

UN SIECLE D'INSTRUMENTS

La transformation des appareils scientifiques et leur utilisation pendant le XXe siècle

Paolo Brenni

Introduction

Qu'est-ce qu'un instrument scientifique ? Une des meilleures définitions, que j'ai l'habitude de souvent répéter, est fournie par Van Helden qui, tout en admettant un certain flou dans ce terme, écrit :

*"Sometimes ambiguity is a virtue, and until we have a better understanding of the role of instruments in natural sciences, we are better off leaving to the term "scientific instrument" its traditional vagueness. Perhaps it is best to say that instruments are the technology of science, a technology that has expanded greatly since the seventeenth century."*¹

Dans le cadre des instruments avant 1900 les choses sont relativement simples. Les instruments que nous pouvons diviser en instruments de mesure et de recherche, en instruments professionnels, en instruments didactiques étaient essentiellement des outils qui restaient confinés dans les laboratoires, dans les collections didactiques des écoles, dans les usines et dans les mains de techniciens ou de professionnels exerçant des activités particulières.² Aujourd'hui tout le monde utilise des

¹Van Helden: "Introduction: Instruments in the History of Science" in Van Helden A., Hankins T.L., (ed.), "Instruments", *Osiris*, II series, Vol. 9. 1994, pp. 1-6. and also Warner D., "What is a scientific instrument, when did it become one, and why?", *British Journal for the History of Science*, 23, 1990, pp. 83-93..

²Pour une introduction générale à l'histoire des instruments avant 1900 on peut voir: Daumas M., *Les instruments scientifiques aux XVIIe et XVIIIe siècles*, Paris, PUF, 1953; Greenaway F., "Instruments" dans Williams T.I.(ed.) , *A History of Technology, Vol. VII, The Twentieth Century c.1900 to c.1950, Part II*, Oxford: Clarendon Press, 1978, pp. 1204-1219; : Turner A., *Early Scientific Instruments, Europe 1400-1800*, London, 1987; Turner G.L'E., *Nineteenth-*

instruments : les ordinateurs d'abord, mais aussi les téléphones, les télécommandes, les chaînes Hi-Fi, etc. Nous sommes entourés de dispositifs de haute complexité, que nous utilisons sans avoir la moindre idée de leur fonctionnement ou de leur construction. Je pense que nous ne pouvons pas, même si nous utilisons couramment ce terme, considérer ces appareils comme des « instruments scientifiques » au sens strict du terme. Ce n'est pas nécessairement la complexité technique ou la fonction (mesure, contrôle, communication, etc.) qui détermine le fait qu'un objet puisse ou non être considéré comme un instrument scientifique. C'est surtout le cadre dans lequel l'objet est utilisé, qui est important. Un amplificateur dans un laboratoire est certainement un instrument scientifique, mais nous ne pouvons pas dire la même chose pour l'amplificateur que nous utilisons pour pouvoir écouter nos CD, même s'il représente une application commerciale d'un objet né pour les besoins de la recherche. En général je préfère éliminer, en suivant aussi Van Helden qui parle justement de « technologie des sciences », tous les objets de « haut contenu technologique » s'ils sont utilisés couramment dans la vie quotidienne ou en milieu domestique.

L'importance des instruments scientifiques anciens est aujourd'hui bien reconnue par les historiens des sciences et des techniques.³ Depuis les années 1980, plusieurs livres, articles et catalogues de collection ont été dédiés à l'histoire des instruments et de l'industrie de précision.⁴ Ces outils des sciences ont été étudiés non seulement d'un point de vue technique, mais aussi en considérant leur rôle dans l'établissement et la diffusion des pratiques scientifiques, dans la transmission des connaissances et plus généralement aussi sous un aspect sociologique qui accentue leur importance dans « la construction de la science ». Il est vrai que seulement une partie relativement limitée de ces études a pris en

Century Scientific Instruments, London: Sotheby Publications, 1983; Turner G.L'E. (ed.), *Gli strumenti*, Milano, 1990.

³ Anderson R.G.W., Turner G.L'E. (ed.), *An Apparatus of Instruments: The Role of Scientific Instrument Commission*, Oxford: Scientific Instrument Commission, 1993.

⁴ Une bibliographie détaillée sur l'histoire des instruments scientifiques qui couvre la période 1883-1995 peut être repérée dans: Turner G.L'E., Bryden D.J., *A classified bibliography on the history of scientific instruments*, Oxford, Scientific Instrument Commission, 1997. Pour les années plus récentes la bibliographie est visible sur le site Internet : <http://www.sic.iuhps.org>.

considération les instruments construits après 1900, et encore moins ceux de la deuxième moitié du XXe siècle. Il existe des études de cas bien précis, mais en réalité très peu a été écrit sur les problèmes relatifs aux instruments très récents ou contemporains, mais déjà obsolètes ou en train de le devenir.

En 1982, Robert Anderson se demandait en ouvrant un congrès scientifique dédié spécialement au patrimoine scientifique du XIXe siècle « *Were scientific instruments in the nineteenth century different ?* ».⁵ Aujourd'hui nous pouvons nous poser la même question pour les instruments du XXe siècle. Et la réponse, je crois, ne peut qu'être affirmative surtout si nous considérons les appareils de la deuxième moitié de cette période. Le progrès scientifique dont l'accélération pendant les dernières décennies a été surprenante, la découverte et l'utilisation massive de nouveaux matériaux, l'abandon des composantes électromécaniques pour les composantes électroniques et leur miniaturisation, le développement de la « big science », l'introduction généralisée des ordinateurs ne sont que quelques-uns des facteurs qui ont contribué à révolutionner la typologie, le design et aussi les modes d'utilisation des outils de la recherche scientifique. Mais ces changements ne se limitent pas à l'aspect fonctionnel et esthétique de ces objets : ils entraînent aussi des modifications profondes dans le rapport entre l'instrument et son utilisateur. Rapport qui depuis la Révolution Scientifique n'avait pas beaucoup changé.

Enfin les instruments du XXe siècle représentent aussi un défi pour les historiens et pour les conservateurs de musées. Leurs dimensions souvent imposantes, leur complexité, leur nombre et aussi leur obsolescence très rapide posent toute une série de nouveaux problèmes relatifs à leur conservation, à leur catalogage et à leur étude.

J'essayerai donc ici de retracer quelques-unes des étapes qui ont marqué la transformation des instruments scientifiques pendant le XXe siècle et surtout de montrer comment ceux qui ont été développés dans la seconde moitié du siècle sont profondément différents des instruments que je vais appeler « classiques ».

⁵ Anderson R., « *Were scientific instruments in the nineteenth century different? Some initial considerations* », in de Clercq P. (ed.), *Nineteenth-century scientific instruments and their makers*, Leiden, Amsterdam, 1985, pp. 1-12.

La situation vers 1900

Vers le début du XXe siècle, les chercheurs ainsi que les ingénieurs (et plus généralement tous ceux qui pratiquent des activités professionnelles impliquant des calculs et des mesures) ont à leur disposition une remarquable panoplie d'instruments.⁶ Les grandes institutions telles les universités, les écoles polytechniques, ou les instituts de recherche ont en Europe et en Amérique de grands laboratoires bien équipés. Les constructeurs les plus affirmés présentent des catalogues avec des centaines, voire des milliers d'appareils pour la recherche, pour la mesure, pour l'enseignement ou pour l'usage professionnel et industriel. Les cabinets didactiques les plus importants ont de très grandes collections où les instruments sont ordonnés selon les divisions de la physique classique. Ces appareils, dont la typologie est bien établie, permettent de démontrer toutes les lois de la physique ainsi que de présenter, de façon parfois spectaculaire tous les phénomènes connus. Les laboratoires de recherche sont équipés d'instruments complexes pour des mesures de précision, instruments parfois uniques qui ont été construits grâce à la collaboration des chercheurs et des constructeurs. Les industries chimiques, électriques, métallurgiques, textiles et minières, pour ne citer que les cas les plus importants, ont besoin d'un nombre croissant d'instruments de contrôle, de mesure, d'analyse qui sont de moins en moins confinés dans les laboratoires de recherche. Et l'utilisation industrielle change la typologie des instruments. En effet dans les usines et dans les mains des techniciens, il est possible de trouver des appareils bien plus compacts, faciles à utiliser et résistant à un environnement difficile que ceux qui sont utilisés par les chercheurs dans les laboratoires.

Si, traditionnellement, ce sont la physique et l'astronomie les domaines de recherche qui, depuis longtemps déjà, utilisent un grand nombre d'instruments, pendant le XIXe siècle la chimie, la médecine et la biologie s'équipent également avec des outils de travail de plus en plus complexes. La chimie n'utilise plus seulement, comme jusqu'au début du siècle, des fours, cornues et ballons en verre ou en grès et, comme les sciences biologiques et la médecine, adopte les microscopes; les

⁶ Au début du siècle un des traités les plus complets sur les instruments de laboratoire est certainement: Frick J., Lehmann O., *Physikalische Technik*, Braunschweig, 1909, (VII ed.).

colorimètres, les saccharimètres, les diabétomètres, les réfractomètres et bien d'autres appareils qui dérivent de la physique. Quelques exemples peuvent suffire à donner une idée de la diffusion des instruments au début du siècle : la firme allemande Leitz, qui produisait une vingtaine de microscopes par an vers 1850-1860, en produit 4000 en 1900. Une estimation très grossière nous indique que les vingt-cinq firmes les plus importantes pour la production de microscopes pourraient avoir construit au moins un demi million de microscopes pendant le XXe siècle, et la majeure partie surtout pendant les toutes dernières décennies du siècle.⁷ En outre avec la récente découverte des rayons X et de nouveaux types d'électrothérapie, plusieurs cabinets médicaux et hôpitaux s'équipent d'un important appareillage électrique. L'anthropométrie et la psychologie expérimentale en essayant de mesurer l'homme ainsi que les mécanismes de ses sensations et de ses réactions importent de la physique aux sciences humaines un grand nombre d'appareils et en développent de nouveaux. La diffusion des instruments est remarquable aussi pour les sciences de la terre. Si les instruments d'arpentage et de géodésie étaient utilisés depuis des siècles, c'est surtout à partir du XIXe siècle que l'on commence à explorer les caractéristiques physiques de la terre au-delà de ses dimensions et de sa topographie : pendules gravitationnels, sismographes, appareils pour sonder les mers, appareils pour mesurer et prévoir les marées, etc. La météorologie, science déjà ancienne, voit aussi son équipement instrumental s'accroître : le réseau des observatoires s'agrandit et les appareils qui enregistrent automatiquement les paramètres du temps sont disséminés sur le territoire de façon de plus en plus ramifiée.

Enfin, pendant la seconde moitié du siècle, plusieurs instruments conçus comme appareils ou prototypes de laboratoires, tels les téléphones ou les phonographes, commencent à entrer dans l'usage public.

Donc vers 1900, l'utilisation des instruments scientifiques qui, dans plusieurs disciplines, avaient une longue tradition, se généralise dans un nombre croissant de domaines. Pendant le XXe siècle, ce phénomène s'accroît et s'accélère de façon spectaculaire.

⁷ Turner G.L'E., *The Great Age of the Microscope. The Collection of the Royal Microscopical Society through 150 years*, Bristol and New York, 1989, pp. 13-15.

L'industrie de précision après 1900

Vers 1900, l'industrie de précision est particulièrement développée en Angleterre, en Allemagne, en France et aux États-Unis. L'Allemagne qui, après la création de l'Empire en 1870, avait vu son industrie se développer de façon exceptionnelle, vante une production d'instruments de qualité remarquable. Une forte collaboration entre milieux industriels et académiques, qui aboutit à la création de laboratoires comme le Physikalisch Technisches Reichsanstalt (financé par W. von Siemens et dirigé par H. von Helmholtz, les plus importants représentants de l'industrie et de la science allemandes), ne peut que stimuler les travaux concernant la réalisation et le contrôle d'instruments très élaborés. La fructueuse collaboration entre le fabricant d'instruments Zeiss, le savant et opticien Abbe et le producteur de verre Schott, est un autre exemple légendaire, et le nom de Zeiss devient synonyme même de précision. La position et la renommée allemandes sur le marché des instruments (pour la physique, pour l'optique, pour l'astronomie et pour les mesures électriques) sont de plus en plus fortes et ce sont surtout les producteurs français qui, frappés par une concurrence qui semble presque imbattable, perdent la position de prééminence qu'ils avaient eue en Europe et en Amérique pendant une grande partie du siècle (entre 1820 et 1880 environ). L'Angleterre a une longue tradition dans l'industrie de précision. Bien que fortement concurrencé par les Français et les Allemands sur le marché continental, son marché interne ainsi que son immense marché colonial assurent une demande constante d'instruments. Les États-Unis, en plein développement industriel, sont de moins en moins dépendants des producteurs européens qui, pendant des décennies, avaient équipé les laboratoires d'outre-Atlantique. Vers le début du siècle, ils commencent à exporter vers l'Europe. Les autres pays européens et américains sont essentiellement importateurs d'instruments. Ils n'ont que quelques constructeurs de taille, mais leur industrie de précision n'est pas suffisante pour satisfaire la demande interne.

Au début du XXe siècle, la structure des firmes pour la production des instruments est souvent encore à gestion familiale et reproduit une situation qui avait été typique du XIXe siècle. Le propriétaire est souvent aussi le « cerveau » de la firme et il est responsable pour la production, la diffusion et la vente de ses produits. Mais les entreprises les plus avancées se réorganisent lentement. Elles utilisent de plus en plus les machines-outils (qui pendant des siècles se limitaient au tour), et elles

commencent à rationaliser leur production, leur gestion ainsi que leurs méthodes de travail. La standardisation des mesures et des grandeurs, qui avait occupé les savants du XIXe siècle, atteint aussi les pièces des instruments : la longueur des tubes des microscopes, le pas de vis des oculaires, les caractéristiques des composantes électriques et des premières lampes électroniques. L'atelier de « l'artiste constructeur » du XIXe siècle est en train de céder la place à l'usine de l'ingénieur du XXe.

La publicité et la diffusion des instruments se font essentiellement grâce à des catalogues illustrés, généreusement distribués, qui dans le cas de certaines firmes allemandes peuvent présenter plusieurs milliers d'appareils et grâce aussi aux expositions. En effet, les expositions universelles ainsi que les expositions spécialisées (d'électricité, d'hygiène, etc.) qui sont de plus en plus nombreuses, permettent aux constructeurs de présenter leurs produits à un public de clients potentiels. Les constructeurs les plus importants ont des filiales dans plusieurs villes où ils sont représentés « en exclusivité » par des revendeurs spécialisés.

La structure de l'industrie de précision commence à changer radicalement surtout après la Grande Guerre.⁸ Les besoins de la guerre avaient en effet modifié et souvent gonflé la production d'instruments. Par exemple les appareils optiques qui servaient aux armées et à la marine (binoculaires, télémètres, lunettes, appareils de visée) et qui au début du conflit étaient en grande partie de production allemande, commencent à être fabriqués par les Alliés en nombre croissant de telle façon que, à la fin de la guerre, il y a une surproduction qui ne peut plus être absorbée par le marché. La crise économique des années vingt, le coût du travail et le prix des matières premières contribuent à aggraver la situation des fabricants. Plusieurs firmes au passé centenaire, qui n'avaient pas été capables de se réorganiser et de moderniser leurs produits, disparaissent. Plusieurs entreprises survivent péniblement ou font faillite. D'autres abandonnent complètement la production et, en exploitant la renommée d'une longue tradition, se consacrent simplement à la vente d'instruments produits ailleurs. Enfin d'autres encore (comme parfois les constructeurs d'appareils électriques de mesure) sont absorbés par des industries beaucoup plus grandes pour lesquelles la production d'instruments scientifique ne représente qu'une toute petite partie de leurs activités. Parfois des noms de constructeurs fameux restent, mais ils ne

⁸ Williams M.E.W., *The Precision makers. A history of instrument industry in Britain and France, 1870-1939*, London and New York: Routledge, 1994.

sont que des coquilles vides. Ainsi, vers la fin des années 20, la structure de l'industrie des instruments scientifiques commence à être complètement différente de celle qu'elle avait eue seulement quelques décennies auparavant.

Jusqu'à la fin du XIXe siècle, l'instrument était l'œuvre d'un artisan très adroit qui, parfois en suivant les désirs et les suggestions du savant, concevait et fabriquait des appareils qui, dans certains cas, demandaient un très long travail de modification empirique. Si ce dernier se révélait fonctionnel et efficace, il pouvait être reproduit pour des dizaines d'années sans de véritables changements, sinon il restait un prototype sans beaucoup d'avenir. Les dessins techniques ainsi que les projets étaient presque inexistantes ou extrêmement rudimentaires. Les quelques cahiers d'atelier restants nous montrent comment, encore pendant la deuxième moitié du XIXe siècle, la construction des instruments est un art plus qu'une science appliquée. Le constructeur essayait de rentabiliser son activité, mais sa « philosophie d'artiste », encore très enracinée à l'époque, l'entraînait dans des réalisations certainement extraordinaires, qui parfois étaient de véritables tours de force, mais économiquement ruineuses.

Les choses changent dans l'industrie du XXe siècle qui ne peut pas se permettre (même si la chose arrive encore souvent) d'entamer des projets qui ne sont pas rentables. Un prototype de laboratoire, aujourd'hui souvent projeté à l'ordinateur, est relativement plus facile à développer qu'un produit commercial. Donc pour développer un instrument scientifique qui soit un produit rentable, il faut étudier attentivement les possibles débouchés du marché, s'assurer un réseau de fournisseurs de composantes et de distributeurs, et s'assurer enfin une bonne commercialisation et un service après vente. Parfois, et il faut penser par exemple aux instruments utilisés aujourd'hui dans la médecine, il s'agit de conquérir un marché potentiel pour des dizaines ou des centaines de milliers d'appareils. Il apparaît donc clair que la structure de l'industrie moderne des instruments n'a plus rien à voir avec celle d'il y a une centaine d'années.

Avec la naissance de la « big science », la construction des appareils est confiée à des firmes diverses aux activités multiples qui, spécialisées dans des domaines différents (cryogénie, électromécanique, électronique, composantes, etc.) travaillent en équipe à la réalisation de systèmes complexes. Ces équipes peuvent comprendre des centaines de chercheurs, techniciens et ingénieurs qui individuellement sont responsables d'une

petite portion du projet à réaliser. Pour de tels projets, rien ne peut être laissé au hasard : les enjeux économiques et politiques sont trop forts.

Les instruments de recherche et de mesure, de taille et de caractéristiques moins exceptionnelles, sont toujours produits par des firmes spécialisées. Mais elles ne fabriquent généralement qu'une partie de leur produit. La spécialisation est telle qu'elles doivent s'adresser à d'autres firmes pour des composantes électroniques, électriques ou optiques. Donc surtout à partir de la deuxième moitié du XXe siècle, le nom qui apparaît sur un instrument n'a plus la même signification que dans le passé. Si autrefois un nom indiquait de façon généralement univoque une usine, voire un artisan bien précis, aujourd'hui ce nom ne donne qu'une indication vague, et parfois trompeuse, de la provenance d'un objet. Un ordinateur avec le nom d'une firme allemande peut être assemblé en Corée, avec des éléments américains, ou japonais.

Les matériaux et le design

Au début du siècle les instruments sont encore essentiellement de laiton, métal qui pour ses propriétés mécaniques, sa résistance à la corrosion et son éclat particulièrement attrayant est depuis longtemps très apprécié des constructeurs d'appareils. Mais lentement des matériaux nouveaux rentrent dans la construction des appareils. Déjà les constructeurs américains ou allemands ont tendance à utiliser pour plusieurs éléments la fonte, moins chère, ou l'aluminium. Les premières matières plastiques apparaissent : le celluloïd (1868), utilisé pour des échelles divisées, la bakélite (1907) pour les châssis et les parties isolantes, etc.

La guerre de 1914-1918 contribue aussi à faire abandonner le cuivre et ses alliages qui, à la suite de la pénurie pendant le conflit, sont maintenant très chers. Le rôle du fer et de l'aluminium devient donc de plus en plus important. Le changement du goût esthétique qui, à partir des années 90, modifie rapidement le design industriel, touche aussi les instruments, qui perdent toute décoration, toute ligne inutilement ornée pour devenir des objets qui s'approchent souvent du rationalisme le plus austère. Donc pendant le premier tiers du XXe siècle, les instruments scientifiques perdent complètement leur apparence d'instrument de cabinet de physique qui les avait caractérisés depuis au moins la fin du XVIIIe siècle. Le laiton laqué disparaît pour laisser place au métal verni ou oxydé. Le changement de goût est tel que, plusieurs instruments du XIXe siècle, qui peuvent être encore utilisés, sont vernis pendant le XXe afin de

les « moderniser ». Parmi un des faits marquant cette modernisation dans la production d'instruments, il y a la standardisation des pièces. Jusqu'à la fin du XIXe siècle, un grand nombre d'instruments étaient produits « pièce par pièce » et les éléments qui composaient ces mêmes pièces n'étaient pas standardisés. Une rationalisation du travail demande une telle standardisation et aussi une diminution importante des pièces à fabriquer. Surtout dans la deuxième moitié du siècle, avec une production souvent complètement automatisée (composantes électronique et électrique, etc.) les pièces réparables deviennent de plus en plus rares. Le coût de la main d'œuvre d'un technicien spécialisé est tel qu'il est préférable de changer des pièces modulaires que souvent il n'est même pas possible de démonter.

Trois périodes

Les divisions chronologiques sont des conventions qui peuvent être utiles et pratiques pour mieux étudier et cerner un phénomène. Néanmoins leur valeur est purement indicative. Pour simplifier les choses il est possible de diviser le XXe siècle en trois périodes qui marquent des étapes importantes dans l'histoire qui nous intéresse.⁹

⁹ Pour le développement des instruments du XXe siècle voir: Atherton W.A., *From Compass to Computer*, San Francisco: San Francisco Press, 1984; Sydenham P.H., *Measuring instruments: tools of knowledge and control*, London: P.Peregrinus and The Science Museum, 1979; Cubberly W.H., *Comprehensive Dictionary of Instrumentation and Control*, North Carolina, Instrumentation Society of USA, 1988, Finkelstein L., Grattan K.T.W., *Coincise Encyclopedia of Measurement and Instrumentation*, Oxford, Pergamon, 1994, Payne P., *Biological and Biomedical Measurement System*, Oxford, Pergamon, 1991 ; Dummer G.W.A., *Electronic inventions and discoveries*, Bristol and Philadelphia, Institute of Physics Publishing, 1997, (IV ed.). Pour un approche moins technique: Bud R., Cozzens S.E., *Invisible Connections. Instruments, Institutions, and Science*, Bellingham, Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1992, Bud R. Warner D.J., *Instruments of Science An Historical Encyclopedia*, London, The Science Museum, Washington, The National Museum of American History, 1998; "Brenni P. Physics Instruments in the 20th Century ", dans J. Krige Pestre J.D. *Science in the 20th Century*, Amsterdam, Amsterdam, 1997, pp. 741-757.

La première période va des toutes dernières années du XIXe à la fin de la Première Guerre mondiale ; la deuxième se termine vers les années 1950-60 et la troisième va de cette date à nos jours.

I Période

La première période voit une série de découvertes scientifiques et d'innovation technologiques, qui prennent toute leur importance surtout après la Première Guerre mondiale. Parmi les premières, nous avons la découverte des rayons X, de la radioactivité, de l'électron, de la supraconductivité, tandis que du point de vue théorique on établit les fondements de la physique quantique ainsi que la relativité.¹⁰

Au début du siècle les toutes premières lampes thermoïoniques font leur apparition dans la technologie de la TSF.¹¹ Ces premiers organes électroniques permettent de résoudre trois problèmes essentiels qui, avec les appareils électromécaniques précédents, n'avaient pu avoir que des solutions partielles et imparfaites. Grâce aux lampes, il devient possible de produire des oscillations électriques non amorties, de redresser de faibles courants alternatifs ainsi que d'amplifier des signaux. L'introduction des lampes représente un progrès majeur, tout d'abord pour la TSF qui se développe remarquablement pendant la Première Guerre mondiale. Les transmetteurs à étincelles ainsi que les détecteurs électromécaniques deviennent obsolètes, et les lampes prennent leur place : la TSF devient radio. Le progrès des lampes se développe en parallèle avec les techniques du vide. Les fragiles et compliquées pompes à mercure, déjà utilisées pour évacuer les ampoules électriques, sont remplacées par des pompes rotatives et par des pompes à diffusion sans organes mobiles, dont la rapidité et l'efficacité sont bien supérieures. Cette première période est caractérisée pour les instruments scientifiques par le début de l'abandon des « appareils classiques ». Si souvent la fonction et la typologie des instruments reste inchangée, le design ou les matériaux qui depuis des décennies, voire des siècles, les avait caractérisés change remarquablement. De nouveaux instruments, fondés sur de nouvelles découvertes sont aussi proposés, mais leur diffusion

¹⁰ Voir par exemple: Segré E., *Les physiciens modernes et leurs découvertes: des rayons X aux quark*, Paris, Fayard, 1984.

¹¹ Voir par exemple: Stock J.W., *70 Years of Radio Tubes and Valves*, New York, 1982; Okamura S. (éditeur), *History of electron tubes*, Tokyo, Ohmsha; Amsterdam, IOS Press, 1994

n'est pas immédiate. Par exemple le tube de Braun, élément essentiel des oscilloscopes et d'une multitude d'appareils électroniques, devient commun seulement après une série de progrès qui le rendent fiable par rapport à d'autres technologies. Des machines lourdes entrent dans les laboratoires, et même si on ne peut pas parler encore de « big science » l'équipement des laboratoires devient aussi une affaire de construction industrielle. Un des premiers exemples d'introduction massive de machines issues de l'industrie lourde dans les travaux scientifiques peut être trouvé au début du siècle dans le laboratoire de cryogénie de Kamerling Onnes. Pour ses travaux fondamentaux sur la liquéfaction des gaz, Onnes doit recourir à un système de pompes et de compresseurs industriels qui donne à son laboratoire l'aspect d'une véritable usine.

II Période

La deuxième période est marquée par l'introduction massive de la technologie électronique des lampes thermoïoniques qui deviennent de plus en plus performantes et sophistiquées. Cette technologie, est rendue extrêmement fiable et est poussée jusqu'à ses limites physiques. On peut considérer que l'industrie des composants électroniques se développe de façon importante à partir des années 20. La manufacture des postes de radio, produits par millions, évolue en parallèle avec la production des lampes. Cette période est aussi caractérisée par la construction de systèmes et de réseaux qui, comme ceux destinés à la distribution de l'électricité, demandent une organisation très complexe dans laquelle la collaboration de chercheurs, ingénieurs et techniciens est fondamentale. En même temps les sciences médicales et biologiques adoptent de plus en plus des instruments compliqués (microscopes électroniques, ultra centrifuges, appareils de diffraction électronique, etc. en partie dérivés de la physique et de la chimie), mais aussi développés à l'intérieur de ces mêmes disciplines biologiques. L'utilisation de thérapies lourdes (rayons x pénétrants, radiothérapie, etc.) contribue aussi à accentuer une technicisation de la médecine.

Aux États-Unis, où de grandes industries ont déjà créé des laboratoires de recherche et développement, on assiste à la naissance de la « big science » marquée par la collaboration de plus en plus étroite entre science et industrie et par d'importantes équipes qui travaillent à une technologie raffinée. La réalisation des premiers grands accélérateurs

de Lawrence¹², les recherches militaires du « Manhattan Project » pour la construction de la bombe atomique sont certainement les symboles les plus représentatifs de ce phénomène. Parmi les technologies nées avant la guerre, mais qui, grâce à la guerre, se développent de façon extraordinaire, il y a celle du radar ou celle du sonar. L'invention de la cavité résonnante dite magnétron en 1940 représente une des étapes fondamentales dans la technologie du radar.

La fin des années 30 et des années 40 est marquée aussi par la construction des premiers grands ordinateurs.¹³ Des premières machines à relais électromécaniques (une technologie souvent dérivée des systèmes téléphoniques), on passe à des ordinateurs à lampes. Utilisés dans le cadre de recherches militaires (par exemple : le Colossus anglais pour déchiffrer les codes ennemis, le ENIAC américain pour des calculs de balistique), ces appareils comptent des milliers de tubes électroniques (et donc sujets à de nombreuses défaillances) et demandent de grandes quantités d'énergie, mais leur puissance de calcul dépasse largement ce qui était possible avec les machines électromécaniques.

Mais, à part les projets les plus spectaculaires, l'effort de guerre a un impact remarquable sur le développement des composantes électriques et électroniques. Leur utilisation par les armées dans les climats les plus différents (des tropiques au pays du Nord), et dans les conditions les plus difficiles (vibrations, humidité, chocs, etc.) rend nécessaire la production de composantes et d'appareils de plus en plus standardisés, miniaturisés, fiables, faciles à réparer. Cette évolution touche les lampes, les résistances, les condensateurs, les relais, et aussi une grande partie des appareils de mesure ou de détection. Ces progrès sont largement exploités tout de suite après la guerre dans la construction des postes de radio et de télévision ainsi que dans la réalisation des instruments scientifiques. La complexité des instruments croît énormément en quelques années. Il est désormais nécessaire de parler de « systèmes instrumentaux ».

¹² Heilbron L., Seides R.W., *Lawrence and his laboratory, A History of the Lawrence Berkeley Laboratory*, Vol. 1, Berkeley, University of California Press, 1989.

¹³ La bibliographie sur l'histoire des ordinateurs est très vaste. Voir par exemple: Pratt V., *Thinking machines*, Oxford, Blackwell, 1897; Williams M.R., *A History of computing technology*, Los Alamitos, California, IEEE, 1997 (II. Ed.).

III Période

Enfin entre 1950-1960 et nos jours, on voit d'abord l'introduction des transistors (inventé en 1947 par le Bell Laboratories) grâce aux progrès de la physique de l'état solide. L'utilisation des transistors, plus petits, plus fiables et moins avides d'énergie que les lampes, entraîne aussi une modification profonde des circuits qui, fonctionnant à des tensions de plus en plus basses, peuvent être par la suite miniaturisés et fabriqués avec des machines automatiques.

L'utilisation des lampes commence à décliner pour disparaître presque complètement.

Les années 50 voient l'invention des tout premiers circuits intégrés (chips) qui peuvent être produits en grande quantité à partir des années 60 et dont le développement est extrêmement rapide. Utilisés d'abord dans les ordinateurs, ils trouvent en quelques années des applications dans tous les domaines de la science et de la technologie ainsi que dans la vie quotidienne. L'introduction d'ordinateurs de dimensions réduites aux performances (vitesse, capacité de mémoire, flexibilité des applications) qui augmentent de façon exponentielle et dont les prix chutent sans cesse, révolutionne complètement l'univers des instruments scientifiques. D'abord réservés aux grands laboratoires de recherche, les ordinateurs, dont l'usage se généralise, deviennent indispensables à partir des années 1970 dans presque tous les instruments de recherche et de mesure. Le traitement des informations devient une priorité essentielle. Grâce aux ordinateurs, il est possible d'un côté de réaliser des instruments particulièrement complexes (en physique et en astrophysique), et de l'autre de construire des appareils de laboratoire ou professionnels très compacts dont les fonctions de calcul, d'analyse, de mesure sont intégrées. Des instruments nouveaux sont introduits dans des domaines qui, comme le contrôle de l'environnement, deviennent importants surtout à partir des années 70. L'invention du laser à la fin des années 50, capable de produire un faisceau de lumière cohérente, donne aux chercheurs un nouvel outil de travail formidable, qui en quelques années devient objet d'usage courant. Comprimé à l'intérieur d'un stylo ou dans les quelques centimètres carrés d'un « baladeur », le laser est désormais un instrument omniprésent, dont tout le monde se sert, parfois sans même le savoir.

Pendant les dernières décennies du siècle, la « big science » se développe aussi en Europe avec la fondation du CERN, qui de plus en plus menace

une supériorité qui avait été américaine. Les énormes machines de la physique sub-atomique, les engins pour l'exploration spatiale, les grands télescopes terrestres et en orbite, sont seulement quelques-unes des réalisations qui marquent les derniers progrès de l'instrumentation scientifique. Les activités dans l'espace, à leur tour permettent de développer des instruments nouveaux capables de résister à des conditions tout à fait exceptionnelles.

Quelques étapes fondamentales

Si le développement de l'électronique en général a probablement représenté le fait le plus marquant dans l'histoire de la technologie du XXe siècle, les progrès de l'instrumentation scientifique ne peuvent être dissociés des avancées dans toute une série de technologies plus classiques. La métallurgie, la chimie, la physique, ainsi que de nouvelles technologies d'usinage nous ont permis d'élaborer de nouveaux alliages (acier inoxydable, alliages pour supraconducteur, alliages à mémoire de forme) et de produire de nouveaux matériaux (céramiques, plastiques, verres optiques spéciaux) qui ont été appliqués dans la construction des instruments. Grâce à ces réalisations, les technologies relatives à la construction des instruments scientifiques ont été profondément transformées. Il nous suffira de donner quelques exemples :

Les mécanismes

Si nous pouvons considérer le XIX siècle comme l'âge d'or de la mécanique ainsi que des instruments mécaniques ou électromécaniques, au XXe siècle, quoique beaucoup d'instruments perdent leurs parties mobiles, la mécanique fine se développe considérablement grâce aussi aux progrès de la métrologie et des techniques d'usinage. Les mécanismes de précision sont nécessaires pour les appareils optiques et électriques, pour les relais, pour les balances de haute précision, pour les gyroscopes et pour maintes autres applications. Les relais téléphoniques et les machines à calculer, avant de devenir électroniques demandent un grand nombre de pièces mécaniques standardisées. Aujourd'hui des machines utiles de plus en plus perfectionnées (et dirigées grâce à des ordinateurs) permettent de construire des éléments avec des tolérances impensables, il y a seulement quelques années. Avec des procédés spéciaux de gravure, la micromécanique, avec ses organes visibles

seulement grâce à des microscopes, ouvre une nouvelle ère dans les applications de mécanismes.

Détection et enregistrement

Enregistrer des paramètres qui évoluent dans le temps est une tâche qui devient essentielle au XXe siècle. Dans les laboratoires pour étudier les phénomènes dynamiques ou dans les industries pour contrôler constamment les phases de production, il est nécessaire de pouvoir enregistrer. Des kymographes à cylindre du XIX siècle on passe à des dispositifs d'enregistrements électriques où l'instrument de mesure marque périodiquement sur une bande de papier des graphes ou des points indiquant les variations temporelles d'un paramètre. D'autres systèmes permettent un enregistrement optique, en exploitant un rayon lumineux mobile qui inscrit sa trace sur du papier photographique. L'enregistrement magnétique, quoique présenté déjà en 1900, devient commun et fiable seulement vers les années 1950. Aujourd'hui grâce aux ordinateurs et à des mémoires presque illimitées, il est possible d'accumuler, de traiter, d'analyser et de stocker une masse de données énormes.

Mais le contrôle des paramètres les plus différents demande l'utilisation de détecteurs et de senseurs appropriés. Aussi dans ce domaine, les technologies les plus diverses ont été utilisées pendant le XXe siècle : senseurs acoustiques, pneumatiques, électromécaniques. Aujourd'hui les senseurs électroniques truffent tous nos systèmes instrumentaux.

*Le vide*¹⁴

Une des technologies essentielles des laboratoires du XXe siècle est certainement celle du vide.

Presque aucune recherche de physique de l'état solide, atomique, nucléaire ou des particules ne serait concevable sans la possibilité de réaliser, maintenir et mesurer des vides très poussés. Plusieurs processus industriels se déroulent sous vide. Jusqu'en 1900 les pompes utilisées dans les laboratoires sont des pompes mécaniques dans lesquelles le gaz à

¹⁴ Collectif, *Vacuum Science and Thecnology, special Volume Commemorating the 30th Anniversary of the American Vacuum Society, 1853-1883*, New York: American Vacuum Society, 1984, and Redhead P.A., *Vacuum Science and Technology, Volume 2, Pioneers of the 20th Century*, New York: AIP Press, American Vacuum Society, 1994.

évacuer est déplacé par le mouvement d'un piston ou d'une colonne de mercure. Grâce aux pompes à diffusion et moléculaires, sans organes mobiles, mais simplement fondées sur des phénomènes de la cinétique des gaz, le vide réalisable est beaucoup plus poussé. Mais les pompes sont seulement un élément, quoique important, de la technologie du vide. Tuyauterie, joints, soudures spéciales, appareils pour la détection des fuites, manomètres de précision, sont aussi essentiels pour garantir le parfait fonctionnement des systèmes à haut vide. Jusqu'à il y a 100 ans, les volumes à évacuer étaient de l'ordre de grandeur de quelques litres. Aujourd'hui, pour les anneaux des accélérateurs non seulement les vides demandés sont beaucoup plus poussés mais ils doivent être obtenus pour des volumes de milliers de mètres cubes.

Digital et analogique

Parmi les changements fondamentaux qui révolutionnent la technologie des instruments, il y a le passage de l'analogique au digital. Ce passage peut avoir lieu seulement avec l'introduction massive de l'électronique. Un signal n'est plus simplement traduit dans un autre signal présentant une proportionnalité avec le premier, et ainsi de suite jusqu'à la fin du traitement. Un exemple classique est celui des ondes sonores qui, pour être transmises, sont converties en ondes électromagnétiques dont la variation d'amplitude est proportionnelle à la variation du son original. Dans la technologie digitale, le signal est haché et transformé en nombres avant d'être traité pour être parfois retransformé en forme analogique. Ce processus qui est certainement moins « direct » et apparemment moins « pratique » que la simple transduction analogique est possible grâce à la puissance et à la vitesse des instruments électroniques. Le « digital » a donc transformé aussi des instruments très simples et répandus qui, comme beaucoup de multimètres de poche, indiquent la valeur en chiffres et non avec le mouvement d'une aiguille sur l'échelle.

Les boîtes noires

Le « *black box* » ou boîte noire indique, dans le cas de l'instrumentation scientifique un engin à l'apparence assez anodine (souvent justement une boîte au châssis métallique), dont la fonction n'est pas automatiquement reconnaissable de l'extérieur. La boîte noire souvent cache à l'intérieur un appareillage complexe, mais ne montre extérieurement que quelques

boutons de commande, des diodes lumineuses ou des indicateurs. Les premières boîtes noires naissent probablement avec l'utilisation de lampes électroniques (amplificateur, premiers appareils de mesure électroniques, redresseur). Il est curieux de noter comment dans les postes de radio des années 1920 les lampes, ainsi que d'autres éléments (solénoïdes d'accord, résistances, etc.) sont placés à l'extérieur, comme dans une sorte de boîte noire renversée, presque pour montrer de façon ostentatoire la complexité et la technicité de l'appareil. Mais cette disposition peu pratique pour maintes raisons (fragilité, difficulté de transport et de stockage, etc.) est abandonnée vers les années 30 et les organes disparaissent à l'intérieur de la boîte où ils sont cachés et protégés. Évidemment la complexité des entrailles des boîtes noires augmente au fur et à mesure de la réduction en taille des composantes électroniques (lampes de plus en plus petites, transistors et enfin circuits intégrés), mais son apparence extérieure (sauf quelque maquillage dû au changement des matériaux et à des critères purement esthétiques) ne varie pas beaucoup. En regardant de près, nous pouvons nous apercevoir comme les « boîtes noires » sont emboîtées les unes dans les autres (composantes scellées à l'intérieur d'un châssis, chips à l'intérieur des composantes, etc.) comme dans un jeu de poupées russes, dont la complication ne semble pas pouvoir s'arrêter.

Les instruments de la Big Science¹⁵

Sous le nom de « big science », terme utilisé surtout à partir des années 50, on caractérise la science contemporaine quand elle développe des projets de très grande envergure, qui demandent une forte présence de l'industrie et souvent de l'apparat militaire, des financements extrêmement importants (qui peuvent être assurés seulement grâce à d'importantes décisions politiques), des équipes de centaines, voire de milliers de chercheurs issus de différents domaines, et la construction de systèmes instrumentaux d'énorme complexité et souvent de grandes dimensions. La « big science » présente donc des aspects scientifiques, technologiques, institutionnels, politiques, sociaux et économiques. Il est donc impossible de la considérer ici dans sa globalité. Je me limiterai

¹⁵ Galison P., Hevly B. (ed.), *Big Science The Growth of Large-Scale Research*, Stanford: Stanford University Press, 1992; Thackray A. (ed.), *Science After '40*, Osiris, II série, Vol. 7., 1992.

essentiellement à l'aspect instrumental de la « big science ». Si le terme de « big science » nous fait automatiquement penser aussi à des instruments très grands ou très complexes, ce n'est pas simplement la réalisation d'appareils de dimensions particulièrement imposantes, qui en marque la naissance. Déjà à la fin du XIXe siècle de gigantesques lunettes logées dans des observatoires monumentaux furent réalisées en Europe et aux États-Unis. Leur construction demanda la collaboration de fabricants d'instruments ainsi bien que d'ingénieurs. Mais leur utilisation restait quand même dans les mains de quelques astronomes et elle n'était pas fondamentalement différente de celle d'instruments beaucoup moins imposants.

La « big science » est surtout synonyme de grands laboratoires, où des équipes de savants, de techniciens et d'ingénieurs travaillent ensemble à des projets qui, surtout dans le domaine de la physique ou de l'astrophysique, demandent des sommes d'argent considérables. Probablement les instruments emblématiques de la « big science » sont les accélérateurs : *Accelerators provide perhaps the best example of how bigger and bigger scientific instrument can evolve into complicated technological system requiring industrial-scale inputs of capital and labor.*¹⁶ Des premiers accélérateurs de Lawrence aux gigantesques machines du CERN ou du Fermilab, la puissance, la complexité et le coût de ces machines, sans aucune comparaison avec le coût des instruments du passé, ainsi que le nombre de personnes qui y travaillent n'ont cessé de croître. Les instruments de la « big science » deviennent donc un symbole de la puissance et du succès scientifique et technologique d'une nation. Le lancement du Spoutnik marqua devant le monde entier la supériorité russe dans la technologie spatiale. Peu de temps après, cette position est remise en question par les succès américains. Les grands accélérateurs européens et américains sont les instruments avec lesquels la bataille de la suprématie scientifique (mais aussi psychologique et politique) est combattue à coup de milliards de dollars et de Gigaélectronvolt. Ces instruments, ainsi que les grands appareils de l'astrophysique et de l'astronomie, ont un immense pouvoir rhétorique et leur réalisation devient une affaire d'État et, de plus en plus, une affaire internationale. La décision d'abandonner la construction du plus grand accélérateur américain dont les travaux avaient déjà été entamés au Texas

¹⁶ Capshew J.H., Rader K.A., *Big Science: Price to the Present*, pp.3-25, Osiris, Vol 7, 1992 *Science after '40* (Thackray A.), p. 8.

a été vivement perçue aux États-Unis comme une défaite de la science et de la technologie américaine.

Avec la naissance de la « big science » des conditions physiques particulières qui jusqu'alors avaient été créées seulement dans des enceintes de dimensions très limitées doivent être étendues à des espaces beaucoup plus grands. Faire le vide poussé dans une ampoule à rayon X, ne présente évidemment pas les mêmes problèmes que le faire dans des kilomètres de tuyauterie comme c'est le cas aujourd'hui dans les grands accélérateurs de particules. Il en est de même avec la production de champs magnétiques ou électriques intenses et calibrés avec précision sur des espaces très étendus.

L'utilisation des instruments de la « big science » doit être programmée soigneusement. Les équipes de chercheurs doivent profiter de la machine qui, en même temps, doit être exploitée de façon maximale. Le temps passé avec ses instruments doit donc être partagé, contrairement aux grandes lunettes du passé, ils n'appartiennent plus à un petit groupe de chercheurs. L'utilisateur en outre ne connaît plus, comme le savant du XIXe siècle, tous les détails et les secrets de sa machine. Il a certainement une idée générale de son fonctionnement mais, vu sa complexité extrême, il ne peut que connaître les détails de la partie dont il est spécialiste.

Les instruments professionnels et didactiques

Même les instruments professionnels les plus classiques, tels les théodolites pour ne citer qu'un exemple, ont été profondément changés par l'électronique. Ces appareils, qui depuis des siècles étaient essentiellement composés d'une lunette orientable en hauteur et azimut et de deux échelles graduées pour la lectures des angles, sont devenus infiniment plus complexes grâce au composantes électroniques. Aujourd'hui les théodolites digitaux contiennent un ordinateur avec un mini-écran, qui permet de mémoriser des milliers de coordonnées et d'exécuter les calculs qui autrefois demandaient des heures de travail. Les performances de ces instruments ont donc été énormément augmentées, les temps des opérations diminués et les pratiques des utilisateurs complètement changées. D'autres instruments professionnels n'ont subi aucune modification, mais en quelques années ils ont complètement disparu, supplantés par des appareils de conception complètement différente. Les sextants, appareils indispensables pour faire le point en

mer, ne sont pratiquement plus que des curiosités pour collectionneurs ou pour marins farouchement attachés à la vieille tradition. L'introduction du système GPS (Global Positioning System) a rendu les sextants (ainsi que d'autres appareils analogues) complètement dépassés. Dans ce cas un instrument d'utilisation immédiate et facile, mais qui cache un système très complexe de satellites, s'est substitué à un instrument simple mais dont l'utilisation était longue et parfois problématique. Les exemples pourraient être innombrables, mais généralement ont tous un point en commun. Les pratiques se simplifient et ne demandent que quelques minutes pour être maîtrisées, mais dans ces cas les boîtes noires qui permettent cette simplification sont de complexité croissante.

Ces dernières années, le prodigieux développement des ordinateurs et de leurs logiciels révolutionne aussi le domaine des instruments didactiques et de démonstration. Ces instruments, conçus au XIXe siècle et souvent déjà proposés par les démonstrateurs au XVIIIe siècle, avaient eu une vie très longue et avaient été utilisés presque sans modifications jusqu'aux premières décennies du XXe siècle. À part quelques simplifications dues à des raisons d'économie et de manufacture (le plastique et l'aluminium prenaient la place du bois, du verre et du laiton), leur design était resté pratiquement inchangé. L'arrivée des ordinateurs les a en bonne partie éliminés. Des logiciels peuvent aujourd'hui aisément présenter sur un écran la simulation de la machine d'Atwood ou du fonctionnement d'une dynamo et illustrer toutes les expériences possibles. Mais si d'un côté ces nouveaux moyens didactiques sont d'une efficacité et d'une flexibilité remarquables (logiciels de plus en plus perfectionnés et interactifs), ils ont aussi un défaut. Leurs simulations ne peuvent pas reproduire les aléas d'une véritable expérimentation et les difficultés qui se rencontrent habituellement même dans la reproduction de démonstrations élémentaires. La réalité virtuelle est parfois un peu trop parfaite pour introduire des phénomènes dont la mesure et l'observation, avec des outils classiques et non virtuels, ne sont pas si simples. La disparition des difficultés typiques de l'expérimentation représente probablement un appauvrissement sur le plan didactique et une certaine falsification de la réalité.

Les instruments et leurs utilisateurs

La révolution dans l'instrumentation scientifique du XXe siècle se reflète aussi dans beaucoup de changements dans le rapport entre l'instrument et

son utilisateur et dans les pratiques de laboratoire. Jusqu'aux premières décennies du XXe siècle, l'utilisateur connaît parfaitement les viscères de son instrument. Seul, ou avec l'aide d'un technicien de laboratoire, il peut le démonter, le modifier, le réparer. Une bonne partie du temps dans le curriculum d'un physicien est en effet dédiée au travail manuel et direct sur les instruments, qui sont des objets « sans mystères ».

L'introduction massive des boîtes noires et plus tard des ordinateurs a changé radicalement cette situation. L'utilisateur de l'instrument est confronté quotidiennement à ce qui a été appelé l'« impénétrabilité des boîtes noires ». Impénétrabilité physique puisque souvent les boîtes noires ne sont pas démontables (éléments scellés, non réparables) ou elles peuvent être démontées seulement par leurs constructeurs. Impénétrabilité psychologique puisque l'utilisateur ne connaît pas et donc ne sait pas intervenir sur ce qu'il y a à l'intérieur de la boîte noire. Il en connaît simplement la fonction mais pas le fonctionnement, sinon dans des lignes très générales. La boîte noire décourage donc toute action physique, et contribue à éloigner l'utilisateur de toute intervention sur l'objet. Comme nous l'avons vu dans l'exemple du sextant, dont l'usage demandait une bonne maîtrise de certaines pratiques manuelles et observationnelles, par rapport au GPS, qui ne demande que d'être allumé en poussant sur un bouton, la complexité croissante de la technologie des instruments permet aux utilisateurs d'accomplir des opérations autrefois difficiles, longues ou compliquées de façon élémentaire. Ce grand avantage comporte quand même la perte d'un savoir-faire manuel et d'une habitude à la manipulation, perte qui peut-être contribue à créer une sorte d'« analphabétisme technique » et à désengager le savant expérimentaliste de ce que l'on a appelé « *the material world of science* ». ¹⁷ Il est donc nécessaire de s'adapter à l'usage d'objets fermés, et hermétiques, en partie mystérieux, qui ne permettent pas à l'utilisateur, souvent avec une certaine frustration, des pratiques manuelles qui étaient autrefois très communes. Ce fait se reflète aussi dans la mode des machines : si bricoler un moteur de voiture était une pratique courante jusqu'il y a quelques années, aujourd'hui la complexité des moteurs ne permet presque plus d'intervention.

Beaucoup d'instruments contemporains permettent de révéler des phénomènes absolument insaisissables à nos sens. Les sens, et

¹⁷ Blume S., "Whatever happened to the string and sealing wax?" in *Invisible Connections* (op. cit., note 2), pp. 87-101.

particulièrement la vue, aujourd'hui ne jouent plus le rôle de détecteurs qu'ils avaient joué dans le passé. L'œil humain n'est plus utilisé pour évaluer une intensité lumineuse, une couleur spectrale, une ombre dans le champ de vision d'un photomètre et depuis longtemps l'oreille ne sert plus à grand chose en acoustique. L'introduction d'instruments de sensibilité croissante produit aussi une dépendance majeure de ces mêmes instruments. Un médecin du début du XXe siècle, avec un simple stéthoscope était capable, grâce à son entraînement, de détecter des dizaines d'anomalies différentes du battement cardiaque. Aujourd'hui aucun médecin n'est plus capable de faire ça en utilisant le même instrument.

Ce que nous observons maintenant sont des images exceptionnelles (ou des diagrammes, des chiffres, des simulations) qui, produites par des machines complexes, nous fournissent une certaine représentation de la réalité. Mais quelle est la valeur de ces images créées par les instruments ? La belle photo du spectre à rayon X du soleil, dont les couleurs sont purement conventionnelles, n'est qu'une possible représentation visuelle d'un phénomène qui forcément échappe à nos sens. Si les instruments sont des révélateurs de plus en plus puissants, ils sont aussi des filtres de plus en plus « épais » entre l'observateur et le phénomène observé. Paradoxalement donc ces instruments, tout en nous révélant plus de détails de l'univers, nous en fournissent une image de plus en plus virtuelle.

L'introduction de grands instruments utilisés par des centaines de chercheurs a aussi engendré une situation nouvelle. L'appareillage n'est plus personnel ou appartenant à un groupe très restreint de personnes ; il faut donc organiser le temps d'utilisation, souvent programmer les mesures sur des périodes de temps très longs. Le travail sur ses grands instruments demande, bien plus que dans les laboratoires du passé, une interaction constante avec des équipes différentes, une grande capacité de collaboration, et l'acceptation d'une certaine limitation de la liberté d'action. Donc dans le domaine de la « big science » l'individualité du chercheur est forcément limitée, et les contributions personnelles dans le cadre d'un grand projet tendent à être peu visibles. Ces faits peuvent déterminer un sentiment de frustration. Comme dans le cas de la boîte noire, le chercheur ne peut pas connaître exactement toute la machine à laquelle il travaille, il doit donc d'appuyer sur les compétences d'autrui.

Enfin une certaine frustration apparaît aussi dans les mots du chercheur E. Chargraff : « *Now I go through a laboratory, be it of*

virology or developmental physiology, and there they all sit before the same high speed centrifuges or scintillation counters, producing the same superposable graphs. »¹⁸ Il est certain que l'utilisation des instruments contemporains qui en bonne partie sont reliés a un ordinateur qui les commande, « aplati » les pratiques de laboratoires. Si le « savoir faire » instrumental d'un physicien ou d'un biologiste au début du siècle étaient bien distinctes grâce à l'usage d'appareils différents, la présence des ordinateurs comme interfaces dans un nombre de plus en plus grand d'instruments, qui ne demandent essentiellement que de connaître des logiciels différents, contribue a éliminer cette différenciation. Les manipulations se simplifient et tendent à s'homogénéiser.

Quelques problèmes relatifs à l'étude, à la conservation et à l'exposition des instruments scientifiques du XXe siècle.

Il est certain que, du point de vue historique, une partie des instruments de la première et deuxième période de notre division chronologique peut être traitée de la même façon que les instruments plus anciens. Leur typologie, sinon leur aspect, est tout à fait semblable à celle des instruments avant 1900. Les choses se compliquent considérablement pour les appareils de la « big science » et de la deuxième partie du XXe siècle. L'énorme différence entre ces instruments et ceux qui sont plus anciens va poser aux historiens des sciences et, plus particulièrement aux historiens des instruments, une série de nouveaux problèmes méthodologiques. Si, comme dit van Helden le concept d'instrument scientifique ne peut pas être défini avec précision, l'ambiguïté est certainement majeure pour beaucoup d'instruments contemporains. Donc même l'objet d'étude est aujourd'hui moins bien saisissable.

Cataloguage

Pour connaître les instruments, il est essentiel de les cataloguer. Un catalogue scientifique et descriptif d'une collection est un outil essentiel pour l'historien des sciences et des techniques. Le catalogue permet de déterminer l'entité d'une collection, d'illustrer les objets qui la composent, de les comparer avec d'autres objets. Pour les instruments classiques (appelons ainsi les instruments pré-électroniques), la pratique

¹⁸ Cité dans Mendelshon E., "The social locus of scientific instruments", pp. 5-22 dans *Invisible Connection* (op.cit. note 9)

du cataloguage scientifique est bien établie. À côté d'une sorte de carte d'identité de l'instrument comprenant des données standard (nom de l'objet, dimensions, matériaux, constructeurs, etc.) on rédige une description de l'objet, qui dans les meilleurs exemples est très détaillée, avec des informations sur son fonctionnement, et éventuellement des notes historiques. Enfin la fiche de cataloguage est complétée par une bibliographie détaillée relative à l'objet en question. Si nous pensons à un instrument contemporain, il est clair qu'un modèle semblable n'est pas toujours fonctionnel ni praticable. D'abord, comme je l'ai montré auparavant, une grande partie de ces instruments sont en réalité des systèmes instrumentaux et donc des assemblages d'instruments différents. Comme nous l'avons aussi vu, pour leur complexité et pour la structure productive contemporaine il est déjà très difficile, sinon impossible, de déterminer un constructeur de l'objet. La description physique de l'objet ainsi que la description de son fonctionnement est aussi problématique, pour la complexité de l'appareil lui-même. La bibliographie qui, dans les appareils classiques peut être généralement limitée à quelques titres, devient aussi beaucoup plus difficile à saisir, vu l'immense quantité de publications et d'articles spécialisés qui décrivent un instrument et les travaux pour lesquels il est utilisé. Donc la fiche descriptive d'un instrument contemporain, risque d'« exploser » dans les mains de son compilateur sans pour autant pouvoir être complète et exhaustive. D'autre part une fiche réduite perd une grande partie de son utilité. Une solution possible à ce problème pourrait être fournie par la création d'une base de données ouverte et constamment mise à jour qui soit une référence standard. Beaucoup d'instruments aujourd'hui sont produits en centaines, voire milliers d'exemplaires. Ces instruments pourraient être décrits dans cette base de données avec des fichiers multiples (description, principe de fonctionnement, bibliographie, etc.) et accessible sur le web une fois pour toutes. Elle représenterait une sorte de *thesaurus* d'instruments contemporains. Un exemple : pour ce qui concerne la NMR, dans cette base on devrait pouvoir trouver des descriptions des instruments les plus utilisés et de leur fonctionnement, des notices historiques générales sur la naissance et le développement de cette technologie ainsi qu'une bibliographie détaillée. Le chercheur intéressé par ce type d'instruments pourrait puiser des informations dans la base de données et à son tour en rajouter d'autres concernant par exemple des particularités techniques ou des notices historiques propres à l'instrument qu'il est en train d'étudier et qui seraient mentionnées dans

un sous-fichier spécial avec les autres instruments du même type conservés. Un système semblable, dont je donne ici seulement une idée grossière et qui bien sûr pourrait être appliquée aussi aux instruments classiques, me paraît absolument nécessaire pour essayer de maîtriser la masse d'informations concernant les instruments contemporains, dont un travail de cataloguage classique amènerait une inutile dépense de temps et d'énergie, vu leur nombre et leur complexité.

Sauvegarde et restauration

Un premier problème concernant la sauvegarde et la survie même du patrimoine instrumental du XXe siècle naît du fait que les instruments récents ou contemporains ne sont pas considérés, au moins actuellement, particulièrement esthétiques. Bien peu de collectionneurs en effet se penchent sur ces objets. Les critères esthétiques ne sont bien sûr pas les seuls qui motivent les collectionneurs, mais comptent certainement parmi les plus importants ; et nous savons bien que leur rôle a été (et est) essentiel pour préserver des objets, avant que ces derniers n'attirent l'attention des musées et des institutions officielles. Beaucoup de grandes collections d'instruments (pensons par exemple aux collections de microscopes anciens comme ceux de la fameuse collection Nachet) ont été formées par des particuliers qui, avec amour et passion, ont recueilli des objets qui à l'époque étaient peut-être considérés comme des curiosités sans beaucoup d'intérêt. Combien d'instruments anciens ont été sauvés de la destruction grâce à la fascination qu'ils exerçaient pour la beauté de leurs formes, la richesse de leur décoration, avant d'être considérés comme intéressants du point de vue technique, scientifique ou historique. Anderson a bien décrit la passion des historiens (et j'ajouterai : des collectionneurs) pour les instruments les plus anciens :

*"Earlier periods have proved to be a much greater attraction for scholars. The mystery of the mediaeval astrolabe, the subtlety of the renaissance sundial, the tempting telescope of the Enlightenment : it would seem that brass and ivory proved a more seductive lure than cast iron and wood and, heaven forbid, plastic."*¹⁹

Donc je pense qu'aujourd'hui nous ne pouvons pas compter sur les particuliers pour sauvegarder cette partie de patrimoine. La conservation

¹⁹ Voir note 5.

des instruments du XXe siècle ne peut pas être envisagée avec succès sans une coopération nationale et internationale. La quantité gigantesque de matériel qui devient obsolète et inutilisé chaque année ne permet certainement pas de tout conserver. Les grands musées comme le Deutsches Museum de Munich, le Science Museum de Londres ou le Musée du conservatoire des arts et métiers à Paris, ne sont plus en mesure d'assurer un rôle de conservatoires universels des techniques comme il pensait pouvoir le faire autrefois. Même en se limitant au patrimoine d'« intérêt national » (terme qui aussi est de plus en plus difficile à définir) leurs forces et leurs structures sont limitées. Il est donc nécessaire de trier et de choisir les objets à conserver selon une politique de concertation des différents musées, instituts de recherche, universités, etc. Cette collaboration, qui demande des efforts remarquables pour être établie, existe déjà dans le cadre de certains projets régionaux ou nationaux. Ces institutions pourraient se concentrer sur une période bien précise, ou sur une typologie d'objet. La production du XXe siècle, caractérisée aussi dans le domaine des instruments, par la fabrication en série (au moins pour plusieurs types d'instruments) nous oblige à éliminer une partie de ces objets. Il faudrait au moins essayer, dans le cas idéal quoique difficilement réalisable, de sauvegarder au moins les objets les plus significatifs. Mais qu'est-ce qu'un objet significatif ? Le tri est dangereux puisqu'il comporte une élimination d'une partie du patrimoine. Le choix est effectué maintenant, en suivant notre jugement actuel, nos paramètres, nos valeurs et il existe le risque qu'un jour notre choix soit considéré comme mauvais.

Pour les objets uniques de la « big science », le problème est différent : qui pourra se permettre de conserver un accélérateur ou un grand radiotélescope une fois leur vie active terminée ? Le prix de la conservation sera dans beaucoup de cas certainement trop haut. Et encore il nous ne restera rien de l'instrumentation d'un satellite de communication ou d'une station spatiale qui, un jour inutiles, seront volatilisés en rentrant dans l'atmosphère. Dans beaucoup de cas nous devons probablement nous contenter de conserver une documentation (écrite, iconographique, sur support optique, magnétique, etc.) et peut-être quelques tranches ou morceaux d'appareils qui risqueront d'avoir plus valeur de relique que de témoignage matériel utile à l'historien.

Il n'est pas possible ici de rentrer dans les innombrables problèmes techniques relatifs à la restauration des instruments du XXe siècle. Je me limite à faire quelques remarques. La restauration des instruments est

une discipline toute nouvelle et, même dans le cas d'objets anciens, il y a plusieurs méthodologies qui s'affrontent.²⁰ Si la restauration fonctionnelle, et donc capable de remettre les instruments en état de marche, est appréciée des collectionneurs et de certains conservateurs, d'autres conservateurs ainsi que les restaurateurs d'œuvres d'art plaident pour une restauration moins poussée. La restauration fonctionnelle est, pour les instruments contemporains, non seulement discutable mais aussi difficilement praticable. Beaucoup d'éléments, tels que les condensateurs électrolytiques, peuvent se dégrader irrémédiablement, d'autres comme les lampes électroniques ont une durée de vie moyenne. Et encore, dans beaucoup de cas, les logiciels nécessaires à ces appareils ne sont plus disponibles. Une restauration fonctionnelle, si possible, serait dans des cas semblables une réparation, souvent avec des éléments modernes qui peuvent assurer le fonctionnement de l'appareil, mais qui serait complètement différente des pièces originales. Donc philologiquement une telle restauration, si on peut encore l'appeler ainsi, ne serait certainement pas souhaitable. Nous pouvons réparer un arc ancien avec une corde de nylon, mais qui ferait ça dans un musée ethnographique ? Mais d'autres problèmes peuvent surgir dans la conservation des instruments contemporains. Nous ne savons pas encore quelle est la stabilité dans le temps de plusieurs matériaux synthétiques, qui d'ailleurs parfois après quelques années d'utilisation ont été abandonnés. Notre expérience est assez limitée dans ce domaine. D'autres instruments, même s'ils sont encore en état de marche au moment de leur collocation dans un musée, ne peuvent pas être mis en fonction, pour des raisons pratiques (coût, complexité, danger). Et même en remettant en fonction un accélérateur ou un amplificateur pour des raisons purement didactiques et muséologiques, que pourrait-on voir ? Des données sortant d'un ordinateur, des graphiques sur un écran, des chiffres lumineux affichés par des diodes. Je ne pense pas que la chose soit si intéressante. Enfin d'autres facteurs encore limitent la conservation ou même l'utilisation muséologique de certains instruments. Les appareils ayant contenu des substances radioactives ou chimiques dangereuses sont par exemple très délicats à stocker. Des règles de sécurité de plus en plus

²⁰ Collectif, *The Restoration of Scientific Instruments. Proceedings of the workshop held in Florence December 14-15, 1998* (sous la direction de l'Istituto e Museo di storia della scienza et de l'Opificio delle pietre Dure), Le Lettere, Firenze, 2000

strictes imposent des contraintes inimaginables seulement il y a quelques décennies. Un exemple : les instruments utilisés sur les navires ou sur les avions de guerre dans les années 40 ou 50 ont des cadrans phosphorescents dont le niveau de radiation est aujourd'hui jugé trop important pour être acceptable dans une exposition publique. Les conservateurs de ces collections peuvent eux-mêmes difficilement accéder à ces objets.

Muséologie

La muséologie des instruments scientifiques contemporains est particulièrement difficile.

Oublions ici un problème que j'ai déjà abordé dans le paragraphe précédent : la difficulté de stocker et surtout d'exposer des appareils qui, par leur dimensions ou leur poids demandent des espaces difficilement trouvable dans des musées. Mais admettons que ce problème puisse être résolu dans un musée ou bien in situ, ou l'appareil en question serait visible dans son cadre original. Comment attirer l'intérêt du public sur un tel objet ? Le défi est des plus ardu. Comme nous l'avons déjà vu, les instruments modernes ne sont ni particulièrement beaux ni particulièrement attrayants du point de vue purement esthétique. Si un visiteur, sans aucun intérêt particulier dans la matière, peut être fasciné par la beauté d'un astrolabe, ou attiré par l'éclat d'un microscope en laiton ou par l'élégance d'une boîte d'instruments chirurgicaux, il éprouvera difficilement une émotion similaire devant un détecteur ou une armoire métallique dans lesquels sont fixés des organes électroniques ou électriques. Les boîtes noires reliées à un ordinateur, comme le sont souvent les instruments contemporains, n'apparaissent même pas comme des objets inhabituels, capables du susciter une quelconque curiosité. Ils sont trop souvent semblables à nos appareils domestiques (Hi-Fi, ordinateur, etc.) pour être dignes d'un regard plus attentif. Même ouverts ou éclatés, ils présentent bien peu d'intérêt. Enfin la complexité des instruments défie toute tentative d'explication. Comment est-il possible de faire comprendre à un public moyen, et où ne figurent ni ingénieurs ni physiciens, le fonctionnement d'un appareil de résonance magnétique nucléaire ? Le risque est double : une présentation excessivement simpliste, et peut-être compréhensible, ne reflète pas la réalité des choses et une présentation plus articulée et complexe devient inaccessible. La science moderne ainsi que ses outils, apparaît souvent trop abstraite, trop

ésotérique et trop lointaine de la vie de tous les jours pour accrocher le visiteur. En outre, contrairement à l'homme du XIXe siècle, friand « des merveilles de la science et des techniques », qui était fasciné en voyant aux expositions universelles les premiers téléphones ou les images d'objets microscopiques, l'homme du XXIe siècle, blasé par une technologie de plus en plus complexe mais qui lui semble un aspect normal de sa vie quotidienne, n'éprouve pas de grande curiosité.

Plusieurs musées se sont heurtés à la difficulté de présenter la science contemporaine en proposant des sections qui, truffées d'appareils, ont rarement recueilli la faveur du public. Et quand il s'agit de présenter des expériences interactives pour expliquer quelques phénomènes de la physique, on a souvent recours à des démonstrations parfois proposées déjà dans les laboratoires du XIXe ou dans les cabinets du XVIIIe siècle. La physique de pointe, les phénomènes atomiques et nucléaires, se prêtent difficilement à une mise en scène. Il est vrai que les simulations sur ordinateur peuvent aider à rendre ces phénomènes plus accessibles et même plus spectaculaires, mais dans ce cas l'objet réel reste trop souvent une relique muette.

Conclusion

Le XXe siècle voit une diffusion étendue et ramifiée de l'usage des instruments scientifiques. Leur usage, qui déjà vers la fin du XIXe siècle, avait dépassé les limites des laboratoires scientifiques pour entrer dans les usines, a aujourd'hui envahi complètement toutes les activités humaines. Dans la vie de tous les jours, nous utilisons régulièrement des dizaines d'instruments scientifiques sans même y penser et certainement sans savoir comment ils sont faits ou comment ils fonctionnent. Leur présence est banalisée, leur simplicité d'usage cache leur complexité intérieure. La complexité, mot que j'ai utilisé ici très souvent, est probablement la caractéristique principale des instruments d'aujourd'hui. D'abord la complexité des instruments « classiques » n'est pas comparable à celle des dispositifs contemporains. Ces derniers, surtout dans le cas d'appareils de laboratoire et de recherche, sont très souvent composés de plusieurs appareils qui ne sont pas de simples accessoires mais qui sont essentiels au fonctionnement du dispositif. Sans mentionner le cas des grands accélérateurs qui demandent un assemblage de centaines d'appareils divers à leur tour composés par d'autres appareils, aujourd'hui même un appareil de laboratoire assez courant est un

ensemble indissociable d'éléments complexes qui sont à leur tour des appareils. Donc il est inexact de parler d'instruments, pour ce qui concerne les dernières décennies du XXe siècle. Le terme d'« instrument », si nous considérons la période avant 1930 indique un appareil bien défini, facilement reconnaissable, dont la fonction – généralement unique-apparaît évidente par la forme même de l'objet. Il est composé d'éléments relativement simples, eux aussi reconnaissables. Rarement nous rencontrons ces caractéristiques dans les instruments contemporains : la forme n'indique plus la fonction, l'omniprésence des ordinateurs et donc de logiciels différents, ainsi que les composantes électroniques rendent souvent l'appareil multi-fonctionnel. Donc il est de plus en plus nécessaire de parler de « systèmes instrumentaux ».

Après avoir analysé quelques-unes des caractéristiques des instruments contemporains, il est donc possible de conclure qu'ils sont profondément différents des instruments que j'ai appelés classiques. Non seulement leur forme, leurs matériaux, leurs assemblages sont différents, mais aussi le rapport entre utilisateurs et instruments est différent. Ces différences se refléteront inévitablement dans la façon avec laquelle les futurs historiens des instruments devront se pencher sur les instruments. Leur survie comme témoins de la culture matérielle du XXe siècle ne sera assurée que partiellement. Mais nous pouvons nous demander : avons-nous vraiment besoin de conserver les instruments obsolètes pour mieux comprendre le développement scientifique et technique contemporain ? Si l'étude d'un astrolabe de la Renaissance nous fournit des informations qui ne sont pas accessibles dans des sources écrites, si l'analyse d'un microscope du XVIIIe siècle nous permet de mieux apprécier les observations de l'époque, est-il vraiment nécessaire de se pencher sur une chambre à bulle pour avoir une image plus précise des pratiques et des connaissances des savants de la seconde moitié du XXe siècle ? Nous avons certainement à notre disposition une grande masse d'informations (sur des supports en papier ou électroniques : des articles, des modes d'emplois, des plans, des projets, des brevets, des images photographiques, de synthèse, film documentaire, etc.), certainement plus grande que celle qu'il est possible de retrouver sur les instruments plus anciens. Nous avons aussi dans plusieurs cas enregistré les propos des personnes qui ont conçu, construit ou utilisé ces objets.

Malgré tout cela, il me paraît difficile de ne pas considérer aussi les instruments scientifiques contemporains comme des témoignages matériels indispensables pour l'historien. Leur utilité pour l'histoire des

sciences et des techniques dépendra beaucoup de notre capacité à les interpréter, à les étudier, à les « faire parler » pour répondre à des questions que, un jour peut-être, nous nous poserons.

Légendes

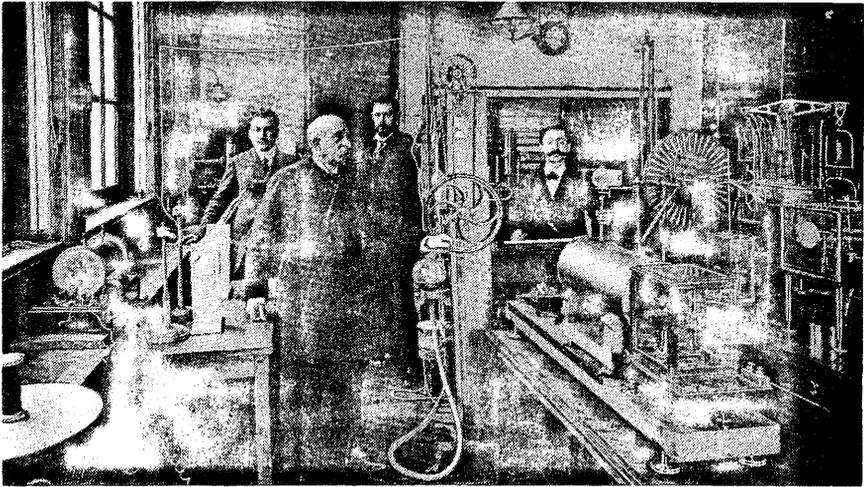


Fig. 1
Le laboratoire de physique de la Sorbonne vers 1900
(Carte postale, collection Brenni)

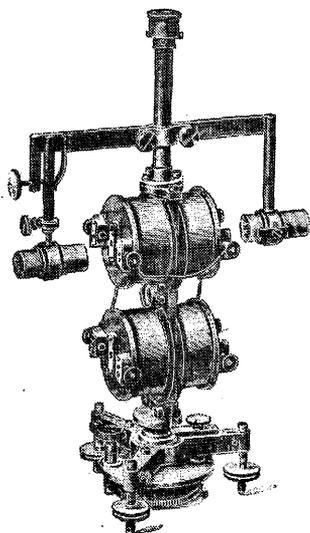


Fig. 13.

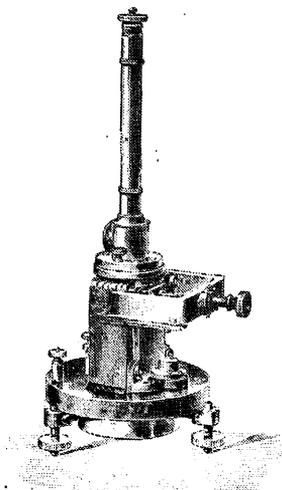


Fig. 14.



Fig. 15.

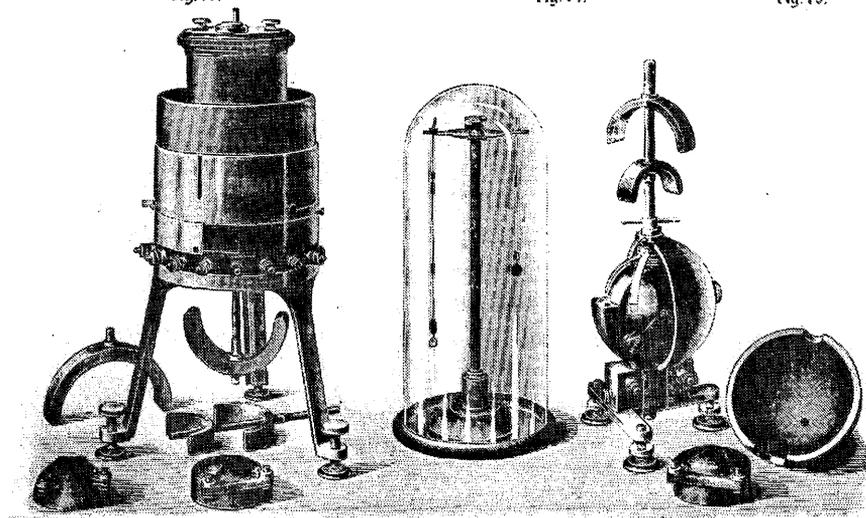


Fig. 2

Galvanomètres allemands vers 1900

(Collectif, *Catalogue de l'exposition collective allemande d'instruments d'optique et de mécanique de précision*, Berlin, 1900, p. 161)

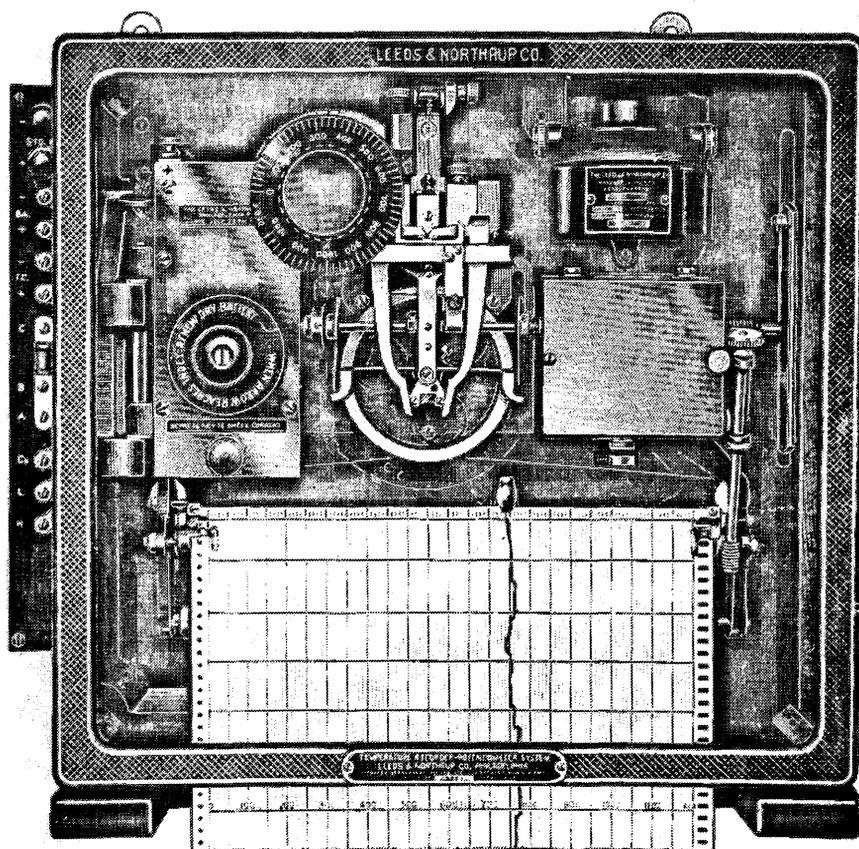
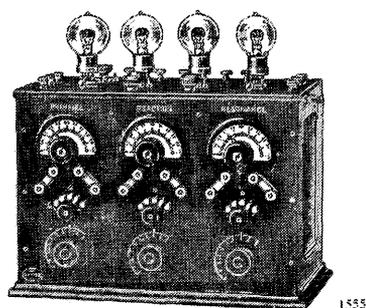
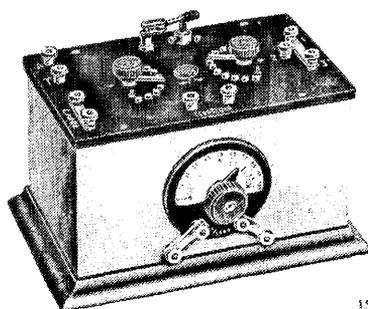


Fig. 3

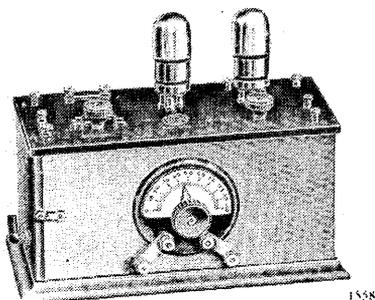
Un potentiomètre enregistreur, instrument industriel, vers 1915.
(Sydenham P.H., *Measuring instruments : tools of knowledge and control*, London 1979 p. 366)



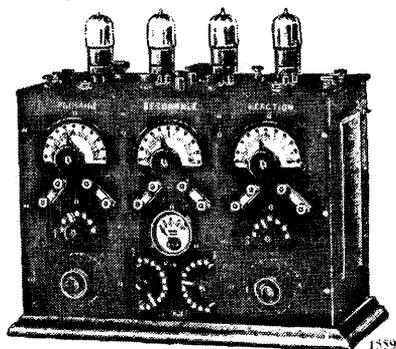
1555



1556



1558



1559

Fig. 4

Poste de TSPF à lampes électroniques et à cristal, vers 1925
 (Biraud G., Forestier R., *Le guide du collectionneur TSPF-Radio-TV*
 Fontenay-le-Comte, 1991, p. 375)

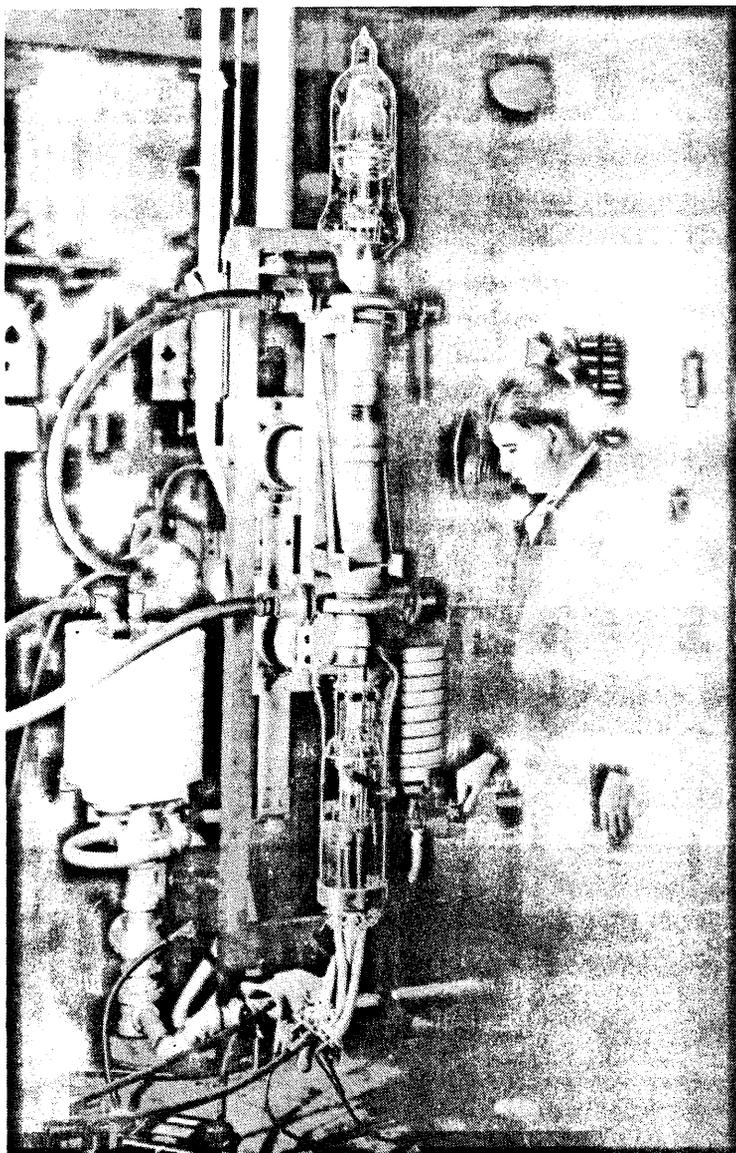


Fig. 5

Tube électronique émetteur de grande puissance construit par les Bell
Laboratories aux années '30
(Gingerich, O., *Album of Science, The Physical Sciences in the Twentieth
Century*, New York 1989, p. 129)

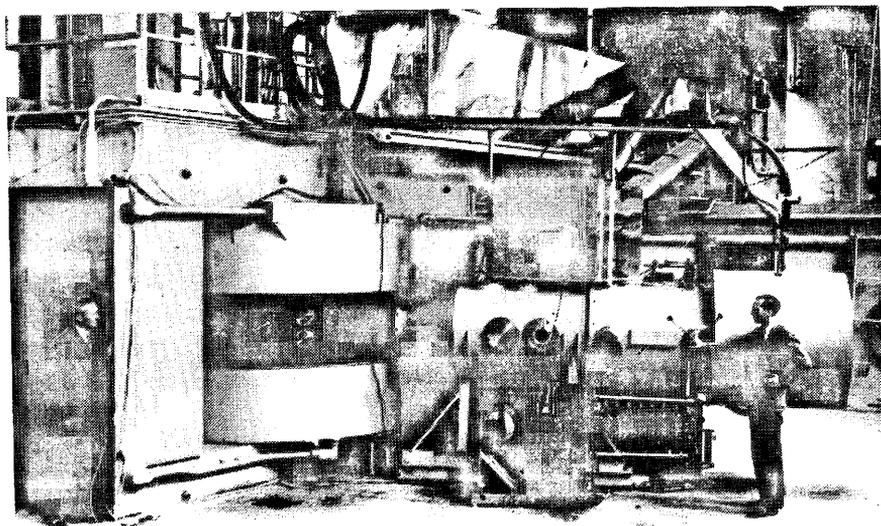


Fig. 6

Le cyclotron de 60 pouces du Lawrence Laboratory, fin des années '30
(Gingerich, O., *Album of Science, The Physical Sciences in the Twentieth Century*, New York 1989, p. 129)

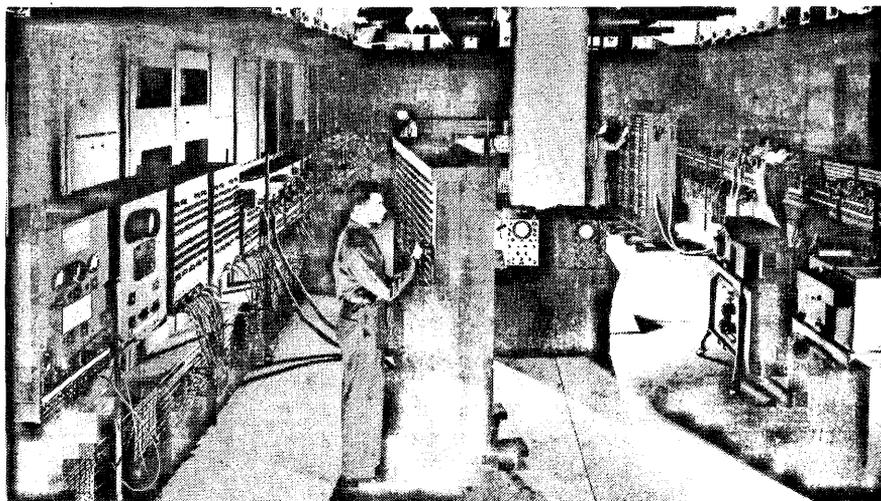


Fig. 7

L'ordinateur ENIAC, complété en 1946
(Pratt V., *Thinking machines*, Oxford, 1987, p. 164)

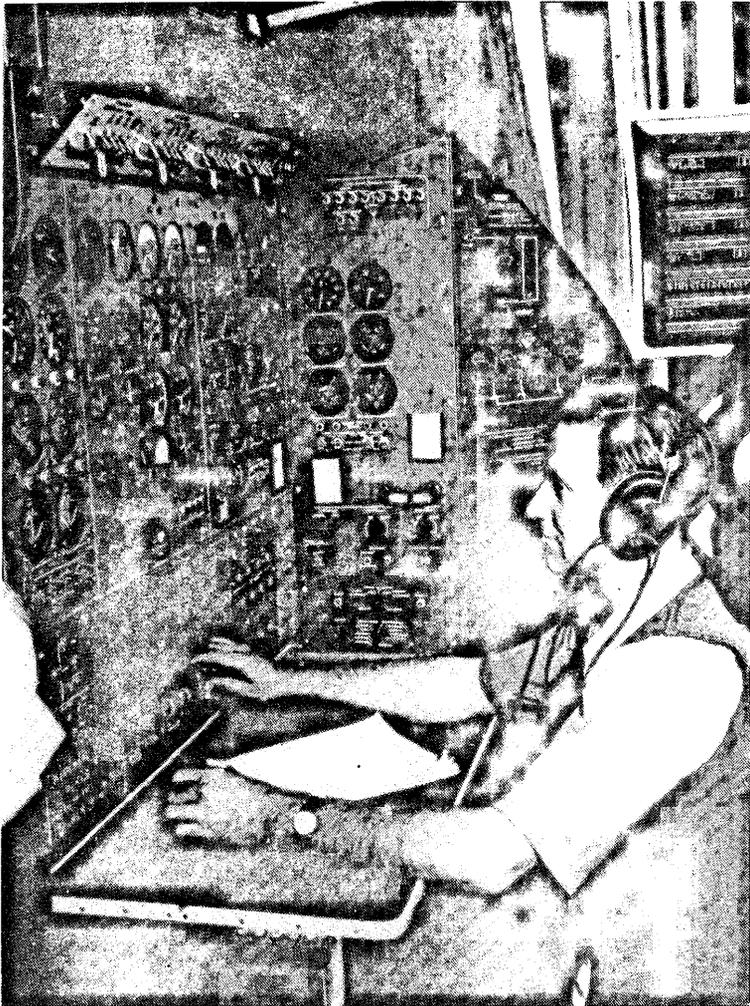


Fig. 8
Instruments à bord d'un avion, vers 1950
(Sydenham, P.H., *Measuring instruments : tools of knowledge and control*, London, 1979, p. 393)

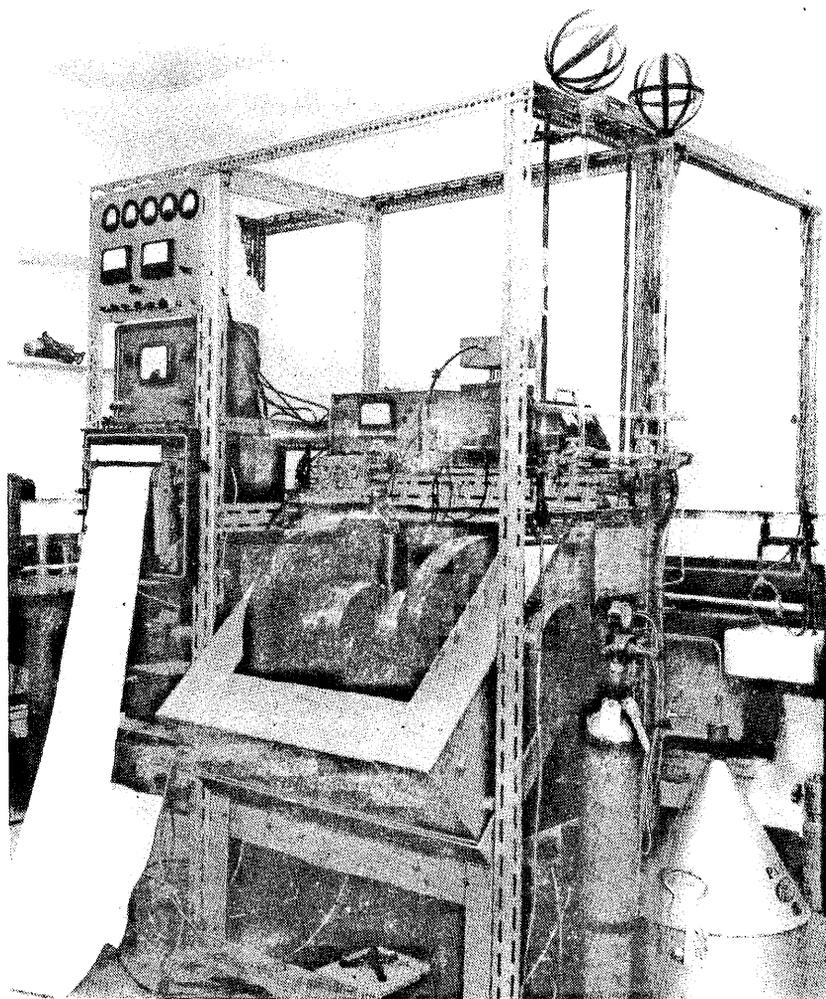


Fig. 9
Appareil de résonance magnétique nucléaire, fin des années '50
(Bud, R., Warner, D.J., éditeurs, *Instruments of Science. An Historical Encyclopedia*, New York, London, 1998, p. 557)

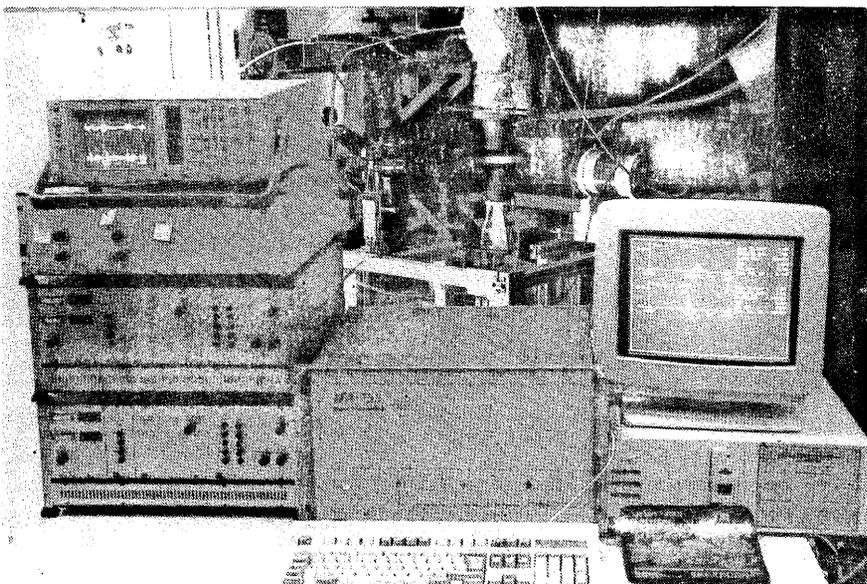


Fig. 10

Boîtes noires : un appareil pour mesurer la turbulence dans une flamme.
 (Bud R. Warner, D.J., éditeurs, *Instruments of Science. An Historical Encyclopedia*, New York, London, 1998, p. 349)

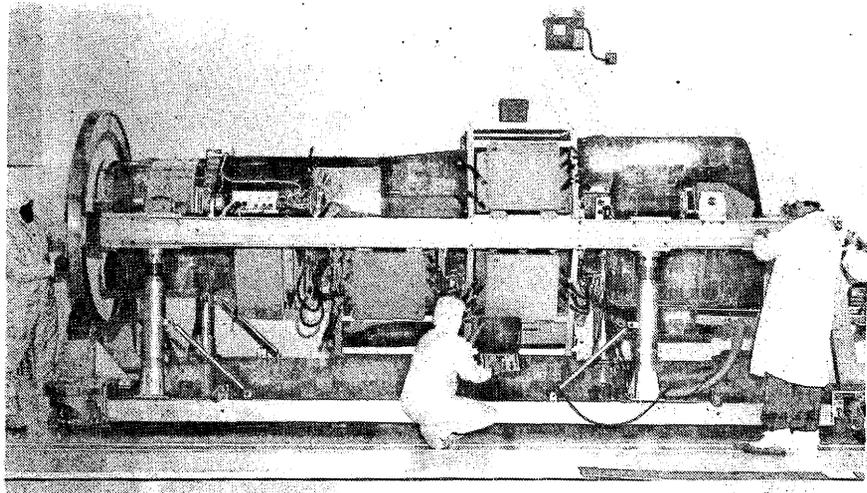


Fig. 11

Télescope à rayon X 1977

(Bud, R., Warner D.J., éditeurs *Instruments of Science. An Historical Encyclopedia*, New York, London, 1998, p. 611)

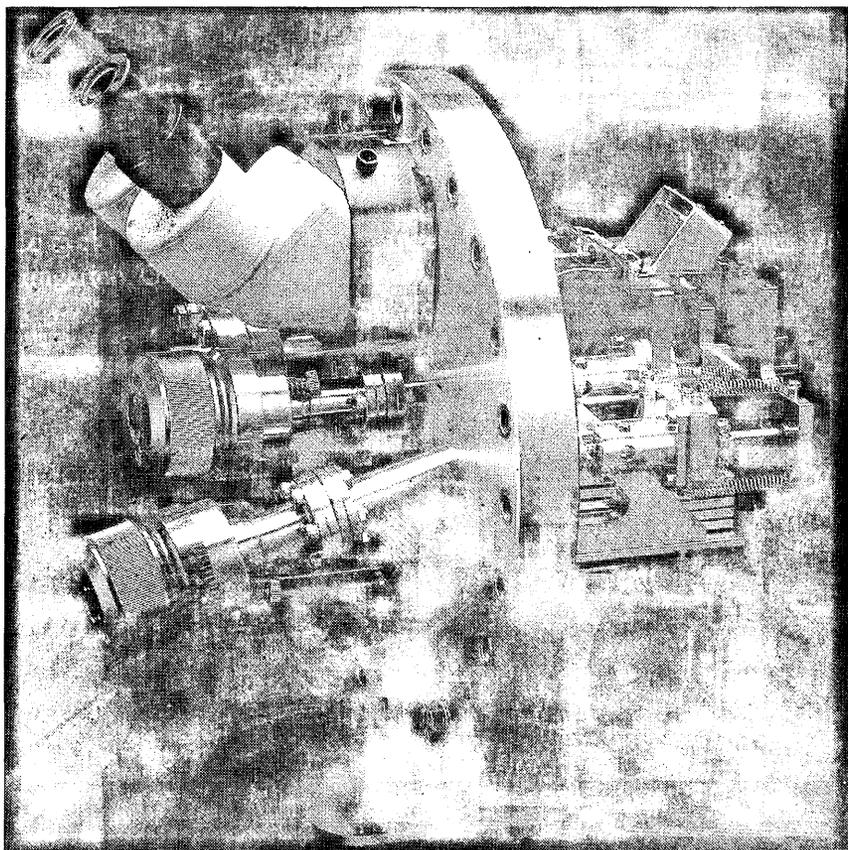


Fig. 12
Microscope à balayage à effet tunnel, 1986
(Bud, R., Warner, D.J. éditeurs, *Instruments of Science. An Historical Encyclopedia*, New York, London, 1998, p. 399)

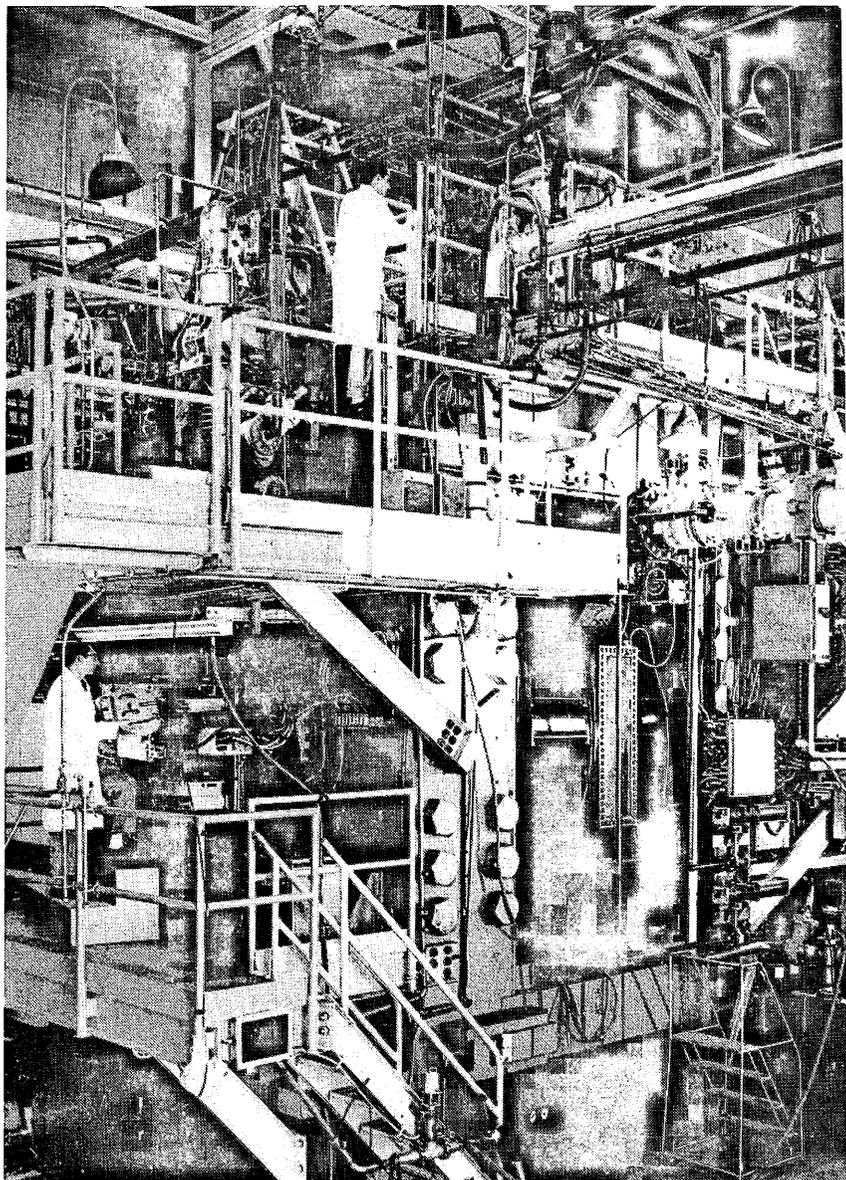


Fig. 13

Big science : la chambre à bulles du laboratoire de Brookhaven (N.Y.)
(Shea, W.R. éditeur, *Storia della scienza - Le scienze fisiche e
astronomiche*, Turin, 1992, p. 526)

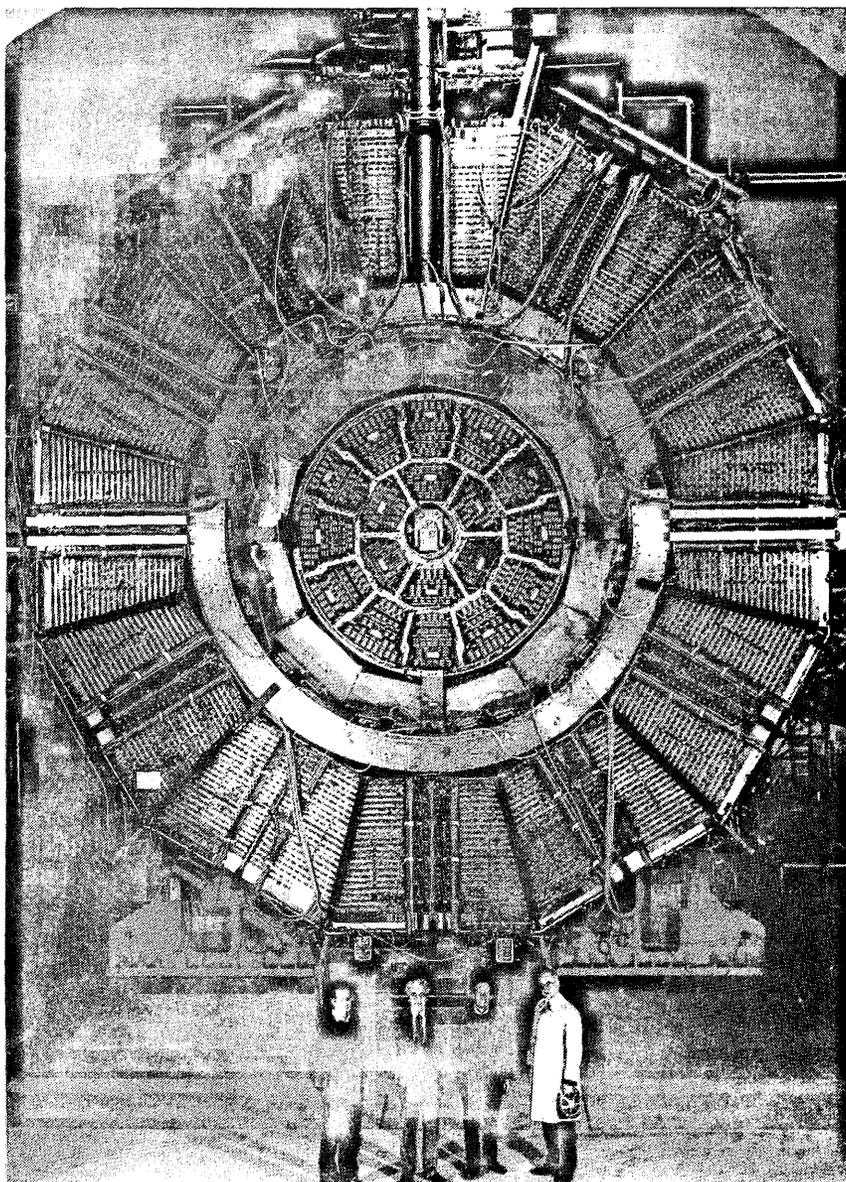


Fig. 14

Big science : détecteur au CERN

(Shea, W.R. éditeur *Storia della scienza : Le scienze fisiche e astronomiche* Turin, 1992, p. 536)

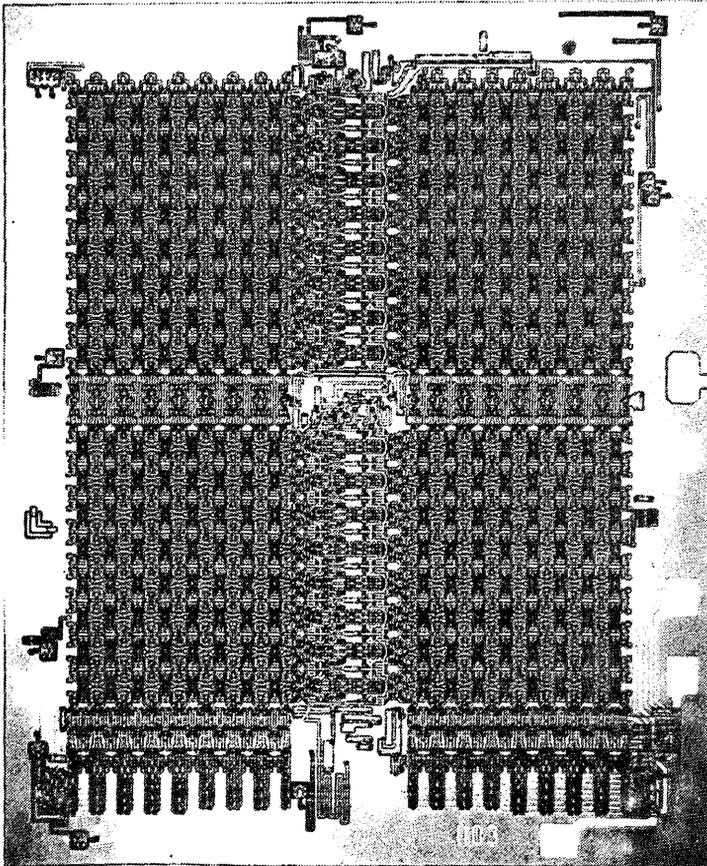


Fig. 15
Miniaturisation : puce électronique Intel 1103
(Ceruzzi, E., *A History of Modern Computing*, Cambridge Mass., 1999, p. 197).