

La phénoménotechnique questionnée par la médiation

L'exemple du showroom du LARSIM

The phenomenotechnology questioned by mediation. The example of the LARSIM's showroom

Yohann Guffroy



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/artefact/4862>

DOI : 10.4000/artefact.4862

ISSN : 2606-9245

Éditeur :

Association Artefact. Techniques histoire et sciences humaines, Presses universitaires du Midi

Édition imprimée

Date de publication : 15 décembre 2019

Pagination : 253-275

ISBN : 978-2-8107-0667-9

ISSN : 2273-0753

Référence électronique

Yohann Guffroy, « La phénoménotechnique questionnée par la médiation », *Artefact* [En ligne], 11 | 2019, mis en ligne le 27 novembre 2020, consulté le 29 novembre 2020. URL : <http://journals.openedition.org/artefact/4862> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/artefact.4862>



Artefact, Techniques, histoire et sciences humaines est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

La phénoménotechnique questionnée par la médiation

L'exemple du showroom du LARSIM

Yohann Guffroy

Résumé

L'objet de cet article est de présenter l'espace de médiation développé au Commissariat à l'Énergie atomique et aux Énergies renouvelables par l'astrophysicien Vincent Minier et le philosophe des techniques Vincent Bontems dans le cadre de la valorisation du programme de l'observatoire spatial *Herschel*. Le « showroom », tel qu'il est appelé, a originellement été pensé comme un lieu de prospection en matière de médiation numérique et de réflexion sur les notions de « phénoménotechnique », « mécanologie » et « objet-image » en astrophysique. Cependant, par l'intermédiaire des dispositifs mis en place, le showroom s'est aujourd'hui mû en gardien de la mémoire du télescope sans ligne de médiation clairement établie. Après avoir évoqué les origines de cet espace ainsi que les concepts qui y sont attachés, nous présenterons les différents dispositifs de la salle avant de proposer, à la suite d'une expérience de terrain, un parcours pédagogique qui permettrait de travailler de manière plus organisée ces notions avec un public scolaire.

Mots-clés

Herschel, phénoménotechnique, médiation, Simondon, mécanologie

» Yohann Guffroy, « La phénoménotechnique questionnée par la médiation. L'exemple du showroom du LARSIM », *Artefact*, 11, 2019, p. 253-275.

The phenomenotechnology questioned by mediation

The example of the LARSIM's showroom

Abstract

The purpose of this article is to present a space of mediation developed by the astrophysicist Vincent Minier and the philosopher Vincent Bontems at the Commissariat à l'Énergie atomique et aux Énergies renouvelables. This room, called "showroom", promotes the spatial telescope *Herschel* and its discoveries. Initially, the creators wanted to set up a place of prospective in digital mediation and of reflection about different concepts as "phenomenotechnology", "mechanology" or "object-image" in astrophysics. However, the showroom became a guardian of the telescope's memory without a clear mediation approach. I will first explain the origin of this space and give a description of the different machines presented there. Then, I will propose a pedagogical experience to redefine an explicit line of mediation in order to work on these concepts with pupils.

— 254

Keywords

Herschel, phenomenotechnology, mediation, Simondon, mechanology

Remerciements

L'auteur tient à remercier Vincent Bontems et Vincent Minier pour avoir apporté leurs témoignages et réflexions qui sont au cœur de cet article ; les physiciens Antoine Drouart et Marine Vanderbrouck pour leurs explications sur le billotron ; le professeur documentaliste Damien Lécroart pour ses conseils sur la conception du parcours pédagogique.

Introduction

Le 10 avril 2019, au cours de six conférences simultanées, un groupe international d'astrophysiciens du projet *Event Horizon Telescope* dévoile au monde une image attendue de longue date, « la première photographie d'un trou noir ». Du moins a-t-elle été décrite de la sorte par de nombreux journaux, laissant parfois facilement entendre qu'il s'agirait d'une prise de vue directe de l'objet céleste¹. Toutefois, la grande majorité des journalistes ayant repris le terme de « photographie » se sont attachés à préciser dans le corps de l'article la manière dont l'image présentée a été obtenue. Huit radiotélescopes², répartis sur les cinq continents, ont été pointés vers deux zones de l'Univers que sont le centre de notre galaxie, la Voie lactée et la galaxie supergéante Messier 87. En avril 2017, c'est finalement cette dernière qui a été observée pendant quatre jours à une longueur d'onde de 1,3 mm, permettant de collecter environ 350 téraoctets de données par jour pour chaque télescope³. Ce matériel a ensuite été mutualisé et a demandé deux ans de traitement informatique pour convertir ces données numériques issues de la captation de signaux radioélectriques en une image. La « photographie » du trou noir est donc un assemblage purement numérique qui fait autorité en tant que preuve de l'existence de ces corps célestes prédits il y a un peu plus de cent ans⁴.

Cet exemple illustre parfaitement le mésusage de certaines formules. Le terme « photographie » est aujourd'hui polysémique et employé dans divers contextes. Toute image est le résultat d'une suite d'opérations qui construit notre rapport à la vue⁵. L'obstacle épistémologique⁶ le plus courant dans le

1. Voir par exemple les articles du 10 avril 2019 de *Paris Match* ou de *Numerama*.

2. « Un radiotélescope est une antenne destinée à recevoir et étudier les ondes de radio émises par les astres. Ces ondes sont de même nature que la lumière, mais leur longueur d'onde est plus grande, de 10 à 30 centimètres, pour celles reçues par le radiotélescope. [...] Le radiotélescope se compose de deux "miroirs" qui concentrent les ondes sur une antenne qui les recueille et les transmet à des amplificateurs sensibles, puis à divers analyseurs. » Définition donnée par l'Observatoire de Nancy : <https://www.obs-nancay.fr>.

3. Observatoire européen austral : <https://www.eso.org/public/france/images/eso1907a/?lang>.

4. Bien que questionnée dès le XVIII^e siècle, l'existence théorique des trous noirs a été établie par la théorie de la Relativité générale d'Albert Einstein en 1915.

5. Rancière, 2003 et 2008.

6. La notion est développée par Gaston Bachelard dans *La Formation de l'esprit scientifique* en 1938. L'obstacle épistémologique est « ce qui arrête la pensée et dont l'esprit doit se déprendre pour devenir scientifique » (Bontems, 2010, p. 221). En somme, il s'agit d'un blocage, d'une limite, qu'il s'agit

rapport à l'image est de penser que ce que l'on voit est le reflet de la réalité perceptible par les sens. En argentique, la photographie serait la gardienne d'une trace, du « ça-a-été » de Roland Barthes⁷ et donc de la captation sans filtre de la réalité⁸ ; avec le numérique, l'introduction des algorithmes a modifié notre rapport à ce que nous photographions en rendant possible, et ce de manière illimitée, la modification de l'image qui ne devient de fait plus une trace du passé mais « un monde possible »⁹. De l'œil qui ne voit qu'une infime partie de ce qui nous entoure aux télescopes qui captent des signaux qui sont traités par de l'électronique, chaque création d'image nécessite une suite d'interventions informatiques et humaines.

C'est en souhaitant déconstruire cet obstacle épistémologique dans le domaine spatial que l'astrophysicien Vincent Minier et le philosophe des techniques Vincent Bontems, tous deux au Commissariat à l'Énergie atomique et aux Énergies renouvelables (CEA), ont mis en place, sur le plateau de Saclay, un espace de médiation pensé pour valoriser et transmettre les découvertes de la mission spatiale Herschel¹⁰, lancée en 2009 et arrêtée en 2013, ainsi que des instruments propres aux départements de recherche qui l'hébergent. Cet espace s'appuie sur l'idée que la médiation n'est pas une simple relation entre un émetteur et un récepteur mais bien un champ intermédiaire à part entière, créateur de connaissances et comprenant sa

de franchir ou de contourner en réorientant sa réflexion afin de pouvoir poursuivre sa progression dans le raisonnement. Chez Bachelard, il s'agit de se départir des idées communes au sens d'idées intuitives, donc ce qui n'est pas éprouvé par le raisonnement scientifique. L'expression a ensuite été reprise dans divers domaines comme les sciences de l'éducation au sein desquelles il s'agit toujours de lutter contre les idées reçues et d'affûter l'esprit critique des élèves face à ce qui peut leur paraître une évidence.

7. Barthes, 1980.

8. Cette idée est en effet erronée. Comme l'indique Jean-Marc Lévy-Leblond pour le processus argentique, « la transparence d'un milieu, ou son opacité [...] résultent d'un très complexe mécanisme : les photons lumineux incidents sont absorbés par les charges électriques du milieu [...] et les mettent en branle ; ces charges réémettent alors de nouveaux photons, etc. C'est donc seulement le bilan de ces processus d'absorption et de réémission itérés qui permet d'établir si et comment le corps laisse passer la lumière ou la bloque ». En d'autres termes : « Les photons qui entrent dans une plaque de verre ne sont pas ceux qui en sortent. [...] Il y a bien eu un renouvellement complet de ces constituants de la lumière au sein du matériau. » Lévy-Leblond, 2006, p. 28-29. Cité dans Gunthert, 2016.

9. Dubois, 2016. Voir aussi le cours au Collège de France de Gérard Berry, « La photographie numérique, un parfait exemple de la puissance de l'informatique », donné le 31 janvier 2018.

10. Le nom du projet est en rapport avec William Herschel (1738-1822), astronome et physicien britannique d'origine allemande, qui est le premier à avoir découvert et démontré l'existence des rayons infrarouges en 1800.

propre épistémologie¹¹. La réflexion investie par les deux concepteurs dans ce qu'ils nomment le « showroom » amène à questionner à la fois la multiplicité des niveaux de profondeur d'explications permettant de satisfaire de nombreux publics ainsi que les concepts qui sous-tendent sa construction. Pour ce faire, nous détaillerons d'abord dans quel contexte réflexif est né le showroom avant d'en présenter les différents dispositifs et de terminer sur une proposition de parcours pédagogique à destination d'un public de lycéens.

La naissance du showroom

Né d'une volonté de promouvoir le projet spatial Herschel, le showroom est mis en place en 2015. Installé dans l'ancienne bibliothèque du Département de Physique nucléaire (DPhN), il occupe aujourd'hui un espace de 150 m² avec cinq dispositifs propres au projet Herschel et deux autres en relation avec le DPhN. Avant de les détailler, revenons à l'origine de sa conception.

La mission spatiale Herschel est lancée en mai 2009 et arrêtée en avril 2013. Officiellement proposée à l'Agence spatiale européenne (ESA) en 1982, elle s'inscrivait comme l'une des pierres angulaires du plan à long terme « Horizon 2000 » de l'agence¹². L'objectif du satellite était de collecter, en tant que télescope spatial, des informations dans le domaine de l'infrarouge et dans la partie submillimétrique du spectre électromagnétique. Plus qu'un simple télescope, Herschel est un ensemble technique au sens simondonien de l'expression, embarquant avec lui des individus techniques¹³ lui permettant de fonctionner de manière autonome et stable une fois en orbite au point de Lagrange 2, soit à 1,5 million de kilomètres de la Terre¹⁴. Il comprend notamment un bouclier thermique, un cryostat, un

257 —

11. L'idée est défendue dans la thèse de Baudouin Jurdant soutenue en 1973 et publiée sous le titre *Les problèmes théoriques de la vulgarisation scientifique*.

12. Pilbratt, 2010, p. 1.

13. « Nous dirons qu'il y a individu technique lorsque le milieu associé [le milieu dans lequel l'objet technique fonctionne et interagit] existe comme condition *sine qua non* de fonctionnement, alors qu'il y a ensemble dans le cas contraire. » Un ensemble technique n'est dit stable que parce que les individus qui le composent le sont eux-mêmes *via* la synergie avec leur milieu associé. Simondon, 2012, p. 75.

14. En comparaison, le télescope spatial Hubble qui observe dans le domaine du visible gravite autour de la Terre à une altitude de 600 kilomètres.

miroir principal de 3,5 m de diamètre, un second plus petit, un module de service contenant toute l'électronique de commande et les instruments de mesure PACS, SPIRE et HIFI¹⁵. En fonction durant trois ans et demi, Herschel a observé l'espace durant plus de 22 000 heures¹⁶. Sans entrer dans le détail du principe de fonctionnement de chacun de ses instruments, nous pouvons cependant indiquer que, de manière générale, le télescope capte les signaux infrarouges de l'espace qui viennent rencontrer son miroir en carbure de silicium et les concentre en un faisceau unique dirigé vers ses instruments de mesure¹⁷. La captation de ce dernier déclenche une transduction dans la mesure où le faisceau crée une variation de la température de certains détecteurs induisant un flux électrique lui-même converti en données numériques par l'instrument. Ces dernières sont ensuite envoyées vers la Terre et transmises aux astrophysiciens¹⁸. Le traitement de ces informations permet aux scientifiques de les traduire sous forme d'images exploitables dans le cadre de l'étude de l'espace.

Bien que l'observatoire ait cessé ses opérations en 2013, les données récoltées par le télescope continuent d'être exploitées¹⁹. Par l'intermédiaire du projet de recherche ExplorNova lancé en 2012 entre le Département d'astrophysique (DAp), le Laboratoire de recherche sur les Sciences de la Matière (LARSIM) au CEA et en collaboration avec des laboratoires de l'Université de Nantes, Vincent Minier et Vincent Bontems ont eu la volonté de mettre en place une zone de Recherche-Action en médiation dont la structure et le contenu sont en perpétuelle évolution, portant sur les instruments développés par le CEA et utilisés par l'Université de Nantes. Initialement, les deux chercheurs souhaitaient offrir aux visiteurs des dispositifs permettant des lectures à multiples niveaux du projet Herschel. Réfléchissant à partir

15. Les deux premiers instruments ont été fabriqués par les laboratoires du Commissariat à l'Énergie atomique et aux Énergies renouvelables avec le soutien du Centre national des études spatiales (CNES). Le dernier a quant à lui été construit au Netherland Institute for Space Research.

16. La durée de la mission était conditionnée par la quantité d'hélium liquide embarquée dans le cryostat pour refroidir le système, soit 2 400 litres, s'évaporant au fur et à mesure du fonctionnement des instruments. Voir le site de l'Agence spatiale canadienne : <http://www.asc-csa.gc.ca/fra/satellites/herschel/nouvelles.asp>.

17. Pour plus d'informations, voir le site web dédié au télescope Herschel (<http://www.herschel.fr/index.php>) ou encore l'ouvrage dirigé par Minier *et al.*, 2017.

18. Tous les instruments d'Herschel ne fonctionnent pas sur ce modèle. Pour plus de précisions, voir Minier *et al.*, 2017, p. 159-182 ; Guy, 2016.

19. Voir le site web tenu par l'ESA : <https://www.cosmos.esa.int/web/herschel>.

du concept de « phénoménoteknikue » développé par Gaston Bachelard²⁰ et de la mékanologie génétique²¹ de Gilbert Simondon, ils cherchaient à promouvoir auprès du public une nouvelle approche des instruments scientifiques en utilisant pour ce cas exemple le halo psychosocial²² du télescope spatial et de ses découvertes. On entend par « phénoménoteknikue » la possibilité pour les instruments scientifiques de porter au statut « d'existant » un phénomène qui serait resté virtuel et théorique sans leur action. Par exemple, « le noyau atomique ne devient une réalité phénoménale qu'à partir du moment où l'accélérateur de particules permet d'en observer les effets »²³ et il en va de même pour les ondes gravitationnelles d'abord théorisées puis phénoménalisées par le travail de détection des deux instruments Virgo et LIGO²⁴ en 2017.

Les premiers dispositifs de médiation ont d'abord été présentés au festival Scopitone de Nantes dès 2013 puis dans de nombreuses expositions dont Voyages Planétaires en 2015 ou encore à la Cité de l'espace à Toulouse. Ces différentes manifestations de vulgarisation scientifique ont été l'occasion pour eux de réfléchir à différentes manières d'offrir au public une variété d'expériences en rapport avec l'astrophysique telles que des tablettes tactiles, un cabinet de curiosités portant sur des objets techniques astronomiques, de grands écrans fonctionnant *via* une technologie de reconnaissance de mouvement des mains (*leap motion*), un programme de réalité virtuelle pour une plus grande expérience immersive ou encore une application web que les visiteurs peuvent retrouver chez eux²⁵, le tout en co-développement avec divers partenaires²⁶. Les informations collectées sur l'objet lui-même

20. Bachelard, 1934, p. 17-18.

21. Simondon, 2012.

22. Gilbert Simondon définit le halo psychosocial comme un rayonnement de l'objet technique au-delà de lui-même, qui influe sur son entourage offrant « une zone de technicité plutôt qu'un objet technique ». Simondon, 2014a, p. 283.

23. Vial, 2014, p. 152.

24. Virgo et LIGO (Low Interferometer Gravitational-Wave Observatory) sont deux interféromètres géants, le premier franco-italien et le second étasunien, mis en place spécifiquement pour détecter les ondes gravitationnelles issues de la fusion de deux trous noirs et énoncées elles aussi pour la première fois par Albert Einstein en 1915.

25. Voir les deux sites web d'ExplorNova : <http://explornova.eu/#accueil> et <http://explornova360.com/>. Il faut noter que le projet ExplorNova360 a été le tout premier à proposer un *Massive Open Online Course* (MOOC) entièrement en français consacré à l'astrophysique.

26. Pour une réflexion sur l'utilisation des technologies dans la médiation voir par exemple : Durampart, 2001 ; Jutant et Bobroff, 2015.

ont été obtenues à la fois par le travail de recherche de Vincent Minier en tant qu'*associate scientist* sur le projet Herschel et « responsable de la communication digitale au niveau France »²⁷ ainsi que par un travail d'enquête approfondi des deux scientifiques auprès des concepteurs d'Herschel.

Lors de son installation, l'espace du showroom devait remplir trois objectifs précis : (1) stocker les dispositifs itinérants de médiation créés à la fois *via* l'axe de communication du programme Herschel et *via* le projet de recherche ExplorNova qui prolongeait cet effort à la suite de la mission ; (2) être un point d'entrée sur le site de l'Orme des Merisiers du CEA pour différents visiteurs extérieurs (lycéens, professeurs, étudiants en astrophysique, etc.) ; (3) être un lieu de réception des personnes importantes reçues par la direction du Centre de Saclay pour illustrer certains axes de recherche menés conjointement par le DAp et le LARSIM. Lors de sa conception, le showroom n'a jamais été pensé comme un espace muséal mais plutôt comme un espace prospectif en matière de savoir-faire dans le domaine de la médiation numérique. En effet, si le musée pense généralement le dynamisme de ses expositions au travers d'une collection fixe, l'objectif est ici d'alimenter sans cesse l'expérience de médiation par de nouveaux outils mais aussi par de nouveaux contenus qui, à terme, feront du showroom un cas d'étude particulier d'un observatoire spatial parmi une multitude d'autres projets en cours de développement ou de fonctionnement. Chacun sera l'occasion d'une nouvelle médiation intégrant de multiples dispositifs, parfois identiques à ceux présents dans le showroom ou potentiellement nouveaux. Il s'agira alors d'une collection de projets et non plus seulement d'objets, donc ramifiable à volonté.

La réflexion commune de Bontems et Minier repose sur le constat qu'il est, comme souligné en introduction de l'article, trop souvent dit que les images de l'astrophysique sont des photographies de l'Univers, occultant de fait toute la technologie nécessaire pour obtenir ces images. Pour les deux scientifiques, le halo psychosocial émanant de l'observatoire impacte à la fois la perception de l'objet technique, l'opinion du public et un sentiment esthétique propre aux résultats imagés du télescope. À partir de ce

27. Il a notamment bénéficié du support du CNES.

concept, ils cherchent à en faire comprendre au public un second, celui « d'objet-image » développé par Simondon²⁸ :

“ Ce qui change avec le milieu numérique, ce sont les conditions d'une amplification culturelle de la connaissance technologique. L'information recueillie n'est plus seulement consignée dans un livre et des articles, elle est capitalisée au sein d'une base de données évolutive servant de support à un serveur de connaissances possédant plusieurs niveaux de profondeurs de navigation. La mémoire de l'inventivité est ainsi valorisable auprès de nombreux publics. La culture technique se diffuse au moins autant par des images à travers des dispositifs numériques qu'à travers des textes avant tout destinés à un public académique. Le cycle de la technologie devient alors une méthode opératoire contribuant à une amplification culturelle de la réalité technique par des « objets-images » qui sont les vecteurs des significations explicites et implicites de la technologie. [...] Ces images interactives et dotées de profondeurs fonctionnent comme des diagrammes ; elles doivent être conçues comme de quasi-organismes virtuels évoluant en symbiose avec nous ou, du moins, comme des germes pouvant s'épanouir au sein du milieu numérique²⁹.

Et ils ajoutent plus loin :

“ Les objets-images numériques doivent être les catalyseurs d'une culture de l'invention. Or, pour cela, la culture numérique a besoin d'autre chose que d'un déluge d'information et d'un brassage des données. [...] l'exploration des virtualités techniques est facilitée par la navigation au sein des objets-images dans la perspective d'une technologie réflexive³⁰.

C'est donc de ces réflexions qu'est issu le showroom du DAp et du LARSIM. À la fois espace de stockage pour des dispositifs itinérants mais surtout espace de médiation, il a vocation à rendre appréhendable, *via* l'exemple

28. « Toute image est susceptible de s'incorporer à un processus de récurrence matérialisant ou idéalisant ; déposée dans la mode, l'art, les monuments, les objets techniques, l'image devient source de perceptions complexes éveillant mouvement, représentation cognitive, affections et émotions. » Simondon, 2014b, p. 13.

29. Bontems et Minier, 2018, p. 65.

30. *Ibid.*, p. 76.

du télescope Herschel, ces concepts de phénoménotechnique, de mécanique génétique et d'objet-image qui offrent un nouveau rapport à l'astrophysique. Notre position, en tant qu'assistant de recherche auprès de Vincent Bontems, nous a offert un intéressant poste d'observation pour recueillir à la fois le matériel nécessaire à la compréhension du projet mais aussi pour questionner les dispositifs à l'aune des concepts qui ont organisé cet espace. Par notre démarche, nous souhaitons à la fois présenter le showroom mais aussi en questionner les fondements.

Présentation des dispositifs et réflexions épistémologiques

Le showroom comprend actuellement (2019) six dispositifs dont quatre sont dédiés à la médiation du projet Herschel³¹ et deux sont en relation avec le DPhN qui héberge le showroom. Chaque dispositif développant un aspect particulier de la réflexion épistémologique des concepteurs, nous les présenterons chacun leur tour dans leurs aspects statique et dynamique en commençant par les dispositifs externes à Herschel.

Le Cabinet de curiosités

Le premier de ces deux dispositifs « hors cadre » est un « cabinet de curiosités » rassemblant divers instruments de physique nucléaire récoltés dans les différents laboratoires et armoires du département et constitue donc un patrimoine *in situ*³² (**Fig. XIX, cahier couleur**). Présentés sur une grande étagère, les objets sont accompagnés de livres issus pour leur part des archives du DPhN³³. La plupart des pièces sont identifiées par un cartel indiquant simplement leur nom tandis que d'autres en sont dépourvues et sont donc anonymes. À la différence du cartel de musée dont les informations textuelles se trouvent *sur* le support, ces dernières sont ici implémentées dans un *nouvel espace* accessible par l'intermédiaire d'une technologie

31. Un septième dispositif est en rapport avec le rover Curiosity envoyé par la NASA sur Mars. N'ayant pu le voir fonctionner, il n'est pas décrit dans cet article.

32. Rainette *et al.*, 2008.

33. *The Physical Review, The Soviet Physic, Nature*, etc.

NFC³⁴ dont chaque cartel est équipé, lisible par l'intermédiaire d'un lecteur et d'un écran tactile. Cet outil permet une plus grande profondeur d'exploitation des connaissances liées à l'instrument et décroïssonne, dans une certaine mesure, l'expérience du visiteur³⁵. En effet, une fois la puce détectée, celui-ci a accès à différentes informations multimodales : il y trouve une reconstitution en trois dimensions (3D) de l'objet physique, manipulable en différents sens ; une courte description reprenant ses principales caractéristiques physiques et historiques ; des photographies qui peuvent représenter l'instrument, son environnement de conception ou d'implantation, les équipes travaillant avec ou encore des schémas expliquant son principe de fonctionnement ; une vidéo issue de différentes sources présentant son histoire, son procès de fabrication ou encore son principe de fonctionnement simulé.

Si plus de la moitié des instruments exposés sont identifiés, il en reste cependant plusieurs qui ne le sont pas. Face à ces derniers, l'observateur est confronté à un objet silencieux, dépourvu d'une mémoire accessible. Les laboratoires de physique, comme tout lieu qui produit ses propres outils de travail, alimentent leurs travaux en nouveaux instruments toujours plus performants, plus complexes, laissant derrière eux ceux qui sont devenus obsolètes. Cependant, tant que la mémoire de leur utilisation est conservée par les physiciens, l'objet vit, son histoire et les connaissances attachées à sa fonction et son fonctionnement existent toujours. Mais si les sachants viennent à quitter les lieux sans avoir transmis la mémoire de l'objet, les nouveaux arrivants se retrouvent alors amnésiques face à l'instrument. Les pièces auront donc perdu leur sens et deviendront les témoins muets d'une époque. Perdre à la fois le principe de fonctionnement de l'objet et sa fonction efface sa connexion avec le monde dont il est issu, celui de la science. Il n'est plus perçu que par sa matérialité, sa forme, et sa biographie, au sens d'une mémoire sociale, en est censurée³⁶. L'objectif du cabinet est donc de maintenir de manière dynamique cette dernière en rassemblant des pièces

34. *Near Field Communication*. Cette technologie de communication de proximité permet d'échanger des données entre un lecteur et un terminal mobile.

35. Bien que le champ des informations exploitables s'élargisse considérablement, l'utilisateur reste dépendant de l'existence de ce cartel et surtout du travail d'implémentation de connaissances nécessaire qui accroît la pertinence de cette technologie.

36. Appadurai, 1988.

oubliées ainsi que leur histoire et en établissant un lien entre les espaces physique et virtuel.

Le billotron

À la différence du cabinet de curiosités qui est une réalisation du LARSIM, le billotron est un outil de communication scientifique propre au DPhN. Il permet de simuler, de manière simple, une expérience capable de déterminer la forme d'un noyau d'atome, élément très complexe à étudier. En effet, alors que les plus puissants microscopes électroniques permettent aux scientifiques de travailler sur l'atome à une échelle de 10^{-10} mètres, le noyau leur reste inaccessible à 10^{-15} mètres. Ce dernier est donc invisible pour les instruments de laboratoire quotidiens et oblige les physiciens à employer des accélérateurs de particules afin d'en étudier les différentes facettes et notamment sa forme. Pour connaître cette dernière, des faisceaux de particules sont envoyés dans des canaux et viennent percuter le noyau de l'atome. Une fois entrées en contact avec celui-ci et selon sa forme, les particules prennent des trajectoires particulières qui sont repérées et enregistrées par des détecteurs placés en différents endroits de l'accélérateur. À la fin, ces enregistrements établissent un histogramme de distribution angulaire permettant de déduire de la courbe obtenue et à partir de modèles informatiques préalablement simulés, la forme du noyau. C'est cette expérience, appelée « réaction de diffusion », que reproduit visuellement et de manière simplifiée le billotron. Des billes faisant office de particules sont relâchées par l'expérimentateur, se diffusent dans la partie centrale du billotron entrant de fait en contact avec le noyau et, selon sa forme, se répartissent dans un réceptacle laissant ainsi apparaître un histogramme que le visiteur peut décrire. Dans ce dispositif, la forme du noyau est supposée inconnue même si pour la démonstration, le médiateur a le choix entre différents modèles géométriques. Cela la rapproche plutôt de la simulation numérique que de l'expérience dans un accélérateur. En effet, la simulation se fait à partir d'un choix de l'expérimentateur de tester telle ou telle forme proposée par les modèles théoriques et d'en étudier les résultats. Le physicien peut alors comparer les courbes issues de ses expériences auprès de l'accélérateur et les simulations informatiques afin de déterminer la forme inconnue de son noyau.

L'utilisation du billotron permet d'illustrer plusieurs points. S'il a été originellement mis en place dans le showroom pour diversifier les thèmes présentés, le dispositif trouve toute sa place dans la réflexion globale de cet espace. En effet, il est un excellent outil pour montrer au public que, dans ce domaine, les physiciens travaillent à partir de données brutes, d'informations et de courbes pour déduire les formes de l'invisible. Il permet par ailleurs de comprendre que les simulations numériques, elles-mêmes issues de propositions théoriques, servent à appréhender le résultat scientifique recueilli auprès des accélérateurs qui sans eux serait vide de sens et donc ininterprétable. Enfin, et pour ajouter un niveau supplémentaire à la modélisation de l'imperceptible, les médiateurs choisissent de présenter des formes dont les histogrammes illustrent parfaitement deux des quatre interactions fondamentales³⁷. Les concepteurs du dispositif offrent au public la possibilité de se représenter la forme géométrique d'une relation physique intangible. Le billotron participe donc lui aussi à illustrer le concept de phénoménoteknikue.

Les dispositifs Herschel

En plus de présenter et valoriser les résultats de la mission Herschel, les différents dispositifs contribuent à la sauvegarde de la mémoire d'un objet qui, par sa fonction même, a été doublement virtualisé puisqu'envoyé dans l'espace et médiateur entre des échelles incommensurables. De manière générale, le télescope n'est plus nécessairement pensé comme un objet matériel mais comme une interface entre l'invisible et l'œil de l'astrophysicien. Le showroom est donc un lieu qui ramène la matérialité d'Herschel à l'esprit du visiteur.

L'écran central

Le dispositif principal du showroom est une application donnant accès aux différents aspects du projet Herschel. Projetée sur un mur central, elle offre une expérience d'immersion particulière (**Fig. XX, cahier couleur**). L'utilisation de l'application se fait à l'aide d'un détecteur de mouvement

37. Les quatre interactions fondamentales sont l'interaction gravitationnelle, l'interaction électromagnétique, l'interaction nucléaire (forte) et l'interaction faible.

qui repère les gestes de la main pour en faire défiler les différentes parties³⁸. Trois aspects sont accessibles : une chronologie du programme accompagnée de photographies ; un détail des différentes composantes technologiques du télescope ouvrant sur des images d'archives et une description à partir d'une reconstitution en 3D ; des résultats scientifiques tirés des données récupérées par Herschel. Si les deux premiers aspects sont repris dans les dispositifs suivants, la partie des résultats scientifiques est ici primordiale. Elle permet en effet de faire comprendre au visiteur l'une des questions épistémologiques qui sous-tend cet espace de médiation à savoir la phénoménotechnique. En proposant une comparaison avec les enregistrements effectués dans le domaine du visible par le télescope spatial Hubble et ceux effectués par Herschel, le dispositif permet de se rendre compte de ce que l'on peut percevoir à travers ce dernier. À l'échelle du visible, les signaux reçus par Hubble nous montrent, pour une galaxie en spirale, un espacement noir entre ses bras laissant penser à une absence de matière. Or, une fois dans l'infrarouge, les images récoltées et traitées montrent qu'il y a toute une activité en cours et invisible à l'œil nu. En effet, dans ces interstices noirs de la galaxie se trouvent de la matière interstellaire, du gaz et de la poussière, dont l'ensemble forme « un réservoir de matière pour fabriquer de futures étoiles »³⁹. Si la lecture de chacune de ces images prises séparément nous offre des morceaux de compréhension de l'activité de l'Univers, les astrophysiciens peuvent les combiner pour former une « méta-image » et s'offrir ainsi une vue densifiée de leur objet d'étude (**Fig. XXI, cahier couleur**). Le traitement numérique permet donc de rendre perceptible, accessible à nos sens, quelque chose qui ne l'est pas naturellement. Ici, les images ne sont donc pas des photos mais bien des interprétations de données qu'il s'agisse aussi bien de celles récoltées par Hubble que par Herschel. Les objets présents dans l'univers deviennent des images-objets, éléments manipulables, objectivables et étudiables et c'est l'humain qui crée finalement ses connaissances par l'assemblage d'images qui deviennent alors des objets-images.

38. À ce dispositif est adjoint le jumeau de l'instrument PACS installé dans l'observatoire Herschel. À la moindre défaillance de ce dernier lors des phases de test, il aurait été remplacé par celui-ci.

39. Citation issue d'une vidéo du site ExplorNova360 sur la galaxie Messier 51.

Explore Space Mission

Explore Space Mission est un portail d'accès à de multiples missions spatiales terminées, en cours ou à venir telles que les programmes Herschel, Euclid, Solar Mission, Athena ou encore le James Web Space Telescope. Relié à la base de données ExplorNova qui est sans cesse alimentée par ses concepteurs, le portail s'actualise en permanence, offrant une expérience d'utilisation dynamique. Le visiteur peut prendre connaissance de l'état d'avancement de chacun des projets grâce à un séquençage du cycle de vie standardisé, organisé autour de cinq grandes étapes : Motivation – Conception – Concrétisation – Exploitation – Valorisation. Pour le moment, seul le projet Herschel est accessible dans la mesure où sa phase de valorisation est bien avancée. Une fois la mission sélectionnée, il est possible d'accéder à deux lignes de temps correspondant pour l'une à l'évolution des technologies d'Herschel et pour l'autre aux activités du segment sol. Des photographies et des vidéos d'archives comme le lancement de la fusée Ariane 5 sont intégrées dans ces lignes de temps. Ce portail permet d'obtenir un nombre important d'informations sur la fabrication, le lancement et l'exploitation d'Herschel.

267 —

Mécanologie

Mécanologie est le dispositif le plus adapté à une utilisation expérimentatrice simple et rapide. Il se compose de deux écrans dont l'un est tactile et propose différentes informations : des éléments succincts de compréhension sur les différentes parties du télescope ; une comparaison des images dans le visible, l'infrarouge et la combinaison d'images ; une vidéo permettant de comprendre comment les données sont captées par l'instrument puis transmises au sol pour traitement. Le dispositif démontre la fabrication d'une image scientifique, de la donnée brute jusqu'à l'image de communication grand public. Il est une version condensée et plus accessible du mur central.

Explornova360

ExplorNova360 est le dernier dispositif de la liste et se décline en diverses applications (Exodunes360 et CERN360) accessibles à tous depuis le web⁴⁰. À partir d'une base lunaire fictive, l'utilisateur a la possibilité d'accéder à de multiples portails lui ouvrant la voie vers la formation des galaxies, les exoplanètes, les nuages moléculaires, etc. Par exemple, l'utilisateur peut choisir de se rendre sur Mars et, à partir des images envoyées par le rover Curiosity, avoir un panorama de l'environnement martien grâce à une série de clichés et voir, en *stop motion*, le robot en action dans ses prélèvements géologiques. L'interaction avec les différents portails dépend du rapport entretenu avec l'élément mis en avant. Ainsi, l'accès à l'information et à la multiplicité des formes d'images (photographie, images de synthèse, etc.) dépend de ce que les astrophysiciens ont récolté. Des photos des dunes de Titan, l'un des nombreux satellites de Saturne, nous sont par exemple rendues accessibles grâce à la sonde Cassini lancée en 1997, arrivée sur place en 2004 et détruite en 2017.

— 268

Retour sur expérience et proposition d'un parcours pédagogique

Nous avons eu par trois fois la possibilité de présenter le showroom. La première en décembre 2018 devant des étudiants et les deuxième et troisième en juin 2019 devant des lycéens ainsi qu'une chercheuse. Bien que la forme de la présentation fût différente en fonction du public, les enquêtes post-visites auprès des deux premiers groupes ne reçurent à chaque fois que très peu de réponses, deux pour le premier, une pour le second⁴¹. Si l'on peut supposer des causes extérieures à l'absence de retour telles que le manque de temps ou d'envie, il faut aussi pouvoir interroger la présentation que nous leur avons fournie. Le showroom est un espace de médiation à plusieurs niveaux. Il est à la fois un lieu de présentation des

40. URL des sites : <http://explornova360.com/> ; <http://exodunes360.fr/> ; <http://experience-cern360.fr/>.

41. L'enquête post-visite auprès de la chercheuse a pris la forme d'une discussion sur les dispositifs et leur accessibilité. Chaque questionnaire était adapté au public visé. Le premier interrogeait principalement la pertinence des dispositifs de médiation, le second portait plutôt sur la perception du contenu par les lycéens.

résultats d'une mission, d'une mémoire laborantine et d'une expérience de physique ; un lieu de réflexion sur la constitution d'un savoir par l'image fabriquée ; un lieu dont l'objet épistémologique s'insère dans une culture de la représentation visuelle des sciences⁴². Le showroom offre la possibilité d'expérimenter différents dispositifs qui peuvent bien évidemment être améliorés mais qui ont le mérite de prendre en considération « l'utilisateur ». En cela, il répond aux prescriptions formulées par Hafizur Rahaman et Beng-Kiang Tan :

“ Les projets actuels de patrimonialisation numérique se concentrent surtout sur le « processus » ou sur le « produit », mais ne considèrent que rarement les « utilisateurs » [...]. Pour une meilleure interprétation et expérience d'un site relevant du patrimoine numérique, il nous faut une méthode d'interprétation inclusive, qui devrait tenir compte de la variété de compétences des utilisateurs, dépasser la linéarité de la narration et la subjectivité dans la création des contenus⁴³.

Minier et Bontems ont cherché à dépasser la simple histoire à raconter et amener les visiteurs à réfléchir à des questions aujourd'hui essentielles à la science. Il manque cependant un élément important qui ferait de ce lieu un espace de médiation complet : un (ou des) parcours pédagogique(s). En effet, la disparité des dispositifs brouille la possibilité d'une médiation claire et organisée qui pourrait mener à de multiples expériences telles que la recherche d'informations précises en manipulant les dispositifs ou bien un jeu de piste qui construise une compréhension des enjeux d'Herschel par l'intermédiaire d'une activité ludique et surtout autonome. Si l'ensemble des dispositifs fait unité dans la réflexion et l'approche d'un projet scientifique de grande envergure, il n'en reste pas moins que l'itinéraire de navigation entre chacun initialement pensé segmente de manière trop brusque l'expérience. Par ailleurs, aujourd'hui, la présentation du showroom implique que le médiateur ait, sur le sujet, un niveau de connaissances très poussé afin de guider sans encombre les différents publics d'un dispositif à l'autre, les maintenant de fait dans une passivité non pas d'écoute mais d'action. Cet espace d'expérimentation en médiation est donc à la fois opportuniste dans sa constitution même puisqu'issu d'un travail mené

42. Pour un panorama rapide, voir Bigg, 2012.

43. Rahaman et Tan, 2011 : citation traduite par Musiani et Schafer, 2017.

pour le CEA sur le projet Herschel et incomplet. Nous souhaiterions ici, sur la base d'une séance pédagogique avec un public particulier, proposer des éléments de réflexion afin d'orienter une présentation future et offrir une ligne de médiation claire. Nous prendrons comme cas exemple la visite des lycéens en juin 2019 plutôt que celle des étudiants de décembre 2018, spécialisés dans la médiation et qui s'intéressaient principalement à la pertinence des dispositifs dans une approche muséographique plutôt qu'aux contenus de ceux-ci.

La notion que nous souhaiterions travailler avec les élèves est celle de phénoménoteknique, comme souhaité par les concepteurs. Si nous devons leur donner une définition simple du terme, nous pourrions dire qu'aujourd'hui, qu'il s'agisse de l'infiniment grand ou de l'infiniment petit, les instruments scientifiques sont des intermédiaires essentiels à la création de la connaissance, permettant d'atteindre des échelles inaccessibles aux sens⁴⁴. En somme, le questionnement auquel les élèves devraient répondre est de savoir comment les instruments interagissent avec la construction de la connaissance scientifique. L'introduction générale devra présenter la découverte de l'infrarouge en expliquant de manière simple l'expérience de William Herschel en 1800⁴⁵ et donc rappeler que les corps émettent des rayonnements invisibles à l'œil nu. La réflexion pourra démarrer par une question du type « d'où viennent la lumière et la chaleur ? ». Pour cela, le médiateur pourra s'aider d'un exemple particulier qui est celui des caméras infrarouges très présentes aujourd'hui. Le public devra ensuite se diviser en deux groupes.

Le premier sera amené à traiter deux sous-questions en rapport à la technologie que sont la manière dont le télescope capte le rayonnement de la galaxie observée et la manière dont il convertit les signaux afin de les envoyer vers les laboratoires au sol. À l'aide de schémas simples et du dispositif « Mécanologie », les élèves pourraient représenter de manière

44. Pensons par exemple aux travaux de Robert Hooke, savant anglais de la *Royal Society*, qui en 1665 entreprend de découvrir un nouveau monde, minuscule, à l'aide de son microscope. Il publiera cette année-là *Micrographia*, ouvrage majeur sur cette *Terra incognita* comme il l'appelle lui-même.

45. De manière simplifiée, Herschel a eu l'idée de placer un thermomètre à mercure dans le spectre de la lumière obtenu par un prisme de verre afin de mesurer la chaleur propre à chaque couleur. Le thermomètre indique que la chaleur reçue est la plus forte du côté rouge du spectre, y compris au-delà de la zone de lumière visible, là où il n'y avait plus de lumière. C'était la première expérience montrant que la chaleur pouvait se transmettre indépendamment d'une lumière visible.

diagrammatique l'interception du rayonnement, sa concentration en un faisceau dirigé vers les instruments de mesure, la transduction et l'envoi vers le segment sol. Le second groupe serait pour sa part affecté à la lecture des données imagées enregistrées en laboratoire sans avoir d'informations en amont sur la manière dont elles ont été produites. Avec les connaissances obtenues lors de l'introduction, les élèves seraient en mesure, avec l'aide d'un médiateur, de comprendre ce que représentent les variations de couleurs sur une image enregistrée par Herschel. Cette dernière serait alors à mettre en relation avec des images prises par le télescope Hubble dans le domaine du visible afin de comparer les similitudes et les différences. Il serait ensuite question de la combinaison des images qui illustrerait la nécessité d'une superposition des longueurs d'onde pour avoir, en une « méta-image », un ensemble de connaissances. Pour aider à la compréhension, le médiateur pourra utiliser l'exemple de l'astrophotographie qui demande, pour obtenir une image nette d'une étoile, l'assemblage de dizaines de clichés du même astre. Cela lui permettrait de montrer que les connaissances ne sont pas nécessairement fondées sur une « prise de vue directe » de l'objet mais sur une combinaison formant un tout cohérent.

Enfin, une restitution par les deux groupes de leurs réflexions respectives offrirait à chacun une vue d'ensemble du processus de fabrication des images en astrophysique et leur traitement en tant que contenant de connaissances. Inverser les rôles et les mettre dans la peau du médiateur ne peut que stimuler davantage leurs échanges et questionnements. Le médiateur coordinateur aurait principalement pour rôle de fixer les cadres et répondre aux questions qui ne trouveraient pas de réponse. Une approche de la sorte permettrait certainement, avec l'aide des différents dispositifs disponibles, de creuser davantage la réflexion sur ce que signifie construire une image et en tirer des connaissances. De la sorte, l'épistémologie soutenant l'existence du showroom serait à même d'être mieux appréhendée par les élèves. De plus, cela les confronterait en creux à l'obstacle épistémologique de l'image comme prise de vue directe⁴⁶ et donc au rapport entre science et régime de vérité. Comme le soulignent Gérard Sensevy et Jérôme Santini :

46. Pour d'autres exemples de l'utilisation de la notion d'obstacle épistémologique en didactique, voir les travaux de la revue *RDST* (Recherches en didactique des sciences et des technologies) issues de la fusion des revues *Aster* et *Didaskalia*.

“ [...] les sciences produisent des modèles explicatifs du monde, mais pas du monde tel qu’il est, bien plutôt du monde tel qu’il est reconstruit dans l’enceinte expérimentale : cela ne diminue en rien la vérité des assertions scientifiques, et la conception empirique n’est nullement relativiste. Au contraire, pourrait-on dire, puisqu’elle décrit la science comme production complexe et organisée de la *vérité* (au sein de ces situations représentées par des modèles hautement spécialisés), le « localisme » seul pouvant précisément garantir cette vérité : il s’agit donc de réévaluer l’importance des situations dans lesquelles le vrai s’élabore⁴⁷.

Les élèves comprendraient alors que la « vérité scientifique » ne dépend pas des sens mais de la construction progressive des connaissances en fonction des découvertes, des technologies développées et des interprétations émises par les chercheurs.

Dans un idéal de symétrisation, il faudrait compléter ce parcours avec un second, destiné aux étudiants et chercheurs, qui partirait d’une question scientifique (« comment naissent les étoiles ? ») et d’une question réflexive (« comment garder la mémoire d’une découverte ? ») qui passerait directement par le mur puis par le cabinet de curiosités et la base de données. Si la première question voit sa réponse s’établir avec les résultats collectés par l’observatoire, la seconde la trouverait dans la constitution et l’utilisation même des différents dispositifs. La conservation de la trace s’effectue ici à une double échelle. Il y a d’abord la conservation de la mémoire du projet spatial lui-même. Les images d’archives, les objets tels que le module PACS, les résultats informatiquement traités ou encore l’exploration de la bibliométrie, rendue possible par l’alimentation de la base de données, permettent un voyage dans la mémoire d’Herschel. Ajoutons par ailleurs que si ce dernier point était mieux développé, les différents publics auraient alors l’occasion de voir se matérialiser devant leurs yeux les interactions entre un projet et le monde de la recherche par le biais des citations, des référencements, etc., donnant de fait corps à une infime partie du réseau scientifique⁴⁸.

47. Sensevy et Santini, 2006, p. 165.

48. Pour des réflexions sur ces questions, voir par exemple les travaux de Vincent Larivière, professeur titulaire à l’École de bibliothéconomie et des sciences de l’information de l’Université de Montréal.

Néanmoins, la pertinence du parcours pédagogique supplémentaire se placerait dans le fait d'interroger la mémoire même de la constitution de ce showroom. Correctement pensée, cette démarche offrirait une prise de recul importante qui permettrait aux étudiants et aux chercheurs de penser la constitution et l'organisation d'un lieu propre à la conservation d'une mémoire. Penser à conserver est une chose mais penser son encadrement et son épistémologie en est une autre. Cet aspect réflexif sensibiliserait ces deux publics à des problématiques souvent laissées de côté par eux-mêmes dans leur travail. Le showroom pourrait alors être alimenté par un autre dispositif qui présenterait le travail mené par Minier et Bontems avec les experts du projet Herschel, illustrant à la fois la méthode d'extraction de connaissances qu'ils emploient mais permettant aussi de montrer aux scientifiques que leurs savoirs explicite *et* tacite sont une source essentielle de connaissances à la fois pour le monde des découvertes et celui de la médiation. L'idée est de sensibiliser les chercheurs à pérenniser leur travail au-delà de l'article ou du livre scientifique.

Conclusion

Le showroom est une expérience de médiation à plusieurs niveaux. Il est d'abord la trace d'une recherche menée sur l'histoire technologique d'Herschel. Il permet de s'interroger sur l'objet technique en lui-même et non pas seulement sur sa production de données grâce à une approche mécanologique qui offre la possibilité de questionner les individualités de chaque partie du télescope. Son incorporation dans le projet de recherche ExplorNova permet d'investir la production d'un savoir scientifique sur l'Univers à travers un instrument technique qui n'est pas qu'une simple interface mais qui a sa propre matérialité. Cependant, le showroom n'est pas le fruit de sa réflexion initiale parce qu'opportuniste et inachevé. Pensé d'abord comme un lieu de stockage mais aussi de démonstration d'un savoir-faire dynamique en matière de médiation numérique, le showroom n'en est pas moins devenu l'un des gardiens de la mémoire du programme Herschel par l'intermédiaire d'ExplorNova. Si les orientations de médiation sont aujourd'hui plutôt bien définies, il lui manque encore certains dispositifs pour faire des visiteurs des « utilisateurs » au sens immersif et non consumériste du terme. Si les concepts de phénoménoteknikue et d'objet-image sont préhensibles par tout public, indépendamment du

niveau d'explication, il reste encore à travailler des parcours et des activités qui offrirait à ce visiteur son autonomie de compréhension pour en faire un utilisateur émancipé, pouvant presque, dans certains cas, faire fi du médiateur. Les concepteurs ont produit des « individus de médiation » mais ils ont insuffisamment pensé leur synergie au sein d'un « ensemble de médiation », il reste donc à passer d'un espace Recherche-Action à un réel espace de médiation.

Bibliographie

- APPADURAI Arjun (dir.), *The social Life of Things. Commodities in Cultural Perspective*, Cambridge University Press, Cambridge, 1988.
- BACHELARD Gaston, *La Formation de l'esprit scientifique*, Vrin, Paris, 1938.
- BACHELARD Gaston, *Le Nouvel Esprit scientifique*, Presses universitaires de France, Paris, 1934.
- BARTHES Roland, *La Chambre claire. Note sur la photographie*, Éditions de l'Étoile/Gallimard/Seuil, Paris, 1980.
- BIGG Charlotte, « Les études visuelles des sciences : regards croisés sur les images scientifiques », *Histoire de l'art*, n° 70, 2012.
- BONTEMS Vincent, MINIER Vincent, « L'astrophysique, l'objet-image et la culture numérique. L'amplification culturelle de la technologie spatiale à la lumière de Simondon », dans STIEGLER Bernard (dir.), *La vérité numérique. Recherche et enseignement supérieur à l'ère des technologies numériques*, FYP éditions, Limoges, 2018.
- BONTEMS Vincent, *Bachelard*, Les Belles Lettres, Paris, 2010.
- DUBOIS Philippe, « De l'image-trace à l'image-fiction », *Études photographiques*, n° 34, printemps 2016, en ligne : <http://journals.openedition.org/etudesphotographiques/3593>.
- DURAMPART Michel, « La médiation technologique : entre réalité et immanence des évolutions organisationnelles liées à la diffusion des TIC », *Communication et organisation*, n° 19, 2001, en ligne : <http://journals.openedition.org/communicationorganisation/2482>.
- GUNTHERT André, « Une illusion essentielle », *Études photographiques*, n° 34, printemps 2016, en ligne : <http://journals.openedition.org/etudesphotographiques/3592>.
- GUY Thomas, « Les lignées techniques de bolomètres. Mécanologie génétique et lois log-périodiques », mémoire de master en histoire et philosophie des sciences, École nationale supérieure de techniques avancées, 2016.
- JURDANT Baudouin, *Les problèmes théoriques de la vulgarisation scientifique*, Archives Contemporaines, Paris, 2009.

- JUTANT Camille, BOBROFF Julien, « Objets de médiation de la science et objets de design. Le cas du projet “Design Quantique” », *Communication & langages*, n° 183, 2015, en ligne : <https://www.cairn.info/revue-communication-et-langages1-2015-1-page-9.htm>.
- LÉVY-LEBLOND Jean-Marc, *La Vitesse et l'ombre. Aux limites de la science*, Seuil, Paris, 2006.
- MINIER Vincent *et al.*, *Inventing a Space Mission. The Story of the Herschel Space Observatory*, Springer, Suisse, 2017.
- MUSIANI Francesca, SCHAFFER Valérie, « Patrimoine et patrimonialisation numériques », *RESET*, n° 6, 2017, en ligne : <http://journals.openedition.org/reset/803>.
- PILBRATT Göran, « Herschel Space Observatory. An ESA facility for far-infrared and submillimetre astronomy », *Astronomy & Astrophysics*, special feature, n° 58, 2010.
- RAHAMAN Hafizur, TAN Beng-Kiang, « Interpreting Digital Heritage: A Conceptual Mode With End-Users' Perspective », *International Journal of Architectural Computing*, 9 (1), 2011, p. 99-113.
- RAINETTE Caroline, CORNU Marie, WALLAERT Catherine, *Guide juridique à l'usage des professionnels du patrimoine scientifique et technique*, L'Harmattan, Paris, 2008.
- RANCIÈRE Jacques, *Le spectateur émancipé*, La Fabrique, Paris, 2008.
- RANCIÈRE Jacques, *Le destin des images*, La Fabrique, Paris, 2003.
- SENSEVY Gérard, SANTINI Jérôme, « Modélisation : une approche épistémologique », *Aster*, n° 43, 2006, p. 163-188.
- SIMONDON Gilbert, *Sur la Technique*, PUF, Paris, 2014a.
- SIMONDON Gilbert, *Imagination et Invention (1965-1966)*, PUF, Paris, 2014b.
- SIMONDON Gilbert, *Du mode d'existence des objets techniques*, Aubier, Paris, 2012.
- VIAL Stéphane, « Ce que le numérique change à autrui : introduction à la fabrique phénoménoteknikue de l'altérité », *Hermès*, n° 68, 2014, p. 151-157.

L'auteur

Yohann Guffroy est doctorant à l'École polytechnique fédérale de Lausanne. Il fait actuellement sa thèse sous la direction de Jérôme Baudry et Liliane Hilaire-Pérez sur le thème du dessin technique en Angleterre entre 1750 et 1850. Il est notamment le coauteur avec Vincent Bontems d'un article publié dans la revue *Artefact* en 2018 sous le titre : « La mécanologie : une lignée technologique francophone ? »