

La doctrine d'un philosophe expérimentaliste au service d'une science particulière : les images produites en physique des matériaux à la lumière de la sémiotique peircienne

Nous nous proposons dans les lignes qui suivent de recourir à la sémiotique peircienne afin d'étudier des représentations visuelles très particulières quant à leurs modes de production et leur rapport au réel : des images¹ scientifiques, et plus précisément des images de microscopie électronique et de microscopie en champ proche². Parce qu'un tel champ d'étude reste encore infiniment trop vaste, nous nous limiterons à la prise en considération d'images réalisées dans le cadre d'un laboratoire de physique des matériaux, discipline dont la fortune actuelle s'explique en particulier par le rôle qu'elle joue dans la connaissance et la production des nanomatériaux aux applications technologiques prometteuses.

Une des caractéristiques essentielles des représentations produites dans un tel laboratoire, est de conférer une visibilité à ce qui autrement n'en posséderait pas : des structures atomiques. Pour comprendre les enjeux de telles images au plan de la représentation, il faut prendre acte de la révolution qu'a constitué l'avènement de microscopes n'utilisant plus le rayonnement photonique, mais d'autres types de rayonnements électromagnétiques. Dans le cadre de la microscopie optique, on pouvait encore établir un lien de ressemblance entre l'objet et l'image de l'objet. On peut, par exemple, fixer des frottis de plaquettes sanguines sur une grille micrométrique d'un microscope optique. « C'est littéralement une grille que l'on voit au microscope et l'on voit aussi une lettre majuscule dans chacun de ses compartiments » (I. Hacking, 1983/1989 : 325). Il y a donc une forme de reconnaissance possible de ce qui est observable par ailleurs, à une échelle macroscopique. Il n'en va pas de même avec des microscopes électroniques à haute résolution ou avec des microscopes en champ proche. Lorsque le rayonnement utilisé pour former l'image est un faisceau d'électrons ou un effet

quantique (l'effet tunnel), l'image ne peut en aucun cas ressembler à l'objet parce que l'œil est incapable de percevoir de tels rayonnements électromagnétiques. Ici, la médiation instrumentale n'a pas pour effet de produire seulement un accroissement ou un affinement des potentialités sensorielles humaines. En fait, c'est l'accès à des phénomènes autrement inconnus qui est rendu possible. A la différence du photographe d'art qui se pose la question de savoir à quels choix il va souscrire (angle de prise de vue, luminosité, profondeur de champ, etc.), le microscopiste s'interroge sur la réalité même des phénomènes dont il postule l'existence sur l'image. Et il n'existe aucun moyen de s'assurer de la fidélité de ces images au réel, en se référant à une vision à l'œil nu de l'entité étudiée. La question entêtante qui poursuit les chercheurs est de savoir si la représentation visuelle est le résultat d'un artefact³ dû à l'appareillage ou si elle représente un aspect du réel.

Deux lignes de questionnement peuvent être tirées des affirmations qui précèdent :

- comment spécifier la nature de telles images ? En d'autres termes, quels sont les liens qui s'établissent entre ces images et les objets d'étude (des échantillons de quelques millimètres) ?

Que représentent-elles précisément ?

- quels sont les processus au sein de la recherche en physique de matériaux qui vont permettre à certaines images d'acquérir le statut de preuve au sein d'une publication ?

L'objectif de cet article consiste à apporter un début de réponse à ces questions, en soulignant l'intérêt d'une « science des signes » pour une meilleure compréhension du travail des physiciens. Dans un premier temps, nous justifierons le choix d'un cadre conceptuel peircien pour aborder notre objet d'étude, puis nous nous pencherons sur les différents types d'images produites dans ledit laboratoire. Nous indiquerons quels emprunts nous comptons faire aux travaux de C. S. Peirce afin d'esquisser une typologie des images qui retiennent notre attention.

1. Pourquoi recourir à la sémiotique peircienne ?

La réponse à cette question peut revêtir la forme d'une antithèse assez courante actuellement, et qui consiste à opposer cette sémiotique à la sémiologie saussurienne, considérée comme étant inadaptée à l'étude de nombreux types d'objets. Si notre propos, dans un premier temps, va effectivement consister à déterminer par la négation notre choix, nous essaierons, en quelques lignes, de souligner qu'il existe, au-delà du cadre de l'antithèse, des raisons positives de recourir à la sémiotique peircienne lorsqu'on a pour objet d'étude des images produites dans le champ de la physique expérimentale.

La sémiologie ne peut convenir en raison de ses postulats communs avec la linguistique structurale, disciplines toutes deux fondées par F. de Saussure (la première, à vrai dire, sur un mode seulement programmatique. Ce sont les héritiers qui tisseront les liens manquants). Le référent, écarté de la tâche du sémiologue au profit d'un modèle du signe à deux faces (signifiant/signifié), ne peut être évacué là où les enjeux de l'image sont précisément constitués par les liens toujours problématiques qu'elle entretient avec l'objet.

Une deuxième pierre d'achoppement, corrélative de la précédente, est constituée par le postulat d'une décontextualisation des signes étudiés (conformément à l'opposition langue/parole chez F. de Saussure) : les signes constituent un système où l'on fait abstraction de l'usage, afin de concentrer toute son attention sur la détermination d'unités constitutives et de règles combinatoires. La présupposition d'un tel ordre de réalité réglé et abstrait (la « langue ») a pu avoir une fécondité heuristique indéniable et donc tenir lieu de principe méthodologique constitutif d'une discipline : la linguistique structurale a émergé sur une telle base. Mais, et sans juger les résultats qu'un tel postulat a permis d'obtenir dans le champ des études sémiologiques, il faut souligner sa totale inadéquation dès lors que l'on a affaire, comme nous, à des images scientifiques. La signification de ces signes n'est pas assignable en dehors de leurs contextes de production et d'utilisation. Englober l'usage *hic et nunc*,

multiplier les points de contact entre l'élaboration des signes et le monde dont ils émergent, relève ici de l'ordre de la nécessité. La sémiotique peircienne convient donc infiniment mieux pour une telle étude. Le fait de considérer que la dimension pragmatique est inséparable du processus sémiotique permet de prendre d'emblée en compte la genèse et la valeur actionnelle des signes conçus au sein du laboratoire.

Troisième point : la primauté accordée à la langue dans le champ des études sémiologiques, s'inscrivant dans la lignée saussurienne. R. Barthes écrit ainsi que « le savoir sémiologique ne peut être actuellement qu'une copie du savoir linguistique » et se montre dubitatif quant à l'étude possible de l'image, dont la substance de l'expression est considérée par lui comme trop transparente pour qu'une véritable fonction-signe s'institue (R. Barthes, 1964 : 81). Et E. Benveniste va jusqu'à affirmer que les œuvres picturales présentent fréquemment des « scènes figurées » qui sont la « transposition iconique de récits et de paraboles ; elles reproduisent une verbalisation initiale » (E. Benveniste, 1980 : 45). Penser la représentation visuelle comme transposition d'un énoncé verbal peut probablement s'avérer opératoire lorsqu'il s'agit d'analyser un tableau de Nicolas Poussin, par exemple. Et ce n'est pas un hasard si les études sémiologiques les plus probantes ont eu pour objet des images où l'on « raconte une histoire » : affiches publicitaires, bandes dessinées, photogrammes extraits d'œuvres cinématographiques. En revanche, un tel carcan doctrinal ne peut avoir aucune pertinence dès lors qu'on envisage l'application *a priori* de ses catégories d'analyse aux images produites dans le cadre des sciences expérimentales contemporaines.

Une telle impasse méthodologique est totalement étrangère à l'entreprise de C. S. Peirce, qui n'a pas privilégié ainsi le fonctionnement du langage verbal. Tout au contraire, il a souligné la continuité de la sémiose, ce qui se traduit par l'affirmation que tout est signe. Dès lors, l'étude d'un type de représentations particulier, comme les images en physique des matériaux, peut

reposer sur une méthodologie qui n'est pas conditionnée par des préceptes initiaux établis en référence à la langue et peut, pour cette raison, s'adapter à tous les types de signes.

Enfin, et c'est là un point qui dépasse le cadre de l'antithèse sémiologie / sémiotique, C. S. Peirce renonce à toute perspective essentialiste, ce qui le conduit, selon I. Babou, à affirmer que

la connaissance scientifique passe par la relation, par la médiation d'un élément tiers intercalé entre le réel et nous : nous ne pouvons en effet rien connaître directement de la réalité. Par contre, tout ce qui est réel réagit, établit des liens qu'il convient d'utiliser comme des indices. Peirce applique là les enseignements qu'il tire d'une longue pratique des sciences expérimentales... (I. Babou, 1999 : I, 6).

Une telle perspective relationniste nous semble pertinente parce qu'elle se situe, comme on le verra, au plus près des processus de production et d'interprétation qui ont cours dans le laboratoire que nous avons retenu.

C'est pour l'ensemble de ces raisons qu'il nous a paru judicieux d'étudier les images produites en physique des matériaux en nous servant des ressources offertes par la sémiotique peircienne.

2. Le laboratoire d'accueil

Pour constituer le corpus d'images et les compte-rendu d'observations devant servir à notre enquête, nous avons séjourné durant six mois dans le laboratoire Groupe Surfaces et Interfaces⁴ (GSI), dont les recherches essentiellement expérimentales portent sur les structures et les propriétés des surfaces de matériaux (en général métalliques). Nous n'évoquerons ici que certains dispositifs techniques, offrant un panorama intéressant des possibilités du laboratoire en matière de production d'images.

Ces appareillages sont :

- le microscope électronique à transmission (MET)
- le microscope électronique à balayage (MEB)
- les microscopes en champ proche : à force atomique (AFM) et à effet tunnel (STM)

Ces appareillages permettent d'étudier des échantillons de taille millimétrique qui requièrent un travail de préparation minutieux. Il s'agit en général de dépôts métalliques sur des substrats métalliques (par exemple un dépôt d'or sur du nickel).

Quelques précisions : le MET permet d'obtenir des images (à l'échelle de deux atomes) grâce à un faisceau d'électrons qui passe au centre d'une série de lentilles électromagnétiques. Ces électrons traversent des échantillons extrêmement minces de part en part et on peut ainsi étudier la structure interne de ces derniers.

Avec le MEB, l'image est produite par le balayage effectué par un faisceau d'électrons permettant l'émission d'électrons secondaires, eux-mêmes recueillis par un détecteur. Le MEB permet d'étudier la structure extérieure d'un échantillon.

Le STM est fondé sur les principes de la mécanique quantique. Près de la surface des matériaux, les électrons des atomes en superficie sortent plus ou moins de leur orbite normale. Les surfaces sont considérées comme recouvertes d'un léger nuage d'électrons. Le microscope à effet tunnel étudie ces nuages. Une aiguille fine (de l'ordre de un ou deux atomes) est approchée de la surface et elle la balaie ; on lui applique un potentiel qui crée un courant dit « à effet tunnel », dont l'intensité est très sensible à la distance. L'image apparaît sur l'écran de l'ordinateur comme un dessin tridimensionnel ou non. Ce microscope a une très haute résolution (à l'échelle de l'atome). Il n'y a plus de partie optique dans ce type de microscope (type lentille optique et électronique), qui permet de réaliser des images topographiques très fines de la surface des échantillons.

L'AFM est un dérivé du microscope à effet tunnel. Ici, c'est l'effet de la proximité de la pointe de l'aiguille par rapport à l'échantillon qui est utilisé (et non un courant comme dans le STM).

L'image est obtenue par balayage de la pointe sur l'échantillon. Elle se matérialise sur un écran d'ordinateur et peut être tridimensionnelle ou non. Elle représente la topographie, la rugosité d'une surface donnée.

3. Les images produites au sein du GSI

Dans la pratique, les chercheurs du GSI établissent fréquemment une distinction entre image « réelle » et image « retraitée » ou « retravaillée ». Pour eux, l'image « réelle », rebaptisée par nous « image primaire », est l'image matérielle produite avec des microscopes. Elle est conçue par les scientifiques comme le résultat d'une interaction entre plusieurs éléments : l'objet, la source de rayonnement (électrons, ondes électromagnétiques, etc.) et le dispositif « imageant » (en l'occurrence un ordinateur). L'image « primaire » a la primauté d'un point de vue généalogique : elle est la première dans l'ordre de production des images.

Exemples d'images primaires

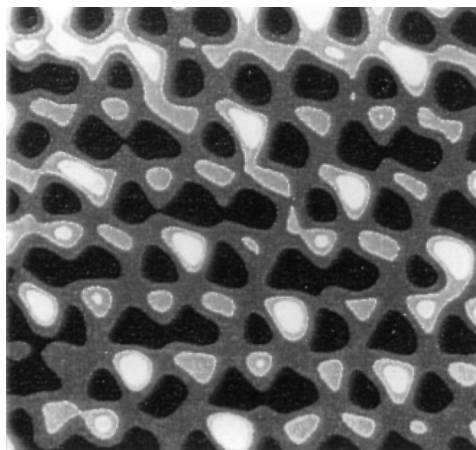


Fig. 1. Image STM (3,4 nm x 3,4 nm) à résolution atomique d'une couche auto-assemblée d'alcanethiols.

Superstructure ($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$) R 30° des atomes de soufre sur l'or (111). (Prêtée par M. Bucher – GSI).

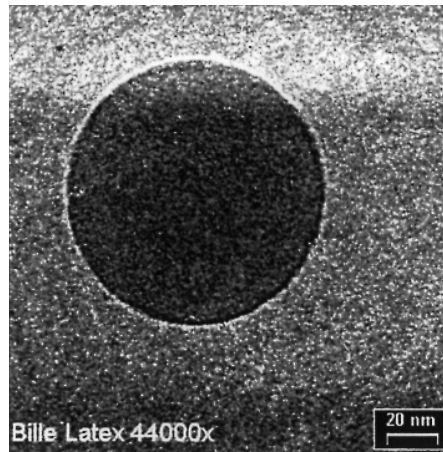


Fig. 2. Image réalisée avec le MET d'une bille de latex (x 44 000). (Prêtée par Mme Erhet – GSI).

L'image « retraitée » est constituée à partir de l'image « primaire » et peut revêtir diverses formes : courbes, images filtrées, etc. Elle est numérique.

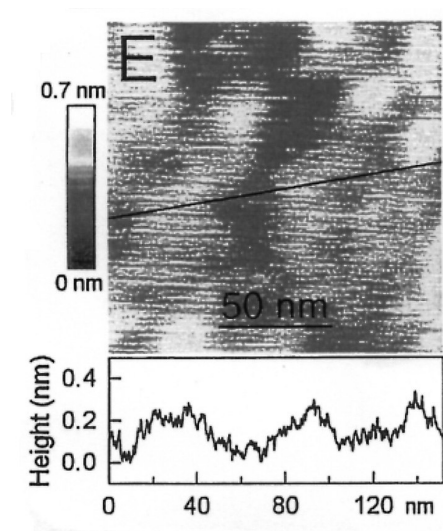


Fig. 3 : Image AFM représentant la topographie d'un film d'aluminium oxydé par technique plasma. (Image primaire) La courbe figurant sous l'image correspond au relief observé le long de la ligne virtuelle tracée sur

l'image (Image retraitée).

(Prêtée par M. Da Costa - GSI)

Un troisième type d'images est constitué par les images de « synthèse » (modélisation et simulation) qui, nous le verrons, peuvent avoir un grand rôle à jouer au sein des processus de recherche. La simulation est l'artifice consistant à générer, grâce au recours à l'informatique, des situations similaires à des situations réelles. La simulation prend donc en compte les acquis théoriques du domaine considéré, ici la physique des matériaux. Elle prend également en compte des facteurs expérimentaux, comme la température de l'échantillon, la pression à laquelle ce dernier est soumis, la taille de la pointe du microscope, la durée de l'expérience, etc. Plus la prise en compte de tous les facteurs expérimentaux sera complète, meilleure sera l'image simulée⁵. Il s'agit grâce à ces images de reproduire une image d'une expérience précise sans avoir à effectuer réellement l'expérience.

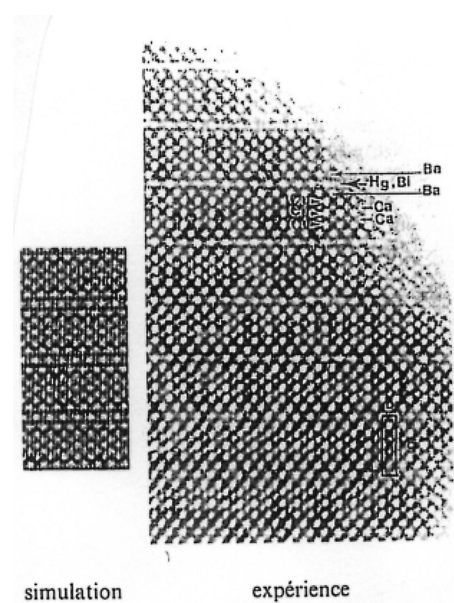


Fig. 4. Micrographie à très haute résolution de la structure d'un composé au mercure 1223 supraconducteur à haute température (environ 120 ° K). Comparaison avec l'image simulée numériquement à partir d'un modèle de structure cristalline (Image prêtée par Mme Hervieu. Laboratoire de cristallographie et des sciences des matériaux. UMR CNRS 6508. Caen).

La modélisation, quant à elle, ne tient pas compte directement des données expérimentales. Elle s'appuie sur les acquis théoriques déjà stabilisés. L'étude du cobalt sur du platine, par

exemple, est l'occasion de programmer toutes les données théoriques disponibles, relatives à ces deux matériaux, et celles qui se rapportent à leurs interactions sans tenir compte des facteurs expérimentaux (pression, température, etc.). C'est pourquoi les images de modélisation ne ressemblent pas à des images prises réellement avec des microscopes, elles ont un aspect plus schématique. Les atomes seront schématiquement représentés sous forme de billes en trois dimensions, de couleurs différentes, que l'on peut orienter à sa guise.

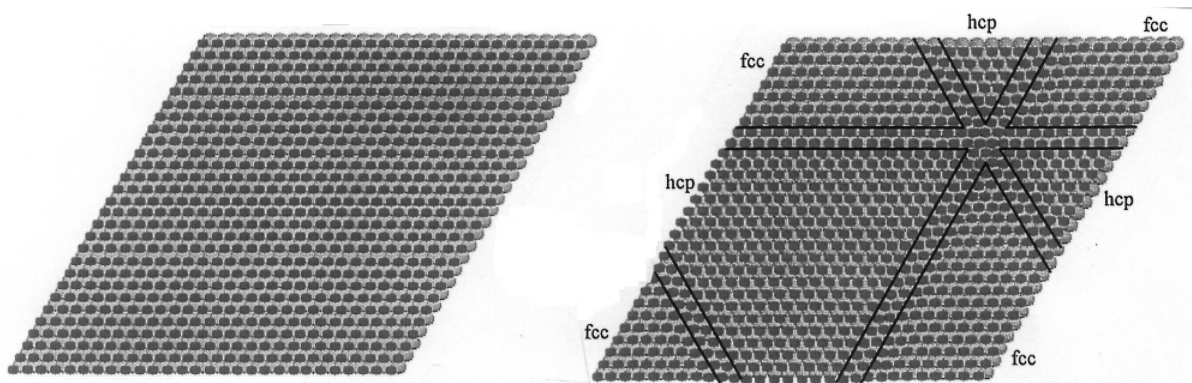


Fig. 5. Images de modélisation représentant un échantillon de cobalt sur platine.

(Images prêtées par Mme Goyhenex – GSI).

La modélisation est assimilable à un processus de condensation. L'image de modélisation⁶ permet d'éviter les effets indésirables liés aux expériences réelles. Simulation et modélisation constituent donc deux démarches bien distinctes. Si l'on souhaite préciser ce qui fonde cette distinction, on relèvera que la modélisation offre plus de latitude par rapport au réel que la simulation. Mais «distinctes» ne signifie pas «opposées», dans le cadre du travail expérimental. C'est plutôt de complémentarité qu'il faudrait parler ici.

Ces images de synthèse ne peuvent évidemment, en vertu de leur définition, être intégrées aux deux types précédemment évoqués. Elles sont élaborées uniquement à partir de modèles logico-mathématiques. On passe d'une représentation conceptuelle, formalisée par un modèle intelligible, à une représentation concrète, sensible.

Pour nous résumer, nous parvenons à une première classification issue de nos observations dans ce laboratoire : au sein du GSI, trois types d'images sont produites : images « primaires », images « retraitées », images de « synthèse ».

4. Emprunts à la sémiotique peircienne

C. S. Peirce a développé une sémiotique de la représentation (B. Barsotti, 2001 :11) puisqu'il a situé le signe⁷ au cœur de son système conceptuel. Le signe est conçu comme un phénomène représentatif défini de la manière suivante :

Un signe, ou *representamen*, est quelque chose qui représente à quelqu'un quelque chose sous quelque rapport (*respect*) ou à quelque titre (*capacity*). Il s'adresse à quelqu'un, c'est-à-dire, crée dans l'esprit de cette personne un signe équivalent, ou peut-être plus développé. (C.S. Peirce, 1978, 2.228 : 121).

En dépit de sa complexité parfois déroutante (rappelons qu' « on a pu relever dans les manuscrits de C. S. Peirce au moins 76 textes plus ou moins définitoires du signe » ; R. Marty et C. Marty, 1992 : 38), la sémiotique peircienne peut constituer une base de travail, car elle est fondamentalement triadique. Elle permet d'étudier les relations que se nouent entre le signe (ou *representamen*), l'objet et l'interprétant.

Les images produites au GSI peuvent être considérées comme des signes ou représentations au sens peircien : elles sont « quelque chose » (une représentation visuelle) mis à la place d'un autre « quelque chose » (l'échantillon, ou des formules mathématiques) pour « l'esprit » des scientifiques. On sait qu'afin d'établir une grille de lecture de l'ensemble des signes existants, C. S. Peirce a proposé trois trichotomies :

...premièrement, suivant que le signe en lui-même est une simple qualité, un existant réel ou une loi générale, deuxièmement, suivant que la relation de ce signe à son objet consiste en ce que le signe a quelque caractère en lui-même, ou en relation existentielle avec cet objet, ou en relation avec son interprétant, troisièmement suivant que son interprétant le représente comme un signe de possibilité ou comme un signe de fait ou comme un signe de raison (C.S. Peirce, 1978 : 138-139).

Étudions tour à tour ces trois trichotomies en les croisant avec la première classification que nous venons d'élaborer.

4.1 La première trichotomie

Dans le cadre de la première trichotomie, un signe peut être appelé qualisigne, sinsigne ou légisigne. Le qualisigne est une qualité qui est signe (C.S. Peirce 2.244, 1978 : 139), le sinsigne est une chose ou un événement existant réel qui est signe (ibid., 2.245 : 139) ; le légisigne est une loi qui est signe (ibid., 2.246 : 139). Les images primaires et les images retraitées peuvent être considérées lors de la phase de production comme des sinsignes car elles correspondent à un événement réel, déterminé dans le temps et dans l'espace. Elles seront considérées comme des légisignes dans un second temps, celui qui correspond à leur insertion dans une publication, au terme d'un processus que nous étudierons plus loin. Elles deviendront des légisignes car elles seront considérées comme des signes fondés sur une loi établie *a posteriori* s'appuyant sur des théories scientifiques et sur les habitudes de lecture de ces images que les chercheurs auront contractées au cours de leur travail de recherche.

Les images de simulation et les images de modélisation sont quant à elles des légisignes, signes fondés sur une loi *a priori* reposant sur des conventions mathématiques.

4.2 La deuxième trichotomie

C'est la plus connue et celle que l'on voit souvent appliquée sans tenir compte des deux autres: elle est centrée sur la relation entre l'objet et le signe. Un signe peut être appelé icône, indice ou symbole. Cette trichotomie, qui accorde une place essentielle à l'objet, évite l'écueil de l'arbitraire du signe, et en tant que telle, permet de mieux rendre compte que ne le fait la sémiologie d'inspiration saussurienne, de la spécificité et de la diversité des signes visuels.

...l'icône se rattache à l'objet par ressemblance (...). Un indice sera rattaché à l'objet existentiellement en en étant un effet, comme la fumée est un effet du feu et signifie par là l'existence d'un feu à l'endroit où celui-ci apparaît. Enfin, un symbole est rattaché à son objet par une règle qui a pour effet de dire qu'il « doit » être interprété comme signifiant cet objet (par exemple, les parties conventionnellement significatives du discours humain). (C. Tiercelin, 1993 : 67)

Quelle est la nature des représentations visuelles produites au sein du GSI, dans le cadre de cette relation représentamen /objet ? Sont-elles indiciaires, iconiques ou symboliques ?

- ▶ Contrairement à ce que pourrait penser le profane, les images primaires dont nous parlons ne sont pas des icônes, car on ne peut établir de ressemblance avec les objets qui sont, à cette échelle, invisibles. Dans le cas des microscopes considérés (AFM, STM, MEB et MET) les images primaires sont mixtes : indices et symboles. Elles sont indiciaires car elles « possèdent un ensemble de qualités que possèdent aussi leurs objets en vertu d'une connexion réelle avec ceux-ci. » (R. Marty et C. Marty, 1992 : 68). Cette connexion est causale. Ces images primaires sont le résultat des interactions des rayonnements électromagnétiques avec les échantillons. Elles sont partiellement symboliques car pour obtenir l'image matérielle, on recourt à un dispositif imageant qui requiert un traitement

informatique fonctionnant comme une boîte noire. Les images primaires de départ donnent naissance à diverses exploitations :

- des graphiques (courbes, histogrammes, etc.)
- d'autres images obtenues par simulation ou par modélisation.

- ▶ Les images retraitées sont elles aussi de nature mixte : indiciaires, car elles sont directement affectées par toute modification éventuelle subie par l'échantillon, et symboliques car les traitements qu'on leur applique se font au travers des modèles logico-mathématiques parfois standardisés, parfois créés par les chercheurs eux-mêmes.

A quoi correspond le traitement matériel de l'image primaire afin d'obtenir des images retraitées ? Il repose sur un processus de mathématisation. A travers celui-ci, il s'agit de rendre les différentes images commensurables, c'est-à-dire comparables (F. Bastide, 1985), mais également de faire « parler » cette image prise au contact direct de l'objet, et cependant trop chargée d'informations. Penchons-nous sur les traitements appliqués à l'image primaire qui vont rendre celle-ci plus « parlante ».

a. Le filtrage

L'image primaire contient du « bruit », c'est-à-dire des informations parasites dues à l'appareillage ou à la matière même. Le filtrage permet une meilleure lisibilité. L'image est en quelque sorte « nettoyée » de ses scories.

b. L'amélioration

Il s'agit d'améliorer les qualités sensibles de l'image primaire. Cette transformation consiste à améliorer le contraste. Exemple : les « fausses couleurs ». Les images produites par les microscopes ne sont pas en couleur, car elles ne sont pas réalisées à l'aide de la lumière visible. Elles se matérialisent dans des gammes de gris pour le MEB et le MET ; pour le STM et l'AFM, on a intégré les « fausses couleurs » directement au dispositif imageant. Pourtant, on rajoute parfois ce que les scientifiques appellent des « fausses couleurs » (car ce ne sont pas des qualités de l'objet étudié) et ce, dans un souci de rendre plus manifestes certaines caractéristiques de l'image. En effet, si les gammes de gris présentent l'intérêt d'offrir une grande précision pour une mesure éventuelle, les contrastes sont insuffisants et les images ne sont pas parlantes pour celui qui les regarde.

c. L'extraction d'informations

Il s'agit à partir de l'image primaire d'extraire un certain nombre d'informations, et ce à partir d'un traitement analytique. Ces informations sont contenues dans l'image initiale, mais sont difficilement accessibles. Prenons en guise d'exemple une image topographique produite en AFM (Cf. Fig.3). Elle met en scène des taches de couleur allant du jaune au rouge, représentant les différentes hauteurs de ce qui est à la surface de l'échantillon. Pour avoir une mesure beaucoup plus précise de ces variations de hauteur, on peut fixer deux points à l'intérieur de l'échantillon, tracer une ligne virtuelle et obtenir autour de deux axes le relief correspondant entre ces deux points. Ceci permet au chercheur d'effectuer des mesures très précises. Si par exemple, dans le cas de l'étude d'un échantillon où l'on a fait croître du cobalt sur du cuivre, il est souhaitable d'obtenir des « marches », ce type de courbe permet d'évaluer s'il s'agit de « marches » et de les mesurer.

► Les images de synthèse sont de deux types : les images de simulation et les images de modélisation produites par des ordinateurs. L'image de simulation consiste

... à reproduire numériquement et à générer de façon figurative et imagée des situations, des séquences, des processus identiques aux processus réels. (D. Parrochia, 2000: 200).

Les images de simulation sont à la fois symboliques et iconiques. Etant donné qu'elles ne sont élaborées qu'à partir de formules logico-mathématiques (qu'elles ne sont pas en relation causale avec l'échantillon), elles peuvent être dites symboliques. Mais elles sont iconiques par rapport à un objet qui n'est pas l'échantillon lui-même, mais l'image primaire de celui-ci, à laquelle elles doivent ressembler le plus possible. (Cf.Fig.4).

Les images de modélisation, quant à elles, ne sont que symboliques car elles recourent à des modèles logico-mathématiques et ne cherchent pas à ressembler à une image primaire.

Elles consistent en l'élaboration de « modèles ». Le terme « modèle » possède de nombreux sens, mais on peut les réduire ici en considérant qu'un modèle en physique est :

...un système de relations avec, en plus, une interprétation précise des termes qui y interviennent. Dans le modèle, il y a des fonctions qui relient des variables par le moyen d'opérations logico-mathématiques, et dans lesquelles interviennent certaines constantes ; il y a aussi des schèmes déductifs qui nous permettent de transformer les fonctions, de les relier entre elles et de calculer leur valeur. Aux constantes et variables dans le modèle, correspondent, dans le monde physique, les propriétés des objets ; aux

fonctions, correspondent les liaisons “réelles” entre les propriétés ; et aux schèmes déductifs correspondent des relations causales. (R. Garcia, 1973 :114).

A la question portant sur la nature des images–représentations dans le cadre de la deuxième trichotomie peircienne, nous pouvons donc répondre que :

- 1) les images primaires ne sont pas des icônes, car on ne peut établir aucune ressemblance entre les objets étudiés et les représentations produites
- 2) la plupart des images produites au GSI sont de nature mixte.

Le fait que les images primaires soient (partiellement) indiciaires, c'est-à-dire qu'elles résultent d'une connexion, d'un contact avec l'objet d'étude (ici, des échantillons constitués par des couches de métaux) permet aux chercheurs, par comparaison de plusieurs images, un contrôle des actions qu'ils entreprennent sur leurs objets. Parfois difficile à lire, l'image primaire donne lieu à des images retraitées, elles-mêmes de nature mixte (indiciaire/symbolique). Cet « appauvrissement » de l'image primaire permet, malgré une perte quantitative d'informations, un gain de qualité. Soulignons que dès que les modèles logico-mathématiques interviennent dans l'élaboration d'une image (soit à travers le dispositif imageant, soit dans le traitement de l'image), des risques d'artefact apparaissent : on peut perdre des informations ou en rajouter. Les chercheurs passent beaucoup de temps à mettre au point et à tester certains programmes qui vont leur permettre de traiter leurs images. Les images de simulation ont un statut particulier (symbole et icône). Elles permettent grâce à un processus logico-mathématique de produire des images primaires simulées. De ce fait, elles ne sont pas soumises aux mêmes aléas que les images primaires quant aux circonstances de leur production. Les images de modélisation de nature symbolique permettent de mieux comprendre sur un plan théorique les phénomènes observés grâce aux images primaires et

retraitées. C'est en exploitant l'ensemble de ces types d'images que les chercheurs parviennent à maîtriser expérimentalement leurs objets.

Ce qu'on peut souligner à l'aide du cadre théorique peircien, c'est donc la nature très particulière des images scientifiques. Certaines (les images primaires et retraitées notamment) sont de nature mixte : selon les cas, à la fois indices et symboles, ou symboles et icônes. Notre tentative d'établir une typologie des images en physique des matériaux à l'aide d'un tel cadre théorique, nous conduit, en fait, à la mise en cause de l'ordonnement des catégories peirciennes. Dans le cadre de la deuxième trichotomie, nous voyons apparaître ce que nous avons nommé la mixité des images. Celle-ci ne correspond pas exactement, à proprement parler, au concept de mixité développé par C.S. Peirce. Ce dernier a, en effet, souligné qu'il n'existe pas d'indices purs (C.S. Peirce, 2.306 1978 : 160), pas plus qu'il n'existe de pures icônes (C.S. Peirce, 2.276 ; 2.279 1978 : 148, 150) : « tous les signes restent dans une certaine mesure, symboliques » (C. Tiercelin, 1993 : 62). Le concept de mixité ainsi forgé est destiné à rendre compte du fait que les définitions des différentes catégories de signes sont abstraites. Ces définitions ne parviennent pas à correspondre parfaitement aux expériences réelles que nous faisons des signes, lorsque nous interprétons une même image, par exemple, tantôt comme un indice, tantôt comme un symbole. Ce sens conféré au terme « mixité » nous semble légèrement différent de notre propre conception : en physique des matériaux, une image est *irréductiblement* et *simultanément* indiciaire *et* symbolique au niveau de sa production⁸. Le terme ne renvoie donc pas dans ce cas à une sorte d'imperfection liée au caractère abstrait des définitions des types de signes, mais à un trait spécifique fondamental de ce type d'image. Cette inflexion apportée à la sémiotique peircienne est importante si on entend appréhender le sens à conférer aux images scientifiques actuelles. En effet, le mode de production de ces dernières a radicalement changé depuis les années 1980. L'idée de l'image numérisée, reposant sur le couplage ordinateur / appareil de radiographie, revient à G.

Hountfield et lui a permis d'obtenir le prix Nobel de médecine en 1979. A partir de cette invention, l'imagerie numérique peut prendre son essor : résonance magnétique nucléaire, échographie, caméra ccd, couplages ordinateur / microscopes de tous types, etc. (P. Barboza, 1996 : 105-107). L'image scientifique, dès lors, connaît un véritable changement de nature. Elle n'est plus seulement indiciaire, symbolique ou iconique, elle est de nature mixte. Cette mixité irréductible des images (car constitutive de leur genèse) rend problématique l'établissement, par les chercheurs, de la signification qu'il convient de conférer à ces images. L'application de la troisième trichotomie va nous permettre d'éclairer ce point.

4.3 La troisième trichotomie

Dans le cadre de cette dernière, le signe, pour son interprétant, est conçu comme « un signe de possibilité ou comme un signe de fait ou comme un signe de raison » (C.S. Peirce, 2.250 1978 : 138-139). Suivant cette trichotomie, un signe peut-être appelé rhème, dicisigne ou argument (ibid., 2.250 : 138). Un rhème est un signe qui pour son interprétant, est un signe de possibilité qualitative (ibid., 2.250 : 138) ; un signe dicent ou dicisigne est un signe qui, pour son interprétant, est un signe d'existence réelle (ibid., 2.251 : 138) ; un argument est un signe qui, pour son interprétant est un signe de loi (ibid., 2.252 : 138). Le concept d'interprétant met l'accent sur le caractère interprétable du signe. Comme l'écrit G. G. Granger : « L'interprétant est un commentaire, une définition, une glose sur le signe dans son rapport à l'objet » (G. G. Granger, 1988 : 115). La notion d'interprétant renvoie également à un autre trait particulier du concept peircien : son caractère nécessairement indéfini et ouvert. Or, la recherche scientifique porte avant tout sur une tentative de conférer à des résultats d'expérience une signification unique. Elle repose également sur la mise en œuvre d'une méthode scientifique. Selon C. S. Peirce, la méthode scientifique est fondée sur une hypothèse fondamentale :

il y a des choses réelles dont les caractères sont entièrement indépendants de nos opinions à leur sujet ; ces réalités affectent nos sens selon des lois régulières, et bien que nos sensations soient aussi différentes que le sont nos relations aux objets, néanmoins, en prenant avantage des lois de la perception, nous pouvons établir par le raisonnement, comment sont réellement et vraiment les choses ; et tout homme, s'il assez d'expérience et de raison à ce sujet, sera conduit à la seule vraie conclusion

(C. S. Peirce 5.384 cité par C. Tiercelin, 1993 : 93).

Ce présupposé fondamental correspond bien à ce que nous avons pu noter au cours de notre séjour dans le laboratoire. Les chercheurs se heurtent à des difficultés liées, selon nous, à la mixité de ces images et il est particulièrement difficile pour eux de parvenir à fixer le sens d'une image, de lui conférer un statut d'argument, c'est-à-dire de lui donner une portée plus générale. Ils y parviennent cependant. Voyons quelles sont les opérations qui permettent d'obtenir un tel résultat.

5. Du signe dicent à l'argument

C'est en étudiant le processus qui va de la production des images jusqu'à leur insertion dans une publication que nous allons découvrir comment s'effectue le passage entre ce qui est « évanescent » (le sens des images inscrites dans le registre de la priméité et peu utilisables scientifiquement), vers ce qui relève du registre de la secondéité (les communications entre chercheurs et leurs multiples vérifications instrumentales), puis vers ce qui appartient du registre de la tiercéité (la construction d'une interprétation argumentative et l'émergence d'un argumentaire convaincant).

La production des images dans ce type de laboratoire comporte plusieurs étapes :

- l'élaboration d'un échantillon, phase requérant de nombreux savoir-faire que nous n'évoquerons pas ici. En général, il va s'agir de déposer une substance métallique sur un substrat (de l'or sur du silicium, par exemple).
- l'examen de l'échantillon à l'aide d'un des microscopes évoqués plus haut. Cette phase est collective. Elle requiert la présence d'un microscopiste doté d'une très bonne connaissance de son instrument, et notamment des nombreux artefacts que celui-ci est susceptible d'engendrer. Le microscopiste est également la personne qui sait utiliser son appareil afin d'obtenir les images les plus intéressantes. Les chercheurs sont présents lors de cette phase du travail expérimental. L'examen d'un échantillon donne alors lieu à de multiples interactions verbales⁹ entre les différentes personnes présentes tant la difficulté est grande pour s'accorder sur ce que l'on voit réellement sur ces images primaires dont la nature, nous l'avons vu, est indiciaire et symbolique. Les questions soulevées lors de cette phase portent sur la difficulté pour les chercheurs à distinguer facilement les artefacts du signal pertinent, correspondant à des propriétés physiques réelles de l'échantillon étudié. Les sources d'artefacts sont nombreuses : la mauvaise qualité de la préparation d'un échantillon, le fonctionnement du microscope, la qualité du vide et les problèmes liés aux programmes informatiques qui permettent de produire l'image. Les chercheurs ont constamment à l'esprit ce que nous avons appelé la nature mixte de l'image primaire, à la fois indice et symbole. Ce fait est manifeste dans les échanges verbaux qui ont lieu autour de l'appareillage. Cette mixité rend difficile l'identification des artefacts possibles. Evidemment, l'expérience des uns et des autres est fondamentale lors de cette phase, mais ce qui est notable, c'est que l'interprétation finale sur laquelle s'accordent les chercheurs est encore trop incertaine pour avoir valeur de vérité. Une image retenue lors de cette phase peut être caractérisée comme étant un « sésame indiciaire/symbolique dicent ». Elle est un sésame car elle correspond à un événement réel, déterminé dans le temps et

dans l'espace. Elle est indiciaire et symbolique en vertu de ce que nous avons exposé plus haut. Elle est un signe dicent car elle renvoie dans l'esprit des scientifiques à un signe d'existence réelle, mais n'ayant pas encore de portée générale.

- la troisième étape va consister à donner une portée plus générale à l'image primaire, à la transformer en « légisigne indiciaire/symbolique argumental ». Légisigne, car elle est alors un signe dont le fondement est, dans notre cas, une loi établie *a posteriori*, par habitude de lecture des images des chercheurs, mais également par la mise en œuvre de conventions scientifiques. Indiciaire et symbolique en raison des conditions de sa production qui demeurent inchangées par rapport à la phase de production de l'image. Argumentale, c'est-à-dire que pour son interprétant, ce signe est signe de loi. Si cette étape se révèle fructueuse (et souvent ce n'est pas le cas), la publication de l'image sera envisageable.

Deux types de problèmes se posent aux scientifiques : parvenir à distinguer, avec la plus grande efficacité possible, les artefacts du signal pertinent (la tâche est rendue complexe par la nature mixte des images primaires) ; conférer à ces images produites à l'aide de méthodes d'investigation locale (en l'occurrence, des microscopes qui permettent d'étudier des zones de l'échantillon comportant quelques atomes) une portée qui sera valable pour l'ensemble des échantillons du même type (soit des milliards d'atomes). On pourrait naïvement croire que les chercheurs réitèrent leurs expériences afin de valider leurs hypothèses de travail. Or, dans ce type de recherche, il est impossible de reproduire au sens strict deux fois la même expérience, puisque la qualité des échantillons est détériorée par l'examen dans les microscopes, en raison de leur exposition aux rayonnements électromagnétiques. Il faut donc à chaque fois reconditionner un échantillon qui présentera toujours des différences essentielles par rapport au précédent.

Ces difficultés vont être surmontées en ayant recours à deux types de processus : ce que nous appellerons l' « interinstrumentalité » d'une part, et d'autre part, la production d'autres types d'images par le recours exclusif à des ordinateurs : les images de simulation et les images de modélisation évoquées plus haut.

6. L'interinstrumentalité

Définissons ce que nous entendons par « interinstrumentalité » : il s'agit du fait de recourir à des instruments conçus sur des principes physiques différents, chaque instrument apportant un type d'information physique spécifique à propos des échantillons retenus. Ces informations pourront être d'ordre chimique, topographique, électronique, etc. Prenons l'exemple d'un chercheur qui a pour objectif de maîtriser l'obtention de nanotubes de carbone et qui entreprend d'examiner un échantillon sur lequel, à son sens, il a fait croître de tels nanotubes. A l'aide d'un MEB, microscope qui permet une analyse de la surface de l'échantillon, il voit de manière très distincte une « forêt de spaghettis », qu'il identifie comme étant les nanotubes attendus. Mais afin de corroborer son hypothèse, il souhaite étudier son échantillon au MET, autre type de microscope ayant une résolution très élevée et permettant d'obtenir des précisions d'ordre chimique. Plusieurs séances de travail au MET ne donnent pas le résultat escompté ; le chercheur semble voir des traces de nanotubes, mais l'analyse chimique de ces traces ne révèle pas de carbone.

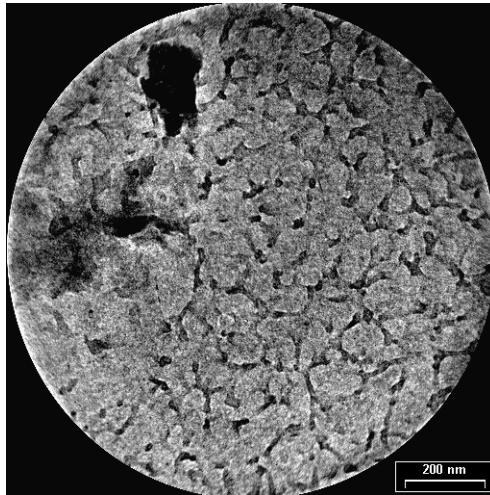


Fig.6. Traces de nanotubes ?

Micrographie réalisée au MET. (Image prêtée par Mme Erhet-GSI)

Comment expliquer ce fait étonnant ? S'agit-il d'un artefact induit par l'appareil, par le processus informatique qui permet de produire l'image, ou encore lors de la phase de préparation de l'échantillon ? Les informations délivrées par ces deux microscopes semblent contradictoires. Le chercheur va donc tenter d'éliminer toutes les causes possibles d'artefact. C'est une phase très difficile, car en fait le chercheur ne sait pas *a priori* si ses difficultés sont induites par un artefact unique ou par la conjonction malheureuse de plusieurs artefacts. Pour se livrer à cette entreprise, il recourt à un raisonnement abductif¹⁰.

Celui-ci a 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. (P. Jacob, 1980 :446)

Le chercheur confronté à un phénomène inattendu (l'absence de nanotubes sur son échantillon examiné au MET) va émettre des hypothèses quant à son origine et va s'employer à les vérifier. Les hypothèses, dans ce cas, vont porter sur les causes d'artefact possibles : la préparation de l'échantillon, 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 va se rendre compte 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 images du MEB un statut d'argument. Elles ne pourront être publiées.

Une image ne peut jamais être considérée par les chercheurs comme un argument. Une seule représentation visuelle ne constitue jamais une preuve. Pour qu'une image puisse être interprétée comme un argument, il faut se doter d'une multiplicité d'images issues de dispositifs techniques différents (incluant le traitement mathématique des images que nous aborderons plus loin) afin de pouvoir repérer ce qui reste stable d'une image à l'autre. Dès lors, on comprend bien qu'une image isolée ne dit rien du tout. Dans le cas de l'astrophysique, une seule vue de galaxie ne suffit pas à emporter la conviction de l'astronome contrairement à ce que croient les « ufologues » (B. Latour, 1993). Il en faut plusieurs correspondant à des longueurs d'onde, des codages, des traitements différents. Il en va de même pour le chercheur du GSI : une seule micrographie réalisée à l'aide du MET ne sera pas considérée comme probante. Il faudra convoquer d'autres techniques (MEB, STM, AFM, traitements diversifiés, etc.) qui permettront de produire d'autres images. Comme l'affirme M. Mercier (1991 : 26), une seule image est « moins fidèle au sujet que l'ensemble, grâce aux variations techniques qui cernent le sens ».

7. Le recours à des images de synthèse : images de simulation ou de modélisation

Ces images sont produites, nous l'avons vu, à l'aide de modèles logico-mathématiques et de ce fait, sont dégagées de toutes les contraintes expérimentales réelles liées à l'usage des microscopes.

Dans le cas des images de simulation, la tâche de l'informaticien va consister à entrer sous forme de programmes toutes les données d'une expérimentation virtuelle dans l'ordinateur. Le résultat obtenu sous forme d'images ressemble cependant à s'y méprendre à des images produites par les microscopes eux-mêmes. C'est pourquoi, nous les avons classées dans la catégorie des signes légisignes symboliques et iconiques¹¹. Pourquoi les chercheurs procèdent-ils de la sorte ? Pour recréer artificiellement des conditions d'expérimentation que l'on ne pourrait obtenir que très difficilement ou pas du tout dans le cadre d'une expérimentation réelle, et leur permettre ainsi de visualiser des états de la matière auxquels ils n'auraient pas accès autrement. Elles permettent d'éviter les aléas expérimentaux qui sont très nombreux. Les images simulées, soit s'insèrent dans un processus d'investigation, soit en constituent le terme. Elles s'y insèrent lorsqu'elles donnent à voir un état problématique de la matière qui sera l'occasion d'ouvrir sur d'autres investigations. Elles peuvent également faciliter la variation des paramètres expérimentaux. Une fois le programme écrit, il est très facile de faire varier précisément la température, entreprise bien plus périlleuse dans le cadre d'une expérimentation réelle. Lorsqu'elles sont le terme du processus, elles reproduisent sous une forme épurée, voire parfaite, ce que les images résultant d'une expérimentation ne montraient qu'avec des imperfections. Elles sont souvent présentées côte à côte sur les posters ou dans les articles ; elles jouent donc en quelque sorte le rôle d' « argument renforçateur ». Lors de la phase de production de ces images, elles sont considérées comme des dicisignes, car bien qu'elles soient produites mathématiquement, elles reposent sur l'utilisation de routines informatiques qui ne sont pas toutes standardisées. Elles sont donc toujours entachées

d'incertitude. Les chercheurs les interprètent comme des arguments, lorsqu'elles viennent s'insérer dans un faisceau d'indices convergents (des images produites à l'aide de microscopes, par exemple).

La modélisation, comme on l'a déjà énoncé, est assimilable à un processus de condensation. Elle permet de représenter « la réalité de façon à la fois économique et fiable » (D. Parrochia, 2000 : 199). On peut visualiser par exemple les interactions entre divers matériaux (comment se positionnent les atomes les uns par rapport aux autres) sans tenir compte de paramètres expérimentaux précis – à la différence de la simulation. La modélisation est, d'un certain point de vue, paradoxale si l'on considère les caractéristiques qui sont les siennes : elle est très abstraite, puisqu'elle se détache de l'expérience, et cependant, les lois et les théories qu'elle met en œuvre, sont empreintes d'expérimentations. L'image ainsi produite peut être considérée comme un légisigne symbolique dicent. Là encore, ce n'est qu'en prenant place au sein d'un processus incluant d'autres techniques que l'image de modélisation passera du statut de dicent à celui d'argument au sein de la communauté scientifique pour les mêmes raisons que celles évoquées pour les images de simulation : les routines informatiques.

L'image de modélisation possède plusieurs fonctions :

- dans certains cas, elle constitue une tentative d'explication des phénomènes en déterminant des règles : un ensemble de possibles que l'expérimentation pourra donner à voir sous une autre forme visuelle. Elle permet en ce sens de prédire un état futur de la matière.
- à l'inverse, elle peut avoir une fonction de confirmation (ou de corroboration, si l'on souhaite ici éviter la querelle entre vérificationnistes et falsificationnistes).
- en dernier lieu, elle permet de décider. Par exemple : entre deux états de la matière, étudiés grâce à deux appareillages différents (des images produites avec le STM et des images de diffraction par rayon X), donnant lieu à des résultats contradictoires ou problématiques, la

modélisation a permis de pencher en faveur de l'interprétation des images produites avec le STM. Ce dernier microscope ayant accru ses capacités, les chercheurs ont réussi à produire des images dont l'interprétation s'accordait avec les résultats obtenus grâce à la modélisation.

Les images de synthèse ont donc un statut particulier : C.S Peirce dirait sans doute que « le but d'une telle action (création d'images de synthèse) est de produire quelque résultat sensible. » (C.S. Peirce. 2002 :247). Cette création d'images de synthèse permet aux scientifiques de clarifier leurs idées « en considérant quels sont les effets pratiques qu'*ils pensent* pouvoir être produits par l'objet de *leur* conception. » (ibid.. 2002 :248)¹².

Récapitulons...

	Phase de production de l'image	Phase d'insertion de l'image dans une publication
Image primaire	Sinsigne indiciaire/symbolique dicent	Légisigne indiciaire/symbolique argumental
Image retraitée	Sinsigne indiciaire/symbolique dicent	Légisigne indiciaire/symbolique argumental
Image de simulation	Légisigne iconique/symbolique dicent	Légisigne iconique/symbolique argumental
Image de modélisation	Légisigne symbolique dicent	Légisigne symbolique argumental

Deux remarques à propos de ce tableau :

- en introduisant plus haut la notion de mixité des images en ce qui concerne la deuxième trichotomie (centrée sur la relation du *representamen* à l'objet), nous ne respectons pas le treillis sémiotique proposé par C. S. Peirce lui-même. Cette démarche consistant à remettre en cause l'ordonnement des catégories peirciennes nous paraît néanmoins féconde : la nature des ces « nouvelles images » scientifiques nécessite cette entorse sous peine de rester enfermé à jamais dans un débat stérile sur la nature exclusivement indiciaire ou symbolique des

images scientifiques. La notion de mixité met en relief la valeur particulière de ces images : tout en étant quelque part un effet induit par une réalité invisible, elles sont parfaitement mathématisables, et beaucoup plus faciles à manipuler sur un plan théorique et mathématique. Mais cette valeur a un coût : les difficultés quotidiennes des chercheurs quant à l'interprétation de ces représentations. Difficile de faire la part des choses entre ce qui est dû à un effet réel et ce qui est dû à des artefacts d'origines variables.

- ce qui est notable lorsque nous observons notre tableau récapitulatif, c'est qu'au cours du processus de recherche, la seule trichotomie qui n'évolue pas, et ce quels que soient les types d'images considérés, c'est celle qui porte sur la relation entre le *representamen* et l'objet. Cette relation semble fonctionner comme un point de repère pour les scientifiques : ils gardent constamment à l'esprit la nature de ces images et tentent de les interpréter de la manière la plus juste possible scientifiquement. Ceci révèle la ferme conviction des chercheurs que ces images, peu ou prou, leur disent quelque chose du monde atomique. Le réel semble résister à travers cette immuabilité de la relation *representamen-objet*. Ce qui, en revanche, est toujours susceptible de changer est l'interprétation que l'on donne de ces représentations, interprétation tellement difficile à fixer que les scientifiques recourent à l'interinstrumentalité et à des images de synthèse pour étayer toute interprétation d'une image donnée.

Conclusion

Le recours à la sémiotique peircienne permet de mieux comprendre la nature des images produites dans ce laboratoire et notamment les liens qui s'établissent entre l'objet étudié et la représentation. Nous avons pu établir que ces images sont de nature mixte dès leur production et que cette mixité est la cause d'un certain nombre de problèmes lorsqu'il s'agit de les interpréter. La sémiotique peircienne permet également de rendre compte de l'évolution du processus interprétatif au cours de la recherche : une image donnée va être interprétée comme

un signe dicent avant d'être considérée lors de la phase finale comme un argument. Les chercheurs sont tout à fait conscients des difficultés engendrées par les processus qui permettent à ces représentations de prendre forme. Or, comme le souligne C. S. Peirce :

Tout signe a, en acte ou virtuellement, ce que nous pouvons appeler un précepte d'explication suivant lequel il fait le comprendre comme étant, pour ainsi dire en sorte, une sorte d'émanation de son objet. (C. S. Peirce, 1978, 2 .230 : 123)

Les préceptes d'explication que vont mettre en œuvre les chercheurs sont d'ordre scientifique. Mais du fait même que les scientifiques ont affaire à des représentations qui sont, plus que d'autres, sujettes à des interprétations, c'est-à-dire un processus toujours potentiellement ouvert, ils tentent de construire des argumentaires bâtis sur d'autres représentations produites avec d'autres moyens techniques en ayant recours à l'interinstrumentalité et aux images de synthèse. Ils développent ainsi dans leurs publications des argumentaires ayant la forme de faisceaux d'indices convergents, les représentations produites par les divers appareillages devant être scientifiquement compatibles entre elles.

BIBLIOGRAPHIE:

ALLAMEL-RAFFIN C., LEFEBVRE M., « Quelles méthodes pour l'analyse des images scientifiques ? Approche sémiotique et anthropologique des images en physique des matériaux et en mathématiques : étude comparative » in *Les recherches en information et communication et leurs perspectives. Histoire, objet, pouvoir, méthode*. 2002, Marseille, SFSIC.

BABOU I., Thèse en Sciences de l'Information et de la Communication, Paris 7, 1999, *Science, Télévision et Rationalité. Analyse du discours télévisuel à propos du cerveau*, <http://mirror-fr.cybertheses.org/ens-lsh/Theses1999/babou/these.html>.

BARBOZA P., *Du photographique au numérique. La parenthèse indicielle dans l'histoire des images.*, 1996, Paris, L'Harmattan.

BARSOITI B., *La représentation dans la philosophie contemporaine*, 2001, Paris, Ellipses.

BARTHES R., *Éléments de sémiologie*, 1964, Paris, Gontier Médiations.

BASTIDE F., « Iconographie des textes scientifiques. Principes d'analyse », *Culture technique* n° 14, 1985, Paris, CRCT ; pp. 133-152.

BENVENISTE E., *Problèmes de linguistique générale*, tome II, 1980, Paris, Gallimard Tel.

GARCIA R., « L'explication en physique », in Jean Piaget, dir., *L'explication dans les sciences*, 1973, Paris, Flammarion ; pp. 103-119.

GRANGER G. G., *Essai d'une philosophie du style*, 1988, Paris, Editions Odile Jacob

HACKING I., *Concevoir et expérimenter*, 1989, Paris, Christian Bourgois.

JACOB P., *De Vienne à Cambridge. L'héritage du positivisme logique*, 1980, Paris, PUF.

LATOURET B., « Le travail de l'image ou l'intelligence savante redistribuée » in *La clef de Berlin*, 1993, Paris, La Découverte ; pp. 145-170.

MARTY R., MARTY C., *99 réponses sur...la sémiotique*, 1992, Montpellier, CRDP/CDDP Languedoc Roussillon.

MERCIER M., « Les images de microscopie électronique : construire un réel invisible » in *Culture technique* n° 22, 1991, Paris, C.R.C.T. ; pp. 25-34.

PARROCHIA D., « L'expérience dans les sciences » in Yves Michaud, dir., *Qu'est-ce que la vie ? Université de tous les savoirs*, 2000, Paris, Editions Odile Jacob ; pp. 193-203.

PEIRCE C. S., *Pragmatisme et pragmatisme. Œuvres philosophiques*, 2002, édition établie par C. Tiercelin et P. Thibaud, Paris, Editions du Cerf.

PEIRCE C. S., *Ecrits sur le signe rassemblé, traduits et commentés par G. Deledalle*, 1978, Paris, Seuil.

PEIRCE C. S., *The Collected Papers of C. S. Peirce, 1931-1935*, Cambridge Mass., édités par A. BURK, Harvard University Press, vol. 7-8.

PEIRCE C. S., *The Collected Papers of C.S. Peirce*, 1958, Cambridge Mass., édités par CH. HARTHSOME, Harvard University Press, vol 1-6.

TIERCELIN C., *C. S. Peirce et le pragmatisme*, 1993, Paris, PUF.

Cet article a été rédigé dans le cadre d'une thèse financée par une bourse de la Région Alsace.

¹ Nous restreindrons ainsi le champ des objets pris en compte dans le cadre de notre étude : une image est inscrite sur un support matériel (écran ou papier) et donc associée à des dispositifs techniques de traitement.

² Une étude s'appuyant sur la sémiotique peircienne appliquée aux images scientifiques a été menée par I. Babou dans le cadre de sa thèse de doctorat. Mais il s'agissait, dans son cas, d'étudier des images scientifiques dans un contexte de vulgarisation scientifique. Notre démarche est différente car elle s'intéresse aux conditions de production de ces images dans le cadre d'un laboratoire.

³ Le terme « artefact » est pris dans ce texte au sens « d'effet indésirable », conformément à l'usage qui en fait dans le laboratoire qui constitue le cadre de notre étude.

⁴ Le GSI est un laboratoire faisant partie de l'IPCMS (Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg, unité mixte CNRS-ULP. UMR 7504).

⁵ Pour le lecteur non familiarisé avec la physique des matériaux, on peut penser aux images de simulation des variations atmosphériques utilisées dans le domaine météorologique. Ces images de simulation sont souvent utilisées afin de formuler des prédictions les plus précises possible sur les conditions météo à venir.

⁶ En guise d'exemple de modélisation accessible à un large public, on peut songer aux modèles de l'atome et aux constructions de molécules à partir de boules noires, rouges et blanches que l'on réalise dans le cadre de ses études, en cours de chimie, du moins dans les lycées français.

⁷ C. Tiercelin rappelle que dans une première période (1865-1867), c'est le concept de « représentation » qui est privilégié par Peirce au détriment de celui de « signe ». Progressivement, alors que la théorie de la pensée-signe émergera, le signe demeurera équivalent à une « représentation » puisqu'il continuera à renvoyer à une « seconde intention » (C. Tiercelin, 1993 : 45).

⁸ Pour C. S. Peirce, c'est au niveau de l'interprétation qu'une même image peut être alternativement indice, icône ou symbole, en fonction du contexte d'interprétation. Ainsi, la trace de pas retrouvée par Robinson sur le sable, par exemple, peut être considérée comme un indice, celui de la présence sur l'île d'un individu particulier, Vendredi, comme une icône car elle peut représenter son objet principalement par sa similarité, comme un symbole pour l'interprétant qui infère de la représentation de cette forme et de ce qu'elle indique, la présence d'un homme sur l'île. (C.S. Peirce, 4.531 cité par C. Tiercelin, 1993 : 59-60).

⁹ Pour avoir un aperçu des ces interactions verbales lors d'une séance d'observation au microscope électronique à transmission, cf. Allamel-Raffin C., Lefèbvre M., « Quelles méthodes pour l'analyse des images scientifiques ? Approche sémiotique et anthropologique des images en physique des matériaux et en mathématiques : étude comparative » in *Les recherches en information et communication et leurs perspectives. Histoire, objet, pouvoir, méthode*. 2002, Marseille, SFSIC.

¹⁰ Le concept d'abduction a été élaboré par C.S. Peirce. Il emploie les termes « abduction » et « rétroduction » selon les textes.

¹¹ Voir plus haut les raisons de cette dénomination.

¹² Nous avons remplacé dans la citation le pronom personnel « nous » par « ils » en raison de l'accord grammatical au sein de la proposition. La citation exacte est : « en considérant quels sont les effets pratiques que nous pensons pouvoir être produits par l'objet de notre conception. » (ibid.. 2002 :248)