La diffusion de l'innovation technique entre XV^e et XVI^e siècle : le cas Léonard de Vinci.

Spread of Technical Innovations during the 15th and 16th Centuries: the Case of Leonardo da Vinci

Pascal Brioist

Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/ephaistos/3811>

DOI : 10.4000/ephaistos.3811

ISSN : 2552-0741

Éditeur

IHMC - Institut d'histoire moderne et contemporaine (UMR 8066)

Édition imprimée

Date de publication : 1 juin 2013

Pagination : 34-48

ISSN : 2262-7340

Référence électronique

Pascal Brioist, « La diffusion de l'innovation technique entre XV^e et XVI^e siècle : le cas Léonard de Vinci. », *e-Phaïstos* [En ligne], II-1 | 2013, mis en ligne le 15 décembre 2019, consulté le 10 décembre 2020. URL : <http://journals.openedition.org/ephaistos/3811> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/ephaistos.3811>

La diffusion de l'innovation technique entre XV^e et XVI^e siècle : le cas Léonard de Vinci

Pascal Brioiist

Centre d'Études Supérieures de la Renaissance

Université François Rabelais de Tours

Comme le souligne avec justesse l'historien des techniques Francis C. Moon, il y a un enjeu important à comprendre comment l'humanité a appris à créer une infinie variété de machines complexes, même si nous ne nous étonnons même plus aujourd'hui qu'une automobile soit constituée de 20 000 pièces et qu'une photocopieuse le soit de quelque 1000 composants. Il se trouve que la pensée de la complexité des machines a connu un tournant majeur à la Renaissance et que Léonard de Vinci fut l'un des premiers à ambitionner, dans un projet de livre des *Elementi machinali*, de réduire toutes les machines de son temps à un ensemble de machines simples¹. La figure de l'ingénieur de génie développée, notamment au XIX^e siècle, à propos de Léonard de Vinci, obscurcit néanmoins la problématique de l'innovation technologique à la Renaissance. Plusieurs champs d'investigation sont à revisiter pour bien comprendre la dimension collective de l'intelligence de la mécanique entre XV^e et XVI^e siècles : celui des machines de guerre, des machines de chantier, des dispositifs anti-friction ou des systèmes à inertie ou encore, par exemple, des machines textiles. Une bonne part des inventions attribuées généralement à Léonard de Vinci s'inscrivent en fait dans un contexte de circulation des idées entre artisans et maîtres de métiers. L'on sait depuis Marcellin Berthelot que Léonard avait de grands prédécesseurs comme Taccola, Francesco di Giorgio et Konrad Kiesser

mais les interactions entre le maître toscan et les inventeurs anonymes des grands chantiers ou des ateliers urbains de la Renaissance sont moins faciles à saisir. Par ailleurs, ce n'est peut-être pas seulement une histoire des continuités qu'il faudrait écrire mais aussi une histoire des discontinuités, celle des inventions qui apparaissent puis s'évanouissent pour ressurgir seulement des siècles plus tard. Pour saisir, enfin, quel fut le vrai rôle de Léonard de Vinci, il faudrait aussi examiner l'importance de sa mise en ordre et en dessin des éléments de machines pour les générations ultérieures en dégagant à ce sujet quelques pistes.

Les prédécesseurs de Léonard de Vinci : une histoire continuiste des machines de la Renaissance

Les premiers coups portés au mythe du génie léonardien l'ont été à l'époque même de la grande redécouverte de Léonard ingénieur par le biais de la publication du *Codex Atlanticus*, au tournant des XIX^e et XX^e siècles. En 1902, en effet, lors de la séance du 27 octobre de l'Académie des sciences, le grand chimiste Marcellin Berthelot (1827-1907) monte en ligne contre l'historien Haton de la Goupillière qui vient de se livrer à un éloge en règle d'un Léonard de Vinci savant. Berthelot vient en effet de découvrir que bien des machines dont on prête l'invention au « grand génie » ont en réalité

été dessinées avant lui². Selon lui, la plupart des soi-disant inventions de Léonard étaient même disponibles de son temps et ses connaissances scientifiques étaient bien réduites. Faire de Léonard le fondateur de la science et de la technique du XX^e siècle tient donc « de l'illusion et de l'erreur ». À une époque où naît le mythe d'un Léonard précurseur de l'aviation (la « chauve-souris » de Clément Ader avait volé en 1890) et de tant d'autres technologies, l'argument frise la provocation. Mais le débat ne fait que commencer. En 1913, le philosophe et académicien Pierre Duhem soutient un parti inverse : si Léonard doit beaucoup à ses devanciers, il était parfaitement au fait de la science du XV^e siècle et avait réalisé de véritables percées théoriques rendant notamment possibles les découvertes de Galilée sur la théorie de la chute des corps. Dans un contexte nationaliste exacerbé qu'est alors celui de la France, le Léonard de Duhem incarne, dans la lignée d'Aristote, non seulement le génie gréco-romain, mais encore les valeurs françaises et catholiques de la Sorbonne médiévale. Dans les années 1970-1980, les travaux d'historiens comme Bertrand Gilles ou Paolo Galluzzi vont confirmer les dires de Berthelot, même si les mêmes idées courent toujours sur Léonard « inventeur de génie ».

Léonard participe en fait de la véritable révolution technologique que connaît l'Italie du nord des XIV^e et XV^e siècles. Après le cataclysme de la Peste Noire, par simple effet démographique, la richesse a commencé à se concentrer, les capitaux sont devenus disponibles pour de grands projets et la rareté relative de la main d'œuvre poussa à chercher des solutions techniques pour accélérer les travaux. À Sienne, l'ingénierie hydraulique et militaire prit son envol avec Mariano di Jacopo dit Taccola (1381-1458) et plusieurs autres ingénieurs anonymes. Taccola offrit à la ville, perchée sur ses collines, un réseau de canaux souterrains prodigieux ainsi que des modèles de machines entraînées par des roues à aubes : scies, pompes et moulins. Dans ses traités, son successeur Francesco

di Giorgio Martini (1381-1502) développa des projets architecturaux, des machines de guerre, des engins civils de plus en plus complexes offrant des solutions inédites de levage et de transport, des moulins des plus divers et une théorie de la mécanique !

À Florence, tout semble avoir commencé avec Filippo Brunelleschi (1377-1446) qui se vit confier entre 1420 et 1436 l'édification du gigantesque dôme de Santa Maria del Fiore. Nous connaissons ses machines par les croquis de témoins, Lorenzo Ghiberti et Giuliano da San Gallo³ : énormes treuils à changement de vitesse, systèmes d'engrenages anti-frottements, grues pivotantes, appareils de levages divers, grands navires à aubes pour transporter le marbre sur l'Arno... Florence et Sienne étant fort proches, les idées nées dans une ville circulaient dans l'autre. Ainsi, le *De ingeneis* de 1433 et le *De Machinis* de Mariano Taccola, reprirent certaines des idées de Brunelleschi. Un document aujourd'hui perdu, le *Zibaldone* de Lorenzo Ghiberti, en aurait fait la synthèse vers 1430⁴. Il y aurait ensuite eu, semble-t-il, une sorte de continuum entre les secrets mécaniques de Brunelleschi, les inventions appliquées à l'art militaire par Taccola en 1440 et par Francesco di Giorgio en 1480. Certains experts imaginent même un texte mystérieux, sorte de chaînon manquant entre Brunelleschi et Taccola d'un côté et Francesco di Giorgio de l'autre⁵. Il se peut que ce chaînon ait été un ouvrage d'Antonio Averlino dit le Filarète, un *Livre des engins* aujourd'hui perdu⁶. Quand Léonard arriva à Florence comme apprenti, il vit en tout cas les grues de Brunelleschi et travailla même à poser au sommet du Dôme une sphère de cuivre géante. Selon toute vraisemblance, il eut également accès au Zibaldone et plus tard, à Milan, aux travaux de Francesco di Giorgio qu'il rencontra en personne. Dans le domaine militaire Léonard s'inspira de Roberto Valturio (1405-1475) dont le *De Re Militari* rédigé pour Sigismondo Malatesta montrait des chars, des outres pour traverser les fleuves et toute sorte de machines de guerre

ingénieuses⁷. Léonard n'était donc pas seul à dessiner des machines : il appartenait à un milieu qui, peu à peu, gagnait ses lettres de noblesse au fur et à mesure qu'il s'éloignait de la pure pratique et affirmait ses fondements théoriques.

L'histoire que nous écrivons ainsi présente tout de même un inconvénient, elle ne met en scène que des héros de l'invention ayant laissé des traces écrites. Elle nous conduit finalement, à la manière de Duhem en 1900, à rechercher des précurseurs de Léonard de Vinci, à évoquer des chaînons manquants⁸... et à oublier toute la masse des inventeurs anonymes. Cette histoire n'est pas sans mérite mais est-il possible de procéder autrement et de faire parler les anonymes silencieux ?

Léonard et la saisie des techniques de son temps

Cette entreprise ambitieuse nécessite un réexamen systématique des machines léonardiennes et de leurs composantes afin d'identifier les sources d'inspirations du maître qui ne seraient pas nécessairement ses confrères⁹. La tâche est immense même si l'*Accademia della Crusca* nous a dotés récemment d'un glossaire des termes toscans utilisés par Léonard pour décrire les machines à partir du vocabulaire des métiers (350 lemmes en tout). Aussi, le présent article a pour seul projet d'examiner quelques pistes qui seront, nous l'espérons, fertiles pour un travail ultérieur nécessairement plus vaste et plus fouillé.

Commençons par les composants et, pourquoi pas, par les engrenages, ces pièces à la valeur éminemment symboliques de la modernité technique. Le livre des *Elementi machinali* de Léonard de Vinci, figurant sous forme de fragments dans les Codices de Madrid, ambitionne en effet un recensement de tous les types d'engrenages et de pignons et même une approche théorique de leurs développés¹⁰. Pourtant, il est bien difficile de déterminer ce qui relève de l'invention du maître et ce qui n'en relève pas. Prenons simplement

l'exemple bien connu du couple de roues semi-engrenées du Codex de Madrid¹¹. Il permet d'obtenir un mouvement de va-et-vient à partir d'un mouvement rotatif continu, belle trouvaille s'il en est mais qui se trouve déjà rapportée au XIV^e siècle dans certains manuscrits techniques arabes¹². De plus, l'idée de roues qui ne sont dentées qu'à moitié s'avère déjà représentée chez Francesco di Giorgio Martini, par exemple à propos d'un engin pour ficher des pieux dans le fond d'une rivière¹³. Elle est aussi reprise par un contemporain de Léonard, l'horloger Lorenzo della Volpaia, à propos d'un mécanisme destiné à soulever l'eau : un demi cercle engrené est solidaire d'un arbre porteur de deux seaux attachés à des cordes, une roue à rayons actionnée par une manivelle produit le mouvement de va-et-vient en étant semi-engrenée¹⁴. Léonard, dans le codex de Madrid, ne fait donc que mettre en liste des dispositifs bien connus. À vrai dire, c'est sans doute plus au XIV^e siècle qu'à la fin du XV^e siècle que la recherche sur les types d'engrenages fut la plus originale, résultat sans doute de la réflexion contemporaine sur les moulins et sur les horloges à poids¹⁵. Une partie des connaissances qui nourrirent cette évolution vint probablement du monde arabe : le découpage du temps dans les horloges par des roues dentées s'inspirait par exemple des astrolabes à engrenages que l'on fabriquait dès 1300¹⁶.

Un gros inconvénient des engrenages du XV^e siècle, décrits par tous les prédécesseurs de Léonard de Vinci, Giovanni Fontana, Mariano Taccola, Giorgio Valturio ou Francesco di Giorgio, est leur fragilité apparente : des dents en bois ne peuvent guère résister longtemps aux efforts qu'on leur demande, en particulier dans les grues¹⁷. Léonard obvie à ce problème de deux façons, d'une part en concevant des engrenages en fer aciéré, tel son fameux cric du *Codex Atlanticus*¹⁸ d'autre part en dessinant de nombreux systèmes permettant de réduire les frottements tels les roulements à billes. En réalité, bien avant lui, Brunelleschi semble avoir conçu des dents d'engrenages faites de cylindres

cuirassés de bronze tournant sur eux-mêmes, ce que Léonard n'ignorait pas puisqu'il les a recopiés et qu'il s'en est même inspiré pour un modèle de moulin double¹⁹. Toutefois, le Toscan ne s'arrêtait pas à la simple reproduction de la tradition entretenue par ses compatriotes. En effet, alors qu'il réfléchissait vers 1497 à la réduction de la friction d'axes de cloches hyper-pesantes ou d'axes de roues de chariots lourds²⁰, il proposait des solutions originales. Ainsi pour les cloches suggérait-il de faire reposer les tourillons autour desquels l'objet se mettait en mouvement sur trois quart de cercles croisés²¹. Plus tard, sans doute après sa visite en 1502 dans la tour du palais communal de Sienne, se souciant des effets de vibration sur la structure des clochers, il proposa de positionner un quadrant-

Figure 2 : Léonard de Vinci, étude sur les engrenages (Madrid Ms 1, f. 5r)

Figure 1 : Léonard de Vinci, couple de roues semi-engrenées (Madrid Ms 1, f. 17r)

coussinet sous l'axe puis les quadrants latéraux horizontalement car il avait saisi que la solution précédente occasionnait de l'abrasion²². Mais d'où lui vint cette intuition ? Quelques lignes du Codex de Madrid nous fournissent un indice : « Jules l'Allemand dit avoir vu en Allemagne ce type de rouleaux être consumés par l'axe m ». L'ingénieur toscan s'enquiert bel et bien des techniques d'au-delà des Alpes auprès des mécaniciens d'origine germanique qui travaillent avec lui à Milan. C'est la raison pour laquelle le mécanisme du codex de Madrid ressemble fort au système anti-frottement présent dès le XV^e siècle dans le beffroi de Metz pour soutenir la cloche de Mutte²³. Léonard absorbe avec une facilité déconcertante tous les savoirs qui l'entourent et exploite toutes les sources d'information possibles.

Prenons à présent un troisième exemple, celui des dispositifs destinés à réduire les irrégularités d'une impulsion motrice et à économiser l'énergie dans un mouvement rotatif, autrement dit les systèmes utilisant l'inertie que l'on appelle volants. Ceux-ci sont mentionnés la première fois, d'après l'historien Lynn White, à la fin du XI^e siècle à

Figure 3 : Léonard de Vinci, vis d'Archimède (Codex Atlanticus, f. 1069r)

propos d'un moulin à broyer les couleurs. Au XIV^e siècle, le philosophe Buridan, cherchant à élaborer la notion de vitesse, réfléchissait à la force (*vis impressa*) emmagasinée par une meule que l'on met en mouvement²⁴. En 1480, Francesco di Giorgio décrivit un régulateur à boules et chaînes dont l'usage est d'optimiser l'énergie nécessaire à une meule de moulin²⁵. À l'orée du XVI^e siècle, en 1507, une gravure allemande montre un régulateur de ce type monté sur un tournebroche, preuve que l'invention est déjà largement répandue et les

dessins de tours de potiers et de tours de menuisiers du *Codice Maglia Bechiano* (Cl XVIII-III) de la bibliothèque nationale de Florence montre qu'elle était probablement non moins en usage chez les artisans toscans du XVI^e siècle. Dans le traité des *Elementi machinali*, volants et régulateurs à boules figurent en bonne place²⁶. À regarder de près les dessins de Léonard, ces appareils connaissent chez lui de nombreuses applications. Ainsi, la fameuse vis d'Archimède double utilisée pour élever de l'eau dans un château d'eau du *Codex Atlanticus* est-elle entraînée par un pignon à lanterne articulé à un volant, muni de dents horizontales, fixé sur une roue à aube²⁷. De même, l'embarcation munie de roues à pales du *Codex Atlanticus*, réminiscence probable du « Badalone » pour lequel Brunelleschi reçut une patente en 1421, utilise un grand volant pesant pour aider les navigateurs de l'Arno à actionner les manivelles faisant tourner les pales²⁸.

Dans le domaine de l'horlogerie, Léonard creuse la théorie d'un autre système mécanique de base : la fusée, qu'il dessine par exemple au feuillet 85r du premier codex de Madrid ou encore au feuillet 14r dans un mécanisme d'horlogerie. Le principe est simple, il s'agit d'égaliser la détente d'un ressort en spirale abrité dans un cylindre de manière à obtenir un mouvement isochrone. Dans le dessin du feuillet 14r, Léonard compense la déperdition d'énergie du ressort par un engrenage de forme conique. À plusieurs autres reprises, il dessine dans le codex de Madrid²⁹ (fol 16r, et fol 45r) des pignons coniques s'engrenant sur des dents montées sur une spirale, preuve qu'il a médité sur la nature du freinage et qu'il en a conclu, comme à son habitude, que celle-ci suivait une loi pyramidale³⁰. Mais le fait que Léonard théorise l'objet ne signifie pas qu'il en est l'inventeur. Konrad Kyeser, en effet, dans le *Bellifortis* offert en 1405 à l'empereur Sigismond, se servait déjà d'un axe conique pour tendre une arbalète et à partir de 1430, un nombre de plus en plus important d'horloges furent équipées de fusées auxquelles le mouvement du ressort était transmis par un frein en boyau ou une chaîne³¹. Entre XV^e et

XVI^e siècles, les fusées d'horloge devinrent un lieu commun de la mécanique, on les retrouvait aussi bien dans les horloges que dans les tournebroches automatiques ou dans les nefs automates de Charles Quint. On sait que Léonard a fréquenté Lorenzo della Volpaia, sa familiarité avec les milieux des horlogers explique donc sa fascination pour ce dispositif d'une rare élégance. Notons toutefois qu'il innova en substituant à la transmission par boyau ou par chaîne la transmission par engrenage.

L'horloge du feuillet 14r du codex de Madrid constitue un excellent exemple de la capacité adaptative de son inventeur : l'engrenage surplombant le tambour du ressort passe progressivement d'un diamètre à l'autre – de plus en plus large – de l'engrenage conique, au moyen d'une vis sans fin et d'une crémaillère. Le contact de la roue du ressort et de l'engrenage conique est ainsi maintenu, de tour en tour, pour chaque diamètre du cône.

Figure 4 : Léonard de Vinci, étude sur les volants (Madrid Ms1 f. 114r)

Il faut donc absolument se convaincre que les mécanismes simples que décrit Léonard et pour lesquelles il trouve des applications ne sont pratiquement jamais des inventions qui lui appartiennent. Lynn White avait parfaitement démontré dans les années 1960 que l'affirmation de Bertrand Gilles selon laquelle le système bielle-manivelle ne s'affirmait que lentement au XVI^e siècle, et que Léonard en était l'ardent promoteur, était complètement absurde³². En effet, ce système était bien connu de l'anonyme auteur du traité des guerres hussites, de Pisanello (1444), de Taccola, de Valturio, de Francesco di Giorgio et de bien d'autres³³. Le même type de démonstration peut être conduit, nous venons de le voir, sur d'autres mécanismes élémentaires. Voyons à présent si l'examen de machines un peu plus complexes donne le même résultat : Léonard s'est-il, là aussi, nourri au sein du milieu artisanal qu'il fréquentait ?

On pourrait, de la même façon, démontrer que Léonard s'est inspiré des maîtres artisans de son temps pour des objets mécaniques plus complexes. C'est le cas par exemple lorsqu'il s'intéresse aux serrures³⁴. Au folio 50v du premier volume du Codex de Madrid, est ainsi figurée une serrure de sûreté à ressort. Celle-ci fonctionne sur le principe suivant : quand la clé tourne dans un dôme (figuré par une pseudo-ellipse sur le dessin), son panneton met en mouvement un dispositif qui pince deux leviers, ou pèles, qui à leur tour actionnent deux pènes (qui se désengagent du nez qui les retient tandis que le nez s'abaisse grâce à un autre mécanisme). En somme, ici, la serrure est fermée à l'état initial et l'action de la clé la déverrouille. Le système de codage invisible caché dans le dôme peut éventuellement ressembler à ce que l'on trouve dans un autre dessin de Léonard : de multiples barbules en étoile au travers desquelles le panneton doit pouvoir passer grâce à ses creux (rouets et râteaux). Aussi ingénieux que paraisse ce travail, il n'est pas tout à fait original. Il suffit pour s'en convaincre de visiter les musées conservant aujourd'hui des serrures du XV^e et du XVI^e siècle³⁵.

Figure 5 : Léonard de Vinci, étude sur les serrures (Madrid Ms1, f. 99v)

On se rend alors compte du fait que Léonard s'inscrit totalement dans le paradigme des serrures de son temps : ainsi, le dôme à barbules en étoile est présent dans une serrure allemande du défunt musée Bricard³⁶. De plus, entre XV^e et XVI^e siècles, les serrures à dôme avec ressorts à l'arrière ou les serrures trapézoïdales avec pènes en bord et gâchettes (des ressorts centraux gardent par

exemple les pènes à l'extérieur en position fermée et quand la clé tourne, les ressorts sont comprimés et font rentrer les pènes) se multiplient dans toutes l'Europe. Ce sont clairement des chefs-d'œuvre d'artisans. Tous doivent-ils leurs capacités d'innovation à Léonard? Les datations et les attributions précises des objets sont éminemment difficiles à réaliser mais il y a fort à parier que le flux d'information part d'abord des artisans et qu'il est seulement récupéré par Léonard qui, bien sûr, s'approprie toujours avec finesse les techniques des hommes de métier et leur apporte sa propre patte. Ainsi procéda-t-il encore, mais le fait est bien connu, avec les maîtres des eaux milanais desquels il apprit énormément de procédés concernant les réparations des canaux et des écluses, comme il le confesse d'ailleurs lui-même³⁷. Il n'est d'ailleurs

Figure 6 : Léonard de Vinci, Retordeuse à deux fuseaux avec ailettes (Madrid Ms 1, f. 68v)

probablement pas réellement l'inventeur des écluses à portes busquées et nous sommes certains qu'il y eut avant lui un ingénieur siennois pour dessiner un étayage de barrage d'écluse en escalier, même s'il appliqua bien ce système à l'écluse-tunnel dont il voulait équiper la rivière Adda au niveau du passage torrentueux des Tre Corni³⁸.

Un dernier exemple, tiré des études qu'en a faites l'historien anglais Graham Hollister Short, achèvera de prouver que l'inspiration de Léonard de Vinci fut souvent puisée dans l'univers artisanal, c'est celui des machines textiles³⁹. Ainsi, dans les feuillets milanais qu'il consacre au filage automatique de la laine, l'ingénieur dessine des ailettes en forme de U tournant autour du fuseau permettant simultanément le filage (la différence de diamètre entre le U et le fuseau occasionne des vitesses différentes qui produisent la torsion du fil et l'embobinage. Le nombre de tours de l'ailette et la longueur de la mèche de fibres étirées déterminent la torsion)⁴⁰. Cette invention n'a semble-t-il pas été originellement établie pour la filière laine mais plutôt pour la filière soie, et ce bien avant Léonard. En effet, dès le XIII^e siècle on trouve en Italie du Nord des moulins (*filatorium*) mus avec cheval et au XIV^e siècle à Lucca, pour des machines équipées de roues hydrauliques pour le moulinage de la soie)⁴¹. Le dévidoir retordeur à fuseaux multiples pour le filage de la laine de Léonard relève donc d'une invention par transfert entre filières. On retrouve d'ailleurs dans plusieurs autres dessins de Léonard le fuseau à ailettes, preuve de l'intérêt que le technologue toscan lui portait⁴². La façon dont Léonard a pu connaître les secrets gardés jalousement par les Lucquois reste néanmoins un mystère, au même titre que le nom de l'artisan qui conçut le premier le fuseau à crochet.

On ignore également si la fileuse mécanique de Léonard fut réalisée lors des années 1490, et où elle fut dessinée. On sait néanmoins que le filage à fuseaux multiples apparut dans les machines de filature au XVIII^e siècle. Se pose ici la question du

cheminement des inventions de Léonard après lui. On sait que les papiers techniques de Léonard ne furent pas publiés avant la fin du XIX^e siècle (seul son *Traité de peinture* » le fut au XVII^e siècle). Comment se fait-il alors que certaines de ses techniques réapparaissent ? Tout d'abord, le témoignage de Benvenuto Cellini à propos de la fonderie et l'usage de solutions léonardiennes pour des statues équestres du XVI^e et du XVII^e siècle, suggère que certains manuscrits ont tout de même circulé⁴³. Ensuite, comme l'a montré Graham Hollister Short à propos des pompes à double secteurs du *Codex Atlanticus* dont le principe est réutilisé dans la samaritaine du pont de Londres en 1590 puis, dans la machine de Newcomen au XVIII^e siècle, il est possible que les mécaniciens allemands qui collaboraient avec Léonard aient rapporté en terre d'Empire des techniques de leur maître⁴⁴. Il pourrait en être de même des métiers à la barre que l'on voit apparaître au XVII^e siècle dans les Flandres, à Londres, en Suisse et en Allemagne et qui fonctionnent sur des principes assez analogues à ceux du métier à rubans de Léonard de Vinci. Je voudrais souligner à la suite de Liliane Hilaire-Pérez que les idées nouvelles ne sont pas nécessairement immédiatement diffusées, elles sont parfois oubliées et ne resurgissent que bien des années après, amendées, ou réinterprétées par d'autres. Ainsi, l'idée de Léonard de passer une navette de part et d'autre d'un métier à tisser par des simulacres de bras et un système d'encliquement/dévérrouillage inspiré de la serrurerie ressemble fort à des composants des métiers automates de De Gennes (1677) et Vaucanson (1744) ainsi que des machines brevetées de la *Draper Corporation* américaine des années 1840-1850. Les discontinuités, de ce point de vue, sont aussi intéressantes que les filiations. Toute la déconstruction à laquelle nous venons de nous livrer pourrait laisser croire que nous doutons de l'apport de Léonard de Vinci à la technologie moderne. Il n'en est rien, sans doute faut-il simplement poser la question autrement.

La mise en ordre et en dessin : l'apport de Léonard à la mécanique

Tout d'abord, notons que les trouvailles de Léonard furent sans doute recopiées par ses contemporains⁴⁵, qu'elles continuèrent d'inspirer les inventeurs des générations suivantes, jusqu'aux auteurs de théâtres de machines comme Ramelli, Besson, Errard ou Zonca⁴⁶. Ces ingénieurs des années 1570-1610 n'avaient pas eu accès aux manuscrits léonardiens, mais firent tout de même état de solutions techniques que l'on trouvait déjà chez leur prédécesseur et probablement aussi dans le milieu artisanal qui leur était commun. L'arbre de transmission du battiloro (une machine à battre les feuilles d'or dessinée dans le *Codex Atlanticus*) qui porte un dispositif de programmation de mouvement, par exemple, réapparaît chez Zonca et les métiers à tisser des rubans de coton sont décrits à Dantzic vers 1570. Certes, les machines de Léonard n'ont probablement jamais été construites (un certain nombre de défauts qu'il faudrait ajuster pour que les dessins puissent accoucher de machines fonctionnantes le prouve), mais leurs concepts ont en tout cas été diffusés pratiquement immédiatement en Italie et même dans le reste de l'Europe (cas déjà cité de la pompe à double secteur), ce d'autant plus facilement qu'ils ne faisaient que saisir, parfois en l'améliorant, une tradition existante.

Le véritable legs de Léonard réside peut-être ailleurs, dans sa capacité d'une part à dessiner de façon convaincante, grâce à l'art de l'axonométrie, des idées de machines encore non réalisées mais grâce aussi à sa capacité à décomposer les machines en éléments simples⁴⁷. Cette méthode léonardienne de décomposition est avant tout pratique, il s'agit pour le toscan d'identifier le vocabulaire de base d'une langue de la mécanique encore à construire⁴⁸. À la fin du XVI^e siècle, Guidobaldo dal Monte, auteur d'un *Mechanicorum Liber* (1577) qui prétend lui aussi réduire la mécanique en art, procède assez différemment⁴⁹. Sa référence,

beaucoup plus théorique, est la science hellénistique et son but est de fonder le travail de ses collègues sur l'explication mathématique des cinq machines simples définies dans l'Antiquité par Héron d'Alexandrie : treuil, levier, plan incliné (coin), moufle, vis⁵⁰. En 1706, quand Philippe de La Hire écrit son *Traité des Roulettes* qui fait suite à son *Traité de mécanique* de 1680, un nouveau pas est franchi : il ouvre en effet la voie de la science de la cinématique des mécanismes en explorant par les mathématiques, à la suite de Christian Huygens, la notion d'engrenages épicycloïdaux⁵¹. Le XVIII^e siècle voit l'affirmation de la théorie mécanique newtonienne mais la science des machines proprement dite ne progresse guère, sauf peut-être chez l'ingénieur Leipzigois Jacob Leupold (1674–1727), mathématicien auteur d'un *Theatrum Machinarum Generale* (1724) dont les planches constituent un inventaire extrêmement précis des types d'engrenages, de cames ou de mécanismes anti-friction⁵². Tout au long du XIX^e siècle, les ingénieurs français de l'École polytechnique produisent à leur tour, et à la suite de Gaspard Monge, des catalogues d'éléments de machines⁵³. C'est pour commencer Alexis Thérèse Petit qui propose dans son cours une description des « machines élémentaires » et une théorie des engrenages, cours complété par Arago vers 1820 avec un exposé des mécanismes d'horlogerie et résumé par Savary en 1830 en une seule planche regroupant engrenages et échappements. Parallèlement, dans l'école d'application de Metz, Victor Poncelet rend disponible en 1826, par la lithographie, un *Cours de mécanique appliquée aux machines* reprenant les idées d'Arago. En 1841, Michel Chasles aborde le problème par le biais de la description géométrique et mécanique des machines et peu à peu s'élabore une approche de la mécanique par le biais de la théorie cinématique renouant avec celle de La Hire. Chasles n'ignore pas l'œuvre mécanique de Léonard de Vinci, il mentionne d'ailleurs une machine à tracer les

ellipses du maître et cite à ce propos l'ouvrage de l'hydraulicien Giovanni Batista Venturi intitulé *Essai sur les ouvrages physico-mathématiques de Léonard de Vinci* (1796). En 1874 enfin, l'ingénieur berlinois Franz Reuleaux (1829-1905), qui avait accès aux dessins de Léonard de Vinci puisqu'on les redécouvrit au XIX^e siècle, se mit en tête de rendre disponible au monde entier une théorie complète de la conception de machines⁵⁴. Il y réussit par le biais d'un livre intitulé *Der Constructor* (1864) et par celui d'une collection de modèles d'engrenages et de mécanismes qu'il fit réaliser à Berlin puis reproduire pour diverses collections en Suisse, au Portugal, en France et même en Amérique (la collection de l'université de Cornell est actuellement la mieux préservée)⁵⁵. Reuleaux considérait que la mécanique pouvait se résumer à une liste d'éléments constructifs et à des chaînes cinématiques identifiables⁵⁶.

Ladislao Reti, qui fut le premier spécialiste de Léonard de Vinci à commenter sérieusement les *Elementi machinali* des Codices redécouverts en 1965 dans la Bibliothèque Nationale de Madrid, fut frappé par l'analogie qu'il percevait entre la typologie léonardienne et celle de Reuleaux. Ainsi, les 6 catégories de chaînes cinématiques de Reuleaux (engrenage, cames, vis, manivelle, poulie, échappement) sont déjà identifiés par Léonard, et l'on peut également renvoyer dos à dos les éléments cinématiques de machines (pistons et cylindres, taillant, tringlerie articulée, poulies et courroies, raccordement, roues à frictions, joints sphériques etc.) des deux hommes que pratiquement 4 siècles séparaient. Une question importante est cependant posée par Francis Moon : Léonard de Vinci, lorsqu'il dessinait une machine complexe du type du Battiloro avait-il vraiment conscience de mettre en œuvre un système combinatoire ? Moon le pense et en veut pour preuve sa décomposition de la fileuse-retordeuse mécanique du *Codex Atlanticus*⁵⁷ en 5 éléments de machines et 4 mécanismes cinématiques⁵⁸.

Figure 7 : Léonard de Vinci, Décomposition de la fileuse-retordeuse mécanique (Codex Atlanticus, f. 1090v)

Conclusion :

Une histoire des techniques écrite sur la longue durée a pour vertu non seulement de penser à nouveaux frais la question de l'invention et de l'innovation, mais aussi de mettre en lumière des acteurs un peu trop silencieux dans les grandes sagas héroïques glorifiant les « inventeurs ». Le Giulio Tedesco qui assiste Léonard à Milan lorsque ce dernier travaille sur les cloches ou les pistolets à

rouet mérite en cela d'être étudié tout autant que ces artisans anonymes ayant apporté leurs petites modifications aux machines textiles schématisées dans le *Codex Atlanticus*.

Quant aux machines simples, dont le Toscan faisait l'inventaire dans son projet d'*Elementi Machinali*, il est évident qu'elles faisaient partie d'un univers technique antérieur à la fin du XV^e siècle. Malgré tout, la méthode de Léonard fut grosse de conséquences pour ses successeurs immédiats.

Peut-on dès lors affirmer que la réduction en art de Léonard de Vinci influença le XIX^e siècle ? C'est peut-être aller trop vite en besogne car les inventeurs de ce temps fonctionnaient surtout, comme leurs prédécesseurs, en s'immergeant dans la culture technique qui les entourait. De plus, même si Léonard inspira probablement Reuleaux, le Toscan n'est guère cité par les professeurs de l'École polytechnique. On peut néanmoins soutenir l'idée que la mise en ordre proposée par Léonard avec son projet d'ouvrage des *Elementi machinali* servit possiblement de trame inconsciente à un certain nombre de ses successeurs dont Jérôme Cardan (son joint universel se trouve déjà dessiné par Léonard) et les auteurs de théâtres de machines. De ce point de vue, même les disciples de Gaspard Monge furent les héritiers, sans le savoir, de l'enfant avide de connaissance du village de Vinci.

¹ En réalité, la théorie des machines simples remonte à l'Antiquité et en particulier à la période hellénistique. Héron d'Alexandrie, Archimède, le pseudo Aristote et d'autres encore, réfléchissaient déjà entre IV^e et II^e siècles avant J.-C. à l'identification et à la mathématisation des machines simples, roues, leviers, plans inclinés etc. À la fin du XVI^e siècle, d'ailleurs, Guidobaldo dal Monte repartant de ces auteurs, publia une remarquable synthèse intitulée : *Guidiubaldi e marchionibus montis mechanicorum liber*, Pisauri, Concordia, 1577.

Marcellin Berthelot, « Les manuscrits de Léonard de Vinci et les machines de guerre », dans *Le Journal des Savants*, 1902, p. 116-119 :

« Ce serait assurément un très grand travail que de reconstituer les sources auxquelles Léonard de Vinci a puisé. Ce travail a été entrepris sur quelques points (anatomie, architecture, arts militaires), notamment par M. G.-B. de Toni (Frammenti vinciani), qui a montré que la plupart des noms d'armes de guerre et des textes correspondants, contenus dans les manuscrits de Léonard, sont purement et simplement traduits de Roberto Valturio (De Re militari), auteur militaire du XV^e siècle... Je citerai d'abord les chars armés de faux. Les dessins de Léonard de

Vinci ne sont pas l'œuvre de son imagination, comme on l'a supposé parfois. En effet, ces chars, employés d'abord par les Assyriens et les Persans, puis tombés en désuétude chez les Grecs et les Romains de la République et des premiers siècles de l'Empire romain, ont reparu à la fin de cet Empire et ils ont été en usage pendant tout le moyen âge, notamment pour la protection du carroccio des communes italiennes. Un dessin de Guido da Vigevano ne permet aucun doute à cet égard. Vers la fin du XIV^e siècle, on commença à les armer de petits canons ; ils sont alors désignés sous le nom de ribaudequins et cités par divers chroniqueurs... Les dessins de mitrailleuses de Léonard, auxquels on a rapporté parfois les appareils de ce genre, ainsi que ceux des revolvers, dont on trouve encore des échantillons dans les musées d'Italie, réclament également d'être soumis à une critique approfondie. La conception de semblables engins était déjà courante à la fin du XIV^e siècle, comme en témoignent quatre dessins du Bellifortis et un dessin de Marianus Taccola.

Même observation pour les faux et crochets placés sur les navires pour attaquer ceux des ennemis. Comme on le voit d'après un dessin de Marianus Taccola, le pont sur outres, dont Léonard donne le dessin, est aussi tiré d'inventeurs plus anciens. C'était là, d'ailleurs, un procédé usité déjà par les Assyriens et figuré sur leurs monuments ».

³ C'est par une copie tardive du *Zibaldone* de Lorenzo Ghiberti réalisée par son petit-fils, Buonacorso, que nous parvenons à imaginer aujourd'hui les inventions de Brunelleschi que ce dernier tenait à garder secrètes.

⁴ Frank Prager, « *Brunelleschi : Studies of His Technology and Inventions* », 1970, p. XI-XIII.

⁵ Gustina Scaglia's, « *Drawings of forts and engines by Lorenzo Donati, Giovanbattista Alberti, Sallustio Peruzzi, The Machine Complex Artist, and Oreste Biringuccio* », *Architectura*, II, 1988, p. 169-97.

⁶ En effet, avant de s'installer à Milan en 1433, le Filarète avait étudié dans l'atelier de Lorenzo Ghiberti à Florence.

⁷ Paola Delbianco (a cura di), Roberto Valturio, « *De Re Militari* », *Saggi critici* Introduzione di Franco Cardini, Rimini, 2007.

⁸ Pierre Duhem, *Études sur Léonard de Vinci, ceux qu'il a lus et ceux qui l'ont lu*, Paris, A. Hermann, 1906-1913.

⁹ Pour avancer dans cette enquête, on peut se reposer sur le travail récent opéré par le Museo Leonardiano en collaboration avec l'Accademia della Crusca de Florence : Paola Manni e Marco Biffi (a cura di), *Glossario Leonardiano. Nomenclatura delle macchine nei codici di Madrid e Atlanticus*, Leo S. Olschki Editore, 2011.

¹⁰ Léonard de Vinci, Biblioteca Nacional de Madrid Ms I, fol. 5r, 116r et 118r.

¹¹ Léonard de Vinci, Biblioteca Nacional de Madrid Ms I, fol. 17r ou fol. 19r.

¹² Stefano Carboni (dir.), *Venise et l'Orient*, Institut du Monde Arabe / Gallimard, Paris, 2006, 374 p. Voir aussi Donald Routledge Hill, « Arabic Mechanical Engineering : Survey of the Historical sources », dans *Arabic Sciences and Philosophy, a Historical Journal*, Cambridge University Press, 1991, vol. 1, p. 167–186.

¹³ Francesco Di Giorgio Martini, Florence, Biblioteca Medicea Laurenziana, Ms 197b, 21, fol. 48v.

¹⁴ Florence, Biblioteca Medicea Laurenziana, Codice L. A., *Della Golpaia Girolamo Benedetto, Benvenuto e Lorenzo : studi di Orologeria, meccanica, astronomica con opportune figure e spiegazioni del secolo XVI*, 17c 39v. Ce principe se retrouve quasiment à l'identique dans le *Codex Atlanticus*, fol. 7r et 8r b (le pignon est cette fois totalement engrené), soit Lorenzo della Volpaia s'est inspiré de Léonard, soit c'est le contraire, soit, plus probablement d'ailleurs, les deux ont une source commune.

¹⁵ Lynn White, *op. cit.*, *passim*. Sur les horloges à poids, voir aussi Carlo Cipolla, *Clocks and culture, 1300 to 1700*, W.W. Norton & Co, 2004.

¹⁶ Derek de S. Price, « The Prehistory of the Clock », *Discovery*, XVII, 1956, p. 155. Le monde arabe héritait sans doute lui-même pour les engrenages du monde grec et en particulier du monde hellénistique. Le mécanisme d'Anticythère, découvert en 1900 en Méditerranée remonte en effet au III^e siècle avant J.-C. et s'avérait capable avec ses 82 éléments dont une trentaine de roues dentées, de calculer le calendrier solaire et le calendrier lunaire.

¹⁷ Les prédécesseurs de Léonard de Vinci ont souvent fait l'objet de réimpression en fac-simile. Les ouvrages utilisés pour le présent article sont : Eugenio Battisti et Giuseppa Saccaro Battisti (ed.), *Le Macchine cifrate di Giovanni Fontana*, Arcadia Edizioni, 1984, qui montre des engrenages utilisés pour pulser l'air dans les tuyaux d'un orgue. Sur Taccola voir Frank D. Pragger et Giutina Scaglia, *Mariano Taccola and his book de Ingeneis*, MIT Press, Cambridge Massachussets, 1972 ; voir aussi *L'art de la guerre. Machines et Stratagèmes de Taccola ingénieur de la Renaissance*, présenté par Eberhard Knobloch,

Paris, Gallimard, 1992. Sur Francesco di Giorgio, voir Corrado Maltese (ed.), *Francesco di Giorgio Martini, Trattati di architettura, ingegneria e arte militare*, Milan, 1967. Sur Valturio, voir l'ouvrage cité plus haut édité par le Centre de recherche de Rimini.

¹⁸ *Codex Atlanticus*, Milan, Biblioteca Ambrosiana, fol. 259r.

¹⁹ *Codex Atlanticus*, Milan, Biblioteca Ambrosiana, f 81r. Cf. Buonnaccorso Ghiberti, B.R. 228, Biblioteca Nazionale di Firenze, fol. 95r et 98r. Ces dessins, repris par Ghiberti du Zibaldone, ont été vus par Léonard qui les reproduisit dans le *Codex Atlanticus*, Milan, Biblioteca Ambrosiana, fol 105B v.

²⁰ Manuscrit A de l'Institut de France, fol. 58r ; Madrid Ms I, fol. 12v ; et *Codex Atlanticus*, Milan, Biblioteca Ambrosiana, fol. 277r.

²¹ Comme le mouvement de la cloche n'est pas une rotation complète, il n'est pas opportun d'utiliser des cylindres du type proposé dans le Manuscrit A de l'Institut de France.

²² L'allusion de la visite de Léonard à la Torre de la Mangia de Sienne en compagnie du père de Biringuccio se trouve dans le Manuscrit L de l'Institut de France (f. 33v). Sur la seconde solution de Léonard voir *Codex Atlanticus*, Milan, Biblioteca Ambrosiana, fol. 972r et 1086r.

²³ Pascal Briost, « A case of Know-how circulation : the bell called Mutte in the city of Metz », dans *Leonardo and Schlickhardt* [actes du colloque *Europa bauen : Leonardo da Vinci und Heinrich Schickhardt. Zum Transfer technischen Wissens im vormodernen Europa*, Stuttgart, 29-30 mai 2008], 2009.

²⁴ Lynn White, « Le Moyen Age à la découverte de la technique et du machinisme », dans *Technologie médiévale et transformations sociales*, La Haye, Mouton, 1979, p. 133-171.

²⁵ Florence, Biblioteca Nazionale, MS II, I.141, fol. 96r.

²⁶ *Codex de Madrid I*, Biblioteca Nacional, fol. 114r et 86r. Le fol. 114r développe une réflexion théorique sur les effets des divers volants :

« Qui si dimanda, di questi 6 moti, detti moti aumentativi, quale è migliore e perché ; e la causa perché stando i pesi stacati perpendicolarmente sotto il principioe ffine della catena che llo sostiene, per che causa poi si fano equidacente, insieme colle dette catene. Ancora si conclude che andando sempre inanzi la causa del moto che ssi tira prima dirieto la catena e poi la palla a quella legata, che non e possibile che quella cosa ch'è tirata dalla causa del suo moto, ch'ella possa dare causa di moto, alla causa del suo moto... »

²⁷ *Codex Atlanticus*, Milan, Biblioteca Ambrosiana, fol. 1069r.

²⁸ *Codex Atlanticus*, Milan, Biblioteca Ambrosiana, fol. 384r.

²⁹ *Codex de Madrid*, fol. 16r et fol. 45r

³⁰ Sur l'omniprésence de la loi pyramidale chez Léonard de Vinci, voir Paolo Galuzzi, « la legge piramidale », dans Paolo Galuzzi (a cura di), *La mente di Leonardo, Nel laboratorio del genio universale*, Florence, Giunti, 2006, p. 246-249.

³¹ Lynn White, *op. cit.*, p. 134.

³² *Ibid.*, note 234, p. 162. La liste des sources de références qu'il donne pour contredire Bertrand Gilles est éloquent.

³³ *Ibid.*, p. 124-125.

³⁴ Leonardo da Vinci, *I Codici di Madrid*, Biblioteca Nazionale Madrid, Edizione Facsimile del codice di Madrid, Giunti Barnèra Firenze, 1974, fol. 49v, 50r, 98v, 99r, 99v. Voir aussi Ms H de l'Institut de France, fol. 13.

³⁵ Citons notamment le musée le Sec des Tournelles à Rouen, le musée de la Reine Béatrice au Mans, le musée Calvet à Avignon, le musée de l'Histoire du fer à Jarville près de Nancy, la Hanns Schell collection de Graz en Autriche, le musée Poldi Pezzoli de Milan ou le musée civique de Borgo San Sepolcro en Toscane. Le musée Bricard du Marais a aujourd'hui définitivement fermé ses portes.

³⁶ À ce propos, voir mon article « Savoir-faire et innovations chez les serruriers de l'Ancien Régime » dans Liliane Hilaire Pérez (dir.), *Les chemins de la nouveauté, innover, inventer au regard de l'histoire*, Paris, Editions du CTHS, 2003, p. 153-165.

³⁷ *Codex Atlanticus*, Milan, Biblioteca Ambrosiana, fol. 611a r ex 225r b : «trova un maestro d'acqua e fatti dire i ripari d'essa e quello che costa». Un riparo e una conca e uno naviglio e uno molino alla lombarda. Un nipote di Gian Angelo dipintore ha uno libro d'aque che fu del padre». Sur les connaissances en hydraulique des Milanais, voir l'article de Patrick Boucheron, «Techniques hydrauliques et technologies politiques : histoires brèves d'ingénieurs au service du duc de Milan à la fin du 15^e siècle », dans *Mélanges de l'École française de Rome – Moyen Âge*, 2004/2, t. 116, p. 803-819.

³⁸ British Library, Ms Additional 34113, fol. 98v : dessins techniques d'un anonyme siennois. Sur le projet de Léonard de Vinci sur la rivière Adda, voir les travaux du Museo Leonardiano et l'article de Pascal Brioist et Romano Nanni, « Les projets de canalisation français de Léonard », dans Pedretti Carlo (éd.), *Leonardo da Vinci & la France*, Poggio a Caiano, CB Publishers, 2010, p. 95-102.

³⁹ Graham Hollister Short, « "The literature relating to Leonardo

da Vinci's Work on Textile Machines". A Critical Review », dans *Le Journal de la Renaissance*, n°5, Brépols, 2007. Voir aussi M. Feldhaus, « Die Spinnradzeichnungen von Leonardo da Vinci », *Melliand Textilberichte*, VII, 1926, p. 469-70. Voir aussi Giovanni Strobino, « Leonardo da Vinci e la meccanica tessile », Milan, 1953 ; et Kenneth G. Ponting's, *Leonardo da Vinci, Drawings of Textile Machines*, Bradford-on-Avon, Moonraker Press, 1979.

⁴⁰ Léonard de Vinci, *Étude de métier à filer* Codex de Madrid I, fol. 67v, vers 1492-97, Madrid, Biblioteca Nacional.

⁴¹ Voir à ce sujet la conférence donnée à Rombas par Liliane Hilaire-Pérez en 2008 dans le cadre de l'exposition *Les rêves mécaniques de Léonard de Vinci*, sur Léonard et les machines textiles.

⁴² Voir par exemple la *Retordeuse à deux fuseaux avec ailettes* du Codex de Madrid I, fol. 68v, 1492-1497 Madrid, Biblioteca Nacional. Voir encore l'*Étude pour un métier à filer continu à fuseaux multiples*, *Codex Atlanticus*, Milan, Biblioteca Ambrosiana (v. 1497-98), fol. 1050r.

⁴³ Andrea Bernardoni, « A Horse for the King, probable French Successes of Leonardo's casting techniques », dans Pedretti Carlo (éd.), *Leonardo da Vinci & la France*, Poggio a Caiano, CB Publishers, 2010, p. 95-102.

⁴⁴ Graham Hollister Short, « The Sector and Chain: An Historical Enquiry. Before and After the Newcomen Engine of 1712. Ideas, Gestalts, Practice. A Critical Review », dans le *Journal de la Renaissance*, n° 5, Brépols, 2007.

⁴⁵ Certains suggèrent que Melzi aurait autorisé l'accès aux manuscrits de son maître à ses amis artistes et d'autres comme Ivo Hart (1961) avancent que le médecin Fusto Cardano et son fils Girolamo (l'inventeur du cardan), furent instrumentaux dans la diffusion des idées léonardiennes.

⁴⁶ Hélène Vérin et Luisa Dolza, « Figurer la mécanique : l'énigme des théâtres de machines de la Renaissance », dans *Revue d'histoire Moderne et Contemporaine*, Belin, Paris, 2004/2 (n° 51-2).

⁴⁷ Ladislao Reti, « The Two Unpublished Manuscripts of Leonardo Da Vinci in the Biblioteca Nacional of Madrid », *The Burlington Magazine*, Vol. 110, No. 778 (Jan. 1968), p. 2-12 ; et surtout *The Unknown Leonardo*, Mc Graw Hill Book Co., New York, 1974.

⁴⁸ Sur l'invention d'une théorie des machines, voir notamment Marco Ceccarelli, « Renaissance of Machines in Italy : from Brunelleschi to Galilei through Francesco di Giorgio and Leonardo ». *Mechanism and Machine Theory* 43, 2008, p. 1530-1552 ; et, du même auteur : « Classifications of Mechanisms Over Time », *Proceedings of International Symposium on History of Machines and Mechanisms HM*

M2004, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2004, p. 285-302. Voir aussi A.D. Dimarogonas, « The Origins of the Theory of Machines and Mechanisms », dans A.G. Erdman (ed.), *Modern Kinematics. Developments in the Last Forty Years*, New York, Wiley, 1993, p. 3-18.

⁴⁹ Guidobaldo Dal Monte, *Guidiubaldi e marchionibus montis mechanicorum liber* (reprod.), 1577 (en ligne : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/>) ; sur la mécanique de Guidobaldo, voir notamment Gianni Micheli, « Guidobaldo del Monte e la meccanica », dans Lino Conti (éd.), *La matematizzazione dell'universo : Momenti della cultura matematica tra '500 e '600*, Assises, 1992), p. 87-104.

⁵⁰ Pierre Duhem, *Les Origines de la statique*, Hermann, Paris, 1905-1906, vol. 1 et 2.

⁵¹ Philippe de la Hire, *Traité de mécanique : ou l'on explique tout ce qui est nécessaire dans la pratique des arts, & les propriétés des corps pesants lesquelles ont un plus grand usage dans la physique*, 1695.

⁵² On y retrouve notamment le mécanisme à trois coussinets-quadrants décrit par Léonard dans le *Codex Atlanticus* mais l'ingénieur allemand explique qu'il s'agit d'un dispositif très ancien qu'on utilise traditionnellement pour les axes de cloche.

⁵³ Jean-Yves Dupont, « Troisième partie – Les Machines, cours d'application : 1817 - 1850 », Bulletin de la société des amis de l'histoire de l'Ecole Polytechnique, 2000 (en ligne : <http://sabix.revues.org/257#tocto1n2>).

⁵⁴ Le *Codex Atlanticus* fut publié d'abord en fac simile à Milan par G. Piumati. Des extraits des carnets avaient également été publiés à Bologne auparavant, en 1828 sous le titre *Saggio delle Opere di Leonardo da Vinci Tavole tratte dal Codice Atlantico*. Reuleaux eut quant à lui accès aux machines de Léonard par le biais du berlinois Hermann Grothe auteur d'une série d'articles sur Léonard inventeur à partir des clichés du *Codex Atlanticus* dont disposait son ami italien Alessandro Cialdi (1873). Cf. Francis Moon, *op.cit.*, p. 61.

⁵⁵ Francis Moon, *Leonardo da Vinci and Franz Reuleaux*, *op. cit.*, p. 7-9. Cette partie de l'article doit beaucoup à l'ouvrage de Moon qui revient avec finesse sur les intuitions de Ladislao Reti.

⁵⁶ Sur les origines de la pensée de Reuleaux, voir le réseau reconstruit par Francis Moon, *op. cit.*, p. 55.

⁵⁷ *Codex Atlanticus*, Milan, Biblioteca Ambrosiana, fol. 1090v.

⁵⁸ Francis Moon, *op. cit.*, p. 36. « Leonardo da Vinci believed that there were rational principles to the art of painting based on mathematical proportions and perspective. There is now evidence that Leonardo had similar beliefs about invention of

machines ».