



HAL
open science

De l'intersubjectivité à l'interinstrumentalité. L'exemple de la physique des surfaces

Catherine Allamel-Raffin

► **To cite this version:**

Catherine Allamel-Raffin. De l'intersubjectivité à l'interinstrumentalité. L'exemple de la physique des surfaces. *Philosophia Scientiae*, 2005, 9-1, pp.3-30. 10.4000/philosophiascientiae.610 . hal-04010696

HAL Id: hal-04010696

<https://hal.science/hal-04010696>

Submitted on 1 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

De l'intersubjectivité à l'interinstrumentalité. L'exemple de la physique des surfaces

Catherine Allamel-Raffin
Université Louis Pasteur, Strasbourg 1.

Résumé : Notre visée, dans cet article, consiste à souligner que la prise en compte d'une stratégie couramment employée par les chercheurs au sein des sciences expérimentales, l'interinstrumentalité, permet de réduire l'impact des facteurs micro- et macrosociaux, privilégiés par les tenants du programme relativiste empirique de Harry Collins, lorsqu'il s'agit d'expliquer la clôture des débats sur la valeur à conférer aux données collectées. Deux études de cas, l'une portant sur l'histoire de l'invention du microscope à effet tunnel, l'autre sur une recherche déterminée au sein d'un laboratoire de physique des surfaces, nous permettent de préciser en quoi l'interinstrumentalité contribue à l'objectivité des résultats obtenus par les scientifiques, et en constitue une composante au même titre que l'intersubjectivité.

Abstract: Our aim in this article is to show how a strategy used in the experimental sciences, strategy that we named "inter-instrumentation", can minimize the role of micro and macro-sociological factors when one tries to understand how the debates about the interpretation of the data come to an end. To defend our point of view, we will present two examples: an historical example – the invention, of the Scanning Tunneling Microscope – and an example collected during an ethnographic study in a surface science laboratory. We would like to emphasize that inter-instrumentation contributes to the objectivity of the experimental results and constitutes a part of it as well as intersubjectivity.

Introduction Parmi les exigences méthodologiques auxquelles se trouve soumise toute entreprise scientifique, on compte au premier chef celle de l’objectivité¹ des procédures et des résultats. De quelles façons se manifeste-t-elle dans le cadre des sciences de la nature? Elle a tout d’abord à voir avec ce que l’on a appelé l’intersubjectivité. Si

¹“(…) la question de l’objectivité est peut-être la question centrale de l’épistémologie envisagée comme méthodologie de la connaissance scientifique (…)” [Nadeau 1999, 698]. C’est sur ce plan que nous situons notre réflexion en n’abordant pas les questions d’ordre ontologique et gnoséologique [Bell 1992], [Nadeau 1999] que la notion d’objectivité ne peut manquer de soulever. Si on considère comme Daston [1992] que le sens du terme “objectivité” est confus, c’est probablement parce qu’on a affaire à un terme-parapluie (*an umbrella term*, pour reprendre l’expression du *Cambridge Dictionary of Philosophy* à propos de l’expression “philosophie analytique”). Dans l’espoir de parvenir à une clarification, on peut avec Megill [1994, 1–20] distinguer quatre types d’objectivité :

1. l’objectivité absolue qui est en fait un concept élaboré dans le champ philosophique. Elle repose sur la croyance qu’on peut décrire la réalité comme elle est *réellement*, en éliminant le plus possible les effets de la subjectivité ;
2. l’objectivité disciplinaire. Cette dernière prend place dans des communautés spécifiques qui vont mettre en place des standards propres à une discipline afin de créer un consensus au sein de la communauté ;
3. l’objectivité dialectique. Dans ce cadre, les objets sont construits à travers un processus dialectique qui prend en compte les subjectivités et les objets ;
4. l’objectivité procédurale où l’on vise à élaborer des procédures impersonnelles d’investigation. Dans la mesure où l’accent est mis précisément sur le caractère impersonnel de telles procédures, on comprend qu’il s’agit du même coup d’éliminer ou du moins de réduire le plus possible la part de subjectivité.

En fait, ces quatre sens du terme “objectivité” sont intimement liés et se recouvrent fréquemment. On peut ainsi considérer les sens (2), (3) et (4) comme des moyens de tendre vers le sens (1). On peut également rejeter le sens (1) en affirmant qu’il impose des “œillères philosophiques”, inspirées par un réalisme métaphysique dont l’effet premier est de rendre impossible la réflexion que nous nous proposons de mener à bien quant aux pratiques de recherche scientifiques (réflexion pour laquelle les sens (2), (3) et (4) apparaissent en revanche comme recevables). “Dans la pratique scientifique, les questions relatives à l’objectivité ne sont pas des questions de métaphysique, mais des questions qui concernent le caractère que présentent certaines thèses défendues dans des recherches particulières.” [Putnam 2003, 142]. Dès lors que l’on renonce à accorder une pertinence au sens (1), on peut considérer – en compatibilité avec ce qu’autorisent les sens (2), (3) et (4) – l’objectivité sur le mode d’un *continuum* : “Considérons nos énoncés comme reposant sur un *continuum* (de manière à ce qu’il n’y ait aucun point où commence l’objectivité) ; et disons que les énoncés qui dépendent éminemment de nos intérêts et de nos points de vue, et tout particulièrement ceux qui procèdent d’un point de vue idiosyncrasique, ou qui sont émis par des personnes indifférentes aux intérêts des autres ou à d’autres points de vue appropriés, se situent à l’extrémité “subjective” du *continuum*, tandis que les énoncés deviennent plus “objectifs” au fur et à mesure que leur prétention à la vérité dépend moins de ces points de vue idiosyncrasiques et de l’indifférence à l’égard des points de vue et des intérêts des autres.” [Putnam 2003, 141].

cette dernière s'avère être une notion mal définie, de l'aveu même de plusieurs épistémologues contemporains [Fagot-Largeault 2002], [D'Espagnat 2002], elle permet néanmoins de mettre l'accent sur la dimension communautaire de l'activité scientifique. Pour se constituer, elle suppose la communication entre des sujets et, idéalement, leur interchangeabilité en vue d'opérer une entreprise de contrôle sur les procédures et les résultats acquis par les uns et les autres. Une telle définition de l'intersubjectivité prend acte de la réalité suivante : on ne fait plus confiance à la raison individuelle comme susceptible de dégager des vérités ultimes, on conçoit bien davantage l'intelligence savante comme distribuée. Par ailleurs, accorder un rôle de premier plan à l'intersubjectivité a le mérite de permettre d'éviter les apories liées aux positions fondationnalistes (garantie divine, principes premiers, etc.).

Cependant, la reconnaissance des avantages offerts par une telle définition de l'objectivité ne peut faire oublier ses limites. Comme indiqué un peu plus haut, il n'y a pas unanimité quant à ce que le terme "intersubjectivité" est censé recouvrir : agrément des sensations dans une perspective phénoménologique, accord critique des chercheurs², confiance commune accordée à l'ensemble des dogmes régissant une discipline, etc. Dans tous les cas, pour les philosophes comme pour les sociologues ou les historiens des sciences, c'est la concordance entre les points de vue individuels qui importe ici, et nul ne contestera raisonnablement l'affirmation que ce sont bien les sujets qui déterminent, en dernière instance, la signification à conférer aux données, et les décisions à prendre quant aux connaissances à valider comme vraies et justifiées. Mais une telle affirmation peut être formulée de manière plus ou moins radicale. On peut ainsi considérer que l'obtention d'un consensus au sein de la communauté des chercheurs peut avoir pour facteurs *déterminants* l'influence des traits psychologiques individuels, des savoir-faire, des savoirs tacites, etc. des dits chercheurs – et les contextes sociaux dans lesquels s'inscrivent leurs travaux. En d'autres termes, les phénomènes du monde naturel étudiés n'auraient qu'un rôle limité dans l'élaboration des contenus de connaissance scientifiques. On aura reconnu ici une formulation, parmi d'autres possibles, de ce que l'on appelle le relativisme cognitif. Dans la suite de notre article, nous concentrerons notre attention sur une version contem-

²C'est là notamment la position de Popper : "L'objectivité, tout comme l'observation non prévenue, est le fruit de la critique, en particulier la critique des comptes rendus d'observation : car il est impossible de se passer de théories, ou d'en faire abstraction, ou même d'empêcher qu'elles exercent une influence sur les observations. En revanche, nous pouvons tâcher de les reconnaître comme des hypothèses et de les formuler de manière explicite, de telle sorte qu'elles puissent être soumises à la critique." [Popper 1990, 68].

poraine de celui-ci, en raison de sa représentativité et de la richesse de son argumentaire. Il s'agit du courant de la sociologie des sciences³ anglophone dont Harry Collins a constitué et constitue encore le fer de lance⁴. Contrairement à d'autres auteurs ou écoles qui refusent une telle caractérisation parce qu'elle leur paraît soit inappropriée, soit trop grossière pour qualifier leur travail, le relativisme est ici assumé comme un précepte fondamental d'une méthodologie de recherche⁵. Cette dernière

³L'emploi du terme "relativisme" en vue de caractériser certaines études sociologiques des sciences recouvre en réalité une nébuleuse d'approches distinctes quant à leurs moyens et leurs visées. En ce sens, le terme "relativisme" est le plus souvent employé pour désigner non pas une doctrine, mais "plutôt un ensemble de points de vues, de règles, de méthodes, de convictions. Et aussi, peut-être, au départ, surtout des refus : refus de la prééminence actuellement reconnue à la science par rapport à d'autres formes de connaissance, refus de croire à une rationalité universelle et intemporelle, refus d'épistémologies qui ignorent les aspects sociaux des pratiques de recherche." [Matalon 1986, 271]. Cette nébuleuse recouvre un ensemble d'auteurs dont certains revendiquent l'appellation de "sociologue relativiste" pour qualifier leur entreprise de recherche : Barry Barnes, David Bloor, Harry Collins, Trevor Pinch, Donald Mackenzie. D'autres adoptent une perspective plus distanciée (cela pouvant se traduire par la rédaction d'articles destinés à souligner pourquoi ils ne sont pas relativistes). On trouve cependant chez eux l'écho des travaux des auteurs précités dont ils admettent certaines orientations et certaines conclusions : Bruno Latour, Michel Callon, Karin Knorr-Cetina, etc.

⁴[Collins 1981a], [Collins 1981b], [Collins 1982a], [Collins 1982b], [Collins 1985], [Collins 1992], [Collins 2004], [Collins 2005], [Collins & Cox 1976], [Collins & Pinch 1993].

⁵Ce précepte est régulièrement réaffirmé par Collins tout au long de son œuvre (voir en particulier [Collins 1981a], [Collins 1982a], [Collins 1985], [Collins 1992, 16]). On peut en trouver une formulation récente sur son site personnel [Collins 2005] : "Methodological relativism is a principle of the research. This means that, as a sociologist, I avoid making judgments about those matters of science which are the subject of social analysis". L'unité d'analyse du sociologue doit être le fait social. Ce parti pris méthodologique dont on reconnaîtra l'écho durckheimien souligné par Collins lui-même, se combine avec le respect du principe de symétrie de David Bloor (principe consistant à utiliser les mêmes types de causes pour expliquer les croyances vraies et les croyances fausses [Bloor 1976]) pour aboutir à un principe qui gouverne toutes les études empiriques menées par Collins et les auteurs de son courant : expliquer avec le vocabulaire et les catégories du sociologue les activités et les décisions prises par les scientifiques et s'interdire de considérer les contraintes que pourraient faire peser les phénomènes du monde naturel sur les résultats obtenus dans les laboratoires de sciences expérimentales. "(...) a relativistic attitude is taken to the scientific phenomenon under investigation. To press the account forward requires that it be taken that the phenomenon itself does not dictate the outcome of the debate, otherwise the failure of the defeated party – the incredibility of the discredited phenomenon – will seem so natural as not to require an explanation at all. The appropriate attitude for conducting this kind of inquiry is to assume that 'the natural world in no ways constrains what is believed to be.'" [1981b, 54]. Avec un tel principe méthodologique, il n'y a rien d'étonnant à ce que l'on aboutisse à des explications qui laissent dans l'ombre les phénomènes naturels eux-mêmes.

inclut une autre exigence de base : celle de partir de l'observation des pratiques réelles qui ont cours dans les laboratoires – soit en adoptant une démarche ethnographique, soit en menant des études de cas historiques – pour aboutir à une description du travail scientifique qui ne soit pas réductrice.

Notre propos, dans les pages qui suivent, a pour ambition de souligner qu'en respectant cet impératif de se pencher sur les activités réelles menées au sein des laboratoires, il est possible d'aboutir à des conclusions qui vont de fait à l'encontre de celles des sociologues des sciences relativistes. En effet, l'attention accordée aux pratiques nous a amené à considérer qu'il existait des stratégies qui ont pour effet de renforcer l'objectivité des résultats expérimentaux en interdisant de rabattre cette dernière sur le seul consensus social. Nous avons baptisé à l'aide du terme "interinstrumentalité" la stratégie qui nous intéresse principalement ici.

Dans une première partie, nous précisons brièvement en quoi consiste la thèse que nous souhaitons battre en brèche, telle qu'elle figure dans le programme de recherche et dans les conclusions des travaux de Collins et des auteurs qui s'inscrivent dans sa perspective. Pour mener à bien cette entreprise critique, nous proposerons dans une deuxième partie un exemple historique, l'invention du microscope à effet tunnel. Ceci permettra de cerner le rôle que joue l'interinstrumentalité, lorsqu'il s'agit d'asseoir la validité d'un nouvel instrument. Nous soulignerons dans une troisième partie, le fait que le recours à une telle procédure ne caractérise pas exclusivement des situations exceptionnelles (l'invention d'un nouvel instrument scientifique), en présentant un exemple tiré de nos propres observations de terrain dans un laboratoire de physique des surfaces⁶.

⁶Pour constituer le corpus d'observations devant servir à notre enquête, nous avons séjourné durant plusieurs mois dans le laboratoire Groupe Surfaces/Interfaces (GSI) rattaché à l'Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg (IPCMS). Les recherches menées au GSI sont essentiellement expérimentales et portent sur les structures et les propriétés des matériaux (en général métalliques). Ces observations ethnographiques ont notamment servi de matériau empirique pour une étude de la production et des fonctions des images en physique des surfaces [Allamel-Raffin 2004].

1 Le programme relativiste empirique de Collins

Dans un article à la fois récapitulatif et programmatique de 1981⁷, Collins dégage les étapes d'un "programme relativiste empirique"⁸. Les deux premières étapes de ce programme visent à :

- montrer que les données expérimentales sont soumises à une certaine "flexibilité interprétative" ;
- dégager les mécanismes (essentiellement microsociaux) qui rendent possible la clôture du débat entre interprétations concurrentes⁹, étant entendu que les données expérimentales elles-mêmes ne suffisent pas pour que l'on parvienne à une telle clôture.

Pour la clarté de notre exposé, il nous faut brièvement présenter ici le sens conféré à l'expression de flexibilité interprétative et préciser en quoi consistent exactement ces mécanismes qui rendent possible la clôture des

⁷"Stages in the Empirical Programme of Relativism" [Collins 1981a, 3–10]. L'article de Collins constitue en fait l'introduction générale d'un numéro spécial de *Social Studies of Science* intitulé "Knowledge and Controversy : Studies of Modern, Natural Science", incluant notamment des études de David Travis, de Trevor Pinch et d'Andrew Pickering.

⁸"An Empirical Programme of Relativism" ou EPOR [Collins 1981a].

⁹[Collins 1981a, 7]. Une troisième étape du programme est présentée dans la même page de la manière suivante : relier le type de travail (empirique) présenté ici aux structures sociales et politiques les plus générales. Les deux premières étapes renvoient à un niveau microsociologique (celui de la communauté des chercheurs au sein d'un laboratoire ou d'une discipline donnée), la troisième se situe en revanche à un niveau macrosociologique. Dans la deuxième édition de son ouvrage *Changing Order. Replication and Induction in Scientific Practice*, Collins considère que les deux premières étapes de son programme ont été pour l'essentiel réalisées : " (To put it in terms of the Empirical Programme of Relativism [EPOR] : I have shown that scientists can argue interminably over the meaning and significance of their data and that experiments cannot provide an answer [stage one of EPOR] ; I have looked at some of the ways in which scientists bring such arguments to a close in practice [stage two of EPOR] ; I now want to look at these 'closures' in the context of the wider network of science and of society [stage three of EPOR]. To do this we need to lift our gaze, from time to time, from the confines of the laboratory.)" [1992, 130]. La distinction entre mécanismes ou facteurs microsociaux et macrosociaux n'est pas toujours facile à tracer. Des facteurs que l'on peut caractériser comme étant au sens strict macrosociaux peuvent avoir une incidence sur la vie quotidienne d'un laboratoire de recherche. Ainsi, par exemple, des décisions prises par des grands groupes industriels peuvent à l'échelle du laboratoire se traduire sous forme de sollicitations, d'exigences de résultats dans une durée de temps limitée, de suppressions de thématiques de recherche. C'est pourquoi nous n'établirons pas de frontière étanche entre les deux types de facteurs dans la suite de cet article, en considérant que même si ce sont des facteurs microsociaux qui sont privilégiés par Collins et son courant dans leurs explications de la clôture des débats, on peut élargir un peu la perspective sans pour autant empiéter trop sur l'étape 3 du programme empirique relativiste.

discussions.

1.1 La flexibilité interprétative des données

Dans les études sociologiques menées par Collins et les auteurs qui se revendiquent peu ou prou de son courant, la flexibilité interprétative désigne le fait que les données empiriques, produites ou collectées au cours d'une recherche, donnent lieu à différentes interprétations. Cette situation est due au fait que dans la science moderne, la collecte de données et l'assignation de leur sens sont le produit de "procédures d'externalisation" pour reprendre la métaphore biologique de Trevor Pinch [1985a, 8]. En effet, ce n'est pas seulement la fiabilité de nos sens qui est en jeu dans le cadre de cette collecte et de cette assignation, mais celle des procédures par lesquelles nos récepteurs sensoriels sont comme "externalisés". Nos perceptions sensorielles ne forment plus que le dernier maillon d'une chaîne d'inférences¹⁰. D'autres inférences doivent être faites par les chercheurs en fonction de la distance plus ou moins grande entre la source de l'information et le détecteur final : distance qui se mesure d'une part d'un point de vue physique (il existe un certain nombre d'interactions entre l'état initial de l'information et son état final) et d'autre part d'un point de vue épistémique (il existe un certain nombre de lois physiques impliquées par la corrélation entre l'état initial et l'état final)¹¹. D'où les considérables difficultés à sélectionner et à dégager une interprétation correcte des données obtenues en recourant à des dispositifs instrumentaux complexes, au terme des manipulations effectuées par les chercheurs. Cette complexité manipulative et instrumentale est telle dans le cadre des activités expérimentales, que d'autres facteurs de flexibilité interprétative ne peuvent manquer de se déployer, au nombre desquels on compte notamment les savoirs tacites¹². Collins insiste tout

¹⁰Pinch prend l'exemple des neutrinos solaires : "Les 'points' observés n'en viennent à signifier la présence de neutrinos solaires que par rapport à d'autres étapes de la détection. Il semble que le processus d'observation se soit affiné jusqu'au point où ce qu'on pourrait appeler les 'perceptions sensorielles primitives' ou les résultats du 'dispositif d'inscription' ne forment plus que le dernier élément d'une chaîne d'inférences." [1985b, 91].

¹¹Ces deux types de distance ne se confondent pas. Dans le cas des neutrinos solaires, il existe un très grand nombre d'interactions entre l'état initial et l'état final de l'information, mais comme ces interactions sont presque de même nature, on peut en rendre compte à l'aide d'une seule loi physique.

¹²Collins [1992, 2001] reconnaît sur ce point sa dette manifeste à l'égard de Michael Polanyi et de ses ouvrages, *Personal Knowledge* [1958] et *The Tacit Dimension* [1966].

particulièrement sur leur rôle tout au long de ses travaux¹³. La pratique scientifique ne se limite pas à l'application de règles formelles ou d'heuristiques. Parallèlement à ces deux types de savoirs, il souligne la place essentielle de quatre autres types [1990, 151–152] : les savoir-faire manuels et perceptifs, les savoir-faire culturels et les savoir-être. Ces quatre types, en tant que savoirs tacites, ont une influence sur la qualité et les résultats des recherches menées au sein d'un laboratoire¹⁴.

Au risque de surprendre, nous affirmerons que cette première étape du programme relativiste en sociologie des sciences – la mise en évidence de la flexibilité interprétative – a eu un mérite indéniable. C'est celui d'avoir placé sous le projecteur un aspect essentiel de la recherche telle qu'elle est menée dans les laboratoires depuis les origines de la science moderne : il s'agit de tous les traits contingents non éliminables, du moins si l'on adopte une démarche visant à *décrire* ce que sont les activités des sciences expérimentales dans leur effectivité.

1.2 La clôture des débats entre interprétations concurrentes quant aux données expérimentales

La deuxième étape du programme relativiste vise à proposer une explication de la manière dont s'achèvent les débats engendrés par la flexibilité interprétative mise en évidence au cours de la première étape. Dans leurs études de cas empiriques, les sociologues relativistes considèrent que ce sont essentiellement des facteurs microsociaux (habileté rhétorique, autorité au sein d'une équipe de recherche, poids symbolique au sein de la communauté des chercheurs, etc.)¹⁵ et macrosociaux

¹³Il en fournit à maintes reprises une définition. Une version récente est formulée ainsi : "We will define tacit knowledge as knowledge or abilities that can be passed between scientists by personal contact but cannot be, or has not been set out or passed on in formulae, diagrams, or verbal descriptions and instructions for action." [Collins 2001, 72]

¹⁴Cette influence se traduit notamment par le fait qu'une expérience est difficilement reproductible, selon Collins. C'est ce qu'il essaye de montrer dans son étude sur le laser TEA. L'importance des savoirs tacites est telle qu'afin d'être en mesure de construire un TEA du même type que celui du concepteur initial, les chercheurs ont été dans l'obligation d'avoir un contact plus ou moins prolongé avec l'inventeur de l'appareillage, afin de réussir à mener à bien leur entreprise [Collins 1992, 51–78].

¹⁵Collins propose notamment la liste de facteurs suivante dans [Collins 1981b], [Collins 1992, 87], [Collins & Pinch 1993, 138] : "1. La confiance, fondée sur une collaboration antérieure, dans les capacités et l'honnêteté professionnelles d'un chercheur. 2. Sa personnalité et son intelligence. 3. La réputation acquise à la tête d'un laboratoire. 4. Le fait qu'un chercheur ait ou non travaillé dans l'industrie ou l'enseignement. 5. L'historique de ses échecs passés. 6. Les informations venues "de l'intérieur". 7. Le style et la présentation des résultats. 8. La perception "psychologique" des résultats.

(politique de recherche nationale ou internationale, rôle des institutions scientifiques, etc.) qui permettent d'expliquer comment les débats entre interprétations concurrentes prennent fin¹⁶. Les standards épistémiques sont eux-mêmes conçus comme le produit de négociations entre les chercheurs¹⁷.

Si l'on accepte de suivre les sociologues relativistes jusqu'au terme de cette deuxième étape, on accepte du même coup une vision des sciences présentant les contenus et les méthodes de celles-ci comme résultat d'une forme d'intersubjectivité qui peut paraître radicale : une intersubjectivité conçue avant tout comme accord entre les esprits¹⁸, sans que les

9. L'importance et le prestige de l'université d'où vient le chercheur. 10. Son degré d'intégration à divers réseaux scientifiques. 11. Sa nationalité." [Collins & Pinch 1993, 138].

¹⁶Dans un article publié en 1982 où il revient sur le contenu du numéro de *Social Studies of Science* de 1981 précédemment évoqué, qui contient plusieurs études de cas (le transfert chimique de la mémoire chez les vers planaires, la détection des ondes gravitationnelles, celle des neutrinos solaires, etc.), Collins résume ainsi les points communs de celles-ci : "In each case, the papers reveal that coherence and accumulation of experimental results are not enough to explain closure – reference to rhetoric, authority, institutional positions, and everything that comes under the "catchall" terms *interests* and *power*, is also required. As I put it into the introduction : "The papers here show that the consensual interpretation of day-to-day laboratory work is only possible within constraints coming from "outside that work" [Collins 1982a, 141–142].

¹⁷En particulier celui de l'exigence de reproductibilité d'une expérience, lorsqu'on a pour ambition de tester les résultats obtenus par son biais. Collins reprend l'affirmation de Popper selon laquelle la répétition B d'une expérience A ne peut être qu'approximative, c'est-à-dire plus ou moins similaire à l'expérience A [Collins 1992, 28–29]. Quelle est donc la valeur que l'on peut attribuer à la reproduction d'une expérience en tant que test ? demande Collins. Lorsqu'on connaît le résultat que l'on veut obtenir et que celui-ci n'est pas controversé, on peut reproduire une expérience, mais on n'affirmera pas qu'on s'est livré à une entreprise de test. Ainsi, dans les travaux pratiques scolaires ou universitaires, "L'étudiant peut avoir une bonne idée de la valeur de son expérience en se rapportant au résultat. Si ce résultat tombe dans la bonne zone, cela veut dire que l'expérience a été réalisée correctement ; s'il en sort, l'expérience n'a pas marché." [Collins & Pinch 1993, 134–135]. Lorsqu'il n'y a pas accord sur les résultats attendus, les chercheurs sont amenés à s'entendre également sur les variables expérimentales à retenir comme acceptables en tant que reproduction de l'expérience. En cas de controverse, le nombre des variables que l'on est susceptible de prendre en compte est très élevé. Un consensus doit donc s'établir sur celles que l'on va retenir et celles que l'on va rejeter. En d'autres termes, selon Collins, ce que l'on va accepter en tant que reproduction valable est avant tout le produit de négociations entre les chercheurs.

¹⁸Le concept d'intersubjectivité, pris à la limite, ne signifie rien de plus qu'un tel accord entre des sujets. C'est ce qu'affirme Collins qui écrit ainsi à son propos : "(...) mutual understanding seems to be possible even when nothing real is the subject matter. The quality of a poem or a picture, the number of angels that could dance on the head of a pin, or the cut of the emperor's new clothes can all be discussed without

contraintes émanant du monde naturel soient considérés comme un facteur déterminant.

Est-on condamné, à l’instar des sociologues relativistes, à renoncer à un idéal d’objectivité et à ne laisser qu’une place si réduite, voire inconsistante, aux phénomènes eux-mêmes dans la constitution des connaissances scientifiques ? Nous émettrons ici un avis bien plus nuancé. En effet, les chercheurs, dans leurs laboratoires sont parfaitement capables de faire preuve de réflexivité quant à leurs pratiques. Ils n’hésitent pas à reconnaître l’existence de la flexibilité interprétative induite par leurs traits idiosyncrasiques, par les difficultés inhérentes à l’usage des appareillages techniques, par l’impossibilité de reproduire à l’identique une expérience, par l’existence de savoirs tacites, par des effets de rhétorique ou d’autorité. Ils sont ainsi confrontés quotidiennement à des situations où domine un état d’incertitude. Pour pallier à cette limite inhérente à toute démarche expérimentale intégrant une dimension instrumentale en vue de collecter des données, des stratégies sont mises en œuvre par les chercheurs en vue d’accroître le degré d’objectivité des résultats. Ce que nous qualifierons à l’aide du néologisme “interinstrumentalité” correspond à une de ces stratégies. Par interinstrumentalité¹⁹, nous entendons

there being any lumps in the world that correspond to them.’ [Collins 1992, 174].

¹⁹Plusieurs auteurs ont tracé des pistes allant dans le même sens que le nôtre. Ainsi, Hacking [1981, 144–145], [Hacking 1983, 324–332] prend pour exemple l’étude des corps denses dans des plaquettes sanguines. Ces corps peuvent être repérés avec un microscope électronique et avec un microscope à fluorescence. Il s’agit bien ici de recourir à plusieurs instruments fonctionnant sur des principes différents pour mettre en évidence l’existence d’entités invisibles à l’œil nu. De même, Culp [1995], dans une étude portant sur le séquençage de l’ADN, montre comment deux méthodes complètement différentes peuvent aboutir à des résultats comparables. Nederbragt [2003] présente une étude de cas portant sur l’invasion de cultures de cellules par des microorganismes. Il montre également que bon nombre d’expérimentateurs utilisent deux ou trois méthodes ou instruments afin de confirmer leur théorie de départ. Dans une étude historique portant sur la fiabilité des premiers thermomètres, Chang [2001a, 283] montre bien que ce n’est pas le recours à la théorie qui a permis à Regnault de clore le débat, mais le recours à plusieurs thermomètres différents (basés sur l’air, l’acide carbonique, l’hydrogène), les résultats obtenus à l’aide de ces différents thermomètres devant être en fin de compte comparables entre eux. Dans un autre article datant de 1995, Chang montre comment les physiciens quantiques essayent d’obtenir une convergence des résultats relatifs aux mesures de l’énergie en physique quantique, en utilisant plusieurs méthodes de mesure. Nederbragt affirme que plusieurs dénominations ont été données par différents auteurs pour nommer le fait de recourir à plusieurs méthodes différentes afin de confirmer une hypothèse : la “robustesse” (“*robustness*”) [Wimsatt 1981], [Culp 1995], la “triangulation” [1986], l’“indépendance des routes” (“*Independence of the routes*”) [Hudson 1999]. Nederbragt adopte l’expression “dérivabilité multiple” (“*multiple derivability*”) afin de désigner la stratégie par laquelle une théorie est confirmée grâce à deux (ou plusieurs) méthodes qui diffèrent quant à l’arrière-plan théorique qui les fonde. Trois remarques peuvent

le fait de recourir consécutivement à des instruments conçus sur des principes physiques différents, pour mener à bien une même étude expérimentale. Chaque instrument délivre un type d'information physique spécifique à propos des objets d'étude retenus (en physique des surfaces, il s'agit d'échantillons de quelques millimètres de largeur). Ces informations pourront être d'ordre chimique, topographique, magnétique, électronique, etc. C'est leur concordance qui fonde la robustesse de l'interprétation qui est fournie en définitive par les physiciens.

2 Interinstrumentalité et acceptation du microscope à effet tunnel

En quoi l'interinstrumentalité a-t-elle pu jouer un rôle dans le processus qui a mené à la conclusion partagée que le microscope à effet tunnel²⁰ ou STM (Scanning Tunneling Microscope) était un instrument

être faites, destinées à nous démarquer quelque peu de ces études : le champ disciplinaire concerné par toutes celles qui ont été évoquées est la biologie, exception faite des études de Chang, alors que la nôtre a trait aux recherches menées dans un secteur de la physique contemporaine. Les entreprises des biologistes décrites par les auteurs précités consistent à repérer les "mêmes entités" ou des "entités comparables". Hacking, par exemple, affirme : "On compare les micrographies électroniques aux micrographies fluorescentes. On est sûr que les deux micrographies montrent la même partie de la cellule à cause de la lettre majuscule P, par exemple, qui permet de la repérer. Dans ces deux micrographies, fluorescente et électronique, la disposition de la grille, la structure générale de la cellule et des 'corps' sont exactement identiques." [Hacking 1983, 325-326]. En physique des surfaces, la démarche est quelque peu différente. Le plus souvent, il ne s'agit pas de repérer les "mêmes" objets sur les images produites avec des microscopes différents. Cela s'avère impossible, car bien souvent les échantillons étudiés sont détériorés par leur passage dans le microscope. Par exemple, si un scientifique a observé des atomes de cobalt sur une surface d'or à l'aide d'un STM, l'échantillon qui aura servi à ses observations sera endommagé. Il devra donc nettoyer le substrat d'or, effectuer un autre dépôt de cobalt (ce ne seront plus dès lors les "mêmes" atomes de cobalt qui seront à la surface de l'échantillon). Ce nouvel échantillon pourra être étudié à l'aide d'un autre type de microscope sur lequel nous reviendrons plus loin (le microscope électronique à transmission) permettant de confirmer la présence d'atomes de cobalt en repérant leur structure atomique. Il s'agit donc, en physique des surfaces, de recourir à de multiples instruments afin de s'assurer que les propriétés qu'on suppose être celles d'objets d'études donnés sont bien avérées. D'autre part, aucun des travaux précités ne met véritablement l'accent sur le fait que l'interinstrumentalité est, du moins en physique des surfaces, une démarche quotidienne. Enfin, peu d'auteurs se sont penchés sur le rôle de l'interinstrumentalité lors des phases d'invention et de diffusion d'un nouvel instrument.

²⁰Le microscope à effet tunnel est un microscope à balayage mesurant un courant tunnel résultant de l'application d'une différence de potentiel entre une pointe métallique et une surface conductrice. Des surfaces métalliques ou semi-conductrices

fiable ? Le STM a été inventé en 1981 par Gerd Binnig et Heinrich Rohrer, qui obtinrent pour cette raison le prix Nobel de physique en 1986. La mise au point d'un tel microscope ouvrit la porte à ce qu'on appelle désormais les nanotechnologies : il permet en effet de rendre visible sous forme d'images en trois dimensions des atomes isolés sur une surface. Le fonctionnement du STM repose sur un effet quantique : la mécanique quantique montre qu'un courant d'électrons peut, malgré l'existence d'un vide ou d'un isolant, passer entre deux métaux suffisamment proches l'un de l'autre. C'est l'effet tunnel²¹, phénomène en contradiction avec les enseignements de la physique classique. L'enjeu pour les physiciens était de taille : pouvait-on construire un appareil macroscopique qui ne perturbe pas l'effet quantique qui n'existe que dans le domaine de l'infiniment petit ? Pour bon nombre de chercheurs de l'époque, une telle ambition était tout simplement irréalisable.

Lorsqu'on se penche de manière plus précise sur le processus qui a abouti à l'invention du STM, on voit émerger une complexité déroutante.

Pour Binnig et Rohrer, il ne s'agissait pas dans un premier temps d'inventer un nouveau microscope : ils connaissaient peu la microscopie et la physique des surfaces. Travaillant dans un laboratoire IBM à Zurich, ils cherchaient un moyen d'étudier finement les défauts de certains matériaux, et ce afin de répondre à la demande de collègues qui travaillaient sur des couches isolantes destinées à des composants électroniques. Leur ambition initiale n'était pas d'étudier la topographie de la surface des échantillons de matériaux, mais de se livrer à des études de spectroscopie. Ils eurent donc l'idée de recourir à l'effet tunnel déjà étudié à l'époque au travers de barrières d'oxyde. Ils mirent plusieurs semaines à se rendre compte, qu'en fait, ils avaient mis au point une sonde qui permettait d'obtenir non seulement des informations spectroscopiques locales mais également des informations topographiques. [Binnig & Rohrer 1986, 392]. Le microscope à effet tunnel était né.

Les premiers résultats obtenus en 1981 furent accueillis assez fraîchement par la communauté scientifique : "ces images étaient, au sens propre du terme, incroyables" (entretien personnel avec J.-P. B., chercheur au GSI). Certains scientifiques accusèrent même Binnig et Rohrer de fraude. "Mon opinion personnelle est qu'à cette époque, beaucoup de chercheurs considéraient l'atome comme quelque chose de sacré. On n'arriverait jamais à le manipuler. Alors, une démarche permettant d'ap-

sont ainsi observées sur des zones allant du micromètre à la fraction du nanomètre, c'est-à-dire à l'échelle atomique.

²¹L'effet tunnel est une conséquence de la mécanique ondulatoire introduite dans les années 1923-1927 par Louis de Broglie et Erwin Schrödinger.

procher et manipuler les atomes avec une telle précision était contre-intuitive. Les chercheurs ne voulaient pas envisager cette possibilité. Ils refusaient même d'en discuter. C'était comme un tabou, comme parler du diable." (Interview de Binnig et Rohrer, 2001²²). La première proposition d'article portant sur la mise en évidence d'un effet tunnel à l'air libre fut ainsi rejetée. Les détracteurs avançaient un certain nombre d'arguments : il aurait fallu étudier les échantillons sous ultravide, afin d'éliminer toute contamination²³ possible. Et même dans le cas du recours à l'ultravide, les échantillons examinés seraient susceptibles d'être "contaminés" avant d'être insérés dans l'enceinte sous ultravide dans laquelle ils pouvaient être étudiés. D'autre part, la théorie permettant de rendre compte de données produites n'était pas suffisamment au point. Binnig et Rohrer se lancèrent donc dans un processus argumentatif qui visait à entraîner l'adhésion de leurs collègues. Ce travail est visible au travers des publications qu'ils rédigèrent de 1981 à 1985. Chacune de ces publications était destinée à offrir des comptes-rendus relatifs à de nouvelles moissons de résultats, mais elles avaient également pour objectif principal de répondre aux critiques de leurs détracteurs²⁴. On peut articuler l'ensemble de ces contributions autour de six axes. Il s'agissait pour Binnig et Rohrer :

- (axe 1) d'affirmer les fondements théoriques du phénomène ;
- (axe 2) de contrecarrer toutes les sources de perturbations possibles (diminution des vibrations, amélioration du vide, amélioration des procédés permettant la préparation des échantillons, etc.) ;
- (axe 3) de rendre la manipulation d'un tel appareillage plus aisé, afin que d'autres scientifiques puissent se livrer au même type d'expérience ;
- (axe 4) de démontrer l'utilité de l'appareil pour certains domaines scientifiques ;
- (axe 5) de recourir de manière systématique à l'interinstrumentalité c'est-à-dire utiliser des instruments déjà utilisés en physique des surfaces, par exemple le LEED (diffraction d'électrons lents), la

²²http://hrst.mit.edu/hrs/materials/private/Binnig&Rohrer_interview.htm. Traduction personnelle.

²³Par contamination, nous entendons le fait que les surfaces étudiées pourraient comporter d'autres éléments que ceux prétendument observés, et ce en raison des molécules qui se trouvent dans le milieu ambiant.

²⁴L'étude qui suit est appuyée pour une bonne part sur les informations trouvées sur le site du Dibner Institute for History of Science and Technology du MIT (USA). Des commentaires de ces publications ont été effectués par Arne Hessenbruch. <http://hrst.mit.edu/hrs/materials/public/Binnig&Rohrer.htm>

diffraction à rayon X, etc., et par comparaison établir la pertinence des observations effectuées à l'aide de leur STM ;

(axe 6) d'étudier des surfaces simples et connues comme l'arrangement 7x7 des atomes de silicium dont l'organisation en maille était connue. Ceci constitue une caractéristique de toute innovation instrumentale dans le domaine de la recherche scientifique. Afin d'asseoir la validité d'un nouvel instrument, les scientifiques étudient toujours des objets déjà bien connus par ailleurs.

Ces axes se rapportent à des exigences diverses que l'on peut classer sous plusieurs rubriques : l'établissement d'un lien fort entre théorie et instrument, qui autorisera à considérer ce dernier comme une théorie réifiée, selon l'expression de Bachelard (axe 1), la volonté d'augmenter l'attractivité de l'instrument (axe 4), l'établissement de sa fiabilité (axes 2, 3, 5 et 6). Dans le cadre de ce dernier, l'élimination des sources d'artefact²⁵ (axe 2) et les mises au point afin de faciliter la réalisation d'expériences du même type (axe 3) sont essentielles, mais non suffisantes. Parmi les exigences imposées par les pairs et reconnues par Binnig et Rohrer, il y a l'interinstrumentalité (axe 5). Ces six axes, autour desquels pivote leur activité durant cinq ans, peuvent ainsi être dégagés de l'examen des articles qu'ils produisent alors :

- dans *Applied Physics Letters* [BINNIG *et al.* 1982], ils utilisent comme argument le fait que les sources de vibrations ont été suffisamment contrôlées pour ne plus interférer avec les données produites (axe 2) ;
- dans *Physical Review Letters* [BINNIG *et al.* 1982], ils font appel à un autre type d'instrument couramment utilisé en physique des surfaces²⁶ à l'époque : le LEED, afin de convaincre leurs pairs du fait que les données obtenues avec le STM ne relevaient pas de leur seule imagination (axe 5) ;
- dans *Helvetica Physica Acta* [BINNIG & ROHRER 1982], ils montrent que leur instrument ne va pas en supplanter d'autres déjà existants, mais plutôt compléter ceux-ci. De plus, ils proposent les premières images d'une surface simple et connue des physiciens des surfaces : l'arrangement dit 7x7 des atomes de silicium (axes 4 et 6) ;
- dans *Surface Science* [BINNIG & ROHRER 1983], Binnig et Rohrer, tout en ayant simplifié techniquement leur appareillage, tentent de convaincre la communauté des physiciens des surfaces que leur

²⁵Artefact est pris ici au sens d'effet indésirable.

²⁶Pour se faire une idée de la "panoplie" des instruments dont les physiciens des surfaces disposent, nous renvoyons le lecteur à l'ouvrage de Cornet et Deville [1998, 166-167].

- technique pourrait leur être utile. Pour ce faire, ils étudient des échantillons d'or, de silicium, matériaux couramment utilisés dans ce domaine. Une fois encore, afin de montrer que leurs résultats ne sont pas que "du vent", ils recourent à d'autres appareillages ayant déjà acquis une validité dans ce domaine scientifique (axes 4, 5, 6) ;
- ils effectuent une nouvelle tentative afin de convaincre les physiciens des surfaces dans *Surface Science Letters* [BINNING & ROHRER 1983]. Ils utilisent toujours des matériaux communs en physique des surfaces et ont à nouveau recours à d'autres instruments, en l'occurrence le microscope électronique à transmission et la diffraction à rayons X (axes 4, 5, 6) ;
 - en 1984, ils sont désormais beaucoup plus confiants dans leur technique. En effet, d'autres chercheurs²⁷ appartenant à un autre laboratoire, ont réussi à donner un fondement théorique consistant à leurs résultats. Dès lors, Binnig et Rohrer s'attachent à rendre facilement reproductibles leurs observations. Dans une publication de 1984 parue dans *Physica B* [BINNING & ROHRER 1984], ils soulignent que la principale source de problèmes est constituée par la pointe métallique du STM. Ils vont s'employer à les résoudre (axes 1 et 3) ;
 - toujours en 1984, dans *Surface Science* [BINNING *et al.* 1984], ils travaillent sur des surfaces étudiées communément en physique des surfaces et parviennent à étudier des échantillons d'or avec différentes techniques (LEED et spectroscopie des électrons Auger), sans avoir à déplacer leur échantillon. Le même échantillon restait dans l'enceinte sous vide et était examiné successivement à l'aide des différents appareillages. De ce fait, les possibilités de contamination étaient alors réduites de manière considérable (axes 2, 5 et 6) ;
 - dans *Surface Science Letters*, en 1985 [BINNING *et al.* 1985], ils améliorent les images de la surface de silicium 7x7, et surtout ils corroborent leurs résultats en recourant à la spectroscopie des électrons Auger et à la diffraction d'électrons lents (axes 5 et 6) ;
 - en 1985, la confiance dans leurs résultats est désormais très élevée en raison du fait que d'autres équipes ont réussi à reproduire leurs résultats. Dans un article publié par *Europhysics Letters* [BINNING *et al.* 1986]²⁸, ils présentent un STM de poche très maniable et l'utilisent pour examiner des échantillons de graphite qu'il compare avec le modèle théorique proposé par les théoriciens (axe 3) ;

²⁷Il s'agit de Tersoff, Hamann, Garcia, Ocal et Flores.

²⁸Cet article a été soumis en septembre 1985, et publié en 1986.

- le dernier article est publié dans la revue *Scientific American* [BINNING & ROHRER 1985]. Cette revue ayant une très large audience, le STM devenait ainsi connu d'un plus large public.

Ainsi, ce n'est qu'en 1985, après que d'autres laboratoires eurent réussi à produire des images équivalentes, que le STM²⁹ fut reconnu comme ayant un pouvoir de résolution à l'échelle de l'atome. Ce très court historique met en évidence les tâtonnements extrêmement nombreux qui permirent de passer d'une première version du STM d'une complexité remarquable aux versions plus facilement utilisables qu'on trouve actuellement dans les laboratoires de physique des surfaces. Ce qui est frappant, c'est que les nombreuses améliorations apportées à la première version du STM résultent en partie des objections formulées par la communauté scientifique rencontrées par les chercheurs : le fait de placer le STM sous ultravide afin de limiter les sources de contamination possible, le fait de parvenir à intégrer à leur dispositif des instruments déjà utilisés dans le domaine comme le LEED et le spectroscope Auger, et ce en vue de maintenir l'échantillon étudié constamment sous vide, etc. Certes, le STM doit beaucoup à ses inventeurs, mais la dette contractée à l'égard de ses objecteurs est essentielle : ceux-ci ont poussé les deux chercheurs à justifier les principes théoriques et à modifier leur appareillage. Binnig et Rohrer ont dû convaincre leurs collègues en fournissant à ceux-ci de bonnes raisons de croire à leurs affirmations³⁰. Chaque publication évoquée plus haut vise à répondre à une catégorie d'objections. La force

²⁹Ce microscope peut être considéré comme un instrument générique selon le concept défini par Shinn [SHINN 2000, 456-457]. Ce concept s'articule autour de trois axes :

- les concepteurs de tels instruments s'intéressent en premier lieu à "la conception des instruments et aux modalités, régularités et lois qui sous-tendent l'instrumentation" [SHINN 2000, 456]. Or, nous avons vu que l'un des axes de recherche de Binnig et Rohrer était de comprendre en profondeur les fondements théoriques de leur instrument, fondements dont ils ne disposaient que de manière parcellaire au début de leur démarche ;
- l'instrument conçu doit être accessible au plus grand nombre d'utilisateurs potentiels en fonction de leurs ressources locales. Là encore, le cours de l'histoire permet de montrer que cet aspect a été central dans les efforts fournis par les deux chercheurs : ils ont tenté de simplifier au maximum la conception de leur microscope afin qu'il puisse être fabriqué et utilisé aisément ;
- l'instrument doit être le plus modulable possible, c'est-à-dire qu'il doit être conçu de manière à être assemblé, désassemblé, adaptable en fonction des besoins des utilisateurs. C'était bien l'objectif de Binnig et Rohrer. Le STM peut être considéré comme un instrument "tout terrain" : il est utilisable à l'air libre ou sous ultravide ; il permet d'étudier des solides et des liquides ; on peut lui adjoindre toutes sortes d'instruments différents (LEED, le spectroscope Auger, etc).

³⁰C'est bien un processus d'argumentation et de contre-argumentation que l'on voit ainsi se déployer [Gingras & Godin 1997, 156]. Pour reprendre les termes de

des réponses apportées par Binnig et Rohrer réside non pas dans le fait de tenter de simplement reproduire leurs propres expériences afin de les tester³¹, mais dans le fait d'utiliser de façon quasi systématique les instruments utilisés couramment par leurs contradicteurs afin d'étayer leurs affirmations. Afin de donner une légitimité à leur nouveau microscope, les deux scientifiques se sont appuyés sur l'emploi de dispositifs déjà éprouvés en physique des surfaces (le LEED, le spectroscope Auger, le microscope électronique à transmission ou MET, etc.) et ont confronté les résultats obtenus à l'aide de ces dispositifs avec les leurs. Cette démarche avait deux objectifs : se convaincre eux-mêmes de la réalité de ce qu'ils observaient avec leur STM et convaincre l'ensemble de leurs collègues.

On pourrait supposer que le recours à l'interinstrumentalité dans ce cas précis est nécessaire en raison du caractère controversé du STM. Les résultats obtenus par le recours à divers instruments n'auraient visé qu'à entraîner la conviction des chercheurs eux-mêmes et de leurs collègues. Il s'agissait de construire un argumentaire du type : "J'affirme que sur mon échantillon, j'examine à l'échelle atomique la substance x ; or avec le LEED, autre type de dispositif, je peux observer que c'est bien la structure de la substance x qui est présente à la surface de mon échantillon ; avec la spectroscopie Auger, je peux détecter la présence sur le

Bachelard, c'est un rationalisme dialectique qui est à l'œuvre dans l'entreprise de création de l'appareillage.

³¹Bien qu'ils aient simplifié les premières versions du STM afin que d'autres chercheurs puissent reproduire leurs expériences, Binnig et Rohrer semblaient conscients du fait que la reproductibilité en elle-même ne constituait pas une garantie suffisante de la fiabilité de leur appareillage. On a en effet ici un cas classique de ce que Collins a appelé la "régression de l'expérimentateur" : pour que les résultats puissent être jugés corrects, il faut que l'instrument soit fiable, mais pour que l'instrument soit jugé fiable, il faut que les résultats soient corrects [Collins 1992, 130], [Collins & Pinch 1993, 134-135]. Lucides quant à cette circularité, Binnig et Rohrer recourent à l'interinstrumentalité. Celle-ci permet de briser le cercle dans lequel Collins enferme les activités de recherche menées au sein des sciences expérimentales. L'attention portée par Collins au problème de la reproductibilité se comprend en partie lorsqu'on remarque que l'étude de cas qu'il mène depuis une trentaine d'années porte sur la détection des ondes gravitationnelles. L'interinstrumentalité n'apparaissait précisément pas comme une alternative à la reproductibilité dans ce domaine, car il n'y a eu, pendant fort longtemps, qu'un type de détecteur disponible, construit par Weber. On pouvait essayer de le copier ou vouloir s'en démarquer, mais il n'y avait pas d'autre voie praticable à ce moment-là. D'où l'analyse de Collins privilégiant la régression de l'expérimentateur, le "débat sans fin" et la possibilité ouverte d'expliquer par des facteurs microsociaux son achèvement. Notons que le domaine de la détection des ondes gravitationnelles a connu des développements technologiques importants depuis les premiers articles publiés par Collins (voir sur ce point [Collins 2004], [Collins 2005]), mais celui-ci réexploite régulièrement les conclusions de ses premières études [Collins 1992], [Collins 1993].

plan chimique de la substance x, etc.”. Un tel processus s’épuise quand une réponse adéquate à toutes les objections potentielles est apportée. A ceci viennent s’adjoindre deux autres facteurs importants : un modèle théorique permettant de rendre compte du phénomène de manière précise et le fait que d’autres laboratoires parviennent à reproduire les expériences du même ordre avec un STM.

Précisons un point : l’interinstrumentalité ne permet évidemment pas aux chercheurs de supprimer toute équivoque et d’aboutir à une certitude absolue, mais de considérablement “minimiser les risques” d’erreur³² quant à l’interprétation qu’ils confèrent à leurs résultats. Ils accroissent la robustesse des conclusions auxquelles ils parviennent.

Une fois ce processus achevé, le STM occupe-t-il une place qui n’a plus à être justifiée et peut-il être utilisé comme une boîte noire ? Oui et non. La fiabilité des résultats produits à l’aide d’un STM n’est plus discutée actuellement. En tant qu’instrument générique au sens de Shinn Shinn [SHINN 2000, 456–457], le STM s’est répandu largement dans les laboratoires de physique des surfaces. Un étudiant apprend en très peu de temps à s’en servir. Pour autant, quand il s’agit d’utiliser cet instrument à la limite de ses capacités (en l’occurrence, obtenir une résolution à l’échelle de l’atome), maîtriser les différents paramètres permettant de parvenir à un résultat satisfaisant devient extrêmement difficile et nécessite une connaissance “intime” de l’instrument. Le STM ne peut, dans ce dernier cas de figure, être considéré comme une boîte noire³³.

Dans le cadre de leur activité de recherche quotidienne en physique des surfaces, les scientifiques sont tout à fait conscients des nombreuses incertitudes liées à l’utilisation de certains appareillages comme le STM,

³²Alvin I. Goldman écrit ainsi, en évoquant la “triangulation de Wimsatt” [Wimsatt 1981] : “Any particular method might yield putative information partly because of its own peculiarities – its biases or distortions. This is a potential danger as long as the properties of the studied object are distinct from the process of detection. Triangulation hopes to correct for such biases on the assumption that independent methods will not have the *same* distorting characteristics (if any at all). Obviously, we cannot use no method *at all* to make observations, to ‘get at’ the system or the relationship under investigation. So we run the risk of getting mere artifacts of a measurement or observation process, rather than the real character of the object. Using multiple methods of detection minimizes this risk.” [Goldman 1986, 150].

³³Nous pouvons souligner que d’autres instruments utilisés en physique des surfaces fonctionnent, quant à eux, le plus souvent comme des boîtes noires. C’est le cas du spectroscope Auger qui permet d’obtenir des informations chimiques sur un échantillon (en indiquant la présence de cuivre à la surface de ce dernier, par exemple). En revanche, le microscope électronique à transmission dont il sera question dans la deuxième section du présent article, est loin de constituer une boîte noire, surtout quand on souhaite produire des images en haute résolution (à l’échelle de deux atomes).

incertitudes qui engendrent bien une certaine flexibilité interprétative des données. Les échantillons étudiés étant à chaque fois irrémédiablement dégradés par l'examen au microscope, les expériences sont au sens strict du terme non reproductibles. Le problème de la reproductibilité, dans le cas présent, ne réside pas dans la négociation de la définition des différentes étapes à suivre dans le cadre du travail expérimental, ni dans la détermination des variables à prendre en compte³⁴. C'est la maîtrise des opérations concrètes relatives à ces variables qui rend impossible toute reproduction à l'identique. En effet, maîtriser les facteurs techniques (variabilité de la qualité du vide, réduction des sources de perturbations mécaniques ou électroniques, etc.) est extrêmement difficile. A ceci se rajoute l'existence de savoirs tacites comme par exemple des savoir-faire manuels (qualité du polissage d'un échantillon de matériaux métalliques, qualité de la confection de la pointe du STM, etc.). L'ensemble des variables qu'il faut prendre en compte et maîtriser est tel qu'il faut souvent plusieurs semaines, ou même plusieurs mois de travail pour obtenir une très bonne image à partir d'un STM. Les chercheurs sont conscients du caractère éminemment problématique de la reproductibilité des expériences en physique des surfaces et de la flexibilité interprétative de leurs données. Pour autant, ce qui s'avère déterminant dans la clôture des débats d'ordinaire, ce ne sont pas des facteurs microsociaux ou macrosociaux, comme le suggère Collins. Les situations auxquelles les scientifiques sont confrontés ne sont pas celle de débats sans fin, grâce au recours à des stratégies dont l'interinstrumentalité constitue un exemple privilégié. En physique des surfaces, ils recourent ainsi de façon quasi systématique à celle-ci³⁵, afin de réduire la flexibilité interprétative. Cette démarche est adoptée même quand dans un premier temps, tout semble fonctionner parfaitement.

3 Interinstrumentalité et recherche quotidienne en physique des surfaces

L'étude de cas que nous allons brièvement développer résulte d'un travail d'observation ethnographique que nous avons mené dans un laboratoire de physique des surfaces strasbourgeois, le GSI, déjà évoqué

³⁴Voir sur ce point la note 17.

³⁵Dans le cadre de notre thèse de doctorat, nous avons montré que non seulement cette interinstrumentalité était présente dans les pratiques de recherche quotidiennes en physique des surfaces, mais que de surcroît, elle constitue la trame argumentative de bon nombre de publications produites dans ce domaine [Allamel-Raffin 2004, 308–326 ; 355–371].

en note plus haut. Ce cas nous semble représentatif des recherches produites en son sein. Le jeune chercheur, dont nous avons observé l'activité, a pour objectif de maîtriser l'obtention de nanotubes de carbone. Pour ce faire, il élabore un échantillon sur lequel il pense avoir fait croître de tels nanotubes. Pour l'examiner, il utilise un microscope électronique à balayage (MEB)³⁶, qui délivre des informations morphologiques sur l'échantillon sous forme d'images. Il voit alors une "forêt de spaghettis", pour reprendre ses propres termes, "forêt" qu'il estime correspondre aux nanotubes escomptés. Parvenu à ce point de la recherche, tout semble cohérent avec ses attentes et les manipulations réalisées à l'occasion de la confection de l'échantillon. A priori, rien ne le contraint à chercher une confirmation de ces premières observations au MEB. Mais nous sommes dans le domaine de la physique des surfaces et ce que le chercheur a appris au cours de ses années d'activité au sein du laboratoire, c'est qu'un seul type d'informations, issu d'un seul appareillage, ne peut suffire. Il lui faut donc tenter de corroborer ses premières observations. Pour cela, il va étudier son échantillon au microscope électronique à transmission (MET)³⁷, autre type de microscope qui devrait lui permettre de mettre en évidence la structure atomique du carbone et d'obtenir également des précisions d'ordre chimique. Plusieurs séances de travail au MET ne permettent pas d'obtenir le résultat escompté. Le chercheur voit sur les images produites à l'aide du MET ce qui semble être des traces de nanotubes, mais l'analyse chimique de ces traces ne révèle pas de carbone.

Quelle peut être l'explication de ce fait surprenant ? Faut-il formuler l'hypothèse d'un artefact induit par l'appareil ou par le processus infor-

³⁶Le MEB est un microscope qui permet une résolution de cinq à vingt-cinq nanomètres. L'image est produite par le balayage effectué par un faisceau d'électrons permettant l'émission d'électrons secondaires recueillis par un détecteur. L'image est obtenue sur l'écran d'un tube cathodique et enregistrée par un appareil photographique. Le MEB permet d'étudier la surface extérieure d'un objet, c'est-à-dire sa morphologie.

³⁷Le MET est un microscope qui permet une résolution de l'ordre de l'Ångström. Le grandissement est obtenu au moyen d'un faisceau d'électrons qui passent au centre d'une série de lentilles électromagnétiques. Les électrons traversent les échantillons à observer, ces derniers doivent être extrêmement minces et prennent place dans un bâti où règne le vide. Il permet d'obtenir deux types d'images :

- des micrographies en "réseau réel". Pour les physiciens, le "réseau réel" est l'espace galiléen à trois dimensions, correspondant à l'espace dans lequel nous vivons. Les images sont conformes à l'idée que nous nous faisons d'une vision à l'échelle microscopique de la matière ;
- des micrographies d'images diffractées. Ce sont des images de ce que les physiciens appellent le "réseau réciproque". Elles se présentent sous forme de petits points lumineux et fournissent des informations sur la structure de l'échantillon considéré.

matique qui permet de produire l'image, ou encore par la préparation de l'échantillon? Les deux microscopes ayant délivré des informations contradictoires, le physicien va se livrer à une laborieuse entreprise : éliminer toutes les causes possibles d'artefact. La difficulté d'une telle démarche se conçoit mieux lorsqu'on ajoute que pour le chercheur, il est impossible de déterminer a priori si l'incompatibilité des résultats obtenus à l'aide des deux microscopes est induite par un artefact unique ou par la conjonction malheureuse de plusieurs artefacts. Pour mener à bien l'entreprise systématique d'élimination des hypothèses relatives aux causes d'artefacts, il faut recourir à un raisonnement abductif. Un tel raisonnement revêt la forme suivante : "un phénomène observé est surprenant. Mais ce phénomène ne serait plus aussi surprenant si une hypothèse d'une certaine espèce était vraie, alors le phénomène s'expliquerait. Alors on essaie de formuler une hypothèse en question. Parmi les hypothèses de cette espèce, on voit par approximation laquelle permet de déduire le phénomène initial avec le plus d'exactitude." [Jacob 1980, 446]. Cette phase abductive est capitale : elle constitue le versant proprement créatif au sein du travail de recherche et s'avère extrêmement importante car rien ne garantit qu'un chercheur soit toujours susceptible d'émettre des hypothèses fructueuses. En effet, un problème peut être engendré par une conjonction de causes multiples et notre observation des activités du laboratoire de physique des surfaces nous permet d'affirmer que les chercheurs manifestent des compétences fort variables d'un individu à un autre quand il s'agit de proposer des hypothèses abductives. Ces variations retentissent directement sur la qualité des recherches en les affectant d'un coefficient d'incertitude.

Notre chercheur confronté à un phénomène inattendu (l'absence de nanotubes sur son échantillon examiné au MET) va donc émettre des hypothèses quant à son origine et va s'employer à les vérifier. Les hypothèses, dans ce cas, vont porter sur les causes possibles d'artefact : la préparation de l'échantillon (Est-ce la phase de production des nanotubes qui est fautive? Est-ce la phase de préparation de l'échantillon en vue du passage au MET qui aurait arraché les précieux nanotubes?), un dysfonctionnement des microscopes ou des ordinateurs permettant de produire l'image, etc. Au terme d'un processus qui va nécessiter trois mois de travail, il finit par retenir l'hypothèse que c'est le mode de préparation de l'échantillon qui est en cause : il pensait produire des nanotubes de carbone. En fait, il s'agit d'une toute autre substance. Dans le cas présenté, le recours à l'interinstrumentalité n'a pas permis de conférer aux premières images³⁸ du MEB un statut d'éléments de preuve. Elles ne

³⁸Les données expérimentales se présentent dans notre exemple sous forme

pourront par conséquent être publiées et l'étude devra être poursuivie, ce qui implique la constitution de nouvelles hypothèses.

Une image produite à l'aide d'un microscope ne peut jamais être considérée par les scientifiques comme une preuve suffisante. Pour le chercheur du GSI, une seule micrographie réalisée à l'aide du MEB ne sera pas considérée comme probante. Il faudra convoquer d'autres techniques (MET, STM, microscopie à force atomique, traitements diversifiés, spectroscopie Auger, etc.) qui permettront de produire d'autres images et d'autres types de résultats (courbes, données chiffrées, etc). Presque tous ces instruments impliquent le recours à des savoirs tacites et engendrent une part de flexibilité interprétative. Mais ce que recherchent les scientifiques, c'est la stabilité de certaines informations issues des observations effectuées à l'aide de ces instruments. Obtenir des informations concordantes permet de conférer à certaines images ou à d'autres types de données non plus un statut de simple coïncidence locale, mais un statut probatoire plus général. Le recours à l'interinstrumentalité fonctionne donc comme un puissant réducteur d'incertitude. Les chercheurs tentent de réaliser des faisceaux d'éléments de preuve convergents en recourant à l'intersubjectivité, aux modèles théoriques et surtout à l'interinstrumentalité. Lorsque le faisceau est jugé suffisamment consistant, c'est-à-dire lorsque les éléments de preuve proposés sont suffisamment concordants et cohérents entre eux pour résister aux objections, les chercheurs publient. Ceci dit, un faisceau est toujours potentiellement amendable, on peut lui adjoindre de nouveaux éléments, on peut critiquer sa composition, le juger insuffisant ou trop partiel. Les textes de commentaires des "référés" des revues sont éloquentes : l'accent y est mis très souvent sur le fait que des chercheurs affirment certaines thèses en s'appuyant sur des données qui restent insuffisamment corroborées par d'autres instruments.

4 Conclusion

A travers nos deux brèves études de cas, nous avons tenté de montrer qu'il était possible d'enrichir notre compréhension du concept d'objectivité, plus particulièrement lorsqu'il est appliqué aux résultats obtenus dans le domaine des sciences de la nature. On peut en effet compléter sa

d'images, mais certains résultats, obtenus à l'aide d'autres instruments ou techniques, se présentent sous formes de courbes : c'est le cas, par exemple, de résultats obtenus à l'aide de la spectroscopie Auger. Ce qui importe ici, c'est essentiellement le fait que les résultats obtenus sous formes d'images ou de courbes ne se contredisent pas entre eux.

définition traditionnelle qui met l'accent principalement sur l'intersubjectivité en adjoignant à cette dernière un ensemble de stratégies dont nous n'avons voulu développer ici que celle qui nous a paru particulièrement représentative : l'interinstrumentalité³⁹. Le fait de convoquer une pluralité de dispositifs techniques afin d'aboutir à une conclusion résultant d'un faisceau d'éléments de preuve convergents constitue un moyen, pour les physiciens, de réduire la flexibilité interprétative. C'est parce qu'ils considèrent celle-ci comme une réalité inhérente à leur entreprise de recherche, que les scientifiques développent une telle stratégie où ce qui est visé est la concordance et la cohérence des résultats obtenus grâce à des appareillages fonctionnant sur la base de principes physiques différents. Ce que l'interinstrumentalité remet ainsi en question, ce sont les conclusions auxquelles on parvient au terme de la deuxième étape du programme empirique relativiste défini par Collins : essentiellement la thèse selon laquelle des facteurs sociaux et en particulier microsociaux sont susceptibles à eux seuls de fournir une explication de la clôture des débats dans le domaine des sciences expérimentales. On pourrait s'accorder avec Collins pour reconnaître que le choix d'une stratégie telle que l'interinstrumentalité repose lui-même sur un consensus au sein de la communauté des chercheurs, et que les résultats auxquels on parvient avec chaque instrument pris isolément sont empreints de déterminations micro- et macrosociales. Mais ce qui ne se laisse pas réduire à du social, c'est le fait qu'il y ait une convergence des résultats. Cette convergence permet d'accroître un degré de certitude et non d'atteindre une certitude absolue. Elle permet de mener l'enquête jusqu'au point où l'on considère que les hypothèses peuvent être validées, parce que l'on se situe "au-delà de tout doute raisonnable". L'objectivité alors peut être pensée non en vertu d'une loi du tout ou rien (soit elle est absolue, soit elle n'existe pas), mais comme le *continuum* dont parle Putnam⁴⁰, c'est-à-dire en

³⁹Deux objections relatives à la pertinence du concept d'interinstrumentalité peuvent être soulevées : il n'est pas possible de recourir à une telle stratégie dans certains cas, car (1) certains domaines de la recherche scientifique ne disposent pas d'un parc instrumental suffisamment diversifié et (2) certaines études incluant une dimension instrumentale ne permettent pas le recours à de multiples instruments (en raison du manque de temps, de moyens financiers, etc.). Des éléments de réponse à ces objections figurent dans les travaux d'Allan Franklin, et en particulier dans l'article intitulé "Experiment in Physics" [1998] : dans le cas où un chercheur ne peut réaliser une expérience qu'à l'aide d'un type d'appareillage, d'autres stratégies sont mises en œuvre. Franklin en propose plusieurs : recourir à des processus de calibration d'un appareil en utilisant des phénomènes déjà connus, reproduire des effets indésirables connus par avance afin de mieux les éliminer dans un second temps, développer des arguments statistiques, etc.

⁴⁰Voir la note 1 du présent article.

vertu d'une loi du plus et du moins.

Références

ALLAMEL-RAFFIN, C.

2004 *La production et les fonctions des images en physique des matériaux et en astrophysique*, Thèse de doctorat en Epistémologie et Histoire des Sciences et des Techniques, Strasbourg : Université Louis Pasteur, 2004. Strasbourg 1.

BELL, D.

1992 *Objectivity, A Companion to Epistemology*, (J. Dancy & E. Sosa eds.) Oxford (GB) / Cambridge (USA) : Blackwell : 310–313.

BINNIG, G., ROHRER, H., GERBER, E. & WEIBEL, E.

1982 Tunneling through a Controllable Vacuum Gap, *Applied Physics Letters*, 40, 178–180.

1982 Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy, *Physical Review Letters*, 49, 57–61.

1983 (111) Facets as the Origin of the Reconstructed Au (110) Surfaces, *Surface Science Letters*, 131, L379–L384.

BINNIG, G. & ROHRER, H.

1982 Scanning Tunneling Microscopy, *Helvetica Physica Acta*, 55, 726–735.

1983 Scanning Tunneling Microscopy, *Surface Science*, 126, 236–244.

1984 Scanning Tunneling Microscopy, *Physica B*, 127, 37–45.

1985 The Scanning Tunneling Microscope, *Scientific American*, 253, 40–46.

1986 Nobel Lecture (consulté le 10 janvier 2002) :

<http://www.nobel.se/physics/laureates/1986/binnig-lecture.pdf>.

BINNIG, G., ROHRER, H., GERBER, C. & STOLL, E.

1984 Real-Space Observation of the Reconstruction of Au (100), *Surface Science*, 144, 321–335.

BINNIG, G., ROHRER, H., SALVAN, F., GERBER, C. & BARO, A.

1985 Revisiting the 7 x 7 Reconstruction of Si (111), *Surface Science Letters*, 157, L373–L378.

BINNIG, G., FUCHS, H., GERBER, H., ROHRER, H., STOLL, E. & TOSSATI, E.

- 1986 Energy-Dependent State-Density Corrugation of a Graphite Surface as been Seen by Scanning Tunneling Microscopy, *Euro-physics Letters*, 1, 31–36.
- BLOOR, D.
1976 *Knowledge and Social Imagery*, London : Routledge & Kegan Paul.
- CHANG, H.
1995 Circularity and Reliability in Measurement, *Perspectives on Science*, 3, (2), 153–172.
2001 Spirit Air, and the Quicksilver : The Search for the Real Temperature, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 31, 260–284.
- COLLINS, H. M.
1981a Stages in the Empirical Programme of Relativism, *Social Studies of Science*, 11, (1), 3–10.
1981b Son of Seven Sexes : The Social Destruction of a Physical Phenomenon, *Social Studies of Science*, 11, (1), 33–62.
1982a Special Relativism : The Natural Attitude, *Social Studies of Science*, 12, (1), 139–143.
1982b Knowledge, Norms and Rules in the Sociology of Science, *Social Studies of Science*, 2, 299–309.
1985 An Empirical Relativist Programme in the Sociology of Scientific Knowledge, *Science Observed. Perspectives on the Social Studies of Science*, K. Knorr-Cetina & M. Mulkay (dirs.) London & New Delhi & Beverly Hills, Sage : 85–113.
1990 *Artificial Experts*, Cambridge : MIT Press.
1992 *Changing Order. Replication and Induction in Scientific Practice*, London : Sage Publication.
2001 Tacit Knowledge, Trust, and the Q of Sapphire, *Social Studies of Science*, 31, (1), 71–85.
2004 *Gravity's Shadow. The Search for Gravitational Waves*, Chicago : University of Chicago Press.
2005 [http ://www.cf.ac.uk/socsi/whoswho/collins.htm](http://www.cf.ac.uk/socsi/whoswho/collins.htm), consulté le 30/01/05.
- COLLINS, H. M. & COX, G.
1976 Recovering Relativity : Did the Prophecy Fail?, *Social Studies*

of Science, 6, (3), 423–444.

COLLINS, H. M. & PINCH, T.

1993 *The Golem*, Cambridge : Cambridge University Press Cité d'après la traduction française par Thierry Piélat : *Tout ce que vous devriez savoir sur la science*, Paris : Seuil, 1994.

CORNET, A., & DEVILLE, J.-P.

1998 *Physique et ingénierie des surfaces*, Paris : EDP Sciences.

CULP, S.

1995 Objectivity in Experimental Inquiry : Breaking Data-technique Circles, *Philosophy of Science*, 62, 430–450.

DASTON, L.

1992 Objectivity and the Escape from Perspective, *Social Studies of Sciences*, 22, 597–618.

D'ESPAGNAT, B.

2002 *Traité de physique et de philosophie*, Paris : Librairie Arthème Fayard.

FAGOT-LARGEAULT, A.

2002 La construction intersubjective de l'objectivité scientifique, *Philosophie des sciences*, tome 1, Collection Folio Essais, Paris : Gallimard, 129–225.

FRANKLIN, A.

1998 Experiment in Physics, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, consulté le 18/09/2003 au site :

<http://plato.stanford.edu/entries/physics-experiment/>.

GARCIA, N., OCAL, C. & FLORES, F.

1983 Model Theory for Scanning Tunneling Microscopy : Application to AU (110) (1 x 2), *Physical Review Letters*, 50, 2002–2005.

GINGRAS, YVES & GODIN, B.

1997 Expérimentation, instrumentation et argumentation, *Didaskalia*, 11, 151–162.

GINGRAS, Y. & SCHWEBER, S. S. 1986 Constraints on Construction, *Social Studies of Science*, 16, (2), 372–383.

GOLDMAN, A. I.

1986 *Epistemology and Cognition*, Cambridge : Harvard University Press.

HACKING, I.

1981 Do we see through a microscope?, *Pacific Philosophical Quarterly*, 62 : 305–322.

1983 *Representing and Intervening*, Cambridge : Cambridge University Press. Cité d'après la traduction française par B. Ducrest : *Concevoir et expérimenter*, Paris : Christian Bourgois, 1989.

HUDSON, R. G.

1999 Mesosomes : A Study in the Nature of Experimental Reasoning, *Philosophy of Science*, 66, 289–309.

JACOB, P

1980 *De Vienne à Cambridge*, Paris : Gallimard.

MATALON, B.

1986 Sociologie de la science et relativisme, *Revue de synthèse*, 3, 267–290.

MEGILL, A.

1994 Introduction. *Four Senses of Objectivity, Rethinking Objectivity*, A. Megill (dir.), London : Duke University Press : 1–20

NADEAU, R.

1999 *Objectivité, Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, (D. Lecourt, dir.), Paris : Puf : 698–706

NEDERBRAGT, H.

2003 Strategies to Improve the Reliability of a Theory : the Experiment of Bacterial Invasion into Cultured Epithelial Cells, *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 34, 593–614.

PICKERING, A.

1984 *Constructing Quarks : A Sociological History of Particle Physics*, Chicago and Edimburgh : University of Chicago Press/Edimburgh University Press.

PINCH, T.

1985a Towards an Analysis of Scientific Observation : the Externality and Evidential Significance of Observational Reports in Physics, *Social Studies of Science*, 15, (1), 3–36.

1985b Observer la nature ou observer les instruments, *Culture technique*, 14, 88–107.

POLANYI, M.

1958 *Personal Knowledge. Towards a Post-Critical Philosophy*, Chicago : The University of Chicago Press.

1966 *The Tacit Dimension*, Gloucester : Peter Smith.

POPPER, K.

1990 *Le réalisme et la science*, Paris : Hermann.

PUTNAM, H.

2003 *Pragmatisme et connaissance scientifique, Cent ans de philosophie américaine*, (J.-P. Cometti et Tiercelin C., dir.), Pau : Pup : 135–155.

SHINN, T.

2000 Formes et division du travail scientifique et convergence intellectuelle. La recherche technico-instrumentale, *Revue française de sociologie*, 41, (3), 447–473.

STAR S. L.

1986 Triangulating Clinical and Basic Research : British Localizationists, 1870-1906, *History of Science*, 29, 29–48

TERSOFF, T., HAMANN D. R.

1983 Theory and Application for the Scanning Tunneling Microscopy, *Physical Review Letters*, 50 : 1998-2001.

WIMSATT, W. C.

1981 Robustness, Reliability and Overdetermination, *Scientific Inquiry and the Social Sciences*, M.B. Brewer & B.E. Collins (dirs.) San Francisco : Jossey-Bast Publishers 124–163.

SITE INTERNET :

<http://hrst.mit.edu/hrs/materials/public/Binnig&Rohrer.htm>, site du Dibner Institute for History of Science and Technology, consulté le 15/01/2002.