

# LA RÉVOLUTION SCIENTIFIQUE N'EST PAS SORTIE DE LA LUNETTE DE GALILÉE

THOMAS LE REUN

L'enseignement de l'histoire des sciences occidentales, et en particulier de l'histoire de la physique, ne se limite très souvent qu'à l'évocation de quelques noms fameux. Dans le cas de la révolution scientifique, *i.e.* l'émergence d'une science nouvelle entre les XVe et XVIIe siècles, on ne cite presque toujours que les contributions de savants tels que Copernic (1473-1543), Galilée (1564-1642) et Newton (1643-1727). À partir de recherches bibliographiques basées sur la lecture d'*Une histoire populaire des sciences* de Clifford Conner [1], je tente d'établir en quoi une telle simplification ne suffit pas à décrire les origines de cette révolution. Des études récentes en sociologie des sciences ont en effet montré que davantage de crédit devrait être accordé aux artistes, artisans, navigateurs et autres travailleurs manuels d'alors. Ils ont en effet largement contribué à transformer le regard sur le réel, qu'il s'agisse des artistes développant de nouvelles techniques afin de mieux reproduire la nature, ou des artisans qui, au gré de leurs essais et erreurs, ont contribué à développer la méthode expérimentale moderne, souvent attribuée à Galilée ou Gilbert (1544-1603) seuls. L'objectif n'est pas tant d'ajouter de nouveaux noms au panthéon des grands scientifiques, ni de négliger la contribution de ceux qui s'y trouvent, mais bien de montrer en quoi l'apport des artistes et artisans a été nécessaire à la révolution scientifique.

Les références à l'histoire des sciences se résument souvent à une mythologie laïque faite des grands savants qui, les premiers, ont rejeté l'ancien ordre pour en bâtir un nouveau, très proche de celui que nous conservons aujourd'hui. Ainsi, Copernic est célébré comme l'inventeur du système solaire, Galilée le découvreur de Jupiter et de ses satellites et Newton le père de la gravité. Magellan, en ayant le courage d'accomplir une circumnavigation, prouve quant à lui que la Terre est bien ronde. Au gré de nos études, nous apprenons plus précisément que Galilée fonde la méthode scientifique et expérimentale moderne et se donne pour principe de chercher la vérité autour de lui plutôt que dans la Bible ou chez Aristote. Il réalise des expériences précises et quantifiées à l'aide des mathématiques, nouvellement introduites au service des sciences naturelles. Cette mathématisation du réel qu'il initie connaîtra son formidable aboutissement chez Newton, souvent réduit à un génie désintéressé trouvant à partir de quelques lois comment s'ordonne l'ensemble de l'univers.

Depuis le milieu du XXe siècle, cette vision de l'histoire des sciences et de l'histoire en général, centrée autour d'une poignée de personnages, est largement remise en cause. Il s'agit non pas de diminuer leurs mérites mais davantage d'en redonner à une foule d'anonymes dont le travail a été nécessaire. Le propos de ces recherches porte

bien sur la fonction de ces anonymes dans la société, et ne consiste pas en premier lieu à élargir ou renverser la liste des savants illustres. Un long mais passionnant résumé de ces recherches se trouve dans *Une histoire populaire des sciences* de C. Conner [1].

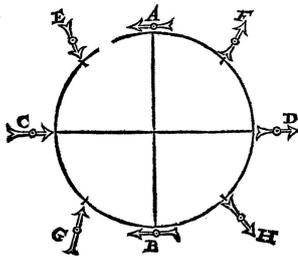
La lecture de l'introduction peut décontenancer, le propos étant volontairement militant. Accepter qu'il existe une connaissance poussée hors des lieux traditionnels de la science (universités, laboratoires, académies, etc.), cela suppose un changement radical de point de vue, particulièrement pour une personne qui, justement, est au cœur de ce système. À titre d'exemple on peut y lire comment, grâce à une connaissance empirique très précise de l'astronomie et de la météorologie, les populations du Pacifique n'ont pas attendu les Européens pour échanger et se déplacer sur de très grandes distances, franchissant allégrement plusieurs centaines de miles de haute mer.

Le propos de cet article est de savoir ce qu'il advient de la révolution scientifique, ce grand bouleversement allant du XVe au XVIIIe siècle, lorsqu'on l'envisage sous ses aspects populaires. Plus précisément, nous verrons que cette révolution a pu tirer ses principaux traits, à savoir la méthode expérimentale et la mathématisation du réel, chez les artisans, artistes et autres travailleurs manuels d'alors.

## 1. GILBERT, ZISEL ET LA NAISSANCE DE LA MÉTHODE EXPÉRIMENTALE MODERNE

Comme on peut le lire dans tout livre d'histoire des sciences, William Gilbert, médecin anglais ayant étudié à Cambridge, est le premier à faire preuve, dans son ouvrage *De Magnete* [2], d'une méthode scientifique moderne. Son étude du magnétisme se fonde sur une approche entièrement expérimentale, se fiant à ses propres résultats plutôt qu'à une quelconque autorité — par exemple Aristote, très à la mode en ce temps là.

Ainsi, Gilbert montre rigoureusement que magnétiser du fer ne fait pas varier la masse de celui-ci, réfutant une vieille croyance.



**Fig. 1** Mesure de la direction du champ magnétique autour d'un aimant sphérique. Gravure extraite de *De Magnete* [2, p. 189].

Il s'intéresse également à la direction du champ magnétique autour d'aimants sphériques (voir Figure 1), rectangulaires, entre deux aimants et dans encore plein d'autres configurations inimaginables. Les instruments qu'il emploie pour réaliser ces cartes de champs, qui sont en fait des boussoles, servent par ailleurs à l'étude détaillée du champ magnétique terrestre. Parmi les quelques mesures quantitatives, on trouve d'ailleurs une évaluation de l'inclinaison du champ magnétique terrestre par rapport à l'horizontale, mais aussi de la déclinaison, *i.e.* le décalage entre les nords magnétique et géographique.

Autre fait très intéressant pour nous, Gilbert décrit précisément la manière dont sont fabriquées les aiguilles de boussole à partir d'une masse de fer. On trouve même dans *De Magnete* une gravure représentant le travail en question (Figure 2), qui est clairement celui d'un forgeron.

En 1941, un historien des sciences et des idées autrichien, Edgar Zilsel (1891-1944), pose la question suivante [3] : d'où vient la méthode scientifique de Gilbert ? Plutôt que de remonter la bibliographie pour tenter de percevoir chez un auteur antérieur les prémices d'une méthode scientifique, Zilsel choisit d'opérer un changement radical de point de vue. Selon lui, la source de la méthode de Gilbert est implicitement mentionnée tout au long de son ouvrage : ce sont les artisans, mineurs, navigateurs et autres travailleurs manuels qui l'ont inspirée. Ce qui l'interpelle notamment, c'est la fabrication des aimants mentionnée plus haut. Elle est maîtrisée par les forgerons du XVI<sup>e</sup> siècle qui en vendent aux armateurs et il est évident qu'elle ne peut être l'invention de Gilbert seul. Une partie de son travail fut donc d'aller à la rencontre des forgerons et d'apprendre d'eux cet art.

Zilsel va encore plus loin et justifie que le travail des artisans comprend une part de méthodologie que l'on retrouve dans les sciences modernes [3, p. 14]. Avec la fin des corporations du Moyen-Âge, les artisans ne partagent plus les secrets de leur ordre et entrent en concurrence. Celle-ci engendre l'innovation, elle-même conséquence de nombreux essais-erreurs-trouvailles réalisés au gré d'hypothèses sur de nouveaux procédés de fabrication ou de transformation.



**Fig. 2** Fabrication d'une aiguille de boussole par un forgeron. Gravure extraite de *De Magnete* [2, p. 139]. On note qu'il maintient une direction nord-sud (*septentrio-auster*) constante.

Il est encore possible de rétorquer que Gilbert se distingue des travailleurs manuels par l'originalité de ses expériences. Il s'avère en réalité que nombre d'entre elles ont été réalisées et publiées en anglais antérieurement par un ancien navigateur reconverti dans la fabrication de boussoles, Robert Norman [4]. De nombreuses concordances entre les expériences montrent qu'il est peu probable que Gilbert n'ait pas été au courant [3, p. 20].

L'intérêt de Norman pour le magnétisme est avant tout motivé par son expérience personnelle de navigateur. Le grand problème de la marine du XVII<sup>e</sup> siècle, dans le contexte du développement des routes commerciales européennes tout autour du monde, est la mesure de la longitude. Se basant sur ses mesures personnelles et celles d'autres marins, il avance que la déclinaison du champ magnétique terrestre, variant notamment suivant une direction est-ouest, pourrait être un moyen de se repérer sur le globe<sup>1</sup> [4, p. 41]. C'est l'un des objectifs de son ouvrage : mieux connaître le magnétisme pour mieux le mettre au service de la navigation. Comment procède-t-il ? Il se présente lui-même comme un homme de peu de science : son seul moyen d'accès au savoir selon lui est l'expérience. Aussi écrit-il dans l'avant-propos de *The newe attractive* [4, p. 9] :

Wherein I meane not to use barely, tedious Conjectures or imaginations : but briefly as I may to passe it over, grounding my Arguments onely uppon experience, reason, and demonstration, which are the grounds of Arts.

1. Cette idée sera contrariée par les variations temporelles de déclinaison, et ce sera le chronomètre de marine qui apportera la solution au début du XVIII<sup>e</sup> siècle.

Gilbert n'aurait-il donc aucun mérite ? Il peut être soupçonné de ne pas toujours citer ses sources, mais nombre de ses expériences sont cependant originales. Par ailleurs, c'est le premier érudit — publié — qui s'intéresse au travail manuel, apprend des artisans, navigateurs et mineurs. Il initie ainsi chez les personnes ayant reçu une éducation universitaire une reconsidération du savoir scientifique et de la manière de l'acquérir, auparavant réduite à une méthode déductive pure.

## 2. L'APPORT DES ARTISTES

Il y a dans le propos de Norman cité plus haut un mot anodin : « Arts ». Au XVII<sup>e</sup> siècle, la distinction entre technique et art est encore moins nette qu'aujourd'hui, à tel point que les deux activités se confondent sous le même terme. Parallèlement à la révolution scientifique, on parle souvent du renouveau artistique de la Renaissance, que l'on caractérise par l'avènement de la perspective — une géométrisation de la nature — et plus généralement par une volonté d'exactitude par rapport au sujet représenté, tant dans les proportions générales — toujours de la géométrie, donc — que dans le détail, notamment lorsqu'il s'agit de reproduire la nature. Ainsi Vasari, peintre et architecte italien du XVI<sup>e</sup> siècle, commence sa biographie de Giotto en annonçant [5, p. 102] :

Les peintres sont sous la dépendance de la nature : elle leur sert constamment de modèle ; ils tirent parti de ses éléments pour s'ingénier à la copier et à l'imiter.

L'étude de la révolution scientifique envisagée selon le travail manuel fait apparaître l'influence des peintres, architectes et sculpteurs. Pamela Smith a consacré une partie de son ouvrage *The body of the artisan* [6] à montrer qu'ils y ont contribué de deux manières : par leur désir d'imitation des formes, d'une part, et leur désir de maîtriser la nature, d'autre part.

Pour connaître la nature, il faut aller à son contact et l'observer de près, ce qui est un trait majeur de la science nouvelle. Ce souci d'exactitude s'applique également dans les proportions, qu'il s'agisse de celles du corps humain ou de celles des objets disposés dans l'espace — la perspective. On comprend donc que la mathématisation de la nature n'est pas apparue uniquement dans les travaux de Galilée ; au contraire, c'est une idée qui se répand largement dans les ateliers des artistes de cette époque.

Chez les artistes apparaît également la maîtrise des matières premières. Prenons l'exemple d'un peintre : il fabrique avec ses apprentis les couleurs employées dans son atelier. À partir de diverses substances naturelles (huiles, pierre broyée, pigments, etc.), il doit pouvoir composer des pâtes dont les couleurs et les tons imitent ceux que l'on trouve dans la nature [6, p. 97]. Ici encore, cela implique un grand nombre d'essais, d'erreurs et d'hypothèses, qui aboutissent notamment à une connaissance empirique accrue des matières naturelles.

Cette volonté de maîtrise technique de la nature apparaît de manière encore plus frappante chez le céramiste Bernard Palissy (1510-1590). Formé à la peinture sur verre, ce huguenot se fixe comme objectif d'apprendre

lui-même l'art de la céramique après avoir vu une porcelaine chinoise [6, p. 100]. Il parvient à une maîtrise inédite et minutieuse de son art (Figure 3) au terme d'une longue expérimentation. Celle-ci lui apporte une connaissance des matériaux géologiques (sels, minéraux, argiles), mais aussi des techniques de cuisson propres à obtenir les meilleurs effets, qu'il expose dans les *Discours admirables* [8], long dialogue opposant deux personnages appelés *Théorique* et *Practique*.

Une objection majeure à la contribution des artistes peut cependant être soulevée : contrairement aux sciences, les arts n'ont pas de visée explicative [6, p. 24]. Pourtant, au XVI<sup>e</sup> siècle, rien n'empêche un artiste ou artisan d'utiliser son observation de la nature pour en tirer des explications. C'est d'ailleurs l'objet de toute une partie des *Discours admirables*. De ces observations géologiques, Palissy tire par exemple une explication de la formation des fossiles qui n'est pas si absurde et qui par ailleurs est en contradiction avec la théorie selon laquelle le déluge aurait jeté ça et là poissons et coquillages : pour lui, l'eau les contenant s'est partiellement pétrifiée, figeant avec elle une substance saline des animaux qui s'y trouvaient [8, p. 214].

On peut de plus mentionner une célèbre étude du mouvement de l'eau réalisée par Léonard de Vinci (1452-1519) (Figure 4). Les spécialistes d'hydrodynamique sont souvent frappés par le fait qu'il représente autant de tourbillons imbriqués, et la note apposée sous l'esquisse préfigure tout le développement moderne de la théorie de la turbulence des fluides. Il ne s'agit pas d'une anticipation fortuite, car cette imbrication n'est rien de plus que ce qu'une observation minutieuse du phénomène révèle. Il n'en reste pas moins que seule une main entraînée pouvait rendre compte d'une telle complexité. Ce dessin de Léonard de Vinci s'inscrit dans une longue étude visant à comprendre les divers mouvements de l'eau, comme en atteste le texte annotant le dessin et avec lui toute une partie de ses carnets [9]. On note donc en réponse à l'objection

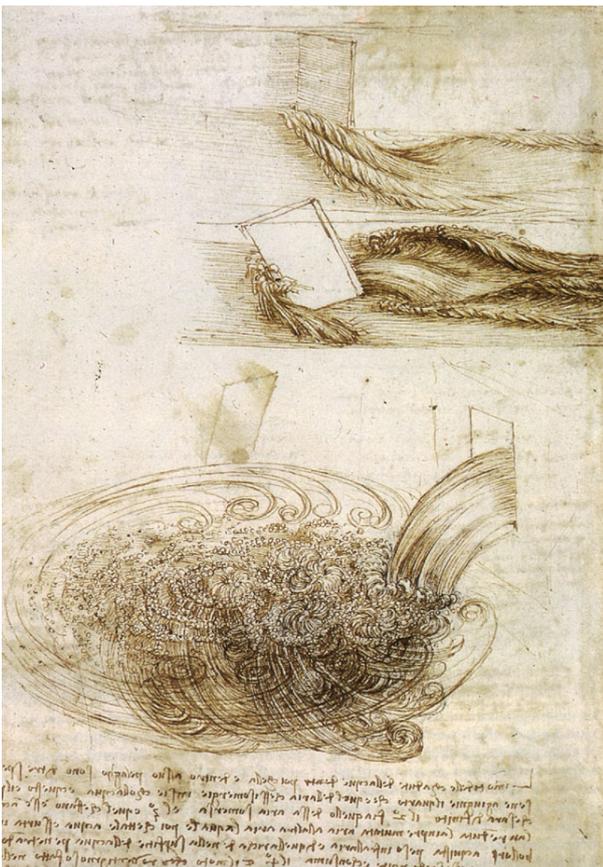


**Fig. 3** Reproduction lithographiée d'une céramique de Bernard Palissy extraite de la *Monographie de l'œuvre de Bernard Palissy : suivie d'un choix de ses continuateurs ou imitateurs* [7].

mentionnée plus haut que la contribution des artistes et artisans ne saurait être réduite à une simple accumulation de connaissances empiriques et techniques. Il peut se trouver dans leur démarche une dimension explicative qui se retrouve dans la méthode expérimentale moderne.

### 3. LE TRAVAIL MANUEL OU LA THÉORIE DE COPERNIC ?

La question que je souhaiterais soulever ici concerne l'influence réelle des artistes, artisans, navigateurs, alchimistes, arpenteurs et autres travailleurs manuels de la Renaissance sur la construction de la science moderne. S'il est maintenant clair que le travail et la méthode de ces métiers sont propices à la construction d'une nouvelle connaissance fondée sur l'expérience, il est moins évident qu'elles ont réellement influencé la science « normale », malgré le cas de William Gilbert. Leur production n'étant pas directement théorique, elle est rarement mise en avant dans une histoire qui présente la révolution scientifique comme une révolution théorique ayant pour point de départ la thèse héliocentrique de Copernic [6, p. 18].



**Fig. 4** Léonard de Vinci, *Études de l'eau passant des obstacles et tombant dans un bassin* [10]. Le texte adjoint est le suivant : « Observe le mouvement de l'eau à sa surface, qui ressemble à celui de la chevelure, laquelle en a deux, l'un suivant l'ondulation de la surface, l'autre les lignes des courbures ; ainsi l'eau forme des tourbillons qui suivent en partie l'impulsion du courant principal, et en partie les mouvements ascendants et incidents. » [9, p. 110]

Dans notre mythologie de l'histoire des sciences, c'est Galilée qui renverse tout, d'un coup, tout seul, en se battant à coup de lunette astronomique contre l'obscurantisme ecclésiastique. *Et pourtant elle tourne!* Un jour il décide de lancer des boulets de canon depuis le haut de la Tour de Pise — qui heureusement est déjà légèrement penchée — et montre au monde entier de manière irréfutable que la masse n'influe pas le temps de chute, contredisant Aristote et avec lui toute l'Église. Ainsi naît l'expérimentation moderne et la nouvelle manière de produire du savoir théorique, à partir de l'expérience.

À rebours de cette image d'Épinal de l'histoire des sciences, à partir du XVe siècle, les artistes/artisans innovent, produisent de nouveaux objets, créent un art imitant le réel apprécié par les classes dirigeantes — Palissy sera le céramiste de Marie de Médicis. La découverte de nouvelles terres et de nouvelles richesses motive un nouvel intérêt pour les navigateurs, arpenteurs et cartographes. Tout ceci attire l'attention sur un groupe de personnes possédant une maîtrise et un savoir nouveaux. Galilée ne s'y trompe pas et écrit en 1638 dans son *Discours concernant deux sciences nouvelles* (cité dans [1, p. 361]) :

Quel large champ de réflexion me paraît ouvrir aux esprits spéculatifs la fréquentation assidue de votre fameux arsenal, [...] particulièrement le quartier des « travaux mécaniques ». Toutes sortes d'instruments et de machines y sont en effet constamment mis en œuvre par un grand nombre d'artisans dont certains, tant par les observations que leurs prédécesseurs leur ont léguées que par celles qu'ils font sans cesse eux-mêmes, allient nécessairement la plus grande habileté au jugement le plus pénétrant.

En 1620, Francis Bacon (1561-1626), philosophe anglais, appelle quant à lui à une « nouvelle philosophie, ou science active » [6, p. 18], qu'il propose d'établir à partir du savoir des artisans. Il dresse d'ailleurs une longue liste des métiers dans lesquels puiser cette nouvelle connaissance [1, p. 317]. On voit donc l'importance gagnée par les artistes et artisans ; elle conduit progressivement à l'intégration de ce savoir et de ces méthodes nouvelles chez les savants érudits et les universitaires.

### 4. LA SCIENCE SANS GALILÉE

Au terme de cet article nous voyons que la science ne serait pas telle que nous la connaissons sans la contribution des artistes et artisans. Ils ont alimenté la révolution scientifique par leur manière novatrice d'appréhender le réel fondée sur l'expérience et la géométrisation. Ces méthodes sont pour eux qui n'ont pas reçu d'éducation latine le seul moyen d'accès à la connaissance. Leurs écrits montrent de plus qu'ils ne se contentent pas d'amasser des savoirs-faire, mais s'inscrivent bien dans une démarche de connaissance du réel.

À l'inverse, nous pouvons reproduire la même expérience de pensée mais en ôtant cette fois-ci Galilée et Newton — pour ne citer qu'eux. Nous comprenons alors que l'apport déterminant de ces scientifiques « de métier » a été de réaliser une synthèse des nouvelles méthodes issues de l'artisanat en y adjoignant la méthode déductive transmise par le monde grec. Sous leur impulsion, les théories scien-

tifiques modernes s'élaborent via un dialogue entre théorie et pratique, entre les connaissances issues d'un processus de déduction et celles tirées de l'expérience.

Pour terminer cette discussion, on peut s'interroger sur ce qu'il advient du lien entre savants et artisans dans les autres civilisations, par exemple en Asie de l'Est. Est-ce que cette distinction existe ? Si oui, est-ce que des échanges se font entre les deux activités ? Y a-t-il eu des moments critiques semblables à la révolution scientifique occidentale dans l'histoire de la civilisation chinoise ?

Répondre à toutes ces questions avec précision demanderait un nouvel article. On peut cependant mentionner la comparaison des mondes occidentaux et chinois réalisée par le sinologue Joseph Needham (1900-1995) [11], tendant à montrer qu'il n'existe pas de signes d'un bouleversement analogue à la révolution scientifique dans la civilisation chinoise. Étonnamment, les raisons avancées par Needham et la plupart des sinologues qui l'ont suivi [12] sont principalement sociologiques. Elles ont trait davantage à l'organisation de la société chinoise plutôt qu'à l'absence en Chine d'une pensée abstraite comparable à celle des Grecs.

### POUR ALLER PLUS LOIN

Si cet article a éveillé votre curiosité, voici une description plus précise des ouvrages et articles qui ont servi à sa rédaction.

Comme dit en introduction, *Une histoire populaire des sciences* [1] cherche à faire la lumière sur les aspects « populaires » de la construction de la connaissance scientifique à travers les époques. C'est une lecture captivante et instructive. Bien que parfois trop radical, l'ouvrage n'en est pas moins pertinent. *The body of the artisan* de Pamela Smith [6] se concentre plus spécifiquement sur l'apport des artistes, artisans et alchimistes à la révolution scientifique. Il traite en plus de la fin de la révolution scientifique où, après quelques siècles d'échanges intenses, les arts et les sciences vont se séparer pour ne conserver que l'aspect purement technique de leurs relations. L'ensemble du livre est illustré de très belles reproductions en couleurs des œuvres évoquées par l'auteure ; il s'agit donc de plus d'un très beau livre. Si vous préférez un retour au texte, j'ai mis en références les écrits des personnes citées lorsque je les ai trouvées en ligne, notamment sur [Gallica](#) ou son équivalent américain [Archive.org](#).

Sur le lien actuel entre turbulence des fluides et arts, évoqué à travers les travaux de Léonard de Vinci, on peut lire un article dans la revue en ligne *Nautilus*, qui, étonnamment, s'intitule « The scientific problem that must be experienced » [13]. Plus généralement, *Nautilus* est une revue de vulgarisation scientifique originale et illustrée par des artistes professionnels.

Concernant la navigation pré-européenne dans l'océan Pacifique mentionnée en introduction, il existe plusieurs articles de recherche récents retraçant les vagues de colonisation de cet océan reconstruites par des méthodes linguistiques et biologiques. L'article de synthèse de Lisa Matisoo-Smith [14] en fait partie et reste très accessible dans ses premiers paragraphes.

Enfin, pour en savoir plus sur la science et la civilisation

chinoise, je recommande la lecture de l'ouvrage de Joseph Needham, *La science chinoise et l'Occident* [11], qui est synthétique, clair et captivant. On pourra également trouver une introduction dans l'émission de la BBC Radio 4 *In our time* [12] consacrée à l'histoire des sciences de cette civilisation.

### REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier Anne Grand d'Esnon qui a eu la bonne idée de m'offrir *Une histoire populaire des sciences*, ainsi que Gilles Christoph pour sa relecture minutieuse et notre discussion enrichissante à propos de cet article.

### RÉFÉRENCES

- [1] Clifford D. CONNER. *Une histoire populaire des sciences*. L'Échappée, 2011.
- [2] William GILBERT. *De magnete*. disponible en latin sur [Gallica](#) et en anglais sur [Archive.org](#). Culture et civilisation (Bruxelles), 1600.
- [3] Edgard ZILSEL. "The origins of Gilbert's scientific method". In : *Journal of the history of ideas* 2.1 (1941). disponible sur [Jstor](#), p. 1–32.
- [4] Robert NORMAN. *The newe attractive*. disponible en anglais sur [Archive.org](#). 1581.
- [5] Gorgio VASARI. *Vie des meilleurs peintres, sculpteurs et architectes*. Sous la dir. d'André CHASTEL. T. 2. disponible en Salle Concours Ouest à la BIU Diderot. Berger-Levrault, 1981.
- [6] Pamela H. SMITH. *The body of the artisan*. disponible en Salle Histoire-Géographie-Philosophie à la BIU Diderot. Chicago University Press, 2004.
- [7] Alexandre SAUZAY et al. *Monographie de l'oeuvre de Bernard Palissy : suivie d'un choix de ses continuateurs ou imitateurs*. disponible sur [digitalcollections.nypl.org](#). Lemercier, 1862.
- [8] Bernard PALISSY. *Les discours admirables*. Martin Le Jeune, 1580.
- [9] Leonard de VINCI. *Les carnets de Léonard de Vinci*. T. 2. disponible à la BIU Diderot en Salle Concours Ouest. Gallimard, 1987.
- [10] Léonard de VINCI. *Études de l'eau passant des obstacles et tombant dans un bassin*. disponible sur [drawingsofleonardo.org](#) et reproduit dans [6, p. 91]. 1508.
- [11] Joseph NEEDHAM. *La science chinoise et l'Occident*. Seuil, 1977.
- [12] *The Needham question*. disponible sur [bbc.co.uk](#). BBC Radio 4, 2006.
- [13] Philip BALL. "The scientific problem that must be experienced". In : *Nautilus* 15 (juil. 2014). disponible en ligne sur [Nautil.us](#).

- [14] Elizabeth MATISOO-SMITH. “Ancient DNA and the human settlement of the Pacific : a review”. In : *Journal of human evolution* 79 (2015). disponible sur [Science Direct](#), p. 93–104. ISSN : 0047-2484.

□ THOMAS LE REUN  
M2 Sciences de la Matière  
Physique, Concepts et Applications  
ENS de Lyon - Université Lyon 1  
[thomas.le\\_reun@ens-lyon.fr](mailto:thomas.le_reun@ens-lyon.fr)