-être en seront-ils aussi les agents chargés de le contrôler de façon responsable.

*Traduit de l'anglais
par Michèle ALBARET*

RÉFÉRENCES

- BEDINI, Silvio *Early Scientific Instruments and their Makers*, Washington, DC Smithsonian Institution, 1964
- BERLINER, Joseph S *Economy, Society and Welfare A Study in Social Economics*, New York, Praeger, 1972
- BOULDING, Kenneth E *The Economy of Love and Fear a Preface to Grants Economics*, Belmont, Californie Wadsworth 1973
- BOULDING, Kenneth E et PFAFF, Martin Ed *Redistribution to the Rich and the Poor The Grants Economics of Income Distribution* (Belmont, Calif Wadsworth, 1972)
- CARNEAL, Georgette *De Forest, a Conqueror of Space*, New York Liveright 1930
- CHIPMAN, Robert A De Forest and the Triode Detector in *Scientific american*, vol 212, mars 1965, pp 92-100
- COOPER, Herbert L-J *Scientific Instruments*, Brooklin Chemical Publishing Co , 1946
- FEINSTEIN, C-H *National Income, Expenditure and Output of the United Kingdom, 1855-1965*, Cambridge, University Press, 1972
- FELIX, David « Technological Dualism in Late Industrializers a Theory, History and Policy » in *Journal of Economic History*, vol 34, n° 1, mars 1974
- FLEMING, J-A *Memories of a Scientific Life*, (Londres et Edimbourg Marshall, Morgan and Scott, 1934, pp 140-143
- HEILBRONER, Robert « Do Machines Make History ? » in *Technology and Culture*, vol 8, n° 3, juillet 1967
- KUHN, Thomas *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago University of Chicago Press, 1967
- INNIS, Herold A « The Penetrative Power of the Price System », in *Essays in Canadian Economic History* (Toronto University of Toronto Press, 1956), pp 252-272
- LANDES, David *The Unbound Prometheus Technological Change and Industrial Development in Western Europe from 1750 to the Present*, Cambridge, University Press, 1969
- LILLEY, Samuel « The Development of Scientific Instruments in the Seventeenth Century », chapitre 6 de l'ouvrage *The History of Science , Origins and Results of the Scientific Revolution A Symposium* (Glencoe, Ill The Free Press, 1951) ,
- Men, Machines, and History* (New York International Publishers, 1966)
- LODGE, Olivier *Talks about Radio*, New York, Doran, 1925
- MCLOSKEY, Donald N Ed *Essays on a Nature Economy Britain after 1840*, Princeton University, Press 1971
- « Did Victorian Britain Fail », in *Economic History Review*, 2^e série, vol 23, décembre 1970
- MATHIAS, Peter « British Industrialisation unique or not ? » in *l'Industrialisation en Europe au XIX^e siècle* Colloques internationaux du Centre de la recherche scientifique, Lyon, 1970
- MUSSON, A E éd , *Science, Technology and Economic Growth in the Eighteenth Century* (Londres Methuen, 1972)

- MUSSON, A-E et ROBINSON, Eric *Science and Technology in the Industrial Revolution* (Manchester University Press, 1969)
- PHELPS-BROWN, E-H et HAND-FIELDS-JONES S-J « The Climateric of the 1890's A Study in the Expanding Economy » in *Oxford Economics Papers*, vol 3, octobre 1952
- POINCARÉ, Henri *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes La télégraphie sans fil*, Paris, G Carré, 1899
- PRICE, Derek de Solla « On the Historiographic Revolution in the History of Technology Commentary » in *Technology and Culture*, vol 15, n° 1, janvier 1974
- ROSENBERG, Nathan « Science Invention and Economic Growth » in *Economic Journal*, vol 84, n° 1, mars 1974
- Technology and American Economic Growth*, New York, Harper and Row, 1972
- ROSTOW, WW « The Beginnings of Modern Growth in Europe An Essay in Synthesis », in *Journal of Economic History*, vol 33, n° 3, septembre 1973
- RÜRUP, Richard « Historians and Modern Technology », in *Technology and Culture*, vol 15, n° 2, avril 1974
- SAUL S-B *The Myth of the Great Depression 1873-1896*, New York, St Martin's Press, 1969
- SHIERS, George « The First Electron Tube », in *Scientific American*, vol 220, mars 1969
- SCHMOKLER, Jacob « Technological Change and Economic Theory », in *American Economic Review*, vol 55, mars 1965
– *Invention and Economic Growth*, Cambridge, Mass, Harvard University Press, 1966
– *Patents, Invention and Economic Change*, Cambridge, Mass Harvard University Press, 1972
- SCHUMPETER, Joseph A, *Business Cycles A Theoretical Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process*, 2 vols, New York , McGraw Hill, 1939
- SWENSON, Loyd *The Ethereal Mether*, Austin University of Texas Press, 1972
- THORP, Williams L *Business Annals*, New York National Bureau of Economic Research, 1926
- WILLIAMS, L-Pierce *Faraday A Biography*, New York, Basic Books, 1965
- WILLIAMSON, B « Late Nineteenth Century American Retardation A Neo-Classical Analysis » in *Journal of Economic History*, vol 33, n° 3, septembre 1973