

# POINT DE VUE

# DANS QUELLE MESURE LA SCIENCE EST-ELLE EXOGENE ?

Le cas des laboratoires Bell  
et de la recherche fondamentale

Nathan ROSENBERG

**J**e voudrais tout d'abord rappeler l'idée de Kuznets, selon laquelle le trait caractéristique des sociétés industrielles modernes est de savoir tirer des applications économiques de connaissances systématisées résultant de la recherche scientifique (1) Ce point de vue peut paraître surprenant, en particulier pour les économistes, puisqu'il présente la croissance économique moderne comme un phénomène essentiellement exogène Et, s'il en est vraiment ainsi, le mieux que nous puissions faire c'est de nous incliner devant cet état de fait, et accepter l'idée que les facteurs les plus déterminants des principaux phénomènes économiques ne sont en rien du ressort de l'analyse économique Depuis quelque temps, d'ailleurs, les économistes auraient de bonnes raisons pour faire preuve d'humilité, et un motif de plus

n'ajoutera guère à leur fardeau déjà lourd

D'un autre côté, nous avons peut-être tort de nous montrer si humbles En ne limitant pas le contenu de notre discipline à une définition trop restrictive, nous pourrions peut-être faire apparaître une interaction continue entre la science et l'économie Tel est précisément mon propos Je vais tenter de démontrer tout d'abord que la technologie intervient dans les variables économiques Jusqu'à présent, les économistes ont mieux su analyser les conséquences des progrès technologiques que leurs causes Cependant, les recherches approfondies de Schmookler, Griliches, Mansfield et d'autres tendent à prouver que la technologie est un sujet sur lequel les économistes ont des choses intelligentes – et peut-être même utiles – à dire

Cet exposé a principalement pour objet de démontrer que les problèmes technologiques influent sur la recherche scientifique de diverses façons Je crois que l'on peut apprendre beaucoup sur le travail des scientifiques – même de ceux qui se consacrent à la recherche fondamentale – en s'intéressant tout d'abord au domaine de la technologie

Il est certes aisé d'affirmer que la science n'est pas un phénomène entièrement exogène Ce qui l'est moins, c'est de tenter de définir les liens qui unissent la science et l'économie Peut-on dépasser le stade des lieux communs ? Je le pense, en partie parce que la recherche nécessite, de nos jours, des moyens financiers importants Au XVIII<sup>e</sup> siècle, lorsque les chercheurs avaient des besoins extrêmement modestes – un cerf-volant, un peu de ficelle, un bocal, un orage magnétique et beaucoup de chance leur suffisaient –, ils pouvaient plus facilement se passer du soutien financier de la société Ce n'est plus le cas aujourd'hui, où la « petite science » a cédé la place à la « grande science », et où les recherches ne peuvent être menées qu'à certaines conditions, telles que, par exemple, l'accès à un accélérateur linéaire de dix millions de dollars

\* Cet article est issu du chapitre 7 de l'ouvrage *Inside the Black Box*, publié en 1982 par Cambridge University Press

(1) Voir par exemple KUZNETS, 1966, chap I

Cet exposé est donc une sorte d'entrée en matière, une première tentative pour définir un cadre conceptuel qui nous aidera à mieux comprendre les relations qui s'établissent entre la science et les performances économiques. Etant donné l'incontestable ampleur de ce sujet, je me dois de présenter quelques excuses toutes symboliques, dans la mesure où cet exposé ne représente guère plus que le premier pas bien modeste d'un long parcours intellectuel. Mon propos est de démontrer que la technique influe profondément, et de diverses façons, sur la recherche scientifique. Je tenterai donc d'identifier certains types d'influence parmi les plus significatifs, et d'éclairer les mécanismes de causalité en jeu.

Certes, les répercussions de certaines préoccupations technologiques sur les connaissances scientifiques ne sont plus à démontrer. La mise en évidence par Torricelli de la pesanteur de l'air dans l'atmosphère, qui représente une découverte scientifique fondamentale, découle de ses recherches pour concevoir une pompe (2) perfectionnée. Et la découverte de la thermodynamique, que l'on doit aux travaux remarquables de Sadi Carnot, est le résultat de ses recherches pour mieux comprendre, un demi-siècle environ après la grande découverte de Watt, le fonctionnement des locomotives à vapeur (3). Si Joule a découvert le principe de la conservation de l'énergie, c'est parce qu'il cherchait des sources d'énergie de substitution pour la brasserie de son père (4). Enfin, Pasteur a développé la bactériologie en tentant de trouver une solution à des problèmes de fermentation et de putréfaction intéressant l'industrie vinicole française. Dans chacun des cas que je viens de citer, c'est en cherchant à résoudre des problèmes spécifiques, dans un domaine précis, qu'on a pu acquérir des connaissances scientifiques d'ordre très général. Mais ces exemples ne donnent qu'une très vague idée de la nature et de l'importance de l'interaction qui

s'exerce entre la science et la technique. A vrai dire, cette interdépendance est totalement niée dans la vision qui prévaut actuellement et pour laquelle la science seule est à l'origine de la technique, celle-ci ne représentant rien d'autre que l'application de connaissances scientifiques préexistantes. Un examen plus approfondi de l'interaction entre la science et la technique serait par conséquent fort utile.

Cet exposé a été présenté lors de la conférence qui s'est tenue à l'université de Harvard en avril 1981, à l'occasion du quatre-vingtième anniversaire de Simon Kuznets, et s'inspire en partie des travaux réalisés dans les Laboratoires Bell de Murray Hill, dans le New Jersey. Cette transcription doit beaucoup aux commentaires incisifs de Moses Abramovitz.

### **Les découvertes techniques . un champ de recherche pour les scientifiques.**

Pour être plus précis, penser que la technique n'est rien de plus que l'application de connaissances scientifiques préexistantes, c'est laisser dans l'ombre un point essentiel, à savoir que la technique représente en elle-même une somme de connaissances sur certains types d'événements et d'activités. On ne peut la définir comme la simple application d'un savoir venu d'une autre sphère. Elle représente un ensemble de méthodes et de conceptions efficaces, qui obéissent à certaines règles et aboutissent à certains résultats, qu'on sache les expliquer ou non. En d'autres termes, on peut définir la technique, non pas comme une somme de connaissances fondamentales, mais plutôt comme une forme de savoir qui nous permet de progresser économiquement depuis des milliers d'années. Il est évident que, si l'humanité s'était cantonnée uniquement aux techniques maîtrisées par la science, elle n'aurait pas tardé à disparaître de la surface terrestre.

(2) COHEN, 1948, pp 68-71

Cette découverte scientifique a permis, à son tour, de créer un nouvel instrument scientifique : le baromètre.

(3) CARDWELL, 1971

(4) CROWTHER, 1936, chap III

Pendant longtemps, l'homme a acquis et accumulé un savoir technique d'une manière purement empirique, sans s'appuyer sur une base scientifique. Certes, la science aurait pu lui permettre d'obtenir les mêmes résultats beaucoup plus rapidement, mais l'histoire démontre que c'est de cette façon empirique qu'il a acquis, puis exploité, un immense savoir, et c'est ainsi qu'il procède encore aujourd'hui. Tant que des motifs suffisamment puissants l'y ont incité, l'homme a accumulé des connaissances ayant trait à de nombreux domaines d'activité productive, certes d'une façon souvent lente et laborieuse. Aujourd'hui encore, nous ne savons pas toujours expliquer scientifiquement certains fonctionnements techniques inhérents à notre activité productive. Nous utilisons les hauts fourneaux sans comprendre véritablement leur processus de combustion, et nous prenons quotidiennement des avions dont la parfaite conception est le fruit d'un travail souvent très empirique, en effet, il n'existe pas de théories des turbulences ou de la compressibilité qui permettent de déterminer à l'avance une configuration optimale de l'appareil. Il est encore nécessaire de procéder à de nombreux essais, puis, en fonction des résultats, à diverses modifications, avant d'aboutir à la forme définitive d'un avion, ce qui explique les coûts de développement considérables que doit supporter l'aéronautique moderne.

Ainsi, autrefois, et c'est encore très vrai de nos jours, il était courant que le progrès technique précède le progrès scientifique. Étant donné les intérêts économiques qui sous-tendent toute innovation technique, il n'est pas étonnant que ces découvertes, basées uniquement sur le savoir technique, devancent la compréhension scientifique. Pour obtenir un succès commercial, il faut un produit efficace et qui corresponde aux divers critères imposés à la fois par le producteur et par le consommateur. Un ingénieur/concepteur doit suivre une procédure d'optimisation complexe, dont la réussite n'est pas nécessairement liée à une com-

préhension scientifique des phénomènes observés. Dans bien des cas, l'absence d'explication scientifique n'est pas forcément, et fort heureusement, un obstacle insurmontable. Il est donc logique qu'en général on développe des connaissances techniques exploitables avant d'avoir approfondi l'explication scientifique des phénomènes qui s'y rattachent, à condition bien sûr que les intérêts économiques en jeu soient suffisamment importants.

C'est pourquoi la technique constitue un immense dépôt de connaissances empiriques, à même d'être étudiées et évaluées par les scientifiques. Il est encore courant que des ingénieurs dans diverses industries résolvent des problèmes qui sont restés sans explication scientifique, et qu'à son tour la solution technique suscite une recherche scientifique qui permettra enfin d'aboutir à une explication (5). Il est bien entendu plus rare que les avancées techniques et scientifiques s'enchaînent de cette façon dans les industries basées sur de fortes connaissances scientifiques, comme c'est le cas dans celles qui ont trait à l'électricité. Mais, même dans ces industries, l'expérience pratique dans un nouveau domaine technique permet souvent de devancer la science, grâce à une observation ou une expérience qui suscitera ensuite la recherche fondamentale. Ainsi, lorsque la radio fit son apparition, les amateurs se virent attribuer la gamme des ondes courtes – moins de 200 mètres – parce que les autorités pensaient que ces ondes n'avaient guère d'utilité. En réalité, ce sont des amateurs intelligents, et qui ignoraient que ces ondes fussent inutiles, qui démontrèrent bientôt qu'elles permettaient d'obtenir une transmission effective. C'est en cherchant à déterminer pour quelles raisons exactement les performances de cet appareil avaient à ce point dépassé les attentes qu'on fit des découvertes majeures sur la nature de l'ionosphère (6). À la fin des années 40, des ingénieurs qui cherchaient la cause de courts-circuits dans des appareils électroniques découvrirent qu'ils étaient dus à des

(5) Pour trouver quelques exemples intéressants de cette interaction, voir WHYTE, 1995

(6) COHEN, chap 16

croissances filamenteuses, c'est-à-dire à des monocristaux sans dislocations. On découvrit que ces cristaux étaient à la fois solides et élastiques, ce qui donna lieu à des recherches approfondies sur les conditions déterminant leur croissance et leurs propriétés physiques. Ces recherches permirent finalement de développer la science fondamentale de la croissance des cristaux qui, à son tour, eut un grand impact sur l'industrie électronique (7).

En ce qui concerne les métaux, la science de la métallurgie n'a commencé à se développer véritablement que dans la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. Il s'agissait d'expliquer le comportement des métaux que produisaient d'ores et déjà les techniques Bessemer et post-Bessemer. L'étude des propriétés spécifiques de l'acier produit par certaines techniques, ou à partir de matériaux particuliers, constitue un terrain particulièrement riche pour la recherche scientifique. Des phénomènes tels que la détérioration par vieillissement ou la fragilité des métaux fabriqués à partir de certains combustibles ne pouvaient qu'intriguer des hommes ayant reçu une formation scientifique. On continua cependant, même au XX<sup>e</sup> siècle, à créer de nouveaux alliages suivant des méthodes tout à fait empiriques.

Le Duralumin, un nouvel alliage d'aluminium de qualité supérieure, a été découvert presque par hasard et utilisé pendant des années sans que personne comprenne vraiment le phénomène du « durcissement par vieillissement ». Ce n'est que plus tard, grâce à l'avènement de nouveaux moyens techniques, tels que la diffraction des rayons X et le microscope électronique, qu'on a pu expliquer ce phénomène.

Wilm a fait la découverte, capitale pour la métallurgie, du durcissement par vieillissement, parce que les mesures de

dureté de certains alliages d'aluminium avaient révélé certaines contradictions apparentes. À l'époque, on était incapable de faire le lien entre le durcissement par vieillissement et les changements structuraux qu'on pouvait observer au microscope, on ne pouvait donc trouver aucune explication satisfaisante à ce phénomène (8). Cependant, le Duralumin fut très largement employé dans l'industrie aéronautique (y compris dans la construction des zeppelins) pendant la Première Guerre mondiale. Dans la période de l'entre-deux-guerres, les alliages durcis par vieillissement et par précipitation (9) furent de plus en plus souvent utilisés pour des applications industrielles. L'indéniable valeur commerciale de ces alliages nouveaux et de qualité supérieure donna un nouvel élan à la recherche fondamentale, qui fut bientôt en mesure de faire le lien entre les propriétés de ces alliages, leurs caractéristiques cristallographiques et leur structure atomique. Cependant, ce sont les métallurgistes, hommes de terrain, qui ont fourni aux ingénieurs toute une gamme de nouveaux métaux beaucoup plus résistants et présentant de meilleures caractéristiques mécaniques, électriques et magnétiques, et ce bien avant qu'on ait pu comprendre véritablement les propriétés de ces alliages. C'est la volonté d'expliquer ces propriétés, mises en évidence par les métallurgistes et déjà largement exploitées dans de nombreuses industries, qui a essentiellement motivé la recherche fondamentale. « Ces études ont permis de mieux comprendre les phénomènes de déformation et de renforcement, d'étayer les théories de la dislocation ainsi que les théories magnétiques, et de vérifier l'existence et l'importance des lacunes dans le réseau des cristaux » (10).

Je pense que, même en plein XX<sup>e</sup> siècle,

(7) « Mechanism of Crystal Growth Discovered », Bell Laboratories Record, avril 1964, p. 142.

(8) « Bien qu'il faille considérer Wilm comme un chercheur brillant dans le domaine de la recherche appliquée et comme un expérimentateur scrupuleux, même selon les critères actuels, il faut reconnaître qu'il ne s'est jamais sérieusement intéressé aux causes du durcissement et qu'il a préféré laisser à d'autres le soin de faire ne serait-ce que des conjectures quant à sa nature » HUNSICKER et STUMPF, 1965, p. 279.

(9) « Les alliages dont le vieillissement s'obtient à température ambiante sont considérés comme des alliages de durcissement par vieillissement, alors que ceux qui s'obtiennent par précipitation à une température plus élevée sont classés parmi les alliages de durcissement par précipitation » ALEXANDER et STREET, 1954, p. 176.

(10) SMITH, 1965, p. 309. Voir également O'NEILL Hugh, *ibid*.

on peut considérer la métallurgie comme l'un des secteurs par excellence où les techniciens sont « arrivés premiers », c'est-à-dire qu'ils ont su développer de nouvelles technologies de pointe avant même que la science ne leur ait tracé le chemin. Les techniciens ont révélé aux scientifiques certaines propriétés et caractéristiques des métaux qui appelaient une explication scientifique. Des innovations techniques telles que l'acier à coupe rapide que l'on doit à Taylor et White (1898), puis, dans les années 20, le carbure de tungstène brite sont des exemples classiques de progrès techniques ayant précédé, puis suscité, la recherche scientifique. A vrai dire, Frederick Taylor s'intéressait aux problèmes d'organisation du travail sans avoir même les plus élémentaires notions de métallurgie à la portée de tous les ingénieurs de son époque (11)

De la même façon, des progrès purent être accomplis dans les techniques de raffinage du pétrole grâce aux techniques de distillation fractionnée, qui avaient été développées dans d'autres industries. Et les méthodes de craquage furent introduites par des hommes doués d'une grande expérience pratique, mais qui n'avaient reçu aucune formation de chimiste. Lorsqu'en 1867 le chimiste français Berthelot publia ses travaux traitant de l'action de la chaleur sur certains hydrocarbures, il ne fit rien de plus que nous donner les moyens d'interpréter un phénomène qui était couramment exploité dans l'industrie pétrolière (12)

Le fait que le savoir technique précède souvent le savoir scientifique continue à se vérifier au XX<sup>e</sup> siècle. Le travail des scientifiques aujourd'hui consiste pour une large part à systématiser et structurer les connaissances acquises, ainsi que les solutions et les méthodes pratiques élaborées par les techniciens dans un premier temps

La technique a exercé une influence déterminante sur la science dans la mesure où elle a tout d'abord acquis certaines formes de savoir et fourni des informations que les scientifiques ont ensuite tenté d'expliquer et de codifier à un plus haut niveau

L'une des réalisations les plus remarquables du XX<sup>e</sup> siècle, le transistor, a suivi un processus apparemment très semblable. C'est seulement après que de nombreuses expériences empiriques sur les semi-conducteurs eurent été réalisées que le vice-président des Laboratoires Bell, Mervin Kelly, décida de financer le projet de recherche qui permit de découvrir, en 1947, l'effet transistor. On sait désormais que le comportement particulier des semi-conducteurs est fonction de la présence d'électrons mobiles (conducteurs), lesquels dépendent de certains facteurs tels que les impuretés, la lumière, la chaleur ou les stimuli électriques. Cependant, les demi-conducteurs tels que l'oxyde de cuivre et les redresseurs au silicium – découverts par des méthodes purement empiriques – étaient déjà largement utilisés bien avant qu'on ait pu expliquer ces phénomènes. Il est certain que les recherches sur l'état solide, qui aboutirent à la découverte de l'effet transistor (13), furent essentiellement motivées par ces techniques qui avaient fait leurs preuves

### **Les interrogations techniques stimulent la recherche fondamentale.**

J'ai tenté de montrer que l'accumulation de connaissances techniques offrait à la science un champ d'observation lui permettant d'alimenter ses recherches. Je souhaiterais maintenant développer cette idée en m'arrêtant aux autres formes que peut prendre cette interaction. L'un des principaux objets de mon analyse de l'impact de la technique sur la science est de souligner le rôle déterminant que joue le progrès

(11) KRANZBERG et SMITH Smith, 1965, 1<sup>re</sup> partie

(12) BIRR, 1966, pp 60-61

(13) J A MORTON, 1971, pp 46-48. Le phénomène de redressement intriguait beaucoup en raison du décalage qui existait entre les prévisions théoriques et le taux de redressement qu'on pouvait observer ou réaliser par des méthodes expérimentales. Voir PEARSON et BRATTAIN, pp 4-7. Les recherches sur les ondes d'hyperfréquence, motivées par l'intérêt que suscita le radar pendant la Seconde Guerre mondiale, permirent d'acquieser une expérience des plus précieuses

technique dans l'établissement du programme de recherche de la science. Ce progrès finit généralement par se heurter à certaines limites qui, une fois identifiées et définies, font l'objet de nouvelles recherches scientifiques. Ainsi, dans le domaine de l'industrie aéronautique, il arrivait toujours un moment où le progrès se trouvait freiné par des limites que seule une meilleure compréhension de certains aspects du monde physique pouvait permettre de dépasser. L'avènement du turbo-réacteur a eu un très grand impact aussi bien sur la science que sur l'industrie aéronautique, dans la mesure où il a permis de repousser peu à peu les limites de la compréhension scientifique, et d'identifier les domaines où il était nécessaire de pousser les recherches afin de rendre possibles de nouveaux progrès techniques. C'est ainsi que le turbo-réacteur a donné naissance à une nouvelle aérodynamique étudiant les vitesses supersoniques, « elle-même à l'origine de l'aérodynamique », en effet, des turbo-réacteurs de plus en plus puissants permirent aux avions d'atteindre des vitesses telles que le dégagement de chaleur à la surface de l'appareil devint un facteur déterminant du comportement de l'air. Puis, la vitesse de ces avions augmentant sans cesse, il devint nécessaire de recourir à la magnétothermodynamique. En effet, on atteignait des températures telles que l'air se dissociait en ions submoléculaires » (14).

Le progrès technique n'a pas pour seule utilité de créer de nouveaux besoins scientifiques dans certains domaines. On a souvent pu faire avancer les connaissances en testant concrètement de nouveaux produits techniques dans leur environnement réel. Bien que les essais en soufflerie aient toujours fourni de précieuses informations sur les performances qu'on pouvait attendre d'un prototype, il y a toujours eu une marge d'erreur considérable entre ces tests et les performances réelles de l'avion. Ce fait est imputable en partie à l'insuffisance des théories scientifiques sur lesquelles on

se fonde pour reproduire les conditions de vol réelles à des fins expérimentales, et en partie à l'insuffisance des connaissances ou à notre inaptitude à mener des expériences fiables. Ainsi, lors du premier vol de la navette spatiale, se posa le problème de la pénétration des ailes dans l'atmosphère terrestre au retour de la navette, problème d'autant plus compliqué qu'il obligeait à prendre en compte certains phénomènes aérodynamiques encore mal expliqués.

Mon point de vue est que les industries à technologie de pointe évoluent toujours suivant le même processus. Le progrès technique oriente clairement la recherche scientifique vers les domaines les plus rentables. Ce processus peut revêtir diverses formes. Ainsi, avec le moteur à réaction, dont les performances ne cessent d'augmenter, les ingénieurs ont pu identifier certains phénomènes naturels spécifiques d'un environnement particulier. Dans l'industrie du téléphone, l'avènement de la transmission à longue distance et de nouveaux modes de transmission ont fortement stimulé la recherche fondamentale. Pour pouvoir améliorer la qualité de la radiotransmission, il était nécessaire tout d'abord de mieux comprendre les interactions qui s'exercent entre le rayonnement électromagnétique et les conditions atmosphériques variables. Il est incontestable que certains des grands programmes de recherche fondamentale développés au XX<sup>e</sup> siècle sont nés de la volonté d'améliorer la qualité de la transmission du son par téléphone. Et en cherchant à résoudre divers problèmes de brouillage, de distorsion ou d'atténuation des signaux radioélectriques qui transmettent le son, nous avons considérablement élargi notre perception de l'univers.

Les deux grandes découvertes scientifiques que firent Jansky il y a cinquante ans et, plus récemment, Penzias et Wilson, sont nées des recherches entreprises pour améliorer la qualité des transmissions téléphoniques. Or ces travaux impliquaient nécessairement qu'on s'intéresse aux sources

(14) CONSTANT II, 1980, p. 240 et VON KARMAN 1954. De la même façon, le développement du chemin de fer au XIX<sup>e</sup> siècle a contribué à faire avancer la science, en particulier en ce qui concerne la fatigue des métaux et la résistance des matériaux.

de bruit Il est à noter que ces deux découvertes ont été possibles grâce à l'utilisation d'appareils extrêmement précis, développés à l'origine par les Laboratoires Bell pour des programmes de recherche appliquée Jansky utilisait une antenne orientable qui avait été conçue par Harald Friis pour résoudre certains problèmes liés à la faible intensité des signaux radiotéléphoniques Quant à Penzias et Wilson, ils se servaient d'une antenne cornet d'une précision remarquable, qui avait été construite pour les programmes de télécommunications par satellite Echo et Telstar (15)

La création des services radiotéléphoniques intercontinentaux à la fin des années 20 suscita des recherches sur la sensibilité statique, qui furent confiées à Jansky En 1932, il publia un article sur les trois sources de bruit que ses travaux l'avaient amené à identifier il s'agissait des orages locaux, des orages plus distants et d'une troisième source que Jansky définit comme « un sifflement parasite permanent dont l'origine reste inconnue » Ce sont ces parasites, auxquels on donna le nom de bruit des étoiles, qui furent à l'origine de la radioastronomie

L'expérience de Jansky montre bien pourquoi il est si difficile de faire la différence entre recherche fondamentale et recherche appliquée C'est souvent en tentant de résoudre des problèmes pratiques, du ressort de la recherche appliquée, qu'on en vient à faire des découvertes scientifiques fondamentales Il est à mon avis parfaitement utopique de vouloir tracer une frontière entre ces deux types de recherche d'après les motivations des chercheurs – qui peuvent être soit la volonté d'obtenir certaines informations pratiques (auquel cas on considérera qu'ils font de la recherche appliquée), soit le désir pure-

ment désintéressé d'acquérir de nouvelles connaissances (on parlera alors de recherche pure) Mais, quelles que soient les intentions premières de ceux qui entreprennent ces recherches, il est tout à fait impossible de prévoir de quel ordre seront les résultats auxquels elles aboutiront L'histoire montre que l'on doit certaines grandes découvertes scientifiques à des hommes qui pensaient, comme Jansky, faire de la recherche appliquée

Les Laboratoires Bell ont financé des travaux de recherche fondamentale en astrophysique parce qu'ils voulaient que soient étudiés les problèmes et les possibilités que présentait la transmission par faisceaux hertziens, en particulier pour les satellites de télécommunications (16) Penzias et Wilson ont observé pour la première fois le rayonnement cosmique de fond, considéré aujourd'hui comme une confirmation de la théorie du « Big Bang » qui serait à l'origine de la formation de l'univers, alors qu'ils tentaient d'identifier et de mesurer les sources de bruit dans leurs appareils récepteurs et dans l'atmosphère Ils découvrirent que « ce rayonnement dans l'espace est isotrope et son spectre présente les caractéristiques d'un corps noir à une température de 3 degrés Kelvin » (17) Penzias et Wilson ignoraient alors que les caractéristiques de ce rayonnement de fond correspondaient exactement à ce qu'avaient deviné avant eux les cosmologues en faveur de la théorie du Big Bang

Il est à noter que les travaux sur la transmission du son, entrepris dans l'industrie téléphonique à des fins pratiques, ont fortement stimulé la créativité de la recherche fondamentale Mais on peut également remarquer que les problèmes de communication ont donné lieu à des

(15) Après avoir reçu le prix Nobel, Wilson dit, au cours d'une interview, que ce qui l'avait tout d'abord incité à travailler pour les Laboratoires Bell, c'était la perspective d'avoir cette antenne à sa disposition « Ce qui m'a tout d'abord amené aux Laboratoires Bell, c'était la possibilité de disposer à la fois du cornet réflecteur – qui avait été construit pour le projet Echo – et du maser à ondes progressives, qui constituait un radiotélescope extraordinaire » AARONSON, 1979, p 19

(16) A de très hautes fréquences, certaines conditions atmosphériques – par exemple la pluie – sont fréquemment à l'origine de brouillages dans la transmission Cette forme d'affaiblissement du signal est un problème qui s'est constamment posé dans le développement de la communication par satellite, et qui a fortement stimulé la recherche, aussi bien technologique que fondamentale, entre autres sur les phénomènes de polarisation Voir DINN Neil F, 1977, pp 236-242

(17) *Impact*, 1972, p 87

formes très différentes de recherche fondamentale. La recherche scientifique donne parfois naissance à un nouvel outil ou concept intellectuel, ou bien encore à un nouveau cadre de pensée pouvant s'appliquer à de nombreux phénomènes dans des disciplines très variées. Ainsi, la théorie de l'information énoncée par Shannon (18) a non seulement joué un rôle primordial dans la conception de nouveaux matériels et de nouveaux systèmes dans l'industrie téléphonique, mais elle a également trouvé de nombreuses applications dans d'autres domaines. On doit à Shannon une formule permettant de calculer la capacité maximale d'un système de télécommunications à transmettre parfaitement l'information, ce qui représente un grand progrès intellectuel intéressant essentiellement l'industrie téléphonique, en effet, il est primordial de pouvoir calculer précisément la capacité de transmission d'un canal préalablement à toute conception industrielle. Mais, comme c'est souvent le cas, cette importante découverte, qui concernait un secteur particulier, eut des répercussions dans bien d'autres domaines. L'idée centrale de la théorie de Shannon, selon laquelle il est possible de donner une expression mathématique à un contenu informationnel, a eu de nombreuses ramifications. La théorie de l'information a ouvert des perspectives entièrement nouvelles dans nombre de domaines, et elle a joué un rôle majeur en informatique. En l'occurrence, la recherche a fourni une série de modèles mathématiques très généralisables, qui ont eu de nombreuses applica-

tions, aussi bien dans le domaine des sciences behavioristes que dans celui des sciences physiques et de l'ingénierie (19).

Ce que je veux dire, c'est que la logique particulière à laquelle obéissent certaines industries, comme l'industrie téléphonique, contribue à orienter la recherche dans certaines directions. Prenons pour exemple la nécessité, inhérente à cette industrie, d'obtenir des matériaux correspondant à certains critères. Pour pouvoir développer le transistor, il fallait atteindre certaines normes de pureté, sans précédent dans le domaine industriel. Le fonctionnement du transistor nécessitant l'introduction de quelques atomes étrangers dans le cristal semi-conducteur, il était impératif que ce semi-conducteur soit d'une extrême pureté. L'introduction d'un seul atome étranger pour 100 millions d'atomes de germanium n'était possible qu'à condition de disposer de matériaux répondant à des normes de pureté très strictes, qu'on ne put atteindre qu'à la suite de longues recherches.

Le développement de l'industrie téléphonique nécessite que le matériel et les composants soient soumis à des conditions extrêmement dures, ce fut le cas aussi bien des câbles transocéaniques que des satellites géostationnaires. Ces conditions extrêmes exigent l'application de normes de fiabilité draconiennes qui, si elles ne sont pas respectées, peuvent avoir de graves conséquences économiques. Il est évident que ce type de technologie oblige à observer des normes incomparablement plus strictes que celles appliquées pour l'élec-

(18) SHANNON, 1948

(19) Le transfert des techniques, concepts, outils de recherche et méthodes, d'une discipline scientifique à une autre, est une question extrêmement importante qui, à ma connaissance, n'a pas encore été traitée de façon systématique. Le transfert, aussi bien du matériel que des connaissances, d'une branche à une autre, a énormément contribué à faire avancer la recherche dans certains domaines. Comme l'a fait remarquer BROOKS Harvey : « La biologie moléculaire a pu se développer grâce, en partie, à l'utilisation d'outils et de techniques expérimentales du domaine de la physique, et bon nombre de ceux qui furent à l'origine de cette science étaient des physiciens convertis. L'intérêt qu'ont tout d'un coup suscité les sciences de la terre – la géophysique interne, la physique de l'atmosphère et l'océanographie physique – est dû en partie à des techniques et à des concepts du domaine de la physique, mais qui ont pu être appliqués dans ces disciplines et qui ont permis de révéler et de résoudre des problèmes scientifiques restés dans l'ombre jusqu'alors. Ces sciences sont donc passées de méthodes d'observation et de description pures à des techniques faisant intervenir pour une large part des expériences en laboratoire et des simulations au moyen de modèles mathématiques » (« Physics and the Polity », *Science*, 26 avril 1968, p. 398). On connaît mal les raisons et la chronologie de ces transferts, ainsi que les circonstances qui les ont motivées. Il semble cependant qu'ils aient contribué de manière importante à orienter le progrès scientifique au XX<sup>e</sup> siècle, et il est intéressant de noter qu'avant cela les sciences physiques ont largement bénéficié du développement de certaines techniques propres à la biologie et à la médecine, et tout particulièrement de la technologie des rayons X et des microscopes optiques et électroniques.

tronique grand public ou dans une briqueterie. En effet, la défaillance d'un câble sous-marin placé au fond de l'océan entraîne des réparations et des coûts de remplacement considérables, ainsi qu'un important manque à gagner. Pour ces mêmes raisons, il était impératif que les satellites de télécommunication soient d'une fiabilité et d'une résistance à toute épreuve pour pouvoir supporter ne serait-ce que le lancement et la mise en orbite. Il fallait qu'ils puissent résister à des chocs, des vibrations, des variations de température, des radiations et d'autres phénomènes (20) d'une extrême violence. Pour cette industrie, le respect de normes de fiabilité très strictes, loin d'être secondaire, représente donc une condition nécessaire à de bonnes performances économiques. C'est essentiellement pour cette raison que les Laboratoires Bell ont donné une grande priorité à la recherche sur les matériaux au cours de ces dernières années. D'autre part, ces préoccupations ont contribué pour une large part à orienter la recherche dans de nouvelles directions. L'un des principaux problèmes que posait le tube à vide était son manque de fiabilité. C'est entre autres pour cette raison (21) que fut entrepris un programme de recherche pure dans le domaine de la physique des solides, programme qui aboutit au développement du transistor. Mais celui-ci, bien qu'il soit aujourd'hui d'une parfaite fiabilité, posa à ses débuts divers problèmes de fonctionnement. Au début des années 50, et alors qu'il trouvait un champ d'application de plus en plus vaste, le transistor révéla de sérieux défauts de fonctionnement, liés à des phénomènes de surface. Ces difficultés donnèrent lieu à d'importantes recherches au niveau fondamental sur les états de surface, ce qui permit à la fois de remédier à ces problèmes de fiabilité et d'acquérir de nouvelles connaissances ayant trait à la physique des surfaces.

Bien avant cela – dans les années 20 –, les recherches menées pour pallier les dé-

faillances des tubes à vide furent à l'origine d'une spectaculaire percée scientifique. C. J. Davisson s'intéressait aux tubes à vide et à l'amélioration de leurs performances afin, entre autres, d'augmenter leur durée de vie et leur capacité, et d'aboutir à une conception plus simple. Il fut frappé par ses observations sur le mode d'émission des cristaux de nickel au cours de ses recherches sur « l'émission secondaire » d'électrons dans des tubes thermoioniques. Il démontra expérimentalement la nature ondulatoire de la matière en bombardant un cristal de nickel au moyen d'un faisceau d'électrons et en étudiant le mode de diffraction de ces électrons. Davisson partagea le prix Nobel en 1937 pour ses travaux, qui firent autorité, sur la nature ondulatoire de la matière (22).

Il existe d'autres excellentes raisons pour ne pas considérer que les relations entre la science et la technologie sont telles qu'il y a d'abord la recherche scientifique, et ensuite seulement les applications techniques qui en découlent. Les propriétés d'un matériau ne sont souvent expliquées scientifiquement qu'après une longue période d'utilisation. En effet, certains problèmes n'apparaissent qu'au bout d'un certain temps. Or l'un des principaux objets de la recherche sur les matériaux était d'améliorer leurs performances en trouvant une solution aux problèmes que révélait une utilisation prolongée. Pour le plus grand ennui de leurs utilisateurs, la plupart des matériaux posent en général toutes sortes de problèmes bien connus, liés à la dégradation, la fracturation, la contamination, le vieillissement, la corrosion, la fragilisation en cas de contraintes complexes, ainsi que de nombreux problèmes de maintenance. Ainsi, les Laboratoires Bell firent entreprendre de nombreuses recherches sur le polyéthylène avant d'en généraliser l'usage dans le gainage des câbles et l'isolation des fils. Cependant, toute une série de nouveaux problèmes apparurent après que le

(20) MORTON, pp 24-25

(21) *ibid*, pp 46-48, ainsi que l'interview non publiée de MORTON J. A. à Murray Hill, N. J., 29 novembre 1962, pp 21-25

(22) MABON 1975, p 97

polyéthylène eut été commercialisé On entreprit à nouveau d'importantes recherches motivées en partie par ces problèmes d'utilisation, ce qui permit de mieux connaître le processus de solidification du polyéthylène et par conséquent sa structure, puis de mieux comprendre comment cette structure pouvait déterminer les propriétés mécaniques, électriques et chimiques du matériau (23) Il apparut que la fragilité du polyéthylène était due en partie à sa masse moléculaire et à sa forme cristalline, on augmenta donc sa masse moléculaire On put aussi lutter contre la fâcheuse tendance du polyéthylène à s'oxyder grâce au développement et à l'utilisation d'agents antioxydants

L'accroissement des connaissances se fait suivant un processus beaucoup plus cumulatif et interactif que ne le pensent ceux pour qui tout progrès s'accomplit de façon unilatérale, une bonne fois pour toutes, et de telle sorte que le savoir scientifique précède nécessairement les applications technologiques En réalité, c'est en soumettant un matériau à des expériences sans cesse renouvelées, dans un nouvel environnement, et en lui faisant par conséquent subir de nouvelles contraintes, qu'on fait apparaître des problèmes auxquels on ne s'était jusqu'alors jamais trouvés confrontés et qu'on n'avait pas même imaginés

En cherchant à améliorer leurs performances techniques, les industries de pointe identifient sans cesse de nouveaux problèmes qui peuvent devenir un sujet d'étude pour la science D'autre part, l'amélioration des performances d'un pro-

duit ou la réduction de ses coûts de production peuvent avoir des conséquences économiques très positives On peut bien sûr se demander pourquoi ce système fonctionne apparemment beaucoup mieux dans certaines industries – ou certaines entreprises – que dans d'autres

### **L'interaction entre science et technique**

J'ai donc tenté de montrer que l'agenda de la recherche scientifique est étroitement lié aux besoins technologiques permanents de l'industrie J'ai également évoqué certaines des formes que peut prendre l'influence technologique, afin que nous puissions mieux comprendre les changements d'orientation de la recherche scientifique Dans le cas de l'industrie téléphonique, c'est, entre autres, l'extension du réseau, le développement de la transmission à grande distance ainsi que les problèmes de brouillage et de distorsion qui en découlent, et la nécessité d'établir des normes de fiabilité extrêmement rigoureuses, qui ont révélé des problèmes spécifiques et orienté la recherche dans certaines directions Avec le développement du réseau téléphonique, cette industrie s'est heurtée à de nouvelles exigences concernant, en particulier, la capacité de transmission des canaux D'un point de vue historique, l'une des entreprises les plus importantes et les plus ingénieuses de la recherche fut d'augmenter la capacité de transmission des canaux existants Cependant, il fut bientôt nécessaire de développer de nouveaux canaux ayant une capacité supérieure On est donc

(23) « An Interview with Dr Bruce HANNAY », Bell Laboratories Record, février 1969, pp 45-52 Comme l'a fait remarquer BAKER W O, « si le secteur des télécommunications a connu une telle expansion au cours de ces dernières décennies, c'est grâce à la science des polymères qui a permis d'obtenir un remarquable transfert d'information entre le comportement de l'entité chimique (c'est-à-dire de la simple molécule de base) et la matière telle qu'elle se présente, que ce soit sous une forme fluide viscoélastique, sous une forme solide, ou encore sous celle du cristal lui-même dont les facultés d'adaptation ne cessent de croître En effet, si la science des polymères suscite tout particulièrement l'intérêt, aussi bien de la science que de l'industrie, c'est parce que, pour la plupart des autres matériaux, les relations entre leurs propriétés (résistance sensible, résilience, friction, nature électrique, etc) et l'unité structurale de base (atome ou molécule) sont beaucoup moins importantes Pour donner un exemple inverse, les propriétés solides et liquides des métaux sont essentiellement déterminées par l'agrégat, même si la structure électronique de l'atome lui-même reste très significative D'autre part, les unités moléculaires des polymères ont une relaxation à la fois mécanique et électrique qui s'établit sur une certaine échelle de temps, et qui permet d'obtenir une grande variété de conformations et de réponses temporelles selon les applications du matériau Ce sont tous ces facteurs qui ont déterminé l'utilisation croissante des polymères par Bell Telephone System au cours des dernières années » *The Use of Polymer Science in Telecommunications*, Annals of the New York Academy of Sciences, p 620

passé de l'utilisation des fils à celle des câbles coaxiaux, puis à celle des équipements hertziens, des satellites, et enfin des fibres optiques. Si la transmission par ondes lumineuses a suscité un tel intérêt, et si l'on a entrepris de développer ce nouveau mode de transmission, c'est parce qu'on était de plus en plus assujéti à une nouvelle contrainte : celle de l'espace physique. La nécessité de remédier au véritable encombrement des circuits dans les zones métropolitaines donna un grand élan à la recherche sur les fibres optiques dont on espérait qu'elles permettraient d'augmenter au maximum la capacité de transmission des canaux dans l'espace disponible.

Le développement des fibres optiques offre plusieurs exemples d'interactions dynamiques entre la science et la technologie qui vont me permettre d'illustrer mon propos. L'intérêt suscité par ce nouveau mode de transmission était essentiellement motivé par les problèmes d'espace et d'encombrement du réseau téléphonique, mais ce sont les nouvelles percées technologiques des années 50 qui ont rendu possible son exploitation. C'est grâce au développement de la technologie du laser qu'il est devenu possible d'utiliser les fibres optiques dans les systèmes de transmission. Puis cette possibilité, à son tour, a éveillé un regain d'intérêt pour l'optique, dans la mesure où toute avancée dans ce domaine pouvait offrir des débouchés extrêmement intéressants. Depuis quelques années en effet, l'optique représente à nouveau un champ de recherches important. Parce qu'elle offrait de nouvelles perspectives fondées sur les innovations technologiques passées et à venir, l'optique, qui connaissait alors un certain marasme intellectuel, devint bientôt un domaine de recherches extraordinairement créatif. Ce renouveau ne doit rien à l'optique elle-même ; en réalité, il a été motivé par des perspectives techniques entièrement nouvelles, elles-mêmes fondées sur la récente découverte du laser.

L'exemple que je viens de citer pour illustrer l'influence de l'évolution technologique sur la recherche fondamentale

n'est pas unique en son genre. La physique des solides, qui est actuellement l'une des branches les plus importantes de la physique, n'intéressait que peu de physiciens avant l'avènement du transistor. En réalité, cette science n'était pratiquement pas enseignée dans les universités. A l'époque, Shockley n'aurait sans doute pu étudier la physique des solides, comme il le fit au MIT dans les années 30, dans aucune autre université américaine, à l'exception de Princeton. Cette situation a, bien entendu, changé avec l'apparition du transistor en 1948. Celui-ci ayant fait la preuve que la recherche en physique des solides pouvait avoir des retombées extrêmement intéressantes pour l'industrie, d'immenses ressources furent attribuées à cette branche. Il est à noter que cette mobilisation soudaine après 1948 pour soutenir la recherche en physique des solides se fit aussi bien dans les universités que dans l'industrie privée. Ainsi, la technologie du transistor n'est pas l'aboutissement d'importants travaux de recherche qui l'auraient précédée. A vrai dire, ces travaux n'avaient été jusqu'alors qu'extrêmement modestes. C'est seulement après l'avènement du transistor que d'importants moyens scientifiques furent engagés dans ces recherches. Selon J. A. Morton – qui dirigea le groupe de recherche fondamentale constitué dans les Laboratoires Bell à la suite de l'invention du transistor –, il était impossible, dans les années 40, de trouver des gens ayant des connaissances en physique des solides « car cette science n'était pas inscrite au programme des universités (24) ». C'est pourquoi Morton persuada Shockley de venir donner un cours intitulé « La physique des semi-conducteurs » au personnel des Laboratoires Bell. L'ouvrage célèbre de Shockley *Les Electrons et les trous dans les semi-conducteurs* était une compilation des documents qu'il avait utilisés dans son cours. En juin 1952, Shockley donna même un cours de six jours dans les Laboratoires Bell à l'intention de professeurs provenant d'une trentaine d'universités différentes, afin de

(24) MORTON, interview non publiée, p. 11

les encourager à inscrire à leur programme des cours sur la physique du transistor Il est certain qu'à l'époque le transfert des connaissances scientifiques se faisait essentiellement de l'industrie vers l'université (25)

Ainsi, même lorsqu'une innovation technologique est précédée de quelques recherches au niveau fondamental, c'est l'établissement d'un lien concret entre la technique et le domaine scientifique concerné qui, par la suite, suscite une grande accélération des recherches C'est à peu près ce qui s'est produit en physique nucléaire après 1938, date à laquelle fut réalisée la fission de l'atome qui eut de si terribles applications militaires pendant la Seconde Guerre mondiale Quelle que soit l'époque, le soutien financier accordé à la recherche est essentiellement fonction des débouchés techniques qu'elle laisse espérer Ce fait s'est beaucoup accentué au XX<sup>e</sup> siècle en raison de l'augmentation vertigineuse des coûts de recherche, et par conséquent de la nécessité de ne financer la recherche publique et privée qu'en fonction de certains critères Mais déjà, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, alors que les coûts de recherche n'atteignaient pas encore les niveaux actuels, la recherche scientifique était essentiellement conditionnée par la perspective de déboucher sur des innovations technologiques prometteuses Si la recherche en chimie organique connut une grande effervescence à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, ce fut surtout grâce aux travaux de Perkin qui réussit à faire la synthèse de la mauvéine, premier colorant synthétique dérivé de l'aniline Et l'ampleur soudaine que prirent les recherches sur le comportement des macromolécules fut la conséquence des travaux de Leo Baekland qui développa, en 1909, les composés de phénol-formaldéhyde, auxquels on peut donner n'importe quelle forme et dont le durcissement s'obtient au moyen

de la réticulation moléculaire par chauffage sous pression (26)

### **La pression de la demande sur la recherche scientifique.**

Pourquoi le progrès technique contribue-t-il de façon aussi déterminante à orienter la recherche scientifique ? Tout d'abord, pour la bonne et simple raison que ce type de recherche peut être extrêmement gratifiant, tant du point de vue financier que du point de vue social Il est important de noter qu'en réalité toute avancée technologique significative marque non pas un aboutissement, mais le point de départ de toute une série de nouveaux développements également importants Là encore, notre vision des choses est déformée par certains préjugés selon lesquels la recherche fondamentale précède toute innovation technologique, qui n'est qu'un produit, ou l'ultime aboutissement, de cette recherche De façon très significative, le développement du transistor, l'explosion du premier appareil nucléaire ou le premier vol d'un aéronef plus lourd que l'air, loin de représenter une étape finale, ont ouvert la voie à de nouvelles recherches On pourrait dire que toute innovation importante sert de base entièrement nouvelle pour de futurs progrès techniques et qu'elle conditionne les recherches pendant des décennies C'est ainsi que la révolution du transistor se poursuit depuis plus de trente ans et que seul un esprit totalement dénué d'imagination oserait suggérer que nous en aurons bientôt épuisé toutes les possibilités technologiques Tout succès commercial fondé sur cette innovation présuppose de nombreuses inventions complémentaires, ainsi que le développement de techniques annexes qui, à leur tour, feront l'objet de recherches scientifiques D'importantes recherches scientifiques sont donc entreprises dans le seul but d'élargir le champ des connaissances nécessaires à

(25) « Même des années plus tard, il n'était pas rare, dans des hauts lieux de la recherche sur les semi-conducteurs tels que Silicon Valley, que les universités fassent appel à des professeurs provenant de l'industrie locale pour enseigner à temps partiel la physique des solides » BRAUN et MACDONALD, pp 126-127

(26) KRANZBERG et SMITH, p 25

l'exploitation de cette nouvelle technologie (27)

Si les connaissances scientifiques progressent généralement à la suite d'avancées techniques importantes, c'est essentiellement parce que ces avancées engendrent de nouvelles motivations économiques. Il y a de fortes chances pour qu'un matériau cher, et n'ayant par conséquent que peu d'applications industrielles, suscite un intérêt très limité – à moins que certaines de ses performances ne présentent un avantage déterminant. D'un autre côté, lorsque le progrès technique fait chuter le prix d'un matériau, celui-ci est plus utilisé et devient susceptible de faire l'objet de nouvelles applications. C'est ainsi que les grandes innovations qui furent réalisées dans l'élaboration de l'acier à partir des années 1850 motivèrent de nombreuses recherches sur ce matériau. Les bas prix de l'acier post-Bessemer permirent d'utiliser ce métal dans la construction pour de multiples usages, ce qui jusqu'alors n'avait pas été possible pour des raisons économiques. Il devint alors indispensable d'expliquer certaines de ses propriétés, telles que sa variabilité notoire et ses caractéristiques de fonctionnement lorsqu'il était soumis à diverses contraintes, tensions et pressions, dans des applications entièrement nouvelles. Ainsi, certaines innovations ayant permis d'abaisser le coût de l'acier et d'en accroître l'offre, il fut possible de l'utiliser à une grande échelle, ce qui incita de nouvelles catégories d'utilisateurs, ainsi que les métallurgistes eux-mêmes, à entreprendre des recherches considérables et à multiplier les essais dans ce domaine. La possibilité d'utiliser l'acier dans la fabrication de rails et de divers équipements pour l'industrie des chemins de fer donna naissance à l'un des premiers laboratoires scientifiques de l'industrie américaine : le Pennsylvania Railroad's Laboratory, fondé à Altoona en 1879. Là encore, on peut dé-

celer des relations de cause à effet qui font que certains phénomènes économiques ou techniques débouchent sur de nouvelles recherches scientifiques (28).

Dans le même ordre d'idées, on peut enfin dire que les avancées techniques permettent de vérifier certains types de phénomènes, et, dans bien des cas, d'entreprendre des recherches d'un grand intérêt, aussi bien scientifique que technique, sur certains points scientifiques précis. Il est intéressant de rappeler que, au début des années 30, Rutherford refusa catégoriquement d'admettre la possibilité de libérer de l'énergie à partir du noyau de l'atome, et que Lord Rayleigh affirma qu'il était impossible de faire voler des appareils plus lourds que l'air, et ce six ou sept ans avant que les frères Wright n'effectuent leur premier vol – certes de courte durée – à Kitty Hawk. Les innovations technologiques sont la preuve que la recherche dans certains domaines particuliers peut avoir de nombreuses répercussions présentant un intérêt aussi bien scientifique que purement économique, et ce en démontrant bien souvent l'inexactitude de certaines certitudes scientifiques.

### **Le cas des instruments de mesure.**

Il existe un autre domaine où la technique influe considérablement sur la recherche scientifique, mais que je me contenterai d'évoquer ici étant donné l'ampleur du sujet. Je veux parler du développement des techniques d'observation, d'essai et de mesure, bref des instruments de la recherche. Le perfectionnement de ces instruments a été pendant longtemps un facteur déterminant de progrès scientifique, en raison de son influence sur l'évolution des méthodes d'observation et de mesure dans certains domaines scientifiques. Développer cette assertion, exemples à l'appui, équivaldrait à retracer

(27) Comme l'a fait remarquer BROOKS Harvey au cours d'un débat sur les sciences physiques, qui eut lieu quelques années après la fin de la Seconde Guerre mondiale : « C'est la nécessité de créer des techniques annexes favorisant le développement et l'exploitation d'une première innovation qui suscitait la recherche pure, et non le contraire. » *Science*, 26 avril 1968, p. 199.

(28) Pour plus de détails sur les travaux réalisés au Pennsylvania Railroad's Laboratory à Altoona, voir *The Life and Life Work of Charles Benjamin Dudley*.

en détail l'histoire de la science depuis quatre cents ans, ce qui dépasse nettement mes compétences. Je me contenterai donc de faire quelques remarques.

Si l'on se réfère à la longue histoire du microscope (puis du microscope électronique), du télescope (puis du radiotélescope), ainsi qu'à celles, plus récentes, de la radiocristallographie, de l'ultracentrifugation, du cyclotron, des divers types de spectroscopie, de la chromatographie et de l'informatique, il est facile de démontrer que le perfectionnement des instruments, en offrant de nouvelles possibilités à la science, lui a permis de progresser dans de nombreux domaines. Cependant, ce serait faire preuve d'un déterminisme technologique assez simpliste que de s'en tenir à cette idée. Tout d'abord, les relations qui s'établissent entre la technique et la science sont beaucoup plus interactives (et dialectiques) qu'un tel déterminisme ne le laisse supposer. En effet, lorsque l'on décide d'encourager les recherches visant à perfectionner certains types d'instruments, c'est généralement parce qu'on a la volonté de progresser dans un domaine scientifique particulier et parce que l'on se sent enfin en mesure de perfectionner les instruments ayant trait à ce domaine. D'autre part, les techniques concernant ces instruments ont un impact scientifique et une portée très variables. Ainsi, l'accélérateur linéaire et l'ultracentrifugeuse ont trait à des domaines scientifiques beaucoup plus restreints que, par exemple, l'ordinateur. Celui-ci, en effet, est un instrument de recherche qui peut trouver une utilisation dans tous les domaines. Il a eu un immense impact sur un grand nombre de disciplines, et aussi bien sur les sciences sociales que sur les sciences physiques. Ces instruments peuvent donc avoir une influence d'une étendue très variable sur les diverses branches de la science. Ce serait par conséquent une erreur que de vouloir établir un lien trop étroit entre les progrès accomplis dans certains domaines scientifiques et les instruments associés à ces domaines.

Enfin, il n'est pas inutile de souligner que les progrès accomplis dans les techniques d'observation n'avaient en eux-

mêmes que peu de signification, jusqu'à ce qu'on ait développé les concepts, et formulé les hypothèses, qui permirent de donner un sens virtuel aux observations qui avaient été faites. Après tout, les microscopes existaient depuis plus de deux cents ans, et plusieurs générations d'observateurs curieux avaient pu y contempler d'étranges petites bactéries avant que Pasteur n'énonce, vers 1850, ses théories sur la microbiologie. A la suite de ces travaux, le microscope participa plus que jamais aux progrès de la science.

## Conclusion

Pour conclure, je voudrais rappeler les thèmes que j'ai tenté de développer. La recherche scientifique est conditionnée, orientée et canalisée par de puissants facteurs économiques. Ces facteurs ont deux causes : d'une part, la recherche scientifique coûte cher ; d'autre part, selon ses orientations, elle peut devenir extrêmement rentable. Les sociétés industrielles ont donné naissance à un vaste secteur technique qui obéit essentiellement à des besoins et des motivations économiques, et ce secteur contribue à établir de nombreux liens entre la vie économique courante et la science. La technique oriente la recherche scientifique vers des domaines promettant d'être rentables, et elle stimule sa créativité en lui soumettant de nouveaux problèmes et en la faisant bénéficier de ses observations empiriques. L'institutionnalisation croissante de la recherche dans des laboratoires industriels privés corrobore cette analyse. Et l'on peut supposer que, dans ces entreprises à but lucratif, la décision d'entreprendre des recherches est soumise à des calculs sur les coûts et les profits qu'elles peuvent générer.

S'il en est ainsi, les économistes ont peut-être tort de faire preuve d'une trop grande humilité en considérant la science comme une force exogène ne pouvant être du ressort de l'analyse économique. Les facteurs que je viens d'évoquer ont contribué à multiplier et à renforcer les influences techniques, et par conséquent économiques, qui conditionnent le progrès scientifique. Je pense que le processus

d'industrialisation fait inévitablement de la science une activité de plus en plus endogène, en augmentant sa dépendance à l'égard de la technique. J'ai dit que les ressources attribuées à la science étaient surtout déterminées par des considérations d'ordre technique. Je pense donc que, pour mieux comprendre l'évolution de la science, il faut considérer celle-ci comme

un processus associant la « logique » du progrès scientifique aux considérations économiques qui conditionnent la vie quotidienne et qui touchent la science par l'intermédiaire de la technique.

*Traduit de l'anglais  
par Myriam WENIG  
(Les intertitres sont de la rédaction)*

## RÉFÉRENCES

AARONSON, Steve, *The Light of Creation, an Interview with Arno A Penzias and Robert C Wilson* Bell Laboratories Record, janvier 1979

ALEXANDER, W et STREET, A *Metals in the Service of Man*, Penguin Books, Harmondsworth, 1954

BIRR, Kendall, « Science in American Industry, » in VAN TASSEL D et L G HALL Michael, eds, *Science and Society in the U S* Dorsey Press, Homewood, III, 1966

BRAUN, Ernest et Mc DONALD, Stuart *Revolution in Miniature*, Cambridge University Press, 1978

CARDWELL D S L, *From Watt to Clausius*, Cornell University Press, Ithaca, N Y, 1971

COHEN I B, *Science Servant of Man*, Little, Brown and Co, Boston, 1948

CONSTANT, Edwartur, *The Origins of the Turbojet Revolution*, John Hopkins University Press, Baltimore, 1980

CROWTHER J G, *Men of Science*, W W, Norton and Co, New York, 1936

DINN, Neil F, *Preparing for Future Satellite Systems*, Bell Laboratories Record, octobre 1977

O'NEILL Hugh *The Development and Use of Hardness Test in Metallographic Research*, in The Sorby Centennial Symposium on the History of Metallurgy, Cyril Stanley-Smith Ed, 1965

HUNSICKER, M -Y et STUMPF, H C *History of Precipitation Hardening* in Cyril Stanley-Smith Ed, The Sorby Centennial Symposium an the History of Metallurgy, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1965

KRANZBERG et SMITH, *Materials in History and Science*, in SMITH, Sorby Centennial Symposium on the History of Metallurgy (cf infra)

*IMPACT*, élaboré par des membres du personnel technique de Bell Telephone Laboratories et de la Western Electric Company Patent Licensing Division, FAGEN M D, ed Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, N J, 1972

KUZNETS, Simon, *Modern Economic Growth* (Yale University Press, New Haven, Conn, 1966)

MABON, Prescott, *Mission Communications* (Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, N J, 1975)

Melvin KRANZBERG et Cyril STANLEY-SMITH, *Materials in History and Society*, 1<sup>re</sup> partie in COHEN Morris ed, *Materials Science and Engineering*, Elsevier, Amsterdam, n d

MORTON, *Organizing for Innovation*, McGraw Hill Book Company, New York, 1971

PEARSON, G -I et BRATTAIN, W H *History of Semiconductor Research*, Bell Telephon System, Technical Publications, Monograph 2538, Murray Hill H J, 1955

SHANNON, Claude, *A Mathematical Theory of Communication*, « Bell System Technical Journal », juillet 1948

STANLEY-SMITH, *Sorby Centennial Symposium on the History of Metallurgy*, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1965

VON KARMAN, Theodore, *Aerodynamics*, Cornell University Press, Ithaca, New York, 1954

WHYTE, R -R, *Engeneering Progress Through Trouble*, The Institution of Mechanical Engineers, Londres 1975

*The Life and Life Work of Charles Benjamin Dudley*, American Society for Testing Materials, Philadelphie, 1933