

Communication de Monsieur François Le Tacon



Séance du 21 octobre 2005



Démarche scientifique et aperçu sur l'état actuel de la science dans le monde

I. - Introduction

La démarche scientifique est basée sur la recherche de la vérité. Son objectif est de tenter de comprendre le monde de manière pertinente et sans biais. En conséquence, la science est une entreprise sociale financée d'abord par les états, mais aussi par des fondations sans but lucratif ou par des entreprises privées en vue de profits.

La recherche scientifique ne peut se faire sans référence au travail des autres, sans la collaboration de tous. La science se place au sein d'un large contexte social.

De nombreux indicateurs permettent de se faire une idée du niveau scientifique atteint par un pays, une institution ou une discipline.

Nous allons d'abord examiner les différentes étapes de la démarche scientifique, puis tenter de faire un état de la situation de la recherche scientifique dans le monde à l'aide de quatre critères, les bases de données Thomson ISI, les prix Nobel, les médailles Fields et le classement des universités établi par l'université de Shanghai. Avant de conclure nous aborderons brièvement la question des liens entre recherche scientifique, développement technologique et développement en général. Nous éviterons cependant d'aborder la question sous l'angle du pourcentage du PIB attribué à la recherche, en raison de la difficulté de faire la part entre recherche au sens strict et recherche-développement et de connaître les chiffres attribués à la recherche militaire ou privée.

II. - Analyse de la démarche scientifique

La démarche scientifique se caractérise par une trois étapes et une succession de processus que nous allons analyser.

Première étape : Identification d'un problème important ou d'une question susceptibles de recevoir une réponse.

Pour beaucoup de scientifiques, l'identification d'un problème à résoudre est amenée par la curiosité, l'enthousiasme ou la passion pour un sujet. Pour d'autres, il peut s'agir tout simplement d'ambition. Pour d'autres encore, il peut s'agir d'un besoin exprimé par la société pour trouver une solution à un problème considéré comme essentiel, l'éradication d'une épidémie, la guérison de maladies ou la mise au point d'une nouvelle arme. L'identification d'un sujet de recherches peut être influencé par des facteurs économiques, culturels, sociaux, politiques ou militaires. Quelle que soit la motivation, toute tentative d'acquérir des connaissances commence par cette étape d'identification de la question à résoudre.

Deuxième étape : Le recherche de l'information

La deuxième étape consiste à rechercher les informations qui existent déjà sur le sujet. Ces informations viennent le plus souvent de la littérature scientifique déjà existante. Elle peuvent aussi provenir de la propre connaissance du chercheur ou d'expériences préliminaires. Il faut éliminer les informations qui sont peu fiables. L'essentiel du travail est bibliographique. Il est maintenant facilité par l'existence de bases de données qui regroupent toute l'information scientifique disponible (titre des articles, résumés et maintenant textes complets en ligne) et l'existence de moteur de recherches extraordinairement puissants qui interrogent toutes les bases données ou les sites internet en quelques secondes. Le meilleur moteur de recherche pour recueillir l'information générale est le serveur américain Google Scholar, spécialement destiné aux scientifiques. Cette deuxième étape est d'une extrême importance. Elle permet de faire le point des connaissances actuelles sur un sujet et évite à un scientifique de refaire ce qui a déjà été effectué par d'autres. Cela n'est évidemment pas vrai pour la recherche militaire où le secret est la règle.

Troisième étape : La mise en œuvre de la démarche scientifique

Qu'elle soit appliquée à la biologie, à l'astrophysique ou à n'importe quel domaine de la science, la mise en œuvre de la démarche scientifique relève d'un processus maintenant bien éprouvé et qui repose sur cinq processus :

- L'observation
- Le raisonnement logique et les hypothèses

- La validation des hypothèses
- L'analyse critique
- La publication

L'observation

L'observation est la description d'un phénomène ou d'un état indépendamment de toute évidence émotionnelle ou de toute croyance. Cette observation qui peut être visuelle, olfactive, auditive ou relever des sensations du toucher, peut être décrite par un dessin, une photographie ou un écrit. Elle peut être quantifiée par une mesure. La mesure est une référence à une grandeur définie par des unités acceptées par l'ensemble de la communauté scientifique. L'appareil qui sert à la mesure peut être simple (un mètre par exemple) ou complexe (un chromatographe en phase gazeuse couplé à un spectromètre de masse). Quelle que soit la nature de l'appareil de mesure, celui-ci doit être fiable, c'est-à-dire donner le même ordre de grandeur pour un même paramètre mesuré dans les mêmes conditions par n'importe quel opérateur.

La valeur mesurée n'étant jamais exacte, la précision de la mesure doit être connue. Il est donc nécessaire de connaître la fourchette dans laquelle se situe la valeur mesurée. En statistique, on parle d'écart type. Ces observations sont répétables et doivent pouvoir être refaites par n'importe quel chercheur dans les mêmes conditions. Si elles ne peuvent être faites que par un observateur ou une catégorie d'observateurs, elles ne relèvent pas de la science.

Lorsqu'elles sont faites en grand nombre, ces observations peuvent être analysées par des méthodes statistiques qui permettent leur classement et l'établissement de liens de relation entre différents paramètres. Ces relations ne relèvent cependant pas de la cause et de l'effet. Elles restent du domaine de la description.

Le raisonnement logique et les hypothèses

A partir des faits observés, mesurés, il s'agit d'établir un raisonnement logique ou rationnel qui permet d'établir des hypothèses, des relations de causes à effets et, à un niveau plus élevé d'intégration, d'établir des concepts, des lois ou de décrire des structures ou des filiations, que la simple observation ne pouvait mettre en évidence. Ces lois, ses concepts ou ces structures contribuent à améliorer la connaissance que l'homme peut avoir du monde, de son histoire et de son fonctionnement. Le raisonnement logique qui permet d'approcher la vérité par étapes successives doit évidemment être mis en œuvre dans un contexte qui exclut tout aspect émotionnel, religieux, politique ou toute croyance non établie par un raisonnement scientifique. Le raisonnement logique existe de-

puis que l'homme est apparu sur terre. Le raisonnement logique est propre à l'homme et n'est donc pas l'apanage des seuls scientifiques. Il est cependant un élément clé de la démarche scientifique. Ses principes ont été codifiés par René Descartes en 1637 à Leiden en Hollande dans son célèbre ouvrage *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences*. On parle d'ailleurs souvent de raisonnement cartésien ou de cartésianisme. Voici les quatre grands principes de Descartes tirés de son *Discours sur la méthode* :

Le premier étoit de ne recevoir jamais aucune chose pour vraie que je ne la connusse évidemment être telle ; c'est-à-dire, d'éviter soigneusement la précipitation et la prévention, et de ne comprendre rien de plus en mes jugements que ce qui se présenteroit si clairement et si distinctement à mon esprit, que je n'eusse aucune occasion de le mettre en doute.

Le second, de diviser chacune des difficultés que j'examinerois, en autant de parcelles qu'il se pourroit, et qu'il seroit requis pour les mieux résoudre.

Le troisième, de conduire par ordre mes pensées, en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connoître, pour monter peu à peu comme par degrés jusques à la connoissance des plus composés, et supposant même de l'ordre entre ceux qui ne se précèdent point naturellement les uns les autres.

Et le dernier, de faire partout des dénombrements si entiers et des revues si générales, que je fusse assuré de ne rien omettre.

Les hypothèses proposées à partir des observations doivent évidemment pouvoir être validées. Parmi les différentes hypothèses proposées, certaines seront fausses. L'objectif est toujours de déterminer celle qui est la bonne. Nous arrivons ainsi à la quatrième étape, celle de la validation des hypothèses.

La validation des hypothèses

L'hypothèse est un instrument dont il faut se servir pour arriver à la découverte de la vérité mais auquel il ne faut pas tenir. Il faut chercher à renverser les hypothèses, c'est-à-dire leur trouver la contre-épreuve.

Claude Bernard

La méthode la plus courante de validation est l'expérimentation. C'est la méthode la plus certaine et la plus fréquemment utilisée. En biologie, la méthode expérimentale a été rendue célèbre par Claude Bernard. Cette méthode consiste à déterminer comment un fait observé ou mesuré est affecté lorsque l'on fait varier un ou éventuellement plusieurs facteurs. La méthode expérimentale, doublée d'une analyse statistique, qui permet de faire la part entre le hasard, c'est-à-dire les facteurs non contrôlés, et les facteurs que l'on fait varier ou fac-

teurs contrôlés, est un outil d'une puissance extraordinaire qui permet d'aller au-delà de la simple observation. Cette méthode permet cette fois d'établir des liens de cause à effet et donc de valider des hypothèses.

Elle n'est cependant pas applicable à tous les cas. En effet, certains domaines ne se prêtent pas à l'expérimentation, comme la paléontologie ou l'astronomie. Il faut donc avoir recours à d'autres méthodes.

Puisqu'une hypothèse déterminée implique des conséquences, il est possible de prédire un certain nombre de processus et de déterminer comment ils peuvent s'accorder avec les données ou les modèles existants. Ce type de démarche, plus difficile à mettre en œuvre, implique la plus grande rigueur. La modélisation est une forme de validation. A partir des données observées ou obtenues expérimentalement on peut établir des relations simples ou complexes entre différents paramètres et établir un modèle, le plus souvent mathématique. Un modèle est une représentation plus ou moins schématique d'un processus à partir d'une démarche raisonnée.

Un excellent exemple est la modélisation des processus atmosphériques à partir d'observations météorologiques. Plus les observations sont nombreuses et précises, plus les équations mathématiques permettent de se rapprocher de la réalité et plus le modèle est fiable. Un modèle peut permettre de faire des prévisions, par exemple l'évolution du temps à court terme ou l'évolution du climat à long terme. Il existe actuellement divers modèles qui prédisent, avec des incertitudes plus ou moins grandes, le réchauffement de la planète lié à l'activité humaine et en particulier aux émissions de gaz à effets de serre.

En biologie moléculaire, il existe de nombreux modèles qui permettent de prédire les fonctions des séquences d'ADN.

Avant d'être considérées comme des vérités, ces nouvelles connaissances doivent être validées, non pas uniquement par un chercheur ou une équipe, mais par l'ensemble de la communauté scientifique qui doit exercer une critique rigoureuse.

L'analyse critique

La nécessité de la critique est un élément fondamental de la méthode scientifique. Il faut être certains qu'il n'y a pas de biais, dans l'observation ou l'expérimentation ou les calculs. Il faut donc que d'autres scientifiques puissent refaire les mêmes observations ou expérimentations et obtenir les mêmes résultats. La validation ne peut être obtenue qu'à cette condition. De même les hypothèses doivent être critiquées, vérifiées. Elles ne deviendront des vérités qu'à partir du moment où elles auront résisté à toutes les critiques.

Ayez le culte de l'esprit critique. N'avancez rien qui ne puisse être prouvé d'une façon simple et décisive... Croire que l'on a trouvé un fait scientifique important, avoir la fièvre de l'annonce et se contraindre des journées, des semaines, parfois des années, à se combattre soi-même, à s'efforcer de ruiner ses propres expériences, et ne proclamer sa découverte que lorsqu'on a épuisé toutes les hypothèses contraires, oui, c'est une tâche ardue. Mais quand, après tant d'efforts, on est enfin arrivé à la certitude, on éprouve une des plus grandes joies que puisse ressentir l'âme humaine.

Louis Pasteur

Si une hypothèse se révèle infondée par les résultats de l'expérience ou l'application d'un raisonnement logique impliquant de nouveaux faits, elle est rejetée ou éventuellement modifiée.

D'autre part, une hypothèse admise, doit pouvoir être toujours remise en question, si de nouveaux faits viennent la contredire. C'est ainsi que la science progresse. Elle avance d'approximations en approximations.

Il est en effet difficile d'avoir des certitudes absolues. Un chercheur doit en permanence s'interroger sur l'état des connaissances, leur validité, la façon de les améliorer et éventuellement de les mettre en doute.

Un scientifique est par définition critique et sceptique. Il s'interroge sur la réalité des connaissances. Il vit dans un monde en perpétuelle interrogation, en perpétuelle remise en question.

Ce doute, cette remise en question permanente se traduisent bien évidemment dans la littérature scientifique.

La publication

Il faut bien distinguer la littérature primaire de la littérature secondaire et des manuels d'enseignement.

La littérature scientifique primaire est constituée par les articles scientifiques qui relatent les avancées de la science. Ils ont toujours la même structure. Ils commencent par une introduction qui fait le point des connaissances acquises avec citations des auteurs qui ont contribué à ces connaissances. L'auteur de l'article décrit ensuite avec la plus grande rigueur le matériel et les méthodes qu'il a utilisées. Il donne les résultats obtenus avec, lorsque cela est possible, les traitements statistiques. Il discute ensuite ces résultats en les comparant à ceux de ses prédécesseurs. Il termine enfin par une conclusion qui peut prêter ou non à hypothèse. Ces articles ont en général été soumis à la critique de lecteurs arbitres qui sont des pairs, c'est-à-dire des collègues. Ces pairs se prononcent surtout sur la validité des méthodes utilisées et la rigueur

du raisonnement. Une fois publiés, ces résultats sont soumis à la critique de la communauté scientifique qui les reprend, les confirme ou les infirme par d'autres articles et ainsi de suite.

A partir d'un certain stade, s'ils sont validés, ces résultats sont repris par la **littérature dite secondaire**. Ce sont les ouvrages de synthèse faits par des scientifiques essentiellement pour des scientifiques ou les étudiants des universités en fin de cycle.

Si les résultats sont corroborés par d'autres scientifiques répétant des expériences voisines ou utilisant ces résultats pour de nouvelles investigations, ils s'intègrent aux connaissances dignes de confiance sur le plan scientifique.

A ce stade, ces résultats deviennent **des faits scientifiques**.

Ivan Pavlov a ainsi défini un fait scientifique :

Aussi parfaite que soit l'aile d'un oiseau, elle ne permettra jamais à un oiseau de voler s'il ne peut s'appuyer sur l'air. Les faits sont l'air de la science. Sans eux, un homme de science ne peut s'élever.

Un fait, par exemple celui de l'évolution, est basé sur des connaissances dignes de foi. Son objectif est d'expliquer les grands processus naturels.

L'activité de recherche génère de nouvelles connaissances qui doivent être enseignées. La littérature secondaire, décrivant les faits scientifiques, est reprise, ordonnée synthétisée dans **les manuels d'enseignement**.

La certitude ou le doute ne sont pas vécus de la même façon dans le monde de l'éducation et celui de la recherche. Lorsqu'un professeur enseigne, il transmet à l'élève des connaissances qui ne sont pas mises en question par l'élève. L'élève reçoit ces connaissances comme des vérités qui sont validées par l'autorité du professeur et les manuels d'enseignement. Celui qui enseigne est par définition celui qui sait. Le professeur lui-même ne met pas en cause la validité de ce qu'il enseigne. De même les livres d'enseignement sont considérés à un instant déterminé comme des sources sûres de connaissances et de vérités. Ces ouvrages, au moment de leur rédaction, sont la compilation de tous les résultats de la science validés par la communauté scientifique. Ils sont considérés par les enseignants et les étudiants comme des sources fiables. L'attitude du scientifique ou du chercheur doit être évidemment totalement différente.

III. - Aperçu de l'état de la recherche scientifique civile dans le monde

Il est possible d'avoir une idée de l'état de la recherche scientifique civile dans le monde grâce à différents critères. Il y en a de très nombreux, mais nous nous contenterons d'en prendre quatre assez différents, mais complémentaires :

- Les bases de données de Thomson ISI
- Les prix Nobel
- Les médailles Fields
- Le classement des universités du monde établi par l'Université de Shanghai et qui combine les trois critères précédents.

Les bases de données de Thomson ISI

Thomson ISI est une branche de la société privée américaine Thomson Corporation. La base de données scientifiques, *Thomson scientific*, est issue de l'ISI, *Institute for Scientific Information*, créé par Eugène Garfield qui en a eu l'idée il y a une cinquantaine d'années. Le site de Thomson, *Web of science*, analyse systématiquement le contenu de 8 600 revues scientifiques, c'est-à-dire les articles, leurs auteurs, les laboratoires dont ils sont issus et la bibliographie de chaque article. En prenant des critères simples comme le nombre de publications par discipline, par pays, par année, par laboratoire ou institution, ou par auteur ainsi que le nombre de fois qu'un article a été cité on obtient des indications très précieuses sur l'état de la science dans le monde.

Sur 10 ans, pour la période qui va de janvier 1992 à juin 2002, soit en réalité 10 ans et six mois, si l'on raisonne en termes de nombre total de publications, les Etats-Unis arrivent largement en tête, devant le Japon, l'Angleterre, l'Allemagne et la France. On notera la huitième place de la Russie et la dixième place de la République Populaire de Chine. Mais si on totalise l'ensemble des pays de l'Union européenne (Europe des douze), les Etats-Unis n'arrivent qu'en deuxième position.

Pour la même période, si l'on raisonne maintenant en termes de nombre total de citations, les Etats-Unis arrivent toujours largement en tête, devant l'Angleterre, l'Allemagne le Japon et la France. La Russie régresse à la dix-septième place et la Chine à la vingtième. Si on totalise l'ensemble des pays de l'Union européenne, les Etats-Unis gardent leur primauté, l'Union européenne arrive en deuxième position.

Ces résultats s'expliquent par le nombre de citations par article qui est élevé pour les Etats-Unis (11,75) et n'est que de 8.77 pour l'Union européenne. On notera le faible nombre de citations des articles russes et chinois et le premier rang de la Suisse devant les Etats-Unis. La France n'occupe dans ce classement que le treizième rang.

Si on exprime maintenant le nombre de publications scientifiques sur dix ans par 1000 habitants, on obtient une image assez différente. Les Etats-Unis devancent encore l'Europe des douze (9.46 contre 8.09). Mais à l'intérieur de l'Union européenne, la situation est très contrastée. Ce sont les petits pays qui sont les plus efficaces. La palme revient à la Suède (16.20), suivie de l'Ecosse (16.15), du Danemark (13.56), de la Finlande (12.89) et des Pays-Bas (11.67). Parmi les grands pays européens, presque tous devancés par les petits pays, la France (7.79) arrive derrière l'Angleterre (10.70), mais devant l'Allemagne (7.50), dont le classement s'explique par l'absorption de l'ex Allemagne de l'Est, l'Italie et l'Espagne.

Parmi les vingt grandes nations du monde sur le plan scientifique, le meilleur score est une nouvelle fois détenu par la Suisse (17.68) et le plus faible par la République Populaire de Chine (0.15).

On peut considérer que la situation de la France, cinquième puissance mondiale, est convenable en Europe. Elle n'est globalement dépassée que par l'Allemagne et l'Angleterre. De 1995 à 2005, le nombre de publications a lentement augmenté en France, le nombre de citations par article a, quant à lui significativement augmenté. Mais sur dix ans, la France n'est que le 13^{ème} pays pour le nombre de citations par article (8.86). En termes de production d'articles, c'est la médecine clinique qui arrive en tête.

Au niveau mondial, les disciplines où la France est la plus forte sont les mathématiques (deuxième rang mondial), la physique, l'espace, la microbiologie (quatrième rang mondial), la biologie moléculaire et la médecine clinique (cinquième rang mondial). En termes d'institutions, la France est bien placée en recherche agronomique. L'INRA occupe en effet la deuxième place derrière l'USDA (*US Department of Agriculture*).

Le nombre total de publications ou de citations ne rend qu'imparfaitement compte de la qualité de la recherche, même si le nombre de citations par article est un excellent critère. On peut affiner en comptabilisant les articles publiés dans les meilleures revues internationales. Une autre approche de la qualité peut se faire par l'étude de l'attribution des prix Nobel ou de la médaille Fields.

Les prix Nobel

L'étude statistique des prix Nobel dans le domaine scientifique par pays est parfois difficile. En effet, suivant les années, ils sont partagés entre plusieurs lauréats ou attribués à un seul chercheur. De plus, parfois, un scientifique peut avoir la moitié d'un prix et l'autre moitié peut être partagée par deux autres. Nous avons attribué la note 1 à chaque nom, que le prix soit ou non partagé ou divisé. Lorsqu'un lauréat a obtenu le prix Nobel dans une université d'un

pays, mais qu'il réside dans un autre, nous avons attribué 0,5 à chaque pays. Par contre, nous n'avons pas tenu compte du pays d'origine lorsqu'il y a eu changement de nationalité ou que la résidence n'est pas le pays d'origine même s'il n'y a pas eu de changement de nationalité.

Sur les vingt dernières années, dans le domaine scientifique, les Etats-Unis ont obtenu cent prix Nobel (99.5). Viennent ensuite l'Allemagne avec 9,5, l'Angleterre 8,5, la Suisse 6, la France 5, le Japon et le Canada 4 chacun, les Pays-Bas et la Russie 2,5 chacun, l'Australie 2 et enfin le Danemark, l'Italie, Israël et la Chine 1. Seuls treize pays ont obtenu au moins un prix Nobel scientifique dans les vingt dernières années. Si nous totalisons l'ensemble des douze pays de l'Union européenne, on obtient 27,5 prix Nobel, ce qui est très loin des Etats-Unis. La supériorité des Etats-Unis est aussi écrasante dans les trois disciplines chimie, physique, médecine et physiologie. Si nous raisonnons sur les dix dernières années, la supériorité américaine ne faiblit dans aucune de ces trois disciplines.

Cependant, avec six prix Nobel scientifiques dans les vingt dernières années, la Suisse se situe en quatrième position dans le monde. Si on rapporte le nombre de prix Nobel au nombre d'habitants, la Suisse écrase les Etats-Unis avec 0,82 prix Nobel scientifiques en vingt ans par million d'habitants contre 0,32 aux Etats-Unis.

Si l'on compare le classement des différentes puissances scientifiques en nombre total de publications et en nombre de prix Nobel, le classement ne subit que peu de changement. Mais à l'exception de la Suisse, la distorsion entre les USA et le reste du monde et en particulier avec l'Union européenne s'accroît si l'on raisonne en nombre de prix Nobel. Il y a un fossé entre l'Amérique et l'Europe. Si l'Europe a une activité scientifique proche de celle des Etats-Unis, elle est loin de faire le poids en termes de qualité et d'avancées majeures. L'Europe avance en ordre dispersé et éparpille ses moyens. La coordination entre les différents pays européens qui a débuté sous l'égide de la commission européenne à Bruxelles, il y a près de trente ans, n'a toujours pas porté ses fruits.

Les médailles Fields

Les mathématiques sont considérées comme la base de toutes les autres disciplines scientifiques. La médaille Fields est la plus haute distinction pour un mathématicien. Elle est attribuée tous les quatre ans depuis 1936 au Congrès international de mathématiques. Nous avons adopté le même critère de classement que pour les prix Nobel. Seuls 43 lauréats pour 7 pays l'ont obtenu. Ils se répartissent ainsi :

- Etats-Unis 21, France 10, Angleterre 7, Russie 2, Japon, Suède et Italie 1. Si les Etats-Unis sont encore largement en tête par nation, cette fois l'Union européenne fait pratiquement jeu égal avec l'Amérique avec 19 médailles contre 21.

- En mathématiques, la puissance des équipements de laboratoires et la puissance d'organisation sont secondaires, ce qui explique probablement la parité Europe Etats-Unis.

Le classement des universités du monde établi par l'Université de Shangai

Ce classement a été établi pour la première fois en 2002 par l'Université Jiao Tong de Shangai. Il a été renouvelé en 2003 puis en 2005. Ce classement combine les trois critères que nous avons précédemment utilisés avec des pondérations suivant la taille de l'Institution.

La note est composée pour 10% par le nombre d'étudiants d'une institution ayant obtenu un prix Nobel (prix Nobel d'économie inclus) ou une médaille Fields, pour 20% par le nombre de personnes travaillant dans l'Institution et ayant obtenu ces mêmes distinctions avec pondération en fonction du temps, pour 20% par le nombre de chercheurs les plus cités dans 21 disciplines (bases Thomson ISI), pour 20% par le nombre de chercheurs ayant publié dans les deux meilleures revues internationales, c'est-à-dire *Nature* et *Science*, pour 20% par le nombre total d'articles cités dans la base Thomson ISI et enfin pour 10% par une pondération dépendant de la taille de l'Institution. La note totale maximale est de 100.

Il est évidemment possible de critiquer cette méthode. Cependant, malgré ses imperfections, ce classement reflète une cruelle réalité. Sur les 500 universités classées, les universités américaines écrasent toutes les autres. Sur les 10 premières, 8 appartiennent aux Etats-Unis. L'Europe est sauvée par Cambridge qui est seconde derrière Harvard et Oxford qui est dixième. Sur les 50 premières universités, 37 appartiennent aux Etats-Unis, 5 au Royaume Uni, 2 au Canada et au Japon, une à la France, la Suisse, les Pays-Bas et la Suède. En dehors du Royaume-Uni, l'Union européenne est inexistante ou presque du peloton de

tête. On peut s'interroger sur les causes de cette faiblesse européenne. La dispersion ou l'insuffisance des moyens n'est pas un argument recevable. Il suffit de se référer au Royaume Uni, grande exception européenne. Le mauvais classement de la France qui ne place que 4 universités (Paris 6, Paris 11, Strasbourg et l'École normale supérieure de Paris) dans les 100 premières s'explique par la structure de l'enseignement supérieur et de la recherche dans notre pays. Les meilleurs étudiants sont drainés dans les grandes écoles qui sont de petite taille et n'ont que des moyens limités de recherche en dehors de la rue d'Ulm à Paris et de l'École Polytechnique.

Ces grandes écoles avec peu d'étudiants n'ont donc pas de poids sur le plan international. La capacité de recherche des universités françaises est en outre très affaiblie par les grands établissements publics qui accaparent les moyens qui sont gérés de façon centralisée.

Affaiblies par le flux des meilleurs étudiants vers les grandes écoles et par l'existence de grands organismes de recherches indépendants mobilisant l'essentiel des moyens, les universités françaises ont des difficultés à émerger sur le plan international.

IV. - Recherche scientifique civile, développement technologique et développement en général

Quelle est la relation entre recherche scientifique, développement technologique et développement en général ? La technologie peut être définie comme l'application systématique de la connaissance scientifique à des tâches pratiques. Par définition, la science est une activité indépendante de la technologie. Cela ne veut pas dire que l'on ne puisse pas conduire une activité de recherche à but technologique. Il est simplement nécessaire que le programme mis en place remplisse les conditions définies précédemment pour toute activité scientifique.

On admet, très schématiquement, qu'il existe une relation linéaire conduisant de la recherche au développement. Autrement dit, la recherche pure conduirait inmanquablement au développement. Il est vrai que le niveau de développement d'un pays est très souvent lié à son niveau de recherche scientifique et en contrepartie, plus un pays est économiquement développé, plus il peut consacrer de moyens à la recherche scientifique. Le cas des États-Unis semble exemplaire.

Cependant, la réalité nous paraît nettement plus complexe. La corrélation entre produit intérieur brut par habitant en 2002 et la production d'articles scientifiques par 1 000 habitants sur dix ans de 1992 à 2002 n'est que moyennement élevée. Si les pays à faible PIB par habitant comme la Chine et la

Russie ont une faible production scientifique par habitant, à partir d'un PIB de 15 000 dollars par an, la corrélation devient plus faible. La situation est très différente suivant les pays.

La Suisse a le PIB le plus élevé du monde et la plus grande production scientifique par habitant. Les Etats-Unis, à PIB par habitant voisin, ont une production scientifique deux fois moindre. En qualité, les Etats-Unis n'arrivent pas non plus au niveau de la Suisse.

La Suisse, rappelons-le, dépasse les Etats-Unis en nombre de citations par article et si l'on tient compte de la population en nombre de prix Nobel dans les vingt dernières années.

Les Etats-Unis tirent leur richesse et donc leur force économique de leur masse scientifique. Mais la qualité de leur activité scientifique reste la meilleure du monde si l'on excepte la Suisse.

Suivant presque tous les critères de qualité scientifique, la Suisse qui a le PIB par habitant le plus élevé du monde, occupe la première place, mais elle est handicapée par sa faible population. C'est probablement la raison pour laquelle les universités suisses, en valeur absolue, ne peuvent rivaliser avec les universités anglaises ou américaines, mais elles font jeu égal avec les universités françaises.

D'autre part, José Goldemberg a montré en 1998 qu'il existait dans la plupart des pays un autre modèle que le modèle linéaire : la recherche pure, le développement technologique, la production qui en découle et le développement d'un marché ne se succèdent pas réellement dans le temps, mais se chevauchent.

Enfin, de nombreux autres critères interviennent dans le développement économique : le système politique, le système bancaire, la structure sociale, le civisme, les ressources naturelles, la puissance militaire, etc...

D'autre part, il devient de plus en plus rare que la recherche soit faite dans un unique but de curiosité ou pour l'amour de la découverte. La nécessité de trouver des fonds auprès de diverses organisations pour pouvoir mettre en œuvre une activité de recherches oblige à clairement établir les retombées de la recherche pour la société. Enfin, aussi intéressant que puisse être une activité de recherche, il est plus confortable pour un chercheur de penser que ses résultats pourraient un jour avoir des retombées pratiques.

Mais même si un programme de recherche est couronné de succès et peut conduire à l'utilisation de nouvelles techniques, ces résultats peuvent avoir une portée limitée si les utilisateurs potentiels sont dans l'impossibilité de l'utiliser,

soit parce qu'ils ne les connaissent, soit parce que le marché ou l'opinion publique ne sont pas prêts. Le transfert de technologie nécessite toute une série d'adaptations impliquant la communauté scientifique, les gouvernements, la structure du pays, l'opinion publique et l'industrie privée. Les scientifiques proposent ; le marché et l'opinion publique décident de l'application des résultats de la recherche.

V. - Conclusions

La démarche scientifique, basée sur trois étapes et cinq processus, l'observation, le raisonnement logique, la validation des hypothèses, l'analyse critique et la publication est universelle. Elle est un puissant outil permettant à l'homme d'avoir accès aux connaissances des lois qui régissent le monde. Cette démarche est sans faille. En effet si certains s'en écartent délibérément en fournissant de faux résultats, la supercherie sera inévitablement découverte par ceux qui les vérifieront ou tenteront de s'en servir.

La science est en perpétuel mouvement et avance sans cesse, le plus souvent en se raturant, sans que l'on puisse imaginer une limite à sa capacité d'investigation. La science est internationale et ne connaît ni les frontières, ni les différences d'origine, de culture ou de religion. La seule exigence pour appartenir à la communauté scientifique est d'adopter les règles de la démarche scientifique.

Si nous raisonnons par pays, il est évident que les Etats-Unis dominent le monde de la science. Mais si on raisonne en nombre d'articles produits, l'Union européenne possède à peu près la même puissance que les Etats-Unis. Le Japon est la troisième force scientifique mondiale. La Chine vient se placer en dixième position en nombre total de publications. En quinze ans, de manière incroyablement rapide, la Chine est passée du rang de nation scientifique sous développée au rang de grande puissance scientifique. Son rang ne fera que s'améliorer dans les années à venir.

Mais si nous faisons intervenir la qualité de l'activité scientifique et les avancées majeures, les Etats-Unis devancent de loin l'Europe. La puissance scientifique de leurs universités, autonomes, en compétition les unes avec les autres, liées au secteur privé, où coexistent recherches du plus haut niveau et enseignement de qualité est un atout décisif. Ces universités prestigieuses attirent les meilleurs étudiants du monde en situation doctorale ou postdoctorale. Beaucoup de ces étudiants étrangers, parmi les meilleurs, restent aux Etats-Unis et contribuent encore à accroître la puissance scientifique de ce pays.

On peut aussi se demander s'il n'y a pas d'autres raisons et si l'esprit pionnier des Américains ne fait toujours pas la différence.

En effet, même si les moyens financiers attribués à la recherche scientifique aux Etats-Unis sont supérieurs à ceux attribués dans l'Union européenne, cet écart ne peut expliquer un tel différentiel de qualité.

Enfin, les Etats-Unis ont su mettre en place une politique de partenariat efficace entre secteur privé et secteur public, ce qui assure une valorisation rapide des résultats de la recherche.

Dans l'Union européenne, seule l'Angleterre a des universités comparables à celles de Etats-Unis. L'Union européenne essaye de mettre en place une véritable politique de la recherche assurant la complémentarité et la collaboration entre les pays. Mais les pays de l'Union doivent eux-mêmes s'organiser en universités autonomes, compétitives et spécialisées au niveau du troisième cycle.

En dehors de l'Union européenne, mais au cœur de l'Europe, la Suisse est un cas complètement à part. Si l'on rapporte ses performances scientifiques à son nombre d'habitants, la Suisse occupe le premier rang dans le monde aussi bien sur le plan quantitatif que qualitatif. L'Union européenne devrait s'interroger sur les raisons d'un tel succès et en tirer les enseignements nécessaires.

La France, cinquième puissance scientifique mondiale, deuxième en mathématiques, est handicapée par la structuration de son enseignement supérieur écartelé entre universités et grandes écoles et par l'éclatement de la recherche entre établissements publics centralisés, difficiles à gérer, et universités dotées de faibles moyens. Ce diagnostic a été établi à de nombreuses reprises, aussi bien par les gouvernements de droite que de gauche, et par de multiples rapports.

Parmi les plus récents, citons le diagnostic de l'appel de mars 2004 intitulé *Du nerf* de François Jacob, prix Nobel de médecine, de Philippe Kourilsky, Directeur général de l'Institut Pasteur, de Jean-Marie Lehn, prix Nobel de chimie et de Pierre-Louis Lions, médaille Fields :

- Un dispositif extrêmement centralisé au lieu d'être largement centré sur les universités.
- Une confusion des rôles notamment entre les chercheurs et les pourvoyeurs de moyens.
- Un système d'emploi scientifique inadapté, trop rigide avec des rémunérations insuffisantes conduisant à la fuite des cerveaux.
- Une reconnaissance insuffisante de l'excellence et de la performance.

Même si il n'y a pas réellement de relation linéaire entre activité scientifique et développement, en raison de la complexité des paramètres qui entrent en jeu, le niveau économique d'un pays dépend le plus souvent de son potentiel scientifique. Et par effet boomerang, plus un pays a un produit intérieur brut élevé, plus il peut consacrer de moyens à la recherche.

Cependant, les résultats de la science appartenant à l'ensemble de l'humanité, les résultats obtenus dans un pays sont immédiatement disponibles pour d'autres. C'est donc plus la capacité à transférer les résultats de la recherche que le niveau intrinsèque de la recherche scientifique qui détermine la puissance de l'économie d'un pays, une des clefs étant probablement le degré d'intégration entre le secteur public et le secteur privé.



Discussion

En remerciant le conférencier, Le Président Guerrier de Dumast souligne son esprit encyclopédique capable de traiter avec compétence les sujets les plus variés. Il a été frappé par le pessimisme de la conclusion, mais n'en a pas été étonné car le récent colloque du 14 octobre sur l'éducation, organisé par l'Académie de Stanislas, a clairement démontré les carences de notre système éducatif, qui expliquent bien la modestie de nos résultats scientifiques à l'échelle mondiale. La parole est ensuite donnée à la salle et questions et arguments fusent de toutes parts.

Monsieur Sadoul rappelle que les Etats-Unis savent retenir les stagiaires étrangers qui viennent se former dans leurs universités en leur offrant salaires alléchants et bonnes conditions de travail. C'est ce qui est arrivé à une de ses collègues qui travaillait à Londres. Elle a pu poser des conditions draconiennes, qui ont pourtant été totalement acceptées, pour continuer ses recherches aux Etats-Unis.

A l'inverse, certains chercheurs désireux de rentrer en France en sont souvent découragés, comme ce fut le cas pour Cournant, éminent spécialiste de la ventilation pulmonaire, dont le fils avait été tué en 1945 et qui a dû rester aux Etats-Unis contre son désir. Il y a reçu le prix Nobel quelques années plus tard.

Dans l'ex-URSS, en revanche, la recherche était faible au contraire de la Chine actuelle qui sera certainement un pays qui comptera beaucoup dans les années à venir. Monsieur Sadoul a visité une école militaire d'aviation en Chine où les chercheurs étaient au courant des découvertes scientifiques les plus récentes.

Monsieur Rivail aborde trois problèmes : celui de la langue, tout d'abord, pour signaler que les publications en langue russe sont pratiquement ignorées de la communauté scientifique hors de Russie. Dans les articles, ne sont citées que les publications en anglais venant d'Europe ou des Etats-Unis. Un dernier problème concerne les articles de revues de seconde main. Ce sont les seuls

qui sont cités au détriment des publications originales. Lorsqu'une erreur se glisse dans un article de ces revues, elle est indéfiniment répétée sans aucune critique. Monsieur Rivail ajoute enfin que la Chine a fait des progrès spectaculaires depuis 5 ans et que tout le monde aujourd'hui y parle dans les milieux scientifiques un anglais parfait.

Monsieur Le Tacon rappelle qu'il travaille avec la Chine depuis 15 ans et qu'effectivement les transformations y sont spectaculaires.

Monsieur Bur regrette que les sciences humaines n'aient aucune place dans les statistiques présentées. Il déplore également qu'on fasse trop peu de place au facteur humain dans la recherche scientifique. Il pense également que, sur les deux cent vingt universités que comptent les USA, bien peu sont valables.

Monsieur Le Tacon lui répond qu'il y en a trente-sept de très haut niveau.

Monsieur Schissler affirme que les Américains reprennent les articles des Européens sans jamais les citer mais qu'ils ont l'art de marier l'université et l'industrie.

Monsieur Perrin accuse les Japonais de vampiriser les Etats-Unis, dans la mesure où, lorsqu'un chercheur américain dépose un brevet au Japon, on le fait languir pendant six ans et on met à profit de temps-là pour exploiter toutes les possibilités du brevet, si bien que lorsqu'il est enfin homologué, il n'a plus aucune valeur.

Monsieur Bonnefont soulève la question du diplôme unique. Il pense aussi que le Nobel n'est pas un bon critère du niveau scientifique d'une nation parce qu'il est très difficile de préciser la nationalité du chercheur au moment de l'obtention du prix. Il souligne enfin qu'avant l'observation, il faut définir les conditions de l'observation et chercher à savoir ce que l'on va observer et comment on le fera.

Monsieur Le Tacon est opposé au diplôme unique et très favorable à l'autonomie des universités. Il pense, au contraire de Monsieur Bonnefont, que le Nobel est un bon critère car il donne une idée de l'importance des équipes qui sont derrière le lauréat du prix.

Monsieur Bur demande ironiquement si quelqu'un sait quelle était la nationalité d'Einstein.

Madame Créhange regrette que le français soit abandonné au profit de l'anglais dans tous les articles scientifiques. Elle admet cependant qu'il faut publier en anglais pour être crédible.

Monsieur Mainard rappelle un propos désabusé de Monsieur Hubert Curien selon lequel l'Ancien Testament n'aurait pas été accepté au CNRS parce qu'il

n'avait pas été écrit en anglais. Plus sérieusement, il souligne que l'avenir d'un pays dépend de son potentiel scientifique.

Monsieur Kevers-Pascalis rappelle la crise qui couve en permanence entre les Grandes Ecoles et la Faculté.

Monsieur Rivail rappelle une parole de Laurent Schwartz selon laquelle, en France, on met les meilleurs élèves d'un côté et les meilleurs professeurs de l'autre en prenant bien soin qu'ils ne se rencontrent jamais.

Madame Mathieu revient sur le problème de la langue en disant que les Français (comme les Allemands), ne défendent pas leur langue.

Monsieur Lanher déplore lui aussi que le français soit abandonné au profit de l'anglais. Pourtant, le français est l'une des plus belles langues du monde. C'est à peu près tout ce qui nous reste de notre brillante culture et elle est bien menacée.

Monsieur Le Tacon n'est pas d'accord et estime qu'il faut une langue internationale. Il se trouve que c'est l'anglais. Il faut se faire une raison et ne pas le déplorer. Le français peut être défendu dans d'autres domaines.



Bibliographie

- ↻ Academic Ranking of World Universities, <http://ed.sjtu.edu.cn/ranking.htm>
- ↻ Bernard Claude, 1865, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, http://classiques.uqac.ca/classiques/bernard_claude/intro_etude_medecine_exp/intro_etude.html
- ↻ Cornu Jean-Michel, *La démarche scientifique*, <http://jmichelcornu.free.fr/sciences/demarche/>
- ↻ Descartes, 1637, *Discours sur la méthode*, http://classiques.uqac.ca/classiques/Descartes/discours_methode/Discours_methode.rtf
- ↻ Goldenberg José, 1998, What is the role of science in developing countries? *Science*, 279, 5354, 1140 - 1141.
- ↻ Jacob François, Lehn Jean-Marie, Lions Pierre-Louis, 1998, *Du nerf*, http://www.lemonde.fr/medias/pdf_obj/dunerf.pdf
- ↻ Pasteur Louis (réunies et annotées par Louis Pasteur Vallery-Radot), *Œuvres de Pasteur* (7 tomes), Masson, 1939.
- ↻ Pavlov Yvan, *Tous les cours de Pavlov en version intégrale*, <http://www.ivanpavlov.com/>
- ↻ ISI, Thomson Scientific, <http://www.isinet.com/>
- ↻ Wikipedia, http://fr.wikipedia.org/wiki/Prix_Nobel#Statistiques_.28au_10.2006.29
- ↻ Wikipedia, http://fr.wikipedia.org/wiki/Médaille_Fields