

JOURNAL DE LA SOCIÉTÉ STATISTIQUE DE PARIS

HENRI DUPRAT

Science des mesures et mesure des sciences

Journal de la société statistique de Paris, tome 131, n° 2 (1990),
p. 79-97

http://www.numdam.org/item?id=JSFS_1990__131_2_79_0

© Société de statistique de Paris, 1990, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Journal de la société statistique de Paris » (<http://publications-sfds.math.cnrs.fr/index.php/J-SFdS>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

SCIENCE DES MESURES ET MESURE DES SCIENCES

Henri DUPRAT
Administrateur à l'INSEE

RÉSUMÉ

Application de méthodes statistiques à l'étude de la littérature scientifique, la scientométrie a conduit à d'utiles résultats dans l'analyse de la structure des divers champs du savoir et dans le repérage de sujets nouveaux. Mais la scientométrie reste jusqu'ici limitée au niveau lexical et plus apte à cerner une question particulière qu'à évaluer la signification d'une information. Des progrès nouveaux peuvent être réalisés dans le vaste champ des sciences exactes, où la métrologie offre un niveau sémantique spécifique. Traitant à la fois des grandeurs et des erreurs de mesure, la métrologie peut fournir les instruments d'une mesure du savoir, et par là des données pertinentes pour une évaluation de l'information scientifique et pour une analyse économique de la science et de la technologie.

Applying statistical methods to a study of scientific literature, scientometrics has led to useful results in the structural analysis of the different fields of knowledge and in the detection of emerging topics. But scientometrics remains, up to now, restricted to a lexical level, and it is more efficient to focus on a particular topic than to assess the meaning of an item. Further improvements can be achieved, in the large field of the exact sciences, where metrology gives a specific semantic measurement errors, metrology can provide tools for a measurement of knowledge, and, therefore, relevant data for scientific information assessment and for an economic analysis of science and technology.

SOMMAIRE

I. L'ESSOR DE LA SCIENTOMÉTRIE ET SES TENDANCES ACTUELLES

Deux problèmes nouveaux

La dualité du projet scientométrique

L'apport actuel de la scientométrie

Le problème des langages spécialisés

II. LA MÉTROLOGIE ET LES PROGRÈS DES SCIENCES EXACTES

Le rôle de la métrologie

Recherche scientifique et développement métrologique

La métrologie et la structure des sciences exactes

Vers la mesure d'un savoir scientifique

Les limites du recours à la métrologie

III. LA MÉTROLOGIE ET LA TECHNOLOGIE

La valeur économique du savoir

Un préalable métrologique

Essai d'analyse systématique

La notion de valeur d'usage

Les concepts de base

La production de caractéristiques au moyen de caractéristiques

Esquisse d'un modèle de la technologie

Conditions pratiques de mise en œuvre

Les perspectives actuelles

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

I. L'ESSOR DE LA SCIENTOMÉTRIE ET SES TENDANCES ACTUELLES

Deux problèmes nouveaux

Le rapide développement de la scientométrie depuis 1960 apparaît, à l'examen, comme une conséquence de la mutation intervenue vers 1940 dans la recherche scientifique. Celle-ci avait changé d'échelle et de moyens, sinon de nature, pour devenir ce que certains ont appelé la « mégascience » contemporaine.

Cette mutation avait posé deux problèmes nouveaux :

- *un problème documentaire* au sein même de la recherche,
- *un problème économique*, celui du coût pour la société des programmes scientifiques.

D'une part, le nombre de chercheurs et celui, corrélatif, des publications avaient fait de la diffusion de l'information scientifique un goulot d'étranglement : il devenait de plus en plus difficile à des chercheurs de plus en plus spécialisés de se tenir informés des progrès de leur discipline et de ceux des disciplines voisines.

D'autre part, le coût des programmes de recherche, dans les pays développés, était devenu un élément non négligeable des budgets nationaux et,

par là-même, avait créé le souci, pour les autorités de tutelle, de soumettre à un calcul économique les politiques et la gestion des laboratoires.

Le développement de l'informatique est venu à point nommé, dans les années soixante, apporter des éléments de solution à ces deux problèmes.

La scientométrie est née ainsi, comme sous-produit de l'informatique documentaire, sous la forme d'analyses statistiques de plus en plus approfondies des flux d'information scientifique.

Elle est devenue, en peu d'années, une discipline nouvelle, prenant pour objet la science elle-même et se donnant pour but la description et l'analyse de celle-ci. Selon l'un de ses fondateurs : « La modélisation de la littérature scientifique peut nous conduire à des méthodes permettant l'investigation systématique et la définition objective, par une analyse structurale, du statut de la science, de sa dynamique et de ses processus internes. Mais il faudra beaucoup de travail pour y parvenir. » (Garfield, 1979).

La dualité du projet scientométrique

La scientométrie répond à deux fins très différentes : elle est à la fois une recherche fondamentale, ébauche d'une « épistémologie quantitative », et une recherche appliquée au développement d'outils d'orientation et de gestion des programmes scientifiques. Cette dualité de buts n'est pas sans dangers : l'urgence du besoin de tels outils peut faire oublier l'ampleur des recherches fondamentales nécessaires à leur développement et leur bon usage.

Une telle dualité des fins poursuivies est à l'image de la science elle-même, où les mêmes risques existent, faute, précisément, d'une connaissance suffisante de la dynamique scientifique.

On sépare trop souvent la science, au sens de la recherche fondamentale, de la « technologie », au sens de Mansfield (1969) : *transformation des progrès du savoir en développement de nouveaux procédés ou de nouveaux produits*.

La réalité est différente : science et technologie s'interpénètrent et sont liées par un réseau complexe d'interactions (Turner *et alii*, 1984). D'une part, les avancées de la recherche dépendent de ses moyens, étroitement liés au progrès des techniques instrumentales et au contexte politique, économique et social ; d'autre part, le développement des innovations fait appel aussi bien à des résultats de recherche fondamentale, anciens ou récents, qu'à des informations économiques ou sociales et à des pratiques industrielles d'origine empirique.

Ce réseau d'interactions comporte des échanges de biens et de services, mais est avant tout un système de communication entre disciplines et techniques. C'est « une organisation mentale collective, faite d'hommes, liés par un tissu de relations, et parlant entre eux divers langages » (Duprat, 1972).

C'est au sein de ce système d'information qu'un même résultat scientifique peut prendre place dans deux échelles de valeur différentes :

– *par sa valeur intrinsèque de connaissance*, au service de la communauté scientifique; c'est cette valeur qui oriente les sélections documentaires et fait le prestige des chercheurs;

– *par sa valeur technologique potentielle*, faite d'éventuelles utilisations futures; ce sont ces enjeux économiques et sociaux qui font l'intérêt de la recherche pour les autorités de tutelle.

Le besoin de prévoir, d'évaluer et d'orienter la science et la technologie pose donc à la scientométrie deux problèmes distincts :

– *analyser la structure et les modalités des relations*, en observer l'évolution et surmonter la diversité des langages;

– *élaborer des indicateurs des valeurs en question*, ainsi que les méthodes nécessaires pour en effectuer une agrégation pertinente et améliorer la prise en compte économique des résultats de la recherche.

La solution du premier problème est un préalable à celle du second : elle implique la priorité d'une recherche fondamentale sur les applications immédiates. Elle apporte d'ailleurs par elle-même de précieux outils de prévision et de gestion scientifique et technique.

L'apport actuel de la scientométrie et ses progrès

L'analyse systémique des interactions entre science et technologie, à partir de la littérature scientifique et technique, est en progrès rapide.

Le projet d'un « *Atlas de la Science* » a conduit à la description, dans de nombreux domaines, de la spécialisation et de l'articulation des disciplines de recherche, à l'identification de champs nouveaux et au suivi de leur développement. Ces travaux permettent de mettre en évidence et de comparer les orientations de la recherche selon les laboratoires ou les pays.

Des travaux analogues, à partir des dépôts de brevets, portent sur les relations entre recherche et développement, ainsi que sur les stratégies industrielles (Narin, 1976).

Ces résultats ont pu être obtenus grâce aux progrès réalisés dans trois directions :

- le recours aux méthodes statistiques modernes d'analyse des données,
- la diversification des approches (co-citations, mots associés),
- l'enrichissement et l'extension des corpus documentaires utilisés.

Ce dernier point est d'une importance majeure. Il est dû aux progrès de l'informatique.

Les données disponibles dans les systèmes documentaires se bornaient, il y a une vingtaine d'années, à des références bibliographiques, sommairement indexées, limitant la bibliométrie à des dénombrements de publications. L'introduction en ligne de résumés et de citations a permis d'améliorer les indexations et a rendu possibles les travaux ultérieurs (Small, 1973).

L'évolution en cours de l'informatique permet de prévoir la possibilité prochaine d'une utilisation directe des textes eux-mêmes, ainsi que de multiples bases de données factuelles.

Il devrait en résulter de nouveaux progrès de la scientométrie, principalement grâce aux méthodes de mots associés (Callon, Law and Rip, 1986). Mais en même temps des problèmes nouveaux, qui apparaissent déjà dans certains systèmes experts, seront posés par l'analyse détaillée du contenu de l'information.

Le problème des langages spécialisés

Le rôle du langage naturel, si « contrôlé » qu'il soit, n'est pas le même selon les disciplines scientifiques : en *sciences humaines*, les passages essentiels d'un texte restent en langage naturel, tandis que dans les *sciences physiques* l'essentiel du contenu s'exprime par des signes ou des nombres et non plus des mots (Shinn, 1987).

Des langages spécifiques apparaissent, à la maturité d'une science, quand elle a su choisir l'ensemble le plus restreint possible, d'« objets » élémentaires, dont les combinaisons, selon certaines lois, rendent le plus clairement compte de la diversité des phénomènes. De Lavoisier à Mendéléev, la chimie a ainsi élaboré son langage actuel de description des substances et de leurs réactions ; une seconde combinatoire est apparue ensuite, rendant compte de la diversité des éléments comme combinaisons de deux ou trois particules fondamentales. La physique des particules est, à son tour, en train de résoudre un problème analogue ; de même, la biologie semble avoir trouvé dans le code génétique le futur langage d'identification et de description de ses objets élémentaires.

Nous avons évoqué ces langages, il y a quelques années, à propos du rôle des grandeurs de mesure dans la physique classique, et essayé d'en montrer l'importance pour le développement des systèmes documentaires : *la conception assistée par ordinateur a pour corollaire l'emploi de langages dont la sémantique et la syntaxe soient homogènes aux relations que le calcul implique, c'est-à-dire aux lois que la physique découvre, condition que vérifient les systèmes d'unités* (Duprat, 1972).

L'existence de tels langages va introduire en scientométrie un nouveau niveau d'analyse, complémentaire de ceux qui correspondent aux noms d'auteurs et au vocabulaire utilisé. Mais, au moins dans le cas des grandeurs de mesure, elle peut apporter des éléments de solution au problème, encore fort mal résolu, de l'évaluation quantitative du contenu de l'information scientifique et technique.

Nous essaierons de le montrer en analysant le rôle de la métrologie dans les sciences exactes et dans le processus technologique.

II. LA MÉTROLOGIE ET LES PROGRÈS DES SCIENCES EXACTES

Le rôle de la métrologie

La métrologie, science des mesures, remplit dans le vaste champ des sciences dites « exactes » une fonction dont l'importance est trop souvent sous-estimée. Pour les scientifiques, en effet, son intervention est permanente, mais est perçue comme subalterne et finit par être oubliée, tandis que les non scientifiques, lorsqu'ils en connaissent l'existence, n'en voient que le rôle institutionnel de contrôle des instruments de mesure.

L'importance réelle de la métrologie tient à deux faits :

- la métrologie est, à la fois, *science des grandeurs et science des erreurs de mesure*; « Dans tous les cas la mesure donne un résultat; c'est la métrologie qui permet d'attribuer à ce résultat sa signification, en le rapportant à une unité soigneusement définie et en précisant les limites à l'intérieur desquelles on peut lui faire confiance. » (Giacomo; 1983);
- la métrologie, comme d'autres sciences, traite *d'une statique et d'une dynamique*; la métrologie statique correspond au rôle institutionnel déjà évoqué; la métrologie dynamique traite de l'amélioration des instruments, de la définition de grandeurs nouvelles et du développement des systèmes d'unités.

En tant que science des erreurs de mesure, c'est la métrologie qui donne un sens à la notion même de « sciences exactes ».

En tant que dynamique des grandeurs de mesure, elle est une composante essentielle des progrès de la connaissance scientifique.

Recherche scientifique et développement métrologique

Le progrès des sciences exactes porte à la fois sur leur rigueur et leur étendue. La métrologie en est un facteur essentiel.

D'une part, *l'amélioration des mesures fait partie du développement de l'instrumentation de laboratoire*, qui permet :

- de créer artificiellement des conditions expérimentales plus variées ou mieux contrôlées que celles fournies par la nature ou réalisées auparavant; ces conditions sont elles-mêmes *définies et contrôlées par des grandeurs de mesure*;
- de mesurer avec une exactitude plus grande les grandeurs existantes.

D'autre part, la description des propriétés des substances, des caractéristiques et du comportement des systèmes devient de plus en plus quantitative. Cette quantification, dont l'histoire de la physique offre de nombreux exemples, comporte une série de phases :

- *une description qualitative*, assortie de classifications, dont l'expression en langage naturel se spécialise peu à peu, avec l'apparition de nomenclatures de plus en plus précises;

- *l'introduction d'échelles empiriques*, pour chaque « qualité » susceptible de varier par degrés et de faire apparaître une relation d'ordre ;
- *la recherche de « lois » empiriques*, sous forme de régularités et de corrélations entre les variations des divers aspects quantitatifs d'un même phénomène ;
- *un effort théorique d'unification* des lois empiriques ; pour les relier entre elles et aux lois plus générales du savoir théorique déjà constitué.

Ces étapes aboutissent à la définition de nouvelles grandeurs de mesure, à leur rattachement aux systèmes d'unités et à la détermination de « constantes physiques » (Duprat, 1986).

En effet, les lois physiques reliant des grandeurs mesurables ont pour forme générale :

$$g_1^{a_1} g_2^{a_2} \dots g_n^{a_n} = K$$

où les $g_1 g_2 \dots g_n$ sont les grandeurs et K une constante physique.

C'est le théorème de Vaschy, lié au caractère mesurable des grandeurs : l'expression de la loi doit être invariante lors de changements des unités de mesure, ce qui implique une relation linéaire entre les logarithmes des grandeurs.

Lorsqu'une loi nouvelle est mise en évidence, deux cas sont possibles :

- cette loi sert à définir *une grandeur nouvelle*, si elle en comporte une ; la nouvelle grandeur vient alors enrichir le système d'unités existant ;
- la loi fait apparaître *une relation nouvelle entre les grandeurs existantes* ; elle doit donc être compatible avec les lois déjà connues qui relient ces grandeurs.

Ce dernier cas est très important du point de vue épistémologique.

La métrologie et la structure des sciences exactes

La fonction instrumentale de la métrologie s'accompagne en effet d'un rôle épistémologique dans l'unification du savoir. Ce rôle a été signalé dès 1927 par le physicien Bridgman, mais il est encore discuté.

Selon Bridgman : « *Un concept physique n'est pas autre chose que l'ensemble des opérations qui rendent possible sa mesure* ». Certains logiciens ont reproché à cette « définition opératoire » de conduire à « une prolifération des concepts », chaque procédure expérimentale différente définissant un concept distinct (Suppe, 1974).

Une telle critique ne tient pas compte du fait que la métrologie est la science des erreurs de mesure et *permet de calculer l'étendue de l'incertitude qui affecte chaque mesure*, en fonction de l'exactitude des instruments utilisés au cours des opérations. Lorsqu'une même grandeur intervient dans plusieurs lois différentes, observables dans des ensembles opératoires différents, *les métrologistes retiennent pour définir la grandeur celle de ces lois qui correspond aux mesures les plus exactes*.

La thèse de Bridgman a d'ailleurs été confirmée plus tard, par l'exemple même, cité par lui, des mesures de longueur. En effet, l'ancienne définition du mètre à l'aide d'une règle de platine iridié a été remplacée en 1960 par la référence à une longueur d'onde, dont la mesure par spectrométrie était cent fois plus exacte; puis, à la suite de l'utilisation de lasers, cette définition a pu être rattachée, en 1983, à la mesure de la vitesse de la lumière, de nouveau cent fois plus exacte (Terrien, 1976).

La métrologie intervient donc à la fois comme auxiliaire de la recherche expérimentale et comme arbitre dans l'unification des théories. Son développement s'identifie à celui des sciences exactes :

- *la structure des systèmes d'unités est la même, par construction, que celle des lois physiques* et, par suite, que celle des relations entre les divers domaines des sciences exactes;
- *le niveau d'exactitude atteint en métrologie dans la définition des étalons fondamentaux reflète, en permanence, celui des meilleurs instruments utilisés par la recherche scientifique* (Guye, 1922);
- *les progrès dans l'exactitude de la mesure des grandeurs fondamentales se répercutent, de proche en proche, sur l'exactitude des grandeurs dérivées.*

Vers la mesure d'un savoir scientifique

L'examen du rôle de la métrologie dans la recherche en physique apporte des éléments nouveaux à la fois dans la gestion documentaire de l'information scientifique et dans l'estimation de la valeur de *connaissance* de son contenu.

La métrologie apparaît en effet, nous l'avons dit, comme *la source d'un langage privilégié* au sein de ce qu'on pourrait appeler le « noyau dur » de la science.

Les grandeurs de mesure qui interviennent dans l'étude d'un phénomène et dans l'expression de ses lois permettent d'identifier ce phénomène dans le champ des sciences et d'indexer les informations le concernant.

L'exactitude de la mesure des constantes physiques constitue une mesure du degré de connaissance des lois où ces constantes interviennent.

Les relations de définition, de proche en proche, des grandeurs de mesure, au sein des systèmes d'unités, donnent une description de la structure des relations entre les disciplines scientifiques et permettent de *constituer l'embryon d'un macrothésaurus*. Cette structure est aussi celle du *réseau à travers lequel les progrès des mesures se propagent dans les sciences*.

La diminution de l'exactitude de la mesure des grandeurs, lorsque l'on s'éloigne des grandeurs fondamentales fait apparaître des relations d'ordre et permet de *préciser la notion de sciences exactes* et le champ de celles-ci.

Les limites du recours à la métrologie

Il faut insister sur le fait que cet apport de la métrologie n'est pas possible dans tous les domaines des sciences exactes.

Les possibilités qui viennent d'être évoquées sont limitées, en premier lieu, par la validité du théorème de Vaschy : celui-ci prête à discussion, notamment, dès que certaines grandeurs ne sont plus mesurables, mais seulement repérables, comme la dureté d'un métal. Il cesse d'être valable lorsque des nombres absolus interviennent dans les phénomènes, par exemple à l'échelle atomique. En second lieu, le développement de la métrologie est plus ou moins avancé selon le domaine scientifique étudié, au sein même de la physique classique.

Il existe néanmoins de vastes domaines où la recherche scientifique peut, pour une large part, être décrite comme « *production de connaissance* », à l'aide des indicateurs physiquement significatifs que fournit la métrologie :

- en ce qui concerne *les moyens utilisés, par les valeurs extrêmes*, observées ou obtenues artificiellement grâce à l'équipement expérimental, *des paramètres physiques* qui définissent les conditions d'expérience, et *par l'exactitude de la mesure* ou du contrôle de ces paramètres;
- en ce qui concerne *les résultats obtenus, par le gain d'exactitude dans la mesure des constantes physiques qui interviennent dans le phénomène étudié.*

On peut ainsi, au moins à titre expérimental et sous certaines conditions, définir la « valeur de connaissance » d'un résultat scientifique. On peut aussi suivre, sinon anticiper, les progrès induits par ce résultat dans les disciplines voisines.

Une étude de cas est en préparation sur un exemple typique de cette interdépendance des progrès scientifiques : celui de la détermination de la vitesse de la lumière, précédemment évoqué.

III. LA MÉTROLOGIE ET LA TECHNOLOGIE

La valeur économique du savoir

Par la technologie, les résultats de la recherche prennent une dimension économique, en donnant naissance à de nouveaux produits et de nouveaux procédés.

La technologie ayant, de surcroît, été reconnue comme le facteur principal de la croissance, il a semblé naturel de considérer les dépenses de recherche comme un investissement et de les soumettre à une procédure de calcul économique analogue à celle utilisée habituellement lors du choix de biens d'équipement.

On a donc tenté de calculer un ratio économique de la forme :

$$\frac{\Delta V}{\Delta D}$$

où ΔV serait la valeur des résultats attendus (par exemple celle de bénéfices escomptés sur les ventes futures de biens nouveaux) tandis que ΔD serait une dépense, correspondant au coût des recherches engagées.

Les travaux économétriques faits pour estimer un tel ratio, *ex post*, au niveau macroéconomique, entre les dépenses totales de recherche et la croissance économique globale n'ont guère donné de résultats.

Le processus technologique d'ensemble est en effet la résultante d'un grand nombre de processus élémentaires, très divers par leurs conséquences et par leur durée. Les surplus de valeur obtenus sont difficiles à séparer, dans les statistiques, de l'évolution d'ensemble des agrégats et de l'influence de multiples facteurs, autres que les progrès scientifiques. Ces surplus ne peuvent être mis en corrélation claire avec le contenu et le niveau des programmes antérieurs de recherche scientifique.

Un préalable métrologique

Au contraire, *au niveau microéconomique*, il existe des cas de plus en plus nombreux où un tel calcul est possible et tend à devenir une pratique courante des bureaux d'études techniques.

Dans la recherche appliquée, en effet, lorsque des études font l'objet d'un contrat passé entre un laboratoire et une entreprise industrielle, le cahier des charges du contrat est rédigé en termes d'objectifs techniques, par des spécifications formulées à l'aide de grandeurs qui sont des grandeurs de mesure.

Le problème de l'évaluation économique des résultats attendus peut alors être décomposé en deux problèmes distincts.

Le principe de cette décomposition se ramène à un calcul très simple :

$$\frac{\Delta V}{\Delta D} = \frac{\Delta G}{\Delta D} \times \frac{\Delta V}{\Delta G}$$

où G représente une grandeur physique caractéristique d'une performance technique, dont dépendra la valeur d'usage d'un produit ou d'un procédé industriel.

Les deux ratios mis ainsi en évidence peuvent être évalués séparément.

Le ratio $\frac{\Delta G}{\Delta D}$ fait intervenir le coût prévisible des recherches nécessaires à l'obtention d'un résultat technique défini à l'avance; c'est *un problème classique de gestion d'un laboratoire*, si incertaine que soit une telle prévision.

Le ratio $\frac{\Delta V}{\Delta G}$ fait intervenir les résultats économiques futurs d'une amélioration technique donnée d'un procédé ou d'un produit; c'est *un problème classique d'étude de marché*.

Un même *préalable métrologique* conditionne donc la passation de contrats de recherche industrielle et l'évaluation économique de résultats obtenus

en laboratoire : l'existence de grandeurs de mesure qui servent de langage commun aux chercheurs et aux industriels (Duprat, 1972).

Les branches d'industrie où les changements technologiques sont les plus rapides, telles que l'électronique ou la chimie, sont celles où la métrologie est la plus avancée : elles bénéficient au mieux des progrès des sciences exactes.

Ces industries sont celles où la prévision et l'évaluation technologiques sont le plus nécessaires, mais ce sont aussi celles où *une modélisation économique de la technologie peut être tentée*.

Essai d'analyse systémique

La technologie est créatrice de valeur économique par la transformation des résultats de la recherche en innovations industrielles. Elle est, nous l'avons rappelé, faite d'un grand nombre de processus élémentaires.

Chaque processus élémentaire comporte *trois phases* :

- la recherche du savoir,
- la genèse de l'invention,
- le développement de l'innovation.

L'analyse en termes d'entrées et sorties fait apparaître :

- *en entrée, des flux monétaires*; ce sont les dépenses de recherche et celles nécessaires au développement de l'innovation ;
- *en sortie, des flux d'information industrielle et commerciale, décrivant un produit ou un procédé nouveau*, dont les ventes futures devront s'évaluer en termes monétaires ;
- dans les phases intermédiaires, *des flux d'information scientifique et technique*, qu'il sera nécessaire d'observer, de décrire et de mesurer.

Nous avons vu qu'il existe dans la pratique industrielle des cas où la phase intermédiaire se réduit à la recherche, en laboratoire, des conditions scientifiques de la réalisation d'une performance technique améliorant la valeur marchande d'un produit ou la rentabilité d'un procédé. Ce cas se rencontre fréquemment lors de la mise au point d'une invention.

Dans le cas général, c'est au stade de l'invention que se situe l'articulation entre :

- les *progrès du savoir scientifique* apportés par la recherche,
- les *améliorations de valeur d'usage*, des produits ou des procédés, introduites par l'innovation.

Nous avons essayé de montrer que les progrès de la recherche peuvent, dans nombre de cas, être quantifiés sous la forme de *gains d'exactitude* dans la connaissance de grandeurs physiques. Les données nécessaires sont contenues dans l'information scientifique et technique.

Les améliorations de la valeur d'usage des produits ou procédés nouveaux mis sur le marché sont quantifiables en termes de *performances techniques et*

de prix de ces performances. Ces données sont contenues dans l'information industrielle et commerciale.

La mise en relation des progrès scientifiques et des progrès techniques est rendue possible par l'existence d'un référentiel commun : *ce sont les mêmes grandeurs de mesure qui servent à étudier et décrire un phénomène et ses lois en laboratoire et à maîtriser l'utilisation de ce phénomène dans un procédé industriel.*

Les performances techniques des produits fabriqués sont elles-mêmes le plus souvent des grandeurs de mesure, au moins empiriques; elle peuvent être calculées, ou empiriquement déterminées, en bureau d'études, grâce à la connaissance des lois des phénomènes en jeu.

La notion de valeur d'usage

Nous avons fait référence à la notion de « valeur d'usage ». Cette notion n'a été introduite que récemment dans la théorie économique, où elle reste discutée (Lancaster, 1966). Elle est pourtant courante dans la pratique industrielle, comme nous avons essayé de le montrer (Duprat, 1987).

Elle est nécessaire aux calculs économiques en matière d'innovation. Le choix entre un produit ou un procédé nouveau et ceux déjà existants se fait en comparant simultanément leurs prix et les caractéristiques qui les rendent plus ou moins aptes à répondre à un besoin donné; ce choix n'entre pas dans le cadre de la théorie classique de la valeur, construite sur le comportement du consommateur, qui répartit ses ressources entre des biens différents selon ses préférences et les prix de ces biens.

La notion d'« *espace des caractéristiques* », introduite par Lancaster, permet au contraire de rendre compte des choix des acheteurs industriels et des calculs des bureaux d'études. Il est notamment possible de formaliser le contenu de l'information industrielle et commerciale en exprimant le prix des produits comme une fonction de leurs caractéristiques et en rendant calculables les « *prix implicites* » de celles-ci.

Des indicateurs des progrès de valeur d'usage introduits par des innovations peuvent ainsi être fournis par les variations concomitantes des caractéristiques de produits et de leurs prix implicites (Triplett, 1985).

Les concepts de base

L'invention est une application nouvelle du savoir à une fin pratique. Elle est ainsi, nous l'avons dit, à l'articulation des progrès de la recherche et ceux des valeurs d'usage. Son analyse fait intervenir divers concepts qui doivent être définis.

Le texte d'un brevet d'invention comprend en général l'indication du produit obtenu, du procédé qui permet de l'obtenir et des produits ou appareils à mettre en œuvre.

Cette séquence :

Produit → Procédé → Produit

correspond dans l'industrie à une portion de « *filière* », que l'invention va modifier ou créer.

Le concept de filière désigne en effet *les transformations successives d'une même matière, le long d'une chaîne d'opérations techniques et de transactions commerciales*. Les filières sont les structures élémentaires de l'activité industrielle.

Le texte du brevet mentionne rarement les sources scientifiques et techniques qui sont à l'origine de l'invention. La notion de « *lignée* » correspond à l'évolution d'un même concept technique, depuis les découvertes scientifiques qui en ont fondé la possibilité jusqu'aux prototypes successifs. Les lignées suivent donc les voies de transmission de l'information scientifique et technique relative à un sujet déterminé, c'est-à-dire la structure même des sciences et des techniques.

Une invention peut ainsi être décrite comme intersection d'une lignée et d'une filière.

Le fait, déjà souligné, que ce soient les mêmes grandeurs de mesure qui servent à étudier et décrire un phénomène et ses lois en laboratoire et à maîtriser l'utilisation de ce phénomène dans un procédé industriel, permet de *rendre cette description quantitative. Les lois physiques, en effet, sous-tendent les techniques industrielles et rendent calculables les paramètres qui servent à contrôler les procédés de fabrication.*

Un troisième concept doit auparavant être défini : celui de « *système technique* ».

Ce concept correspond au fait que les nouveaux produits engendrés par la technologie sont rarement utilisés isolément, mais comme composants de systèmes en même temps que d'autres produits qui constituent leur « *contexte d'utilisation* ».

Dans l'industrie, les concepts de filière et de système technique sont étroitement liés. D'une part, les équipements de production sont par eux-mêmes des systèmes techniques; d'autre part, de nombreux procédés de production consistent dans l'assemblage des composants d'un système qui constitue le produit final.

La production de caractéristiques au moyen de caractéristiques

La structure d'un système implique un ensemble de relations entre les caractéristiques des composants; elle se traduit par *un ensemble d'équations exprimant les contraintes de leur compatibilité mutuelle, ainsi que les caractéristiques du système complet en fonction des caractéristiques de ses composants.*

Si l'on décrit de cette façon une opération de production industrielle, *les équations obtenues font apparaître les caractéristiques du produit final comme fonction des caractéristiques des fournitures et des matériels utilisés.*

Ces équations font partie du savoir scientifique et technique des ingénieurs ; leur forme et leurs paramètres incorporent les connaissances existantes et sont modifiés par le changement technologique. C'est par leur intermédiaire que les caractéristiques des produits sont fonction du progrès scientifique.

Un tel modèle correspond à la transposition dans l'espace des caractéristiques de Lancaster du modèle classique de Straffa de « La production de marchandises au moyen de marchandises » (1960). On peut donc parler de « *Production de caractéristiques au moyen de caractéristiques* » et donner une formulation analytique de la notion de valeur d'usage.

Le chaînage des opérations de production le long d'une filière se révèle alors être *transitif*, les caractéristiques du produit issu d'une opération devenant caractéristiques d'entrée dans la suivante. Le modèle est donc valable pour la filière dans son ensemble.

Or on peut définir un système technique comme *un ensemble de filières aboutissant à une même utilisation finale* : un tel ensemble peut être représenté par un schéma en *forme d'arbre*. Sa propriété fondamentale reste d'être conforme au même modèle que le processus élémentaire, c'est-à-dire de pouvoir être *décrit en termes de caractéristiques d'entrée et de caractéristiques de sortie*.

Cela signifie que la problématique de la valeur d'usage, définie au niveau élémentaire d'un produit, garde un sens au niveau agrégé d'un système technique, et reste formulée en termes de performances et de prix de ces performances (Ayres, 1985).

Ce résultat est important du point de vue de la statistique économique : il permet d'envisager une prise en compte progressive de la technologie en compatibilité nationale.

Esquisse d'un modèle de la technologie

Il est donc possible, en théorie du moins, de rendre compte des relations qui font dépendre, de façon calculable, les performances techniques des procédés ou des produits de progrès scientifiques antérieurs, eux-mêmes décrits en termes quantitatifs.

Ces relations sont celles qu'utilisent en pratique les bureaux d'études. Elles sont extrêmement nombreuses et complexes.

Des représentations très simplifiées en ont déjà été élaborées lors d'études de cas, rétrospectives ou prospectives, sous la forme de *graphes de propagation* ou *d'arbres de pertinence* (étude Batelle pour la NSF, 1973, Ayres 1985).

Le but de la modélisation théorique proposée ici est de *justifier l'existence, due à la métrologie, et l'utilisation d'indicateurs quantitatifs, qui peuvent*

être associés à ces représentations et conduire à une mesure économique des progrès techniques. Il devient alors possible de *mettre en relation la valeur de connaissance, précédemment définie, des progrès scientifiques et leur valeur technologique.*

L'étude quantitative d'une lignée se fait en termes de valeurs de connaissance. Elle nécessite, pour chaque embranchement de l'arbre qui la représente, l'identification de la grandeur physique (ou des grandeurs) dont la mesure a bénéficié d'un progrès d'exactitude d'une importance suffisante pour constituer un « événement » scientifique, ainsi que les progrès des conditions expérimentales qui ont permis d'y parvenir (progrès des valeurs atteintes par les paramètres physiques et gains d'exactitude de leur mesure).

L'étude des changements des filières porte sur la valeur technologique. Elle implique l'identification des caractéristiques décrivant les performances les plus significatives de produits et de procédés, et les variations de ces caractéristiques, ainsi que celles de leurs prix. Ce sont les facteurs déterminants des progrès de valeur d'usage.

L'articulation des lignées et des filières se situe, nous l'avons dit, au stade du brevet d'invention. L'étude prospective de celui-ci porte sur l'identification des performances techniques nouvelles qu'un progrès des connaissances rend réalisables. C'est la méthode déjà utilisée par les bureaux d'étude. Mais ces travaux restent confidentiels.

Au contraire, les données nécessaires à des études de cas rétrospectives sont accessibles : elles figurent dans la littérature scientifique et technique et font partie du savoir des ingénieurs. De telles études de cas peuvent ainsi être faites sur des systèmes techniques en cours de développement.

L'analyse quantitative d'un progrès du savoir et de la propagation de ses conséquences est donc possible.

Conditions pratiques de mise en œuvre

La mise en œuvre des méthodes qui viennent d'être exposées repose sur l'utilisation conjointe de deux bases de données quantitatives sur :

- *le suivi des sciences et des techniques, en termes de résultats et de performances,*
- *l'évolution parallèle du coût des résultats et du prix des performances.*

Les données permettant de suivre l'évolution des sciences sont celles déjà énumérées :

- gains d'exactitude dans la détermination de constantes physiques,
- valeurs extrêmes des paramètres expérimentaux réalisables en laboratoire,
- exactitude de la mesure des grandeurs.

De même, le suivi de l'évolution des techniques porte sur les performances des produits ou des procédés industriels. Il faut souligner l'importance parti-

culière, à cet égard, des équipements et instruments destinés à la recherche, dont les performances correspondent aux deux rubriques précédentes.

Les sources nécessaires sont constituées par les publications scientifiques et techniques, mais aussi par l'interrogation d'ingénieurs, et, pour une large part, par les descriptions de matériels et de produits contenues dans l'information industrielle et commerciale émanant des fournisseurs.

La base de données sur le suivi des coûts et des prix ne peut être constituée qu'à partir de cette dernière source. Elle nécessite de surcroît un *calcul économétrique pour la détermination des prix implicites des performances*, à l'aide de méthodes dites « hédonistiques », appliquées aux caractéristiques et aux prix des produits (Triplett, 1985).

Les perspectives actuelles

Les applications actuelles sont encore expérimentales. Trois études de cas sont en cours :

- l'utilisation de *laser* pour la nouvelle définition du mètre,
- l'utilisation d'*outils de coupe en céramique* dans l'usinage des métaux,
- le rôle des *circuits intégrés* dans le calcul scientifique.

Leur intérêt est avant tout méthodologique. Néanmoins, les deux derniers de ces cas ont une grande importance immédiate en économie industrielle.

Les possibilités de développement d'études analogues sont limitées par des contraintes à la fois pratiques et théoriques.

Les difficultés pratiques tiennent aux *coûts de collecte et de traitement des données*. Celles-ci sont dispersées dans un grand nombre de documents... et dans la mémoire de nombreux spécialistes. Certaines banques de données existent cependant déjà aux Etats-Unis, qui pourraient peut-être faire l'objet d'une coopération internationale (Lenz, 1985).

Les difficultés théoriques sont doubles :

- la *coupure épistémologique qui sépare encore les sciences et les techniques, d'une part, de l'économie, d'autre part*; celle-ci reste jusqu'ici limitée à la sphère monétaire; il existe en théorie économique un problème métrologique qui semble ignoré (Duprat, 1986);
- le *préalable métrologique* sur lequel nous avons déjà insisté; les méthodes présentées ici ne sont valables que dans le champ des sciences exactes et de leurs applications industrielles.

Des perspectives favorables existent cependant.

Au point de vue pratique, en effet, *la collecte des données devrait, dans l'avenir, être facilitée par les progrès de l'informatique*, déjà évoqués. Ceux-ci provoquent, en effet, un développement rapide des bases de données factuelles. Le traitement de texte et la composition automatique en imprimerie rendent possible un accès direct, d'un coût très faible, aussi bien à l'information scien-

tifique et technique qu'à l'information industrielle et commerciale. Le goulot d'étranglement va donc devenir la capacité d'analyse, par les utilisateurs, des textes disponibles en ligne, provoquant le développement de logiciels de « *lecture assistée par ordinateur* ». C'est l'un des enjeux des recherches actuelles sur l'intelligence artificielle. Et certains systèmes experts utilisent déjà les grandeurs de mesure comme prédicats d'analyse de l'information.

Au point de vue théorique, *un fait nouveau*, d'importance majeure à notre avis, est le développement actuel d'une analyse économique du changement technologique, associant des ingénieurs, des statisticiens et des économistes (Triplett, 1985). L'originalité de cette analyse est d'utiliser comme cadre de référence « *l'espace des caractéristiques* » des produits, selon l'approche proposée dès 1966 par Lancaster.

En ce qui concerne le préalable métrologique, deux points doivent être soulignés :

- le champ des sciences exactes s'étend en permanence et, nous l'avons dit, une large part des progrès industriels procède d'améliorations récentes de sciences déjà anciennes ;

- l'analyse structurale de l'ensemble du savoir scientifique et technique est déjà assurée grâce aux méthodes lexicales actuelles ; le recours à des méthodes métrologiques ne fait qu'apporter des informations supplémentaires et des moyens nouveaux d'évaluation, la continuité entre les deux démarches étant assurée par l'utilisation comme mots-clés privilégiés des noms mêmes des grandeurs de mesure et de ceux de leurs unités.

CONCLUSION

Le développement de l'information scientifique et technique devrait sous peu conduire la scientométrie à traiter des données autres que textuelles et notamment à exploiter des valeurs numériques de grandeurs de mesure. Cette rencontre avec la métrologie ne pourrait qu'enrichir les concepts et les méthodes de la scientométrie, par la confrontation de résultats obtenus à des niveaux d'analyse différents, et lui ouvrir des voies nouvelles vers la science économique. Il existe en effet des domaines où la métrologie peut fournir des éléments de solution au double problème posé par l'évaluation des résultats scientifiques : mesurer leur « valeur de connaissance » et leur « valeur technologique ».

Une telle complémentarité entre disciplines scientifiques a une valeur particulière lorsque le champ de recherche est aussi vaste et reste aussi peu exploré.

Les « *sciences cognitives* », d'une part, restent un projet, celui de Simon (1969) et quelques autres, projet dont la réalisation n'est qu'amorcée par les travaux sur l'intelligence artificielle. Ni l'épistémologie ni la technologie, dont c'est pourtant la vocation, n'ont encore le statut de sciences qui traiteraient, respectivement, des sciences et des techniques comme la biologie traite des êtres vivants.

La science économique, d'autre part, pourtant déjà ancienne et bien établie, et malgré son extension vers des « sciences de la décision et de l'action », reste centrée sur la théorie de l'équilibre et semble ne voir dans le changement technologique qu'une cause exogène de perturbations marginales.

L'importance des enjeux de la science et de la technologie justifie donc un effort nouveau, nécessaire pour observer, décrire, comprendre, prévoir et orienter le développement. Cet effort devrait comporter *un vaste programme de recherche pluridisciplinaire*.

Janvier 1989

BIBLIOGRAPHIE

- AYRES R.U. (1985) Empirical measures of technological change at the sectoral level. *Technological forecasting and social change*, 27(2-3), 229-248.
- BATELLE (1973) Interactions of science and technology in the innovative process : some case studies. (Report for the N.S.F.) Columbus, Ohio.
- BRIDGMAN P.W. (1927) *The logic of modern physics*. MacMillan, New York.
- CALLON M., LAW J. and RIP A. (1986) Mapping the dynamics of science and technology. The MacMillan Press Ltd, London.
- DUPRAT H. (1972) Conditions linguistiques du transfert technologique. *Automatisme* XVII(11), 337-346, Dunod, Paris.
- DUPRAT H. (1986) Comptabilité nationale et métrologie. In *Etudes de comptabilité nationale*. Archambault E. et Arkhipoff O. éd., Economica, Paris.
- DUPRAT H. (1987) Vers une théorie de la valeur d'usage. *Journal de la Société de Statistique de Paris*, 128(4).
- GARFIELD E. (1979) *Citation indexing*. John Wiley and sons, New-York.
- GIACOMO P. (1983) La métrologie, langage universel. *Culture technique*, n° 9.
- GUYE C.E. (1922) *L'évolution physico-chimique*. Ed. Chiron, Paris.
- LANCASTER K.J. (1966) A new approach to consumer theory. *Journal of political economy*, 74(2), 132-157.
- LENZ R.C. (1985) A heuristic approach to technological measurement. *Technological forecasting and social change*. 27(2-3), 249-264.
- NARIN F. (1976) Evaluative bibliometrics : the use of publication and citation analysis in the evaluation of scientific activity. *Computer Horizons*, inc. Cherry Hill, N.J.
- SIMON H.A. (1969) *Sciences of the artificial*. Cambridge M.I.T. Press.
- SHINN T. (1987) Géométrie et langage : la structure des modèles en sciences sociales et en sciences physiques. *Bulletin de méthodologie sociologique*, 16, 5-38.
- SMALL H.G. (1973) Co-Citation in the scientific literature : a new measure of the relation between two documents. *Journal of the American Society for Information Science*, 24, 265-269.
- SRAFFA P. (1960) *Production of commodities by means of commodities*. Cambridge University Press.
- SUPPE F. (1974) *The structure of scientific theories*. University of Illinois Press.
- TERRIEN J. (1976) Standards of length and time. *Reports on progress in physics*, 39, 1067-1108.

- TRIPLETT J. (1985) Measuring technological change with characteristics-space techniques. Technological forecasting and social change, 27(2-3), 283-308.
- TURNER W.A., COURTIAL J.P., BAUIN S. et LAMPART C. (1984) Les CARTINDEX des sciences et des techniques. Documentaliste, 21(1).