



HAL
open science

Le compas dans l'œil : la “ mécanique géométrique ” de Viviani au chevet de la coupole de Brunelleschi

Simon Dumas Primbault

► **To cite this version:**

Simon Dumas Primbault. Le compas dans l'œil : la “ mécanique géométrique ” de Viviani au chevet de la coupole de Brunelleschi. *Revue d'Histoire des Sciences*, 2020, 73 (1), pp.5-52. 10.3917/rhs.731.0005 . hal-03715681

HAL Id: hal-03715681

<https://hal.science/hal-03715681>

Submitted on 19 Jul 2022

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

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

Simon Dumas Primbault
Rue du Maupas, 21
1004 Lausanne, SUISSE
+33 6 80 75 15 15
simon.dumasprimbault@gmail.com

Le compas dans l'œil

La « mécanique géométrique » de Viviani au chevet de la coupole de Brunelleschi

Manuscrit d'auteur de Simon Dumas Primbault. "Le compas dans l'œil : la « mécanique géométrique » de Viviani au chevet de la coupole de Brunelleschi." *Revue d'Histoire des Sciences*, Armand Colin 2020, 73 (1), pp.5. doi : 10.3917/rhs.731.0005

Introduction

Être ingénieur à la cour des Médicis jusqu'au XVII^e siècle requiert une discipline à la croisée des mathématiques, des arts picturaux et des arts mécaniques. Vincenzo Viviani (1622-1703)¹, dernier disciple de Galilée et nommé premier ingénieur du Grand-duc en 1666, baigne durant la seconde moitié du siècle dans une telle indivision des pratiques – le dessin est autant savant que toujours artistique –, des techniques – celles indissociables de l'observation et du dessin – et des savoirs – replongeant la perspective ou le clair-obscur dans leur substrat euclidien. Cette indivision florentine des sciences et des arts – tant picturaux que mécaniques – s'incarne dans le concept cardinal de *disegno*, dont la théorie et la pratique sont enseignées à l'*Accademia* éponyme, et qui, nourri de mathématiques, se présente comme un héritage des *trattatisti*, des peintres et des premiers historiens de l'art ; d'Alberti, de Vinci et de Vasari.

En opposition à l'école vénitienne de la couleur, cette culture visuelle qui s'ancre dans le maniérisme florentin et s'inspire aussi de la tradition bolonaise ou du naturalisme flamand repose sur les trois piliers vasariens que sont la perspective linéaire, le *chiaroscuro* et la géométrie euclidienne. Si durant la seconde moitié du XVI^e siècle des mathématiciens tels que Federico Commandino ou Guidobaldo del Monte ont tiré la perspective hors des ateliers des peintres jusque dans le champ des mathématiques², l'*Accademia* au début du XVII^e siècle concilie l'œil, la main et l'esprit, à travers le concept et la pratique du *disegno*, dans une synthèse opérée entre l'art pictural,

¹ - L'historiographie a voulu retenir le prénom « Vincenzo » car c'est ainsi que nombre de ses contemporains s'adressent à lui mais c'est bien du nom de « Vincenzo » qu'il signe ses correspondances et publie ses ouvrages.

² - Filippo Camerota, *Linear Perspective in the Age of Galileo: Ludovico Cigoli's « Prospettiva pratica »* (Florence : Olschki, 2010), 59.

Cf. également l'ouvrage fondateur de Martin Kemp, *The Science of Art: Optical Themes in Western Art from Brunelleschi to Seurat* (New Haven : Yale University Press, 1990).

la géométrie et l'ingénierie. Une synthèse entre les *personæ* de l'artiste peintre, de l'ingénieur scénographe et du géomètre dessinateur au sein de laquelle se meut Vincenzo Viviani.

À travers l'étude des diverses représentations de la coupole de Brunelleschi que l'ingénieur a réalisées entre 1694 et 1697, le présent article entend mettre en lumière, le long de l'abstraction progressive qui mène des dessins d'ingénieur aux schémas statiques, les fondements géométriques du *disegno* chez Viviani. Nous verrons à l'œuvre dans la pratique du dernier disciple une tension entre l'ingénieur et le physico-mathématicien, les arts et les sciences, annonçant les limites d'une forme de mathématisation de la nature – ou plutôt d'une forme de naturalisation des mathématiques – qu'il appelle « géométrie mécanique ».

La culture visuelle du *disegno*

Le concept de *disegno* – qui revêt les deux sens de dessin comme tracé linéaire à l'encre ou au crayon et de dessein comme conception ou projet de création – occupe une place centrale dans la culture florentine renaissante et jusqu'au XVII^e siècle, au sein d'un système de valeurs curiales, d'une culture visuelle, mais encore d'une épistémologie. En effet, la naissance et la formalisation de la perspective linéaire et du clair-obscur, ancrés dans la géométrie euclidienne et utilisés comme instruments de connaissance ont eu une influence considérable sur le développement de branches du savoir basées sur l'observation et la reproduction. Tout à la fois pratique, discipline³ et forme de pensée, le *disegno* révèle à quel point la distinction entre sciences et arts picturaux et mécaniques n'a pas cours dans la culture florentine renaissante.

Entrant dans l'atelier des peintres italiens de la Renaissance, Carmen Bambach a su montrer comment l'usage du dessin sur le *cartone*, avant sa copie par *spolvero* ou *incisione* sur les toiles et les fresques, met en lumière une pratique matérielle qui est à la fois théorique et technique, savante et artistique, et qui permet d'envisager la culture visuelle comme une véritable épistémologie pratique : « *To see revealed the intricate techniques and devices actuating the design processes of*

³ - La thèse foucaldienne de Karen-edis Barzman est celle d'une formation des subjectivités à travers la discipline du *disegno* telle qu'enseignée à l'*Accademia*, discipline responsable d'un certain ordre social et en particulier de l'émergence de l'état moderne en Toscane (Karen-edis Barzman, *The Florentine Academy and the Early Modern State: The discipline of disegno* (Cambridge : Cambridge University Press, 2000), notamment Ch. 5).

*the great Italian Renaissance masters is not to deny their genius, but rather to understand how fundamental a tool drawing was to their vision*⁴. »

Plus récemment, la *Bildwissenschaft* par l'intermédiaire de son héraut Horst Bredekamp a relancé les recherches iconologiques sur les images du savoir, abordant notamment les techniques artistiques mises en œuvre par Galilée dans sa production de formes savantes. Bredekamp envisage le dessin et la matérialité du tracé sur le papier comme un *medium* permettant de traduire en une expérience visuelle commune les observations faites par l'astronome grâce à son télescope⁵. Galilée est ainsi doté d'une « intelligence graphique » (*zeichnerische Intelligenz*) dont l'outil n'est autre que le *disegno* qui permet une « forme de pensée visuelle » (*visuelle Denkformen*)⁶.

Dans une même veine, Alexander Marr a récemment montré comment la pratique mathématique de Mutio Oddi au tournant du XVII^e siècle à Urbino était infusée, « entre Raphaël et Galilée », de l'usage d'instruments matériels – encre et papier en premier lieu –, d'une esthétique du *disegno* et d'un style architectural formant ainsi « un corps cohérent de savoirs et de pratiques liés entre eux à travers leur dépendance – ou leur relation – commune à la géométrie⁷ ».

Cette discipline du *disegno* est également au cœur de la pratique de Vincenzo Viviani qui l'a découverte, apprise et internalisée à la *scuola privata* de l'ingénieur Baccio del Bianco (1604-

⁴ - Carmen C. Bambach, *Drawing and Painting in the Italian Renaissance Workshop: Theory and Practice, 1300-1600* (Cambridge : Cambridge University Press, 1999), 11.

⁵ - Horst Bredekamp, *Gazing Hands and Blind Spots: Galileo as a Draftsman*, in Jürgen Renn (dir.), *Galileo in Context* (Cambridge : Cambridge University Press, 2001), 153-192.

⁶ - Toutes les traductions sont de l'auteur.

« L'étude des matériaux à travers lesquels Galilée consigna les phénomènes nécessite une loupe analogique et numérique semblable au télescope avec lequel il observa le ciel. Dans l'opération d'agrandissement s'ouvre un théâtre historique qui peut être considéré comme l'un des plus remarquables usages d'une forme de pensée visuelle. Le noyau de la présente recherche repose dans la reconstruction de l'intelligence graphique de Galilée. » (« *Reziprok zum Fernrohr, mit dem Galilei den Himmel betrachtete, erfordert das Studium des Materials, durch das er die Phänomene festhielt, die analoge und digitale Lupe. In der Vergrößerung tut sich ein historisches Theater auf, das zu den großen Momenten des Einsatzes visueller Denkformen gezählt werden kann. In der Rekonstruktion von Galileis ziehnerischer Intelligenz liegt der Kern der vorliegenden Untersuchung.* » Horst Bredekamp, *Galilei der Künstler: Der Mond. Die Sonne. Die Hand* (Berlin : De Gruyter, 2012), 6.)

Une nouvelle édition remaniée de cet ouvrage dont l'analyse reposait sur des dessins contrefaits attribués à Galilée (cf. Nick Wilding, *Faussaire de Lune. Autopsie d'une imposture, Galilée et ses contrefacteurs* (Paris : BnF, 2016)) est sortie plus récemment : Horst Bredekamp, *Galileis denkende Hand* (Berlin : De Gruyter, 2015).

Cf. également Horst Bredekamp (dir.), *A Galileo Forgery: Unmasking the New York Sidereus Nuncius* (Berlin : De Gruyter, 2014) tout récemment traduit en français (Horst Bredekamp (dir.), *SNML. Anatomie d'une contrefaçon* (Bruxelles : Zones Sensibles, 2019)).

⁷ - « *a coherent body of knowledge and practices bound together through their common reliance on – or relationship to – geometry* » Alexander Marr, *Between Raphael and Galileo: Mutio Oddi and the Mathematical Culture of Late Renaissance Italy* (Chicago : University of Chicago Press, 2011), 167.

1656). Car Galilée est déjà presque aveugle lorsque Viviani arrive à son chevet en 1640 et n'a pas pu lui transmettre la pratique du *disegno*. Après la mort de l'astronome pisan en 1642, le dernier disciple est d'abord nommé *aiuto* de Baccio del Bianco alors *ingegnere* dans le corps des *Capitani di parte*⁸. Au cours d'expertises hydrauliques dans le Val-d'Arno, Viviani continuera sur le terrain à apprendre le dessin auprès de ce second maître qu'il connaît déjà de la *scuola privata*. Mais c'est surtout sa longue carrière dans l'*Accademia* éponyme qui lui permettra de parachever sa maîtrise du *disegno*.

C'est une conception mathématique du *disegno* qui préside à la création et au développement de l'*Accademia delle arti del disegno* à Florence qui a été imaginée pour former non pas des artistes peintres mais des ingénieurs artistes, des architectes civils et militaires :

*The teaching of mathematics in the academy was surely intended to engender a facility in the theory and practice of disegno. However, the instruction Viviani offered in the academy (like that offered by Coccapani, del Bianco, and Torricelli before him) must have served, at least in the mind of Ferdinando II, as an efficacious way of grooming civil and military engineers and architects, who could contribute to a program of public works as well as to a politics of culture in the Medici State*⁹.

Une politique culturelle dont la démonstration se fait autant par l'érection de monuments d'architecture que par la tenue de grandes fêtes finement scénographiées, mécanisées, iconographiées :

*The intention behind the creation of the Accademia del Disegno by Cosimo I was specifically to ensure a supply of artists to serve the dynasty and to set up a workshop where the Medici iconography would be devised and where all the spectacles and ceremonies would be conceived*¹⁰.

⁸ - Créé dès 1267, le corps d'ingénieurs des *Capitani di Parte guelfa* est chargé par Côme I en 1549 tant de l'administration des biens domaniaux que de l'organisation des fêtes publiques. Ils rendent compte à l'*Ufficio dei Capitani*, parfois directement au Grand-Duc (cf. Diana Toccafondi et Carlo Vivoli, *Cartografia e istituzioni nella Toscana del Seicento: gli ingegneri al servizio dei Capitani di Parte e dello Scrittoio delle Possessioni*, in *Cartografia e Istituzioni in Età Moderna* (Gênes : Atti Società Ligure Storia Patria), XXVII (CI) Fasc. I (1986), 167-202). Viviani d'abord *aiuto* puis nommé *ingegnere* à la mort de Bianco en 1656, ne deviendra *idrometra e primo matematico* qu'en 1666 et n'aura toute sa vie durant que trop peu de temps à son goût pour s'occuper de mathématiques.

⁹ - Barzman, *op. cit.* in n. 3, 97.

¹⁰ - Ioana Magureanu, Baccio del Bianco and the Cultural Politics of the Medici Court, *Revue Roumaine d'Histoire de l'Art*, XLVIII (2011), 13-26, 15.

Fondée en 1563 par Côme I de Médicis, sur impulsion notamment de Vasari¹¹, l'*Accademia del disegno* eut pour objectif de promouvoir la production artistique toscane en fédérant les guildes d'artistes et en enseignant gratuitement le dessin. Le concept de *disegno* tel qu'envisagé par Vasari dans ses *Vite* sert donc de principe fondateur à l'académie. Réalisant l'unité des trois arts – la peinture, la sculpture et l'architecture –, le dessin est pour Vasari le lieu de la création, le mouvement par lequel l'œil, la main et l'esprit se projettent vers l'œuvre :

Le *disegno* est, selon Vasari, l'expression tangible et extérieure de l'idée, ou forme, que l'artiste a tirée de la chose grâce à son intellect. Le *disegno* qui délimite à la fois un champ, un espace, une ouverture, rassemble deux mouvements : l'un vise l'intelligible et l'autre, le sensible. [...] L'art atteint l'objet et traduit l'invisibilité du sens dans la visibilité pertinente du *disegno*. Voir une forme et la dessiner signifie dépasser sa surface lisse et plate pour en saisir l'invisibilité cachée et la révéler dans le profil du dessin¹².

Instrument de connaissance puis d'action sur le réel, le *disegno* vasarien est fondamentalement mathématique, visant, dans une veine aristotélicienne, à extraire du particulier matériel le savoir universel contenu dans les formes géométriques. La perspective linéaire, le clair-obscur et la géométrie euclidienne deviennent alors les trois piliers de l'enseignement du dessin à l'*Accademia* qui en fait une véritable pratique disciplinaire.

Au tout début du XVII^e siècle, l'enseignement du *disegno* à l'académie n'est pourtant pas tant vasarien et ce sont des artistes savants florentins comme Baccio del Bianco ou l'un de ses maîtres Giulio Parigi qui organisent des *scuole private* dans lesquelles ils enseignent la géométrie et la perspective mathématique, la mécanique, l'hydraulique, l'ingénierie ou encore l'architecture¹³. Viviani sera des élèves de Bianco. En 1638, à la demande en conseil de l'académie du *Luogotenente* Filippo Pandolfini, les cours de mathématiques sont de nouveau assurés. Le juriste, mathématicien, architecte et peintre Giovanni Coccapani est alors nommé *maestro dei Pittori* – un titre désignant aussi bien le professeur de mathématique que l'instructeur d'« académie »¹⁴ – et chargé d'enseigner

¹¹ - Catherine Goldstein, Vasari and the Florentine Accademia del Disegno, *Zeitschrift für Kunstgeschichte*, 38/2 (1975), 145-152.

¹² - Joselita Ciaravino, *Un art paradoxal. La notion de disegno en Italie (XV^e - XVI^e siècles)* (Paris : L'Harmattan, 2004), 132.

¹³ - Filippo Baldinucci, *Notizie de' professori del disegno da Cimabue in qua*, (Florence : V. Batelli e compagni, 1847), Vol. IV, 122 sq pour Parigi, et Vol. V, 16 sq pour Bianco.

Dans la veine de l'œuvre de Vasari et dans la continuation de celle-ci, Filippo Baldinucci a rédigé et compilé ces centaines de *Notizie de' professori del disegno* en six volumes publiés entre 1681 et 1728.

¹⁴ - L'académie est un dessin d'après modèle réalisé en *studio*.

la géométrie euclidienne, mais aussi l'ingénierie civile, la fortification, la mécanique et l'hydraulique¹⁵. En 1640, Coccapani est remplacé par Baccio del Bianco qui enseignera cinq ans avant d'être remplacé par Evangelista Torricelli. À la mort de ce dernier en 1647, c'est Vincenzo Viviani qui est nommé *maestro dei Pittori*, sa charge est renouvelée en 1657. Il sera également *Console* de l'académie pendant plus de cinquante ans, renouvelé jusqu'en 1701¹⁶.

La pratique du *disegno* telle qu'enseignée à l'*Accademia* est donc fondamentalement géométrique et a pour objectif de permettre la pratique de l'ingénierie. Dès 1642 à son retour de Paris, le prince Leopold de Médicis demande à Viviani de lui traduire *La perspective pratique* de Jean Dubreuil puis, plus tard, la *Perspective curieuse* de Jean-François Nicéron et la *Perspectiva horaria* d'Emmanuel Maignan¹⁷. Trois traductions qui resteront inachevées mais dont subsistent quelques traces¹⁸. Des manuscrits de la *Prospettiva pratica* de Lodovico Cardì, dit Il Cigoli, jamais publiée de son vivant, Viviani devait également reconstruire une démonstration mathématique qui ne verra jamais le jour :

Ce *Livre de perspective* de Lodovico Cigoli m'a été donné par le Sérénissime Prince Leopoldo pour que je m'attèle à démontrer mathématiquement les règles qui y sont enseignées, afin d'ajouter à ces pratiques les théories à l'usage de ceux qui les comprendraient, et que si l'on y devait trouver quelque incohérence, elle soit levée, afin de ne pas discréditer le vrai qui s'y trouve¹⁹.

Car d'Alberti à Cigoli en passant par Vinci, les traités de dessin, de peinture et de perspective qui font la culture florentine sont tous enracinés dans une géométrie euclidienne *pratique*. La distinction ici opérée par Viviani entre « *pratiche* » et « *teoriche* » souligne en effet qu'il y est rarement fait usage de cet héritage antique comme d'un instrument de démonstration *more geometrico*. Bien plus souvent, la présence plus ou moins explicite de la géométrie euclidienne au

¹⁵ - Barzman, *op. cit.* in n. 3, 91 et 160.

¹⁶ - Le site web de l'*Accademia del disegno* recense les procès-verbaux de l'*Archivio di Stato di Firenze* (ASF) relatifs à tous ses membres depuis sa création. Pour Viviani, voir <https://www.aadfi.it/accademico/viviani-vincenzo-di-jacopo/>

¹⁷ - Camerota, *op. cit.* in n. 2, 30-32.

¹⁸ - Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze (BNCF), Manoscritti Galileiani (Gal.) 246, ff° 66-70 et Gal. 326, ff° 503-546.

¹⁹ - « *Questo Libro di Prospettiva di Lodovico Cigoli m'è stato dato dal Serenissimo Principe Leopoldo per ch io vi faccia una volta fatiche attorno per dimostrare matematicamente le regole che ci insegnano, affine d'aggiungere a queste pratiche le teoriche per quelli, che li intendessero, e per che essendovi cosa non sussistente si levi via per non iscreditare il vero, che ci è.* » BNCF, Gal. 107, f° 1r.

sein des fondements du dessin appelle de ses vœux une reconstruction théorique des pratiques, comme c'est ici le cas.

Cette indivision, au cœur de la pratique de la théorie, *informe* le savoir produit par Viviani. Comme pour son contemporain romain Giovanni Pietro Bellori (1613-1696), le dessin est pour Viviani un véritable « *medium épistémologique* » (*epistemological medium*)²⁰ permettant la collaboration de l'œil et de la main dans l'activité de pensée :

*The act of drawing thus appears as a resumption of the act of thinking, and it is noteworthy that these two activities, thinking and drawing, are shown as something nearly coincidental*²¹.

L'épistémologie visuelle qu'est le *disegno* joue un rôle majeur : instrument pratique en tant que moyen d'expression graphique, autant qu'objet de réflexion théorique en soi, il se place ainsi au cœur de la pratique de la théorie et permet d'« expliciter le rapport de la main et de la pensée et faire valoir une réflexion théorique derrière chaque construction matérielle²² ».

Compétence incorporée, le *disegno* est donc pour Viviani non seulement une façon d'apprendre à voir mais encore une manière de comprendre par le dessin. L'apprentissage de l'observation minutieuse du réel, l'extraction des formes pertinentes, leur traduction dans un langage graphique adapté permettant l'émergence de la connaissance sont aussi les conditions de l'intervention technique sur ce réel. Pour Viviani, cette culture visuelle se présente donc comme une véritable épistémologie qui informe sa manière d'envisager le monde, qui éduque son œil et sa main dans l'observation, la représentation et l'abstraction du monde naturel en vue d'agir dessus. Le dernier disciple de Galilée devenu premier ingénieur du Grand-duc comprend les arts et les techniques comme un moyen de perfectionner la nature en l'imitant.

En effet, le dessin d'architecture ou d'ingénierie est le premier à profiter de ces nouveaux modes de représentation, les déclinant en coupes, éclatés et autres projections²³. Les *appunti* de terrain de Viviani nous montrent par exemple comment le cours de l'Arno peut être approximé de proche en proche par une suite de tronçons de longueurs données, c'est-à-dire réduit à la concaténation de parallépipèdes rectangles depuis sa source jusqu'à son embouchure²⁴ (*cf. illus.*

²⁰ - Elisabeth Oy-Marra, Drawing as an Epistemological Medium in Bellori's Lives, in Harald Klinke (dir.), *Art Theory as Visual Epistemology* (Cambridge : Cambridge Scholars Publishing, 2014), 111-123.

²¹ - Oy-Marra, *op. cit.* in n. 20, 116.

²² - Ciaravino, *op. cit.* in n. 12, 15-16.

²³ - Wolfgang Lefèvre (dir.), *Picturing Machines (1400–1700)* (Cambridge : MIT Press, 2004).

²⁴ - BNCF, Gal. 239, ff° 71v-76r.

1). Le fleuve ainsi réduit à une série de formes parfaites – des briques déterminées par trois longueurs – agencées selon des directions relatives – l'angle de l'une par rapport à la précédente –, les dessins des cours d'eau peuvent à leur tour se réduire à de simples schémas géométriques et, bien vite, se transformer en tableaux de mesures dont les points de repères géographiques sont précisés, en quelques mots, en marge des colonnes.

Depuis l'observation patiente et minutieuse de la nature jusqu'au dressage de longs tableaux de chiffres, de nombreuses opérations épistémologiques ont ainsi été réalisées : la forme du cours d'eau a d'abord été extraite du paysage pour faire l'objet de toute l'attention de l'œil et de la main du dessinateur, des mesures ont été réalisées puis transformées en inscriptions apposées le long du dessin, le fleuve ainsi quantifié selon les données jugées pertinentes par les ingénieurs peut être linéarisé par approximation géométrique et enfin cette dernière encodée en termes numériques inscrits sous forme tabulaire.

Ce type de géométrisation par morceaux qui est aujourd'hui très courant était déjà fréquent à l'époque et est notamment détaillé dans un manuel de Benedetto Castelli²⁵. Cette « géométrisation drastique du modèle des fleuves et des courants²⁶ » est à la fois la première force et la plus grande contrainte du géomètre moderne réduit à n'étudier que ce que l'hydraulique contemporaine appelle les régimes permanents ou stationnaires d'écoulement des fluides. Entre dessin et schéma, entre représentation et géométrisation, l'ingénieur Viviani doit jongler avec l'abstraction mathématique des sections géométriques de Castelli et la « physicalité » (*fisicità*) des portions de fleuve déjà éprouvée par Vinci²⁷.

Bien que l'on ait quitté le domaine de la représentation visuelle et du dessin naturaliste, puis traversé celui du schéma pour aboutir à une collection de chiffres ordonnés en tableau, toutes ces opérations ont nécessité les compétences à la fois pratiques et théoriques d'un Viviani à la fois dessinateur et ingénieur ; toutes ont nécessité la matérialité du papier, non seulement comme véhicule de ces inscriptions mais comme condition de leur possibilité même, les façonnant au passage. Si Viviani a bien le compas dans l'œil selon le mot attribué à Michel-Ange par Vasari, il

²⁵ - Afin de saisir en détail la place et l'importance de l'hydraulique toscane à cette époque, tant au cœur de l'économie politique et sociale du duché que dans le développement des mathématiques et des arts et techniques, cf. Cesare S. Maffioli, *La Via delle Acque (1500-1700). Appropriazione delle arti e trasformazione delle matematiche* (Florence : Olschki, 2010).

²⁶ - « *drastica geometrizzazione del modello dei fiumi e delle correnti* » Maffioli, *op. cit.* in n. 25, 184.

²⁷ - Sur cette opposition entre abstraction et physicalité, imposée par la pratique de la géométrie euclidienne, voir Maffioli, *op. cit.* in n. 25, 184 sq.

l'a également dans la main. Je me propose ici, en nous penchant sur des documents plus tardifs relatifs à un problème d'architecture traité par Viviani, de mettre en lumière la géométrisation sous-jacente au *disegno* afin de comprendre le glissement qu'il opère du dessin de l'ingénieur vers le schéma du géomètre.

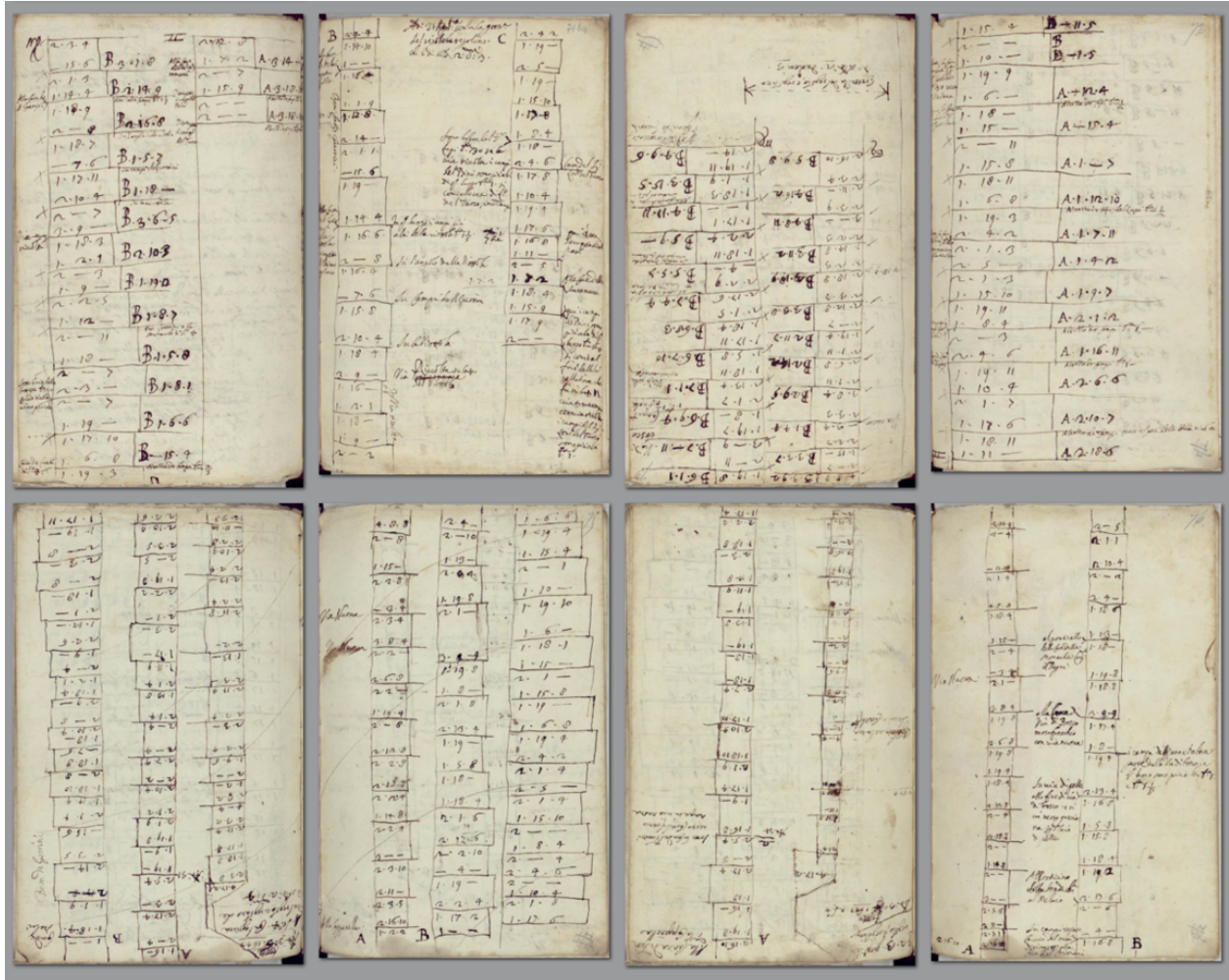


Illustration 1 BNCf, Gal. 239, ff°71v-76r.

Les fissures dans la coupole de Brunelleschi

À partir de travaux sur la prise de notes dans la pratique de la lecture à l'époque moderne, Lorraine Daston a défini un programme de recherche centré sur les « pratiques cognitives » (*cognitive practices*) qui forment l'*habitus* savant dans l'histoire des sciences, parmi lesquelles

l'observation, l'économie de l'attention, les arts de la mémoire, les pratiques de lecture ou encore la solidification et l'érosion des croyances²⁸. En particulier, dans le domaine des études sur les images savantes, au sein duquel les orientations théoriques ne manquent pas²⁹, Lorraine Daston a ouvert un champ de recherche plus philosophique sur l'observation et la construction visuelle de l'objectivité grâce au concept d'« images épistémiques » considérées comme « pratiques cognitives » et entendues au sens strict de productions visuelles qui remplacent le monde naturel et deviennent à leur tour l'objet de l'enquête savante :

All scientific images are more or less informative, more or less accurate, more or less competently executed. All serve the aim of representing some aspect of nature faithfully, whether naturalistically or schematically, as woodcut or as digital photo, life-sized or scaled. But epistemic images aspire to more: in the eyes of their makers and users, they are more than just representations of nature; they are nature, or rather, nature selected, distilled, refined and perfected. [...] An epistemic image earns its name by translating abstract epistemological priorities into concrete pictures³⁰.

Prolongeant sur un versant épistémologique l'enquête sur le *disegno* entamée dans l'histoire de l'art, j'aimerais me pencher sur les notes de travail produites par Viviani entre 1694 et 1697 lors d'une controverse sur la cause des fissures observées dans le *duomo* de Florence, ainsi que sur les dispositions mécaniques à mettre en œuvre pour y remédier. Une série de dessins techniques d'un genre nouveau pour l'époque – coupes, profils, élévations – permettent à Viviani de construire, par l'agencement de vues partielles, une image épistémique. C'est grâce à cet instrument graphique – en particulier le schéma – que l'ingénieur enracine son expertise dans l'expérimentation, la reproduction et la démonstration, afin d'émettre un diagnostic sur la coupole de Brunelleschi puis d'émettre un jugement quant aux travaux à y réaliser. Du point de vue épistémologique, cet usage éminemment géométrique du *disegno* nous permettra de clarifier la place des représentations visuelles dans les modes de compréhension mathématique des phénomènes naturels à l'époque moderne et discuter des figures de l'ingénieur, du mathématicien et de l'artiste.

²⁸ - Lorraine Daston, Taking Note(s), *Isis*, 95/3 (2004), 443-448.

²⁹ - Alexander Marr, Knowing Images, *Renaissance Quarterly*, 69 (2016), 1000-1013.

³⁰ - Lorraine Daston, Epistemic Images, in Alina Payne (dir.), *Vision and Its Instruments: Art, Science, and Technology in Early Modern Europe* (University Park : Penn State University Press, 2015), 13-35, 18.

Dessiné à main levée, sans grande précision, presque sans respect des proportions, mais néanmoins reconnaissable au premier coup d'œil : c'est le *duomo* de la cathédrale Santa Maria del Fiore de Florence qui occupe une pleine page d'une liasse de papiers de travail de Viviani archivée *a posteriori* sous l'en-tête *Relazioni di Fabbriche*³¹ (cf. illus. 2). Car si l'on regarde plus avant cette rapide esquisse, on y distingue plusieurs vagues qui, de haut en bas, balafrent la cathédrale de la lanterne au tambour ; ces longs tracés représentent les fissures qui travaillent l'édifice. Ainsi c'est bien la *fabbrica*, c'est-à-dire la construction matérielle et mécanique elle-même, qui intéresse alors Viviani, plutôt que son esthétique architecturale ou ses proportions. En effet, depuis l'achèvement de la lanterne en 1436 par Lorenzo Ghiberti, la coupole de Brunelleschi ne cesse de bouger sous l'effet du terrain, des tremblements de terre, des éclairs autant que des contraintes internes à la structure, si bien que s'ouvrent des fissures dans les voutes internes et externes de celle-ci³². Dès le début du XVII^e siècle se pose alors avec urgence la question de la stabilité du dôme florentin qui semble menacer de s'effondrer³³.

Le 6 janvier 1694, Viviani, alors premier ingénieur à la cour du Grand-duc de Toscane, est sommé par ce dernier de mettre son expertise au service d'un collège de *deputati* dirigé par Giovan Battista Nelli, alors *Provveditore dell'Opera*, et chargé de statuer sur l'état de la cathédrale Santa Maria del Fiore ainsi que de proposer des solutions pour répondre aux problèmes soulevés le cas échéant³⁴. Deux jours plus tard, accompagné des autres membres de la commission, c'est un Viviani âgé de soixante-et-onze ans qui entreprend la longue et fatigante ascension de la coupole de Brunelleschi jusqu'à sa lanterne pour observer *in situ* les dégâts causés par le temps.

³¹ - BNCF, Gal. 222, f° 112r.

Cette liasse de 214 folios précède seulement les miscellanées dans le carton dédié à la mécanique des solides au sein des papiers personnels de Viviani. Assez hétérogène, elle rassemble une série de comptes-rendus d'expertises (*relazioni*) au sujet de bâtiments et d'ouvrages d'arts toscans (*fabbriche*). Ces comptes-rendus très textuels, car destinés aux autorités, sont parfois accompagnés de brouillons et dessins comme c'est le cas pour la coupole.

³² - Sur la coupole de Brunelleschi, voir le récent ouvrage de Massimo Ricci, *Il genio di Filippo Brunelleschi e la costruzione della Cupola di Santa Maria del Fiore* (Livourne : Le Sillabe, 2014).

³³ - Cesare Guasti, *La Cupola di Santa Maria del Fiore illustrata con i documenti dell'archivio dell'opera secolare* (Florence : Barbera, Bianchi, e comp., 1857).

³⁴ - BNCF, Gal. 222, f° 123r. Lettre de Leopoldo Tomansi à Vincenzo Viviani datée du 6 janvier 1694.

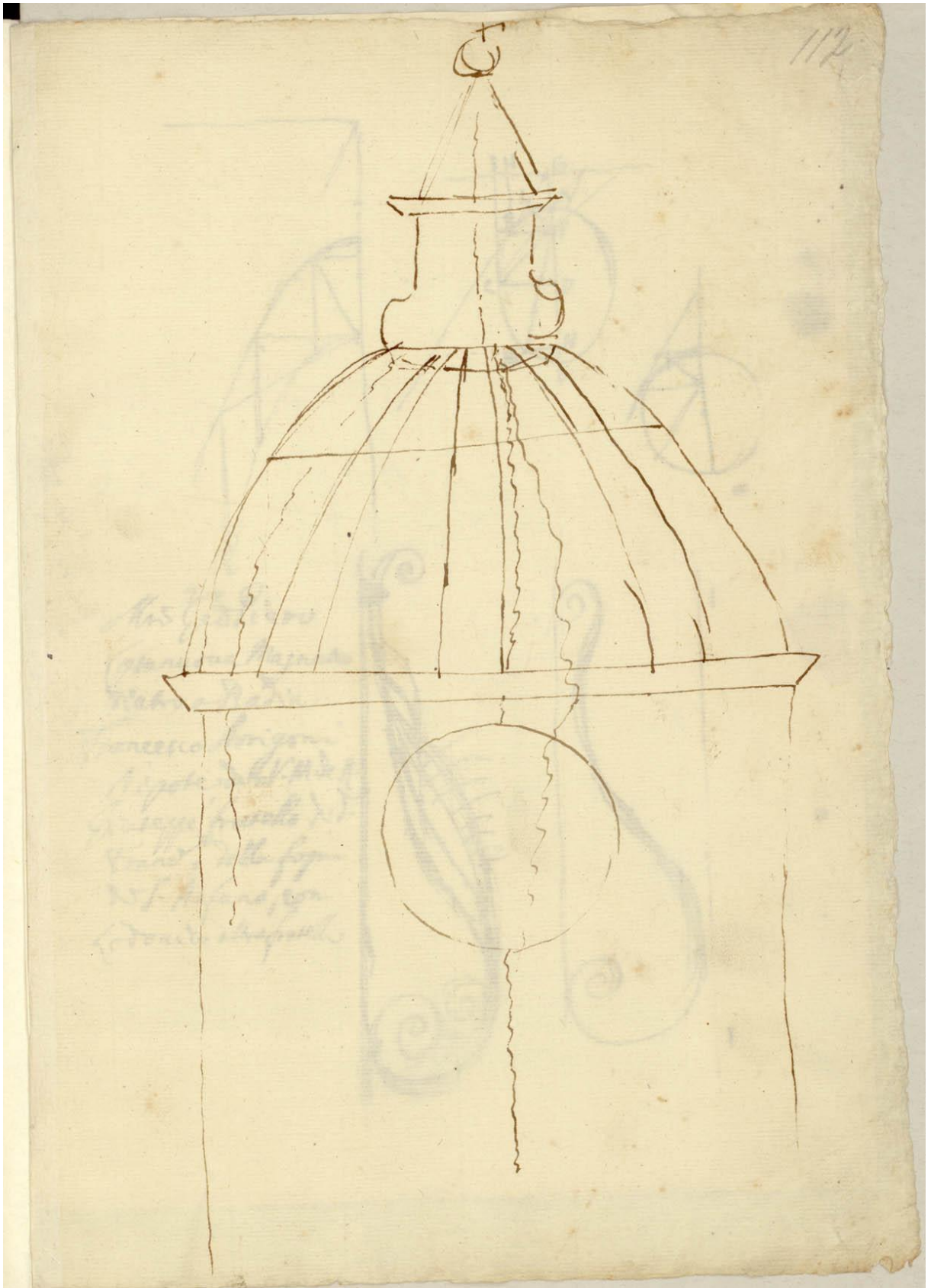


Illustration 2 BNCF, Gal. 222, f° 112r.

Un an plus tard, alors que Viviani n'a suivi que de loin les réflexions et délibérations du collègue de *deputati*³⁵, Giovan Battista Nelli atteste au nom de la commission de l'existence de fissures dans l'édifice et, craignant pour la stabilité de celui-ci, préconise de cercler le tambour et la coupole à l'aide de grandes chaînes métalliques pour empêcher le mouvement de la structure.

Cette décision reposait quasiment exclusivement sur des considérations empiriques tenues par de nombreux architectes de l'époque³⁶ et soutenues par l'observation d'autres *fabbriche* : les coupoles italiennes non « armées » de chaînes métalliques ont tendance à s'ouvrir vers l'extérieur, il convient donc d'entraver ce mouvement centrifuge³⁷. C'est ce qui apparaît notamment dans la correspondance entre Falconieri et Viviani initiée par ce dernier au sujet de la coupole de Saint-Pierre de Rome³⁸ – la pareille sera rendue quelques décennies plus tard aux romains qui s'enquerront des études et travaux réalisés par Viviani à Florence³⁹. Ainsi en février 1695, les travaux sont autorisés par le Grand-duc et la fonte des chaînes est entamée.

C'était sans compter, cependant, sur une voix discordante : celle anonyme des *Opinioni intorno lo stato della gran Cupola del Duomo di Firenze*⁴⁰ envoyées à l'automne 1695 au Grand-duc et arguant, contre la mise en place du cerclage, que la coupole tombe vers son intérieur du fait d'un surpoids sur ses fondations⁴¹. Il conviendrait alors de ne pas procéder à l'installation des chaînes qui ne feraient qu'empirer le phénomène. Pour appuyer son argument, l'ingénieur anonyme, rapidement identifié comme étant Alessandro Cecchini, fait appel à des résultats théoriques relatifs

³⁵ - « Selon l'opinion traditionnelle, soutenue par les affirmations de Bartolomeo Vanni dans un écrit resté inédit, et confirmée par le témoignage de Clemente Nelli, Vincenzo Viviani n'aurait pas manifesté grand intérêt dans l'examen, auquel il était tenu comme député, de la question des "fissures" de la Coupole. [...] Il semble donc que Viviani ait initialement suivi avec un certain détachement les travaux de la Commission, sans s'engager directement dans l'examen des questions. » (« *Seconda l'opinione tradizionale, sostenuta dalle affermazioni di Bartolomeo Vanni, in uno scritto rimasto inedito, e confermata dalla testimonianza di Clemente Nelli, Vincenzo Viviani non avrebbe manifestato eccessivo impegno nell'esame, cui era tenuto come deputato, della questione degli "screpoli" della Cupola. [...] Sembra, cioè, che il Viviani abbia inizialmente seguito i lavori della Commissione con notevole distacco, senza impegnarsi direttamente nell'esame delle questioni.* » Paolo Galluzzi, Le colonne "fesse" degli Uffizi e gli "screpoli" della cupola. Il contributo di Vincenzo Viviani al dibattito sulla stabilità della cupola di Brunelleschi (1694–1697), *Annali dell'Istituto e Museo delle Scienze di Firenze*, 2/1 (1977), 71-111.)

³⁶ - Galluzzi, *op. cit.* in n. 35, 74.

³⁷ - Galluzzi, *op. cit.* in n. 35, 76.

³⁸ - Les brouillons de la lettre de Viviani sont conservés en BNCF, Gal. 222, ff° 119r et 141v ; la réponse de Falconieri en BNCF, Gal. 222, ff° 142r-145r.

³⁹ - Pascal Dubourg-Glatigny, *L'architecture morte ou vive. Les infortunes de la coupole de Saint-Pierre de Rome au XVIIIe siècle* (Rome : École française de Rome, 2017).

⁴⁰ - Giovanni Battista Nelli, *Discorsi di Architettura di G.B. Nelli* (Florence : Eredi Paperini, 1753), 77-103, cité par Galluzzi, *op. cit.* in n. 35, 79.

⁴¹ - Nelli, *op. cit.* in n. 40, 78 sq.

à la *resistentia solidorum*, l'une des deux nouvelles sciences détaillées par Galilée dans ses *Due nuove scienze* : « celui qui ne voudrait pas me croire à ce propos, est dans l'obligation de croire Galilée⁴² ».

C'est alors seulement que, dans une réaction d'orgueil décrite par Galluzzi, Viviani se penche véritablement sur le problème des fissures dans la coupole de Brunelleschi : non seulement il se doit de défendre le résultat d'une expertise à laquelle il a apposé son nom, mais il doit qui plus est faire valoir son statut de dernier disciple de Galilée. Ce qui se joue pour Viviani en cet instant, c'est moins l'exactitude d'une expertise, à laquelle il a d'ailleurs peu œuvré, que la défense d'un héritage intellectuel dont il prétend être le seul et dernier légataire. Expérimentation, modélisation, abstraction grâce à la géométrie euclidienne et aux travaux de son maître, Viviani s'efforce alors de mettre en branle tout cet héritage au service de la démonstration théorique *a posteriori* d'une décision déjà prise sur la base d'une expertise empirique – une démonstration qui n'a d'autre but que de renforcer son statut de dépositaire et possesseur des sciences galiléennes.

À l'image du croquis précédent, les papiers de travail de Viviani sur les fissures de la coupole florentine⁴³ sont très illustrés de la main même de celui-ci. Les nombreux dessins qui émaillent ces quelques folios jouent des rôles différents pour le savant selon qu'il s'agit de dresser un protocole expérimental, de modéliser géométriquement le problème ou de résoudre celui-ci grâce à la statique. Ouvrons donc cette liasse de brouillons pour y chercher quel usage l'ingénieur Viviani fait du *disegno*.

Expérimenter

Dès après avoir pris connaissance des *Opinioni* de Cecchini, Viviani entreprend de faire réaliser une expérimentation permettant de vérifier si l'édifice continue de bouger et de mesurer la vitesse de ce mouvement ainsi que sa direction en estimant la déformation des fissures au cours du temps. Car si Cecchini s'oppose à l'installation des chaînes métalliques dont il prétend qu'elles aggraveront le phénomène, c'est parce qu'il pense que le problème vient des fondations de la cathédrale, qu'il conviendrait d'abaisser pour arrêter le mouvement vers l'intérieur de la coupole.

⁴² - « *chi non credesse a me questa proposizione, è in obbligo di crederla al Galileo* » Nelli, *op. cit.* in n. 40, 88, cité par Galluzzi, *op. cit.* in n. 35, 79.

⁴³ - BNCF, Gal. 222, ff° 107r-146v.

Pour répondre à Cecchini, Viviani veut donc commencer par montrer par l'expérimentation que la coupole tombe vers l'extérieur, que les fissures vont en s'agrandissant et qu'il est donc nécessaire d'intervenir sur la structure en la cerclant de chaînes métalliques.

Dans un régime expérimental des savoirs qui prend son essor dans les académies dont il est un acteur⁴⁴, Viviani entend donc faire réaliser une expérience pour juger de l'état de la coupole de Brunelleschi et proposer sa propre solution. *Faire* réaliser une expérimentation, l'expression est importante car Viviani qui a dorénavant presque soixante-treize ans ne peut se permettre de faire l'ascension de la coupole jusqu'à deux fois par mois dans le seul but de faire des mesures. Il voulait d'ailleurs le préciser aux lecteurs du rapport de la commission des *deputati* comme on peut le lire dans l'un des brouillons de son apostille à la lettre de Nelli : « [...] compte tenu de mon grand âge et de la faiblesse de mes jambes, je n'ai pas pu me résoudre à satisfaire l'ordre de notre Sérénissime Grand-Duc [...] »⁴⁵. » S'il semblerait que le peu d'intérêt qu'il portait au problème fut encore plus grand que la « faiblesse de [s]es jambes », c'est tout de même dans l'optique de pouvoir envoyer des petites mains réaliser ces relevés qu'il rédige donc un protocole expérimental intitulé « Tâches à réaliser de nouveau concernant les grandes fissures de la Coupole » et dont nous disposons du brouillon⁴⁶ (cf. illus. 3) ainsi que de la transcription⁴⁷.

L'objectif est simple – il s'agit donc de mesurer le mouvement relatif de la coupole interne par rapport à la coupole externe – et est précisé par Viviani dès le début de son protocole :

Afin de clarifier, sans qu'on n'y puisse opposer aucune exception et sans qu'il subsiste le moindre doute, si l'une ou l'autre des deux parties cassées des deux faces de l'octogone, tant dans la Coupole externe que dans l'interne, se déplace vers l'intérieur à cause de l'abaissement des fondations soumises à ce déplacement, ou vers l'extérieur à cause de la poussée du poids supérieur, l'on pourrait procéder ainsi⁴⁸.

⁴⁴ - Viviani est un membre fondateur actif de l'*Accademia del Cimento* (cf. Luciano Boschiero, *Experiment and Natural Philosophy in Seventeenth-Century Tuscany: The History of the Accademia del Cimento* (Dordrecht : Springer, 2009)).

⁴⁵ - « [...] stante la debolezza delle mie gambe e la mia grave età, non ho potuto soddisfarmi per eseguire il benigno comando del Serenissimo Gran Duca nostro [...] » BNCF, Gal. 222, f° 125r.

⁴⁶ - « Diligenze da farsi di nuovo intorno agli screpoli maggiori della Cupola » BNCF, Gal. 222, f° 120rv.

⁴⁷ - Galluzzi, *op. cit.* in n. 35, 105-106.

⁴⁸ - « Per chiarirsi, senza che possa darvisi eccezione e senza avervi davver alcun dubbio, se l'una o l'altra delle due parti rotte delle due facce dell'ottagono, tanto nella Cupola esterna, che nell'interna, abbia moto all'ingù e per cagione d'abbassare il fondamento a quello sottoposto, o se habbia all'infuori, per cagione della spinta del peso superiore, si potrebbe operar così. » BNCF, Gal. 222, f° 112r.

Notons que Viviani fait une référence implicite aux *Opinioni* de Cecchini. En effet, les mesures doivent établir sans doute possible (« *senza [...] alcun dubbio* ») si les coupes se déplacent vers l'intérieur (« *all'ingiù* ») auquel cas il conviendra d'abaisser les fondations de l'édifice – c'est la solution de Cecchini –, ou vers l'extérieur (« *all'infuori* ») auquel cas le cerclage sera de rigueur – comme l'a préconisé Viviani en donnant son accord aux *deputati*.

Le protocole est aussi relativement simple. Il convient d'abord de repérer deux fissures face à face dans les coupoles interne et externe du dôme pour y tracer, dans la pierre même de l'édifice, deux rectangles de référence, perpendiculaires aux fissures choisies et les traversant (*cf.* illus. 3). Alors, pour estimer le mouvement du dôme, il suffit de venir mesurer, avec régularité dans le temps, les longueurs des rectangles ainsi que la distance qui les sépare – en prenant soin d'avoir scellé le lieu des relevés pour éviter que quelqu'un n'y touche :

Ceci fait, que l'on ferme tout à clef sûre afin d'empêcher à plus d'un le passage et l'entrée, si bien que personne d'autre ne pourra voir ces traces, non plus les toucher. À partir de là, l'on ira chaque mois faire la reconnaissance de ces distances prises, et si l'on n'y trouve aucun changement, alors l'on pourra affirmer que ces fissures ne changent pas non plus⁴⁹.

Une expérimentation des plus simples donc mais presque impossible à saisir sans l'appui du dessin réalisé par Viviani et auquel il fait référence tout au long de son protocole dont l'organisation est maîtrisée : après deux lignes d'en-tête, qui introduisent avec précision le contenu du folio à venir, puis l'objectif clairement stipulé de l'expérimentation, viennent enfin le dessin illustrant les fissures et les manipulations à réaliser sur celles-ci. Étant donnée la place qu'il occupe dans le folio, il semble bien que le schéma ait été réalisé par Viviani juste après qu'il ait précisé l'objectif poursuivi mais avant le reste du texte qui suit donc le contour gauche du dessin. Le schéma ne vient donc pas illustrer *a posteriori* un texte qui pourrait en faire l'économie mais il est bien l'élément graphique à partir duquel va pouvoir se dérouler le protocole à venir. Il n'est pourtant pas non plus lisible tel quel et c'est l'ajout d'une dizaine de lignes à sa gauche qui permet d'en saisir le sens. Le jeu des lettres émaillant l'image permet au texte de préciser la nature du dessin : « [...] figurons-nous que ABCD soit une face interne de la Coupole externe et que EFGH soit la face externe de la Coupole interne, dans lesquelles se trouvent les *screpoli* correspondants NI, KL [...]»⁵⁰. » Texte et image, main dans la main, permettent donc ensemble de représenter sur la surface du papier une situation physique dans le dôme de la cathédrale.

Il ne doit cependant pas s'agir d'une situation physique en particulier, bien située dans le dôme, car les mesures sont à effectuer en plusieurs endroits de celui-ci. Le dessin est tracé à main

⁴⁹ - « Fatto ciò, si serri tutto a chiave sicura da tenersi da più d'uno il passo e l'adito, sì che niun altro possa veder tali segni, non che toccar. Li a poi, di mese in mese, si vada a far la ricognizione di tali distanze prese, che se non si troverà mutatione in alcuna, si potrà affermar che né meno in tali screpoli ella sia seguita. » BNCF, Gal. 222, f° 112r.

⁵⁰ - « [...] figuriamoci che la ABCD sia una faccia interna della Cupola esterna e che la EFGH sia l'esterna faccia della Cupola interna, nella quali sieno gli screpoli NI, KL corrispondenti [...] » BNCF, Gal. 222, f° 112r.

levée par un Viviani que seule la forme générale intéresse car il traite d'une fissure quelconque. Le schéma qui figure seulement des morceaux découpés dans la coupole n'est donc pas une représentation réaliste mais un pas vers l'abstraction d'une forme plus générale. Le texte est d'ailleurs là pour le rappeler qui traite de longueurs quelconques : « d'une longueur horizontale, par exemple, de 1 brasse 1/2 et d'une hauteur d'1/3⁵¹ ».

Un pas vers l'abstraction d'une forme générale donc, mais un pas seulement car il s'agit toujours d'un protocole expérimental indiquant la marche à suivre pour réaliser pratiquement des mesures empiriques dans le dôme de la cathédrale. Les opérations sont précisées dans le texte par une série de verbes d'action sous une forme impérative impersonnelle : « que l'on fasse » (*si facciano*), « que l'on marque » (*si contrassegnino*), « que l'on prenne » (*si piglino*) et enfin « que l'on aille faire la reconnaissance » (*si vada a far la ricognizione*)⁵². Le schéma de Viviani n'a donc de sens qu'en tant qu'il permet à un opérateur muni du protocole de se référer à un pan de coupole qu'il aurait sous les yeux. Assez abstrait pour représenter une fissure quelconque mais assez concret pour n'avoir d'utilité que pratique, le dessin du protocole doit être transporté jusque dans la coupole pour y trouver son application.

Ainsi, plutôt que de modéliser la coupole pour la faire tenir sur une feuille de papier dans son bureau comme nous le verrons par la suite, Viviani s'attèle d'abord au contraire à envoyer son papier dans la coupole pour en tirer des données empiriques nécessaires à sa réflexion théorique. L'image n'est pas ici valable en soi dans son opacité, elle est bien plutôt une référence la plus transparente possible dont la signification et l'utilité n'apparaissent que dans la confrontation à ses référents, les fissures de la coupole. Ces mesures ne seront cependant jamais réalisées et Viviani devra s'en tenir aux expériences traditionnelles menées par Nelli entre 1694 et 1695 : « [...] pour bien clarifier si de tels *screpoli* se dilatent davantage, il faut en faire l'épreuve l'aide des habitués tasseaux de bronze⁵³. » Des expériences traditionnelles consistant à insérer des tasseaux de bronze ou de marbre dans les fissures et que la commission a retrouvé déplacés, encastrés voire cassés : la coupole se déplace en direction de la tribune du Sacrement.

⁵¹ - « *di lunghezza orizzontale, per esempio, di 1 braccio 1/2 e d'altezza d'1/3* » BNCF, Gal. 222, f° 112r.

⁵² - BNCF, Gal. 222, f° 112r.

⁵³ - « [...] *per ben chiarirsi se tali screpoli si dilatassero di vantaggio, di farne varie prove con le solite biette di bronzo* » Guasti, *op. cit.* in n. 33, 179.

Reproduire

De sa prise de fonction au sein du collège de *deputati* début 1694 à sa réponse musclée aux critiques émises par Cecchini en 1697, Viviani ne fera que deux fois l'ascension du dôme de la cathédrale Santa Maria del Fiore. D'abord par manque d'implication dans les études de la commission puis par intérêt purement théorique et géométrique, le septuagénaire ne fréquente que peu et rapidement la coupole de Brunelleschi. Ainsi, pour se donner les moyens d'exercer son expertise de premier ingénieur du Grand-duc sur cet édifice sans avoir à y remonter chaque fois, Viviani développe deux stratégies réciproques et complémentaires. Nous l'avons vu précédemment, la première consiste à envoyer dans la structure des émissaires munis de son protocole expérimental dans l'intérêt d'y pratiquer des relevés expérimentaux sur le mouvement de la cathédrale – dans ce premier cas, les schémas tracés par Viviani n'ont de signification que mis en relation directe avec la matérialité des fissures.

La seconde stratégie, réciproque, consiste à faire venir la structure sur le plan de travail de son bureau. Alors, plutôt que de produire depuis son lieu de travail des inscriptions qui doivent être emportées dans l'édifice, il produit des inscriptions qui permettent d'emporter l'édifice sur son lieu de travail. L'esquisse rapide à main levée que nous avons déjà rencontrée (*cf.* illus. 1) participe de cet effort de construire un objet de savoir au moyen d'images épistémiques. Si ce dessin n'est pas utilisable d'un point de vue mathématique ni ne répond aux besoins techniques de l'ingénieur, la lanterne, le dôme et le tambour de la coupole sont reconnaissables au premier coup d'œil tandis que les fissures qui les balafrent attirent l'attention : en un seul dessin, quelques coups de crayon, le problème est exposé sur le papier.

Si le problème est ainsi miniaturisé et rapporté aux deux dimensions de la surface du papier, il n'est pas encore possible de le traiter sur cette dite surface car les données mécaniques et géométriques du problème ont ainsi été escamotées. C'est à l'aide d'autres dessins que Viviani reconstruit sur le papier la morphologie précise de l'édifice, ses dimensions ainsi que son volume.

La vue en coupe, développée par l'ingénierie et l'architecture italienne au cours du siècle précédent⁵⁴ ainsi que dans les *Kunstbüchlein* de la Renaissance allemande⁵⁵, est un outil graphique

⁵⁴ - Lefèvre, *op. cit.* in n. 23.

⁵⁵ - Jaya Marie-Paule Remond, « The Kunstbüchlein: Printed Artists' Manuals and the Transmission of Craft in Renaissance Germany », Thèse de doctorat (Cambridge : Harvard University, 2014).

dont se saisit alors Viviani pour préciser le profil de la coupole de Brunelleschi. Dans le dessin d'un fragment de l'édifice⁵⁶ (cf. illus. 4), Viviani détaille la morphologie de la partie haute de la cathédrale, conserve les proportions du bâtiment, précise le jeu des deux coupoles interne et externe ; s'ils ne sont pas explicitement indiqués, les pleins et les vides se laissent deviner tandis que l'on commence à sentir le jeu des contraintes mécaniques dans la structure. Ce dessin technique permet alors de pénétrer virtuellement la construction depuis le plan de travail de Viviani. En d'autres endroits⁵⁷ ce dernier apporte des précisions sur la structure en dessinant en coupe des détails de l'architecture qui viennent compléter les vues plus larges. Mais ces dessins ne suffisent pas à rapporter l'édifice – du moins ses propriétés pertinentes pour l'étude – jusque dans le bureau de l'ingénieur.

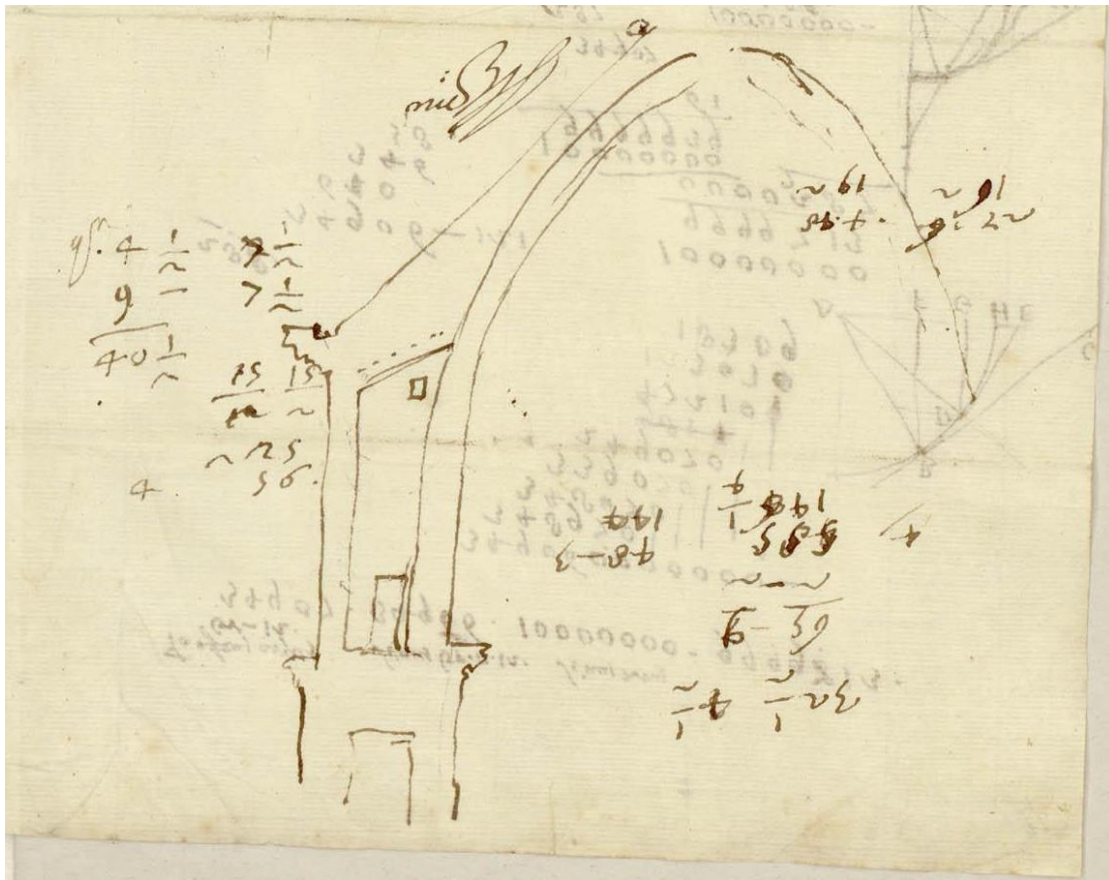


Illustration 4 Fragment de BNCF, Gal. 222, f° 121v.

<https://dash.harvard.edu/handle/1/12274193>

⁵⁶ - BNCF, Gal. 222, f° 121v.

⁵⁷ - BNCF, Gal. 222, f° 114v.

Les dimensions de l'objet étudié sont en effet cruciales à la résolution du problème – nous verrons par la suite que, selon Galilée, les proportions ne suffisent pas car les contraintes mécaniques ne sont pas elles-mêmes proportionnelles aux dimensions de l'édifice. Ainsi Viviani double les vues en coupe de la cathédrale d'un autre type de dessin technique sur lequel l'architecture est ramenée à un profil filaire permettant de mentionner sans équivoque les dimensions de la coupole en brasses (« *braccio* » dénotées « *b* » et comptées en quantités entières auxquelles s'ajoutent des fractions) selon des repères situés sur la surface intérieure de la cathédrale⁵⁸ (cf. illus. 5). Fonctionnant ainsi main dans la main, les vues en coupe et les profils dimensionnés de Viviani permettent de miniaturiser et projeter sur la surface du papier les propriétés physiques et mécaniques du dôme de Brunelleschi.

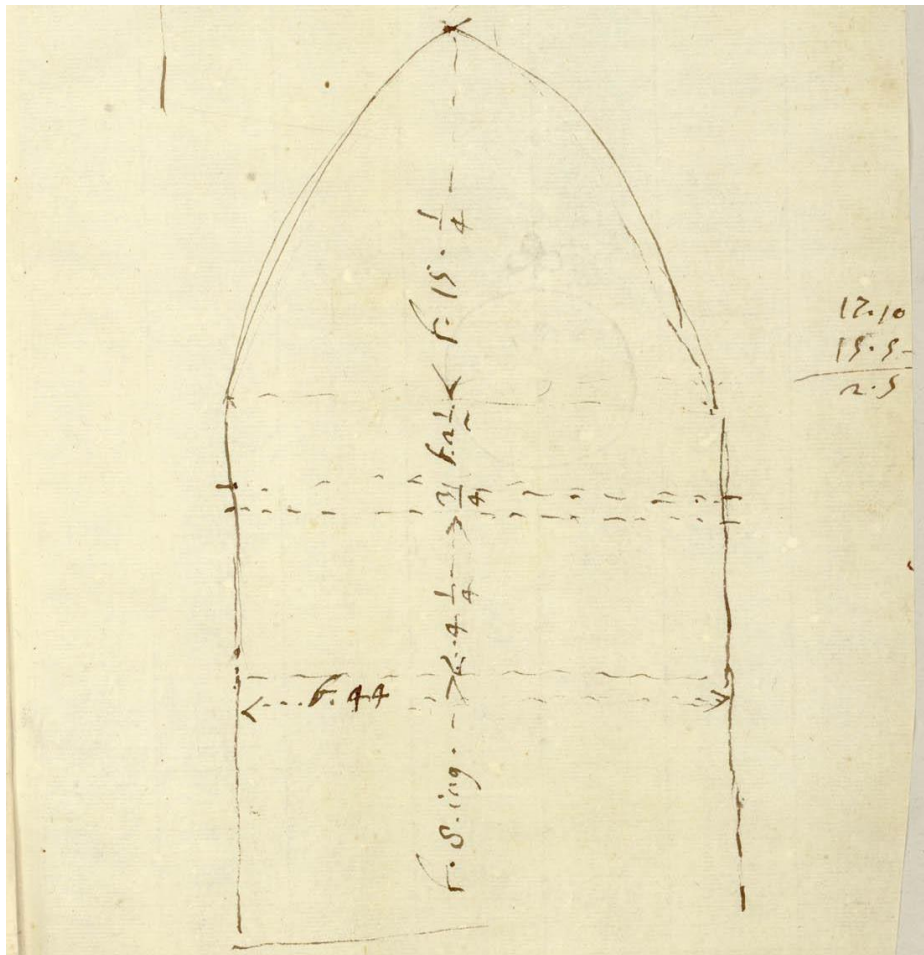


Illustration 5 Fragment de BNCF, Gal. 222, f° 115r.

⁵⁸ - BNCF, Gal. 222, ff° 115r et 117bis.

Nous nous rapprochons ainsi du kaléidoscope de l'image épistémique : pour Viviani, une image seule ne suffit pas à remplacer l'objet d'étude et s'ériger en objet de savoir en soi, c'est tout un réseau de dessins de types divers qui fait office d'image épistémique. Un réseau auquel doit s'ajouter un troisième type de dessin visant à restaurer le volume d'une cathédrale projetée ou « écrasée » sur le papier. Car nous n'avons vu pour l'instant que des fragments de la coupole de Brunelleschi, des morceaux de l'édifice abstraits de l'ensemble physique. C'est volontairement que Viviani se débarrasse des fondations de l'édifice en opposition aux thèses de Cecchini. Mais *quid* de ce qui échappe à ces vues en coupe et profils filaires ? Au premier abord l'on pourrait croire que les fragments suffisent et que le reste du dôme se construit intuitivement par symétrie en faisant tourner la demi-coupe de l'illustration 4 autour d'un axe central comme le suggère la forme du profil de l'illustration 5.

Il ne suffit pourtant pas de faire tourner ces demi-coupes autour d'un axe de révolution pour retrouver le volume de la construction car celle-ci n'est pas à symétrie centrale : le tambour est de forme octogonale sur lequel vient se poser un dôme de même forme mais dont les dimensions se réduisent continuellement jusqu'à la lanterne. Ainsi pour reconstruire le volume tridimensionnel de la structure mécanique qui est l'objet de l'étude de Viviani, ce dernier doit ajouter à son faisceau de dessins des coupes selon des plans horizontaux laissant ainsi voir la morphologie et les dimensions de la partie supérieure de la cathédrale. Ainsi entre quelques calculs et la rédaction d'une note à l'intention de Nelli, Viviani trace le profil filaire du tambour émaillé de ses dimensions et de l'angle de ses faces (*cf.* illus. 6). Profil auquel il convient d'ajouter, comme dans le cas des coupes verticales, une seconde coupe horizontale prise dans le dôme et détaillant la structure : les proportions et l'épaisseur des deux coupoles interne et externe, celle-ci renforcée à ses angles, celle-là peut-être déjà virtuellement cerclée d'une chaîne métallique (*cf.* illus. 7). Ces dessins réalisant la projection de la partie haute de la cathédrale selon la dimension qui échappait aux projections précédentes permet donc à Viviani de redonner à l'édifice sa forme, ses dimensions et son volume matériels tout en projetant et miniaturisant celui-ci sur l'espace plan de la feuille de papier. La cathédrale – ses propriétés physiques et mécaniques pertinentes pour l'étude des fissures – a été reproduite sous forme d'inscriptions graphiques.

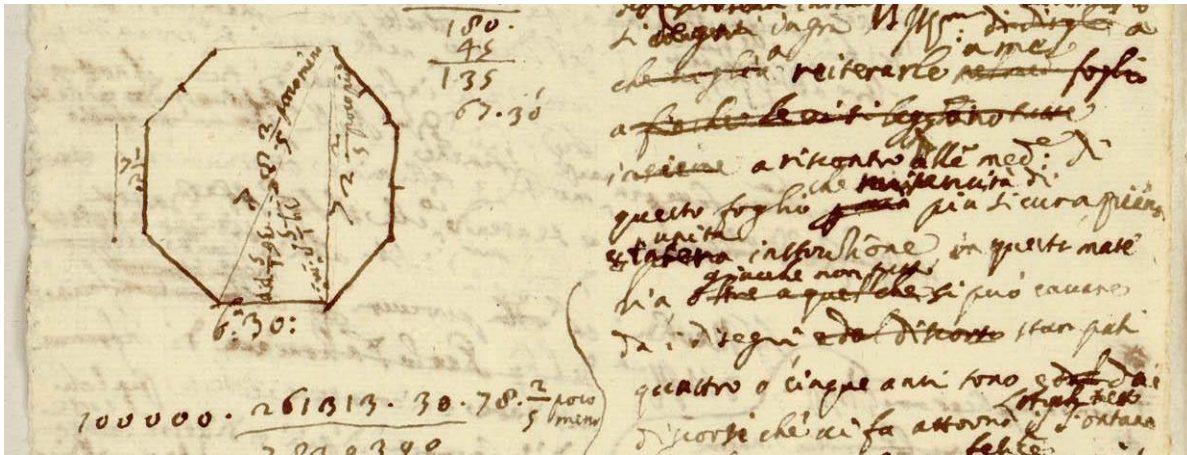


Illustration 6 Fragment de BNCF, Gal. 222, f° 130v.

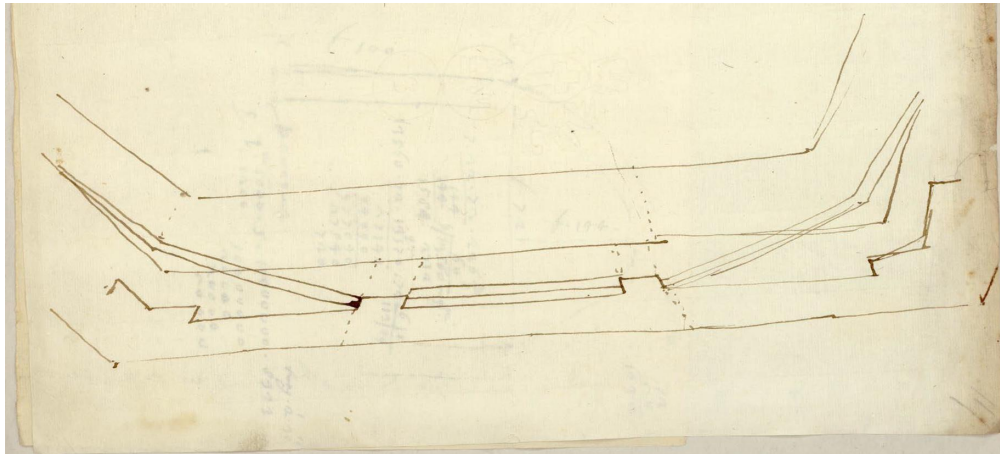


Illustration 7 Fragment de BNCF, Gal. 222, f° 117r.

Reproduite donc et non seulement représentée, car contrairement aux schémas pour l'expérimentation, le faisceau de dessins ici réalisés par Viviani permet de créer un objet de savoir à part entière sur lequel en retour vont être menées des expérimentations – modélisation géométrique et calculs mécaniques que nous abordons dans un instant. En rapportant la coupole sur le papier et en la réduisant à ses propriétés physiques et mécaniques, l'objet ainsi construit se passe de sa référence externe et devient signifiant en soi, manipulable en tant que tel sur la surface du papier, sur le plan de travail du bureau de l'ingénieur. La traduction graphique de l'objet architectural permet d'abstraire de celui-ci les propriétés épistémologiques qui intéressent l'ingénieur. L'objectif est ici de produire, au sens de Lorraine Daston, des images épistémiques devenant des objets de savoir en soi, remplaçant leur référent physique qu'est l'édifice :

*Not all scientific images, then or now, count as epistemic images. An epistemic image is one made with the intent not only of depicting the object of scientific inquiry but also of replacing it. A successful epistemic image becomes a working object of science*⁵⁹.

Cependant, pour Viviani, l'image seule n'est pas épistémique, c'est un réseau ou un faisceau de dessins qui permet de remplacer l'objet de l'étude pour devenir un objet de savoir en soi et c'est le passage d'un dessin à l'autre, leur superposition, leur combinaison qui permettent de construire cet objet de savoir qu'est l'image épistémique. Notons enfin que de l'esquisse à main levée de la façade extérieure de la coupole (illus. 1) à l'octogone symbolisant la coupe horizontale du tambour (illus. 6), le dessin de Viviani s'abstrait progressivement de l'aspect visuel de l'édifice en même temps qu'il se codifie par l'agencement d'éléments discrets normés (lignes droites, angles, pointillés, cotes...) permettant d'extraire et de visualiser les propriétés mécaniques de la structure pourtant invisibles (distances, angles, intérieur des coupes...). Cette grammaire du dessin sous-tend une analytique du visuel qui va se prolonger avec la modélisation géométrique de l'édifice que nous abordons maintenant.

Démontrer *a posteriori*

Il est étonnant de constater que Viviani, malgré ses connaissances en géométrie de l'espace et sa proximité d'avec les textes de Cigoli, n'ait réalisé aucun dessin en perspective de la structure. C'est que, par sa réduction ou « projection » à des données de géométrie euclidienne plane, Viviani veut ramener le problème des fissures de la coupole à la résolution d'un problème de statique. En effet, la décision de cercler le dôme et le tambour de chaînes métalliques a déjà été prise par le Grand-duc suite au rapport de la commission de *deputati* rédigé par Nelli. D'autre part, c'est seulement en réponse aux critiques formulées par un Cecchini, armé de la nouvelle science de *resistentia solidorum* de Galilée, que Viviani s'attèle à démontrer *a posteriori* le bien-fondé de l'expertise des *deputati*, donc de la décision du Grand-duc. Pour un Viviani qui eut voulu rééditer

⁵⁹ - Daston (2015), *op. cit.* in n. 30, 13.

les *Due nuove scienze* en y voyant trois⁶⁰ voire quatre nouvelles sciences⁶¹, le véritable enjeu est donc de rappeler à Cecchini, et à qui voudra bien l'entendre, qu'il est lui-même le premier et le dernier dépositaire de l'héritage intellectuel de Galilée. Les fissures dans les coupoles de la cathédrale deviennent donc l'occasion, voire l'excuse, pour Viviani d'exercer les *nuove scienze* de son maître sur un problème concret, ou bien plutôt de rapporter un problème concret d'ingénierie à des considérations galiléennes grâce à la géométrie euclidienne plane. À l'aide de cette dernière, c'est donc à un problème de statique que Viviani entend réduire les préoccupations mécaniques et architecturales de la cour.

Ces problématiques d'ordre géométrique se manifestent déjà dans une vue en coupe de la partie supérieure de la cathédrale sur laquelle Viviani a représenté un quart de cercle accolé à la paroi de la coupole et découpé par des rayons qui sont autant d'angles selon lesquels travaillent les fissures⁶² (cf. illus. 8). L'esquisse d'une flèche circulaire semble indiquer comment s'exercent de telles contraintes dans la structure et est accompagnée juste en-dessous de deux lignes en italien : « Comme le poids absolu est à la force tirant horizontalement, ainsi est le sinus total à la tangente⁶³. » Ces deux lignes sont en réalité un théorème de statique – ou plutôt, comme nous allons le voir, de mécanique géométrique selon Viviani – reliant la force poussant la structure vers l'extérieur au poids de celle-ci et à l'angle de la fissure. Ce théorème permet donc à Viviani de démontrer non seulement que l'instabilité de la coupole provoque la chute progressive de celle-ci vers l'extérieur, mais encore de dimensionner les chaînes nécessaires au cerclage de la structure dès lors que l'on dispose du poids de celle-ci et de l'angle des fissures. Si l'on voit dans ce dessin se géométriser le dôme en lignes droites, angles et jeux de forces invisibles, il aura pourtant fallu à Viviani construire un nouvel objet de savoir à partir de l'image épistémique que nous avons abordée produite par extraction des propriétés mécaniques du dôme. De la vue en coupe à l'image géométrique, l'opération épistémologique réalisée par Viviani se joue dans le dessin : afin que le problème architectural se résolve en un théorème de statique, il lui aura fallu préalablement géométriser la structure mécanique.

⁶⁰ - Renée Raphael, *Reading Galileo: Scribal Technologies and the Two New Sciences* (Baltimore : Johns Hopkins University Press, 2017), 59 sq.

⁶¹ - En attestent deux brouillons de page de titre pour deux rééditions avortées entreprises par Viviani et intitulées « Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a tre nuove scienze puis quattro nuove scienze » (BNCF, Gal. 200, f° 102rv).

⁶² - BNCF, Gal. 222, f° 114v.

⁶³ - « *Come il peso assoluto alla forza orizontalmente traente cosi il seno totale alla tangente* » BNCF, Gal. 222, f° 114v.

Lorsqu'il met en lumière le rapprochement effectué implicitement entre les « *screpoli* » de la coupole et les « *fessure* » des colonnes des Offices, Galluzzi remarque que Viviani fait un saut qu'il ne justifie pas correctement⁶⁴. C'est une étude antérieure de Torricelli qui joue le rôle de chaînon manquant dans son raisonnement⁶⁵. En effet, pour parer à l'effondrement des colonnes dans lesquelles apparaissent des fissures, Torricelli avait réalisé l'étude de l'équilibre mécanique d'un solide soumis à son seul poids réparti selon une ligne de faille provoquant un mouvement vers l'extérieur. Traitant d'abord d'un cas général d'une « poutre inclinée » (*trave inclinata*) puis du cas particulier de la colonne en l'assimilant à quatre « poutres » (*trave*) reposant les unes sur les autres, Torricelli muni de la science de *resistentia solidorum* de Galilée, concluait à la nécessité de cercler les colonnes des Offices à l'aide de chaînes métalliques ainsi dimensionnées.

Raisonnant *a posteriori*, Viviani trouve là la solution qu'il cherchait à son problème et, remontant le fil de la démonstration, n'a plus qu'à modéliser la coupole de Brunelleschi à l'aide des colonnes des Offices. C'est par le rapprochement graphique entre la coupole et les colonnes, motivé par les conclusions de Torricelli devenues *ad hoc* pour Viviani, qu'est menée la modélisation de celle-ci sur celles-là. En effet, l'opération épistémologique visant à traduire le problème de mécanique en problème de statique nécessite de réduire les vues en coupe de la cathédrale à des schémas géométriques plans, ce que Viviani réalise sur un folio dans lequel il fait la démonstration du théorème énoncé plus haut, équivalent à celui antérieurement trouvé par Torricelli⁶⁶ (*cf.* illus. 9).

⁶⁴ - Galluzzi, *op. cit.* in n. 35, 94-97.

⁶⁵ - Cette étude, restée inédite, a été rédigée en latin par Torricelli peu de temps avant sa mort et est aujourd'hui conservée parmi ses papiers personnels (BNCF, Gal. 147, ff° 124r-125v). Viviani, dépositaire légal de l'archive personnelle de Torricelli et chargé de publier certaines œuvres posthumes de celui-ci, a ainsi eu accès à ces notes qui ne comprennent aucun dessin (Galluzzi, *op. cit.* in n. 35, 95n79).

⁶⁶ - BNCF, Gal. 222, f° 118r.

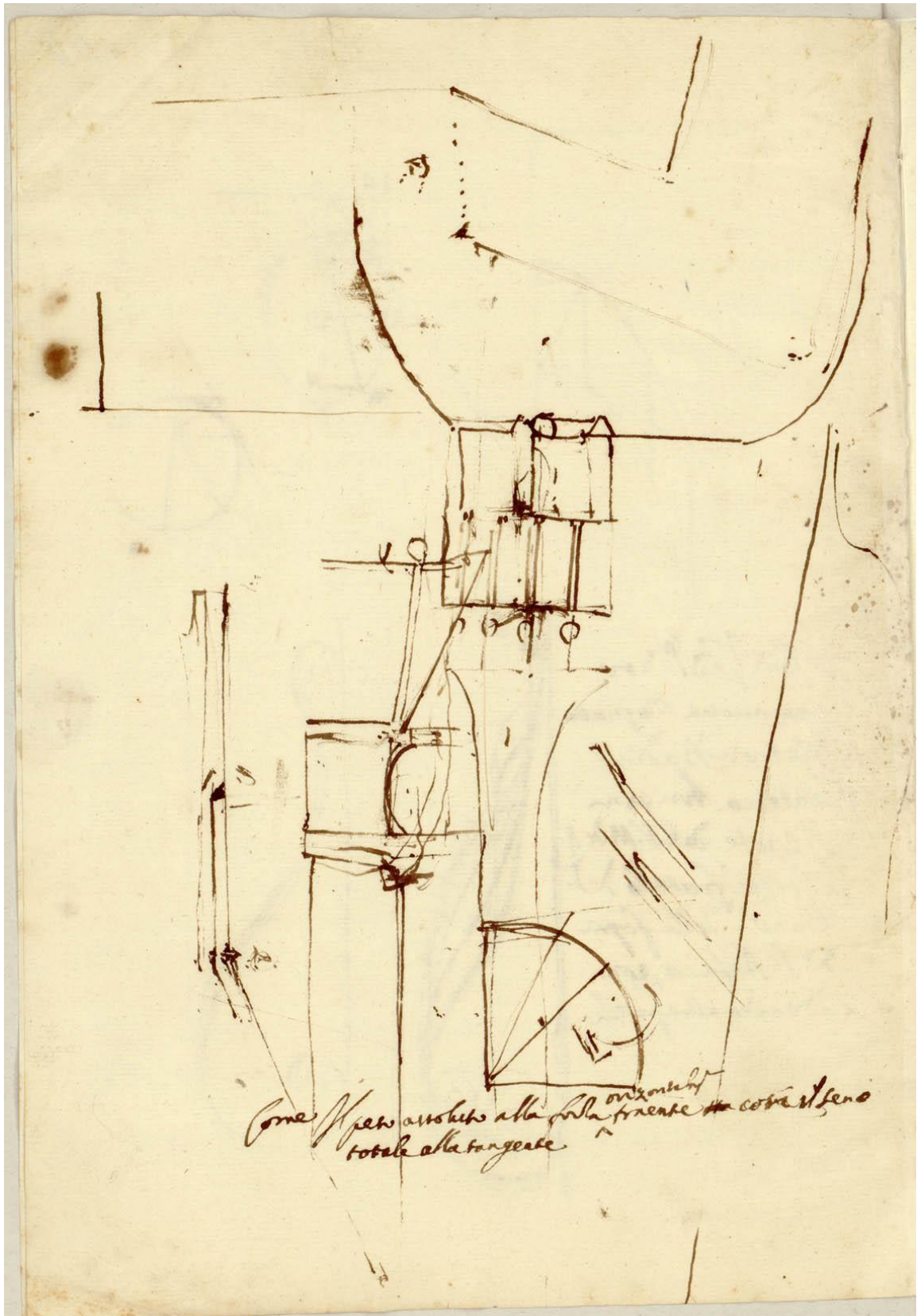


Illustration 8 BNCF, Gal. 222, f° 114v.

Figurons-nous maintenant que l'axe AC représente une fissure que l'on idéalise comme une faille parfaitement droite dans un édifice dont la partie supérieure remplit l'espace au-dessus de AC et dont le poids exerce un bras de levier au point C. Déterminer le poids L qui réalise l'équilibre permet donc de déterminer la force orientée de droite à gauche (depuis l'extérieur) à appliquer au point C pour endiguer le mouvement de la partie supérieure de l'édifice par rapport à la partie inférieure. L'on voit donc comment ce schéma permet de traiter des colonnes fissurées des Offices et préconise l'usage d'un cerclage métallique dimensionné par le poids L ainsi calculé. Si par un effet d'abstraction et d'idéalisation géométrique on identifie la fissure AC aux *screpoli* d'une coupole alors ce dessin permet encore de résoudre le problème du dôme de Brunelleschi : le premier dessin du folio permet d'imaginer grossièrement le mouvement vers l'extérieur de la coupole déstabilisée par une fissure, mouvement empêché par l'imposition d'une force *poussant depuis l'extérieur* représentée par un poids suspendu à une poulie *tirant vers l'intérieur*.

Les opérations ici réalisées par Viviani dans la démonstration de son théorème ne sont plus de l'ordre de la géométrie euclidienne mais bien plutôt du ressort de la mécanique, et en particulier de la statique. Sa modélisation géométrique lui ayant en effet permis de traiter le système comme un ensemble de machines simples (leviers, poulies et poids) afin d'y appliquer les règles de la statique⁶⁸. Si ni Stévin, ni Roberval, Pardies ou Varignon n'apparaissent dans les inventaires de sa bibliothèque, il ne faut aucun doute que, comme Torricelli avant lui, Viviani aura au moins appris les règles de la statique au chevet de Galilée. C'est cet apprentissage qu'il met en branle ici et que, à l'heure de rédiger la biographie de son maître, il qualifia pourtant de « géométrie mécanique » (*geometria meccanica*)⁶⁹.

C'est donc bien le dessin, et plus particulièrement le schéma géométrique abstrait, qui permet à Viviani de réduire le problème architectural à un problème de statique en identifiant graphiquement les *screpoli* de la coupole de Brunelleschi avec les fissures des colonnes des Offices. L'effet d'abstraction et d'idéalisation géométrique qui préside à cette identification graphique n'est cependant pas si immédiat et transparent qu'il n'y paraît. Pour que le dessin technique – la vue en coupe – se transforme en schéma géométrique, il a fallu d'abord extraire de

⁶⁸ - Pour plus de détails sur ledit théorème, cf. Galluzzi, *op. cit.* in n. 35, 91-94.

⁶⁹ - Vincenzo Viviani, « Racconto Istorico Della Vita del Sig.R Galileo Galilei », in Stefano Gattei, *On the Life of Galileo: Viviani's Historical Account and Other Early Biographies* (Princeton : Princeton University Press, 2019), 1-94.

la coupe un fragment de la coupole centré sur une fissure et dont les dimensions non spécifiées excèdent la représentation. Ensuite, Viviani a dû idéaliser la situation en supposant les surfaces lisses et planes – donc rectilignes puisqu'il s'agit encore d'une coupe – ainsi représentables par des lignes droites et donc notamment modélisables par un levier. Enfin, un système de signes mécaniques de poids, de poulies et de crochets a été nécessaire pour faire apparaître graphiquement des contraintes physiques autrement invisibles : les forces.

Ce faisant, de l'image épistémique qu'il avait réalisée à l'aide de coupes et profils, Viviani abstrait une nouvelle fois les propriétés pertinentes pour sa démonstration *ad hoc* : les propriétés géométriques de l'édifice qui se visualisent graphiquement par un agencement de formes idéales, cercles et triangles tracés à l'instrument. Un agencement auquel viennent se superposer les signes mécaniques des contraintes physiques agissant dans la structure, poulies et crochets tracés à la main. Ainsi, comme dans son traitement des eaux du Val-di-Chiana, Viviani peut se ramener à l'unité statique d'un problème dont la résolution doit mener à la démonstration d'un théorème.

Une fois de plus, le dessin porte en lui-même sa propre signification et s'affranchit d'une référence extérieure qui n'est d'ailleurs plus identifiable. Le dessin devenu schéma s'érige en objet de savoir en soi, remplaçant à leur tour les vues en coupe qui déjà remplaçaient la cathédrale, l'objet de la résolution d'un problème statique tenant lieu de problème architectural. On le voit d'ailleurs à l'espace qu'occupent les cinq schémas sur le folio de démonstration : le texte vient s'insérer, voire s'immiscer, *a posteriori* entre les dessins qui sont bien l'objet même de l'observation et de la réflexion.

Les limites de la géométrisation

Si Viviani a donc réussi à construire une preuve *ad hoc* pour démontrer *a posteriori* la nécessité d'une solution déjà décidée par le Grand-duc, c'est moins pour entériner cette décision que pour rappeler qu'il est le dépositaire de l'héritage galiléen et son seul interprète possible. Cette réaction d'orgueil est patente dans une note jetée par Viviani sur une page conservée parmi les brouillons de son étude dont la graphie dénote l'empressement et l'agacement du premier ingénieur (*cf. illus. 10*) :

Les lettres anonymes auxquelles on ne peut pas donner réponse, on les fait souvent donner aux flammes voraces du feu, surtout quand celles-ci sont écrites de la plume vide, teintée d'une envie atrabilaire ou dans un style de génie, à tort ou à raison, de celui qui critique un autre qui ne fait rien de mal (comme il l'a prouvé pour son propre compte), concerné par son prochain, qui n'entrave jamais les actions des autres, ni ne se préoccupe de s'y ingérer, mais toujours aveuglément et de bon cœur obéit à son suprême Maître⁷⁰.

Un agacement dont nous saisissons la cause dans un autre fragment de ses brouillons où les ratures laissent entendre qu'il reproche à Cecchini d'avoir « appliqué » (*applicato*) parfaitement « hors de propos » (*fuor di proposito*) les travaux de Galilée et plus particulièrement de n'avoir pas « compris » (*comprenderla*) sa « mécanique géométrique » (*meccanica geometrica*), sous-entendu dont il est lui-même désormais le détenteur :

[...] ce même Grand Galilée (si hors de propos cité [~~appliqué~~] par ce [~~M.~~] honteux écrivain qui l'a voulu discuter) à quiconque sera capable de l'appliquer [~~la comprendre~~] en apparaît évidente et indubitable [~~sa mécanique géométrique~~] la démonstration [...]⁷¹.

Il est à noter qu'alors qu'en 1654, peu après la mort de son maître, Viviani se faisait disciple du père de la « géométrie mécanique » (*geometria meccanica*) en rédigeant sa *Vita del Galileo*, les termes sont ici inversés. C'est qu'en quarante ans de service auprès du Grand-duc, l'ingénieur Viviani a fait le deuil de ses ambitions mathématiques, la mécanique a pris le pas sur la géométrie et il s'en plaint dans une longue supplique adressée en 1697 à son ami l'abbé Salviati⁷².

⁷⁰ - « Alle lettere cieche, alle quali non si può dar risposta, si suol farle dare alle voraci lingue del fuoco, massime quando elleno sieno scritte con la vana penna dell'altra, intinta nell'atra bile dell'invidia, o dettata dal genio, o a ragione o a torto, di criticare chi altro non fa di male (come a suo costo ha provato) che giovare al prossimo, né si piglia mai impiccio de' fatti altrui, né procura d'introdurvisi, ma sol ciecamente e di buon cuora obbedisce al suo supremo Signore. » BNCF, Gal. 222, f° 134r.

⁷¹ - « [...] quel medesimo Gran Galileo (tanto fuor di proposito citato [~~applicato~~] dal [~~Sig.~~] vergognoso scrittore al proposito da lui discusso) a chiunque sia capace di applicarla [~~comprenderla~~] ne arrega evidente la [~~sua meccanica geometrica~~] dimostrazione e incontrastabile [...]. » BNCF, Gal. 222, f° 122r.

⁷² - BNCF, Gal. 155, ff° 5r-23r.

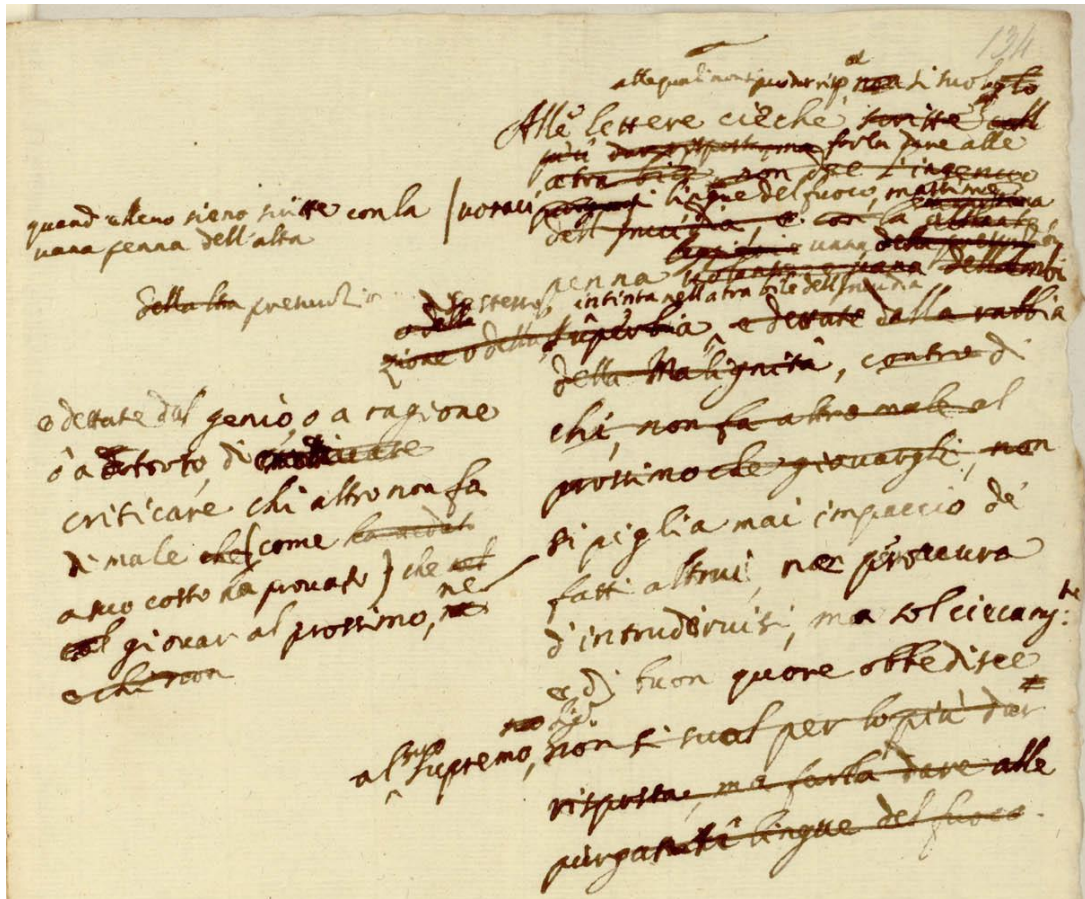


Illustration 10 BNCf, Gal. 222, f° 134r.

D'ailleurs la nouvelle pièce que constitue cette démonstration ne sera pas versée au dossier des *deputati* et le Grand-duc, à la faveur des deux *discorsi* de Cecchini, demande au début de l'année 1697 à Viviani et Nelli de donner à nouveau leur expertise concernant la stabilité de la coupole. Plutôt que de faire valoir l'étude théorique réalisée entre temps par le premier ingénieur qui aurait soutenu le projet de construction de deux chaînes supplémentaires, les deux courtisans mettent alors en avant les résultats de nouvelles expériences menées sur les fissures de la coupole et qui n'attestent plus d'aucun mouvement. Aucune trace desdites expériences et il semblerait bien plutôt que Viviani et Nelli aient rejoint tardivement l'avis de Cecchini, les chaînes ne seront jamais mises en place⁷³.

Viviani est alors confronté à la faillite de sa démonstration qui reposait crucialement sur le rapprochement graphique *ad hoc* entre les *screpoli* de la coupole et les *fessure* des colonnes des

⁷³ - Galluzzi, *op. cit.* in n. 35, 83 sq.

Offices. Si la preuve est nécessairement biaisée car téléologique, elle met néanmoins en lumière l'insuffisance de la réduction géométrique à la statique dans le traitement des problèmes de résistance des matériaux. Car bien que la configuration géométrique locale permette une simple analogie entre la coupole et les colonnes, cette analogie trouve vite ses limites. En effet, les situations mécaniques sont pour leur part fort différentes : il faut pouvoir tenir compte dans le cas de la cathédrale de l'ensemble de la coupole qui présente une structure plus complexe qu'une simple colonne. Viviani a donc bien raison de s'inquiéter pour la « mécanique géométrique » galiléenne, un héritage qu'il a peur de voir dépassé.

Il est vrai, Viviani se dote de représentations graphiques de plus en plus abstraites et analytiques, construites à partir de la combinaison d'éléments discrets – formes géométriques, poids, crochets, poulies... – permettant de modéliser mathématiquement la situation. Par ce biais, il obtient en latin comme en langue vernaculaire des théorèmes logiquement équivalents à des équations formalisées dans la symbolique de l'algèbre. Toute sa réflexion repose cependant sur l'abstraction géométrique initiale tirée de l'analogie entre coupole et colonnes et, comme le fait remarquer Koyré au sujet de la mécanique pour Descartes et Galilée, « toute représentation graphique côtoiera toujours le danger de glisser dans la géométrisation à outrance⁷⁴ ».

Viviani pêche donc par excès de géométrisation, par excès de dessin, car c'est avec le développement conjoint de l'analyse infinitésimale et de la notation symbolique en algèbre que les nouvelles sciences galiléennes pourront véritablement prendre leur essor, jusqu'à s'affranchir de la représentation visuelle chez Lagrange⁷⁵. Dans le champ de la naissante physico-mathématique en général, et en mécanique en particulier, l'insuffisance du dessin naturaliste autant que de ses adaptations par abstraction géométrique se fait donc sentir, la « mécanique géométrique » comme forme de mathématisation de la nature – ou peut-être est-ce une forme de naturalisation des mathématiques – montre ses limites. Reprenant un des fils de la thèse de Mahoney, nous pourrions avancer que « les adaptations temporaires des techniques géométriques ont finalement laissé la

⁷⁴ - Alexandre Koyré, *Études galiléennes* (Paris : Herman, 1966), 157.

⁷⁵ - La mécanique devenant alors une branche de l'analyse : « On ne trouvera point de Figures dans cet Ouvrage. Les méthodes que j'y expose ne demandent ni constructions, ni raisonnemens géométriques ou mécaniques, mais seulement des opérations algébriques, assujetties à une marche régulière et uniforme. Ceux qui aiment l'Analyse, verront avec plaisir la Méchanique en devenir une nouvelle branche, & me sauront gré d'en avoir étendu ainsi le domaine. » (Joseph-Louis Lagrange, *Méchanique analitique* (Paris : Desaint, 1788), vj.)

place à une forme de représentation mathématique entièrement différente : l'analyse infinitésimale écrite dans le langage de l'algèbre symbolique⁷⁶ ».

Il ne s'agit pourtant pas là, contrairement à ce qu'affirme son auteur, d'une thèse contredisant les travaux d'Edgerton sur le rôle crucial joué par les techniques de perspective et de clair-obscur dans le développement des savoirs naturels à l'époque moderne⁷⁷. Pour comprendre pourquoi les thèses d'Edgerton et Mahoney ne sont pas mutuellement exclusives mais concernent plutôt deux épistémologies différentes, il faut revenir à une distinction conceptuelle entre explication horizontale et explication verticale, d'abord évoquée par Léon Brunschvicg en 1939 dans *La raison et la religion*⁷⁸, raffinée par Robert Lenoble dans son *Histoire de l'idée de nature* publiée à titre posthume en 1969⁷⁹ puis récemment reprise par Stephen Gaukroger⁸⁰. Selon cette distinction, le XVII^e siècle avec la naissance de la physico-mathématique témoigne du glissement d'un mode de compréhension horizontal à un mode de compréhension vertical du monde naturel. La verticalité d'une explication d'ordre ontologique – expliquant les phénomènes en revenant à leurs causes sous-jacentes (finales, matérielles, motrices...) selon un schéma typique de la philosophie naturelle et en particulier de la physique aristotélicienne – cède le pas à l'horizontalité de l'explication désormais épistémologique – qui s'attache sur un même plan à formellement déterminer les relations qui unissent entre eux les phénomènes. En d'autres termes, la science se sépare de l'ontologie.

Le dessin, et plus généralement la représentation visuelle, n'a donc pas été supplanté par la symbolique de l'analyse infinitésimale. Il sert bien plutôt un autre type d'explication tout à fait différent : vertical, matériel, ontologique en un certain sens – l'usage que fait Viviani du *disegno* pour ses travaux d'ingénieur est à cet égard symptomatique et les dessins de la Lune réalisés par Galilée sont paradigmatiques d'une telle approche. Ceci n'a pas tué cela, la physico-mathématique

⁷⁶ - « *temporary adaptations of geometrical techniques ultimately gave way to an altogether different form of mathematical representation: infinitesimal analysis couched in the language of symbolic algebra* » Michael S. Mahoney, *Diagrams and Dynamics: Mathematical Perspectives on Edgerton's Thesis*, in John William Shirley et F. David Høner (dir.), *Science and the Arts in the Renaissance* (Washington : Folger Books, 1985), 198-220, 200.

⁷⁷ - Notamment Samuel Y. Edgerton, *The Mirror, the Window, and the Telescope: How Renaissance Linear Perspective Changed Our Vision of the Universe* (Ithaca : Cornell University Press, 2009).

Le débat entre Edgerton et Mahoney porte sur la place des représentations visuelles dans les mutations de la physique à l'époque moderne. Pour Edgerton, ce sont les modes de représentation naturaliste, notamment de machines, grâce à la perspective et la géométrie euclidienne qui ont permis l'avènement de la révolution scientifique par la maîtrise de l'espace. Au contraire pour Mahoney, au cœur de l'avancement de la physique de l'époque se trouve un processus d'abstraction engendré par l'usage analytique de diagrammes, éloignant ainsi de l'expérience sensible immédiate.

⁷⁸ - Léon Brunschvicg, *La raison et la religion* (Paris : Presses Universitaires de France, 1964), 40-42.

⁷⁹ - Robert Lenoble, *Esquisse d'une histoire de l'idée de nature* (Paris : Albin Michel, 1969), 244-245.

⁸⁰ - Stephen Gaukroger, *The Collapse of Mechanism and the Rise of Sensibility: Science and the Shaping of Modernity, 1680-1760* (Oxford : Oxford University Press, 2010), Part II, notamment 154, 169 et 173.

a sciemment décidé de s'affranchir du dessin pour privilégier une certaine forme d'explication selon des critères pratiques d'applicabilité mécanique – *a contrario* du dessin, les *nuove scienze* galiléennes initient un mouvement en direction de la représentation symbolique non visuelle des phénomènes naturels. Ainsi, plutôt que de voir dans le développement d'une représentation mathématique non visuelle le progrès et la victoire des mathématiques sur le dessin, il vaudrait mieux voir l'imposition progressive comme seule explication valable de la nature l'horizontalité formelle des relations entre phénomènes. Cependant, la verticalité de l'explication matérielle reste elle aussi valable bien qu'elle ne soit plus aujourd'hui du ressort de la physique, ou de la science en général, et soit souvent reléguée avec mépris au rang de spéculation philosophique ou de divagation poétique.

Notons enfin qu'ici se joue également le lien qui unit l'architecture à la mécanique et la géométrie. À une époque où l'architecture est « souvent considérée comme une branche des mathématiques⁸¹ », Viviani joue effectivement le rôle d'expert mathématicien en traduisant le problème architectural en problème mécanique grâce à la géométrie. Ainsi Galluzzi peut-il écrire à ce propos, prêtant ce jugement à Viviani : « seul celui qui – comme Cecchini – ignore les lois géométrico-mathématiques sur lesquelles se fonde aussi l'architecture, peut citer Galilée “si hors de propos”⁸² ». Ce n'est cependant pas au service de l'architecture que travaille le premier ingénieur et d'ailleurs il ne semble pas convaincu d'avoir affaire à une branche des mathématiques, lui qui, dans une lettre probablement adressée à l'un de ses patrons, rappelle la nécessité en cette matière de s'en remettre non seulement à des « maquettes » (*modelli*) mais encore aux savoir-faire pratiques des artisans concernés avant que les « théoriciens » (*teorici*) ne prennent une décision :

Je dis aussi que relativement aux grosseurs, aux figures, aux cuissons et autres choses, j'aurais jugé bon d'entendre l'opinion de plusieurs artisans, praticiens et d'experts en un tel art et aussi de plusieurs experts maçons afin de faire mieux qu'il n'a paru bon aux théoriciens de choisir⁸³.

⁸¹ - « *In rhetorical terms (for the supposed certainty of mathematics offered intellectual credibility) and in practice (for architectural design relied explicitly on measurement), architecture was regularly considered to be a branch of mathematics.* » Marr (2011), *op. cit.* in n. 7, 14.

⁸² - « *solo chi – come il Cecchini – ignora le leggi geometrico-matematiche su cui si fonda anche l'architettura, può citare Galileo “tanto fuor proposito”* » Galluzzi, *op. cit.* in n. 35, 100.

⁸³ - « *Dissi ancora che circa alle grossezze, alla figura, alle bolliture e simili cose avrei giudicato bene sentir i pareri di più fabbricanti pratici e periti in tal arte, et anche di più muratori esperti, per far poi quel meglio che fosse paruto a i Teorici di eleggere* » BNCF, Gal. 160, ff° 1r-2r.

Un rapport entre mathématiques et architecture qui n'échappe pas à Galluzzi qui ajoute :

C'est en employant précisément des procédés et des concepts caractéristiques de la mécanique galiléenne, tels quels ou à l'aide de techniques démonstratives plus sophistiquées, que Viviani a réussi à démontrer la fausseté de l'accusation maligne avancée par son tenace interlocuteur⁸⁴.

En effet, plutôt que de mettre des mathématiques prétendument fondatrices au service d'un problème d'architecture, Viviani renverse la vapeur et se sert du cas pratique architectural comme de grain à moudre pour le moulin de sa physico-mathématique, elle-même prétexte à s'exercer à la géométrie antique – c'est en cela qu'il naturalise les mathématiques.

Il faut encore rapprocher cette attitude de celle adoptée par Galilée confronté au problème de l'assainissement du Bisenzio et qui avait voulu profiter de cette occasion pour faire la démonstration à toute l'aristocratie florentine, et en particulier à l'administration du Grand-duc, de « l'utilité et l'applicabilité de sa théorie mathématique du mouvement⁸⁵ » par la mathématisation de la nature. Toujours rapprochant physique et mathématiques mais dans un mouvement réciproque, Viviani veut se servir d'un cas pratique pour faire la démonstration de la justesse de sa géométrie : au cours d'une sorte de « preuve matérielle de la géométrie » (*prova materiale della geometria*) qui au XVII^e siècle était aussi jugée à l'aune de son efficacité pratique⁸⁶, Viviani initie un mouvement de naturalisation des mathématiques – c'est-à-dire que, par opposition à la mathématisation de la nature, il met un phénomène naturel au service du développement et de la justification de ses mathématiques. Après les nouvelles sciences d'un Galilée qui prétendait appliquer la géométrie euclidienne à l'étude du monde physique, quelques décennies après l'œuvre du siennois Teofilo Gallacini qui faisait converger mathématiques, mécanique, anatomie et architecture en une « *matematica media*⁸⁷ », Viviani asservit donc architecture et mécanique à la recherche mathématique qu'il se donne pour unique fin.

⁸⁴ - « *Era proprio impiegando procedimenti e concetti caratteristici della meccanica galileiana, sia pura con tecniche dimostrative più sofisticate, che il Viviani era riuscito a dimostrare la falsità della maligna accusa rivoltagli dal tenace interlocutore* » Galluzzi, *op. cit.* in n. 35, 100.

⁸⁵ - « *l'utilità e l'applicabilità della sua teoria matematica del moto* » Maffioli, *op. cit.* in n. 25, 210.

⁸⁶ - Enrico Giusti, *Euclides Reformatus. La teoria delle proporzioni nella scuola galileiana* (Turin : Bollati Boringhieri, 1993), 3 et *passim*.

⁸⁷ - Alina Payne, *The Telescope and the Compass: Teofilo Gallacini and the Dialogue between Architecture and Science in the Age of Galileo* (Florence : Olschki, 2012).

Conclusion

L'usage du dessin dans l'étude de la stabilité de la cathédrale Santa Maria del Fiore remplit pour Viviani deux fonctions réciproques. En rédigeant d'une part un protocole expérimental pour *faire* réaliser des relevés dans la coupole, il produit des images qui ont pour vocation de circuler jusque dans l'édifice et prendre sens au contact de celui-ci. D'autre part, c'est en produisant un faisceau de dessins que Viviani se donne les moyens de construire l'image épistémique de la partie supérieure de la cathédrale dans l'intérêt de traduire celle-ci en inscription et la transporter jusque sur la surface du papier – image épistémique devenue objet de savoir en soi, remplaçant la cathédrale elle-même.

Nous avons ainsi été témoins de la construction d'une image épistémique au sens de Daston – c'est-à-dire d'une représentation visuelle qui se substitue au monde naturel pour devenir objet de savoir en tant que tel – par la mise en réseau d'un faisceau de dessins, chacun abstrayant et aplatissant sur le papier une facette de l'irréductible matérialité de la coupole de Brunelleschi. Le dessin se dote alors d'une grammaire graphique permettant à Viviani de pratiquer une analytique du visuel, découpant l'observation en une combinaison d'éléments sur lesquels intervenir théoriquement.

Cependant, nous avons aussi vu que bien qu'il entende justifier d'une intervention technique sur l'architecture du dôme, l'horizon de Viviani n'est pas le dessein mais bien plutôt une preuve matérielle de l'efficacité pratique et de l'applicabilité de la science mathématique *de solidorum* de feu son maître Galilée. Selon cette perspective, l'objectif du dernier disciple, contrairement au premier ingénieur, est de mener une naturalisation des mathématiques plutôt qu'une mathématisation de la nature.

Le *disegno*, bien qu'il reste au sens propre un « tracé linéaire plus ou moins complexe⁸⁸ », ne revêt donc pas ici pour Viviani le sens de projet qu'il a pour lui lorsque, artiste et ingénieur, il s'occupe d'hydraulique. En effet, pas de dessin de conception des chaînes à utiliser pour cercler le dôme, pas de dessin de spécification des techniques à mettre en œuvre, et les vues en coupe ou profils réalisés par Viviani n'ont eu pour corollaire que d'autres dessins plus abstraits, plus géométriques encore et qui auront servi une démonstration mathématique. Comme Galilée,

⁸⁸ - Ciaravino, *op. cit.* in n. 12, 9.

Guidobaldo del Monte et de très nombreux artistes et ingénieurs italiens à partir de la Renaissance, Viviani semble entretenir une conception très géométrique du *disegno* mis au service des mathématiques⁸⁹.

L'usage du dessin est donc d'une importance capitale pour Viviani car il lui permet de remplir sa mission de premier ingénieur en combinant celle-ci avec ses aspirations de premier mathématicien. Car c'est précisément à travers le dessin que Viviani s'échappe de l'ingénierie et court-circuite les problèmes d'ordre architectural pour s'engouffrer dans la géométrie. Ainsi, si c'est avec la naissance du dessin technique faisant le pont entre théorie et pratique que naît la figure de l'ingénieur-scientifique⁹⁰ alors nous pouvons affirmer que Viviani n'est pas un ingénieur-scientifique, nonobstant son titre à la cour. En réalité, Viviani est un excellent ingénieur au sens d'expert pratique de terrain et en charge de la réalisation de projets construits sur l'accumulation de savoirs empiriques. Il est aussi géomètre et physico-mathématicien mais jamais en même temps qu'il est ingénieur. En effet, la figure de l'« *engineer-scientist* » théorisée notamment par Valleriani⁹¹ occulterait la relation conflictuelle qu'entretient Viviani avec son rôle d'ingénieur et la torsion qu'il fait parfois subir à l'ingénierie en la réduisant à des problèmes de géométrie, cela occulterait également, comme l'a déjà fait l'historiographie, toute la pratique d'un Viviani hydraulicien, faiseur de projet⁹². S'il y a donc continuité entre le dessin d'art et le schéma d'ingénieur, la tension subsiste avec la modélisation géométrique du mathématicien. Difficile de voir en Viviani une figure de l'*engineer-scientist* alors qu'il est plutôt le lieu de tensions irrésolues entre arts mécaniques et physico-mathématique.

Dans ce cadre, nous avons vu comment Viviani bute sur les limites du *disegno* géométrisé, c'est-à-dire sur les limites de l'épistémologie que prescrit sa culture visuelle. La *scientia de solidorum* galiléenne et ses outils de géométrie euclidienne ne sont pas appropriés à la modélisation

⁸⁹ - « *earlier more explicitly mathematical manifestation[s] of disegno, which relied for their aesthetic appeal on restrained geometrical elegance and proportionality rather than the courtly sprezzatura* » (Marr (2011), *op. cit.* in n. 7, 181).

⁹⁰ - Lefèvre, *op. cit.* in n. 23, 3.

⁹¹ - Matteo Valleriani, *Galileo Engineer* (Dordrecht : Springer, 2010) ; et Matteo Valleriani (dir.), *The Structures of Practical Knowledge* (Dordrecht : Springer, 2017).

⁹² - Plus généralement, Maffioli écrit à juste titre que la figure de l'*engineer-scientist* « laisse dans l'ombre les tensions et conflits entre les ingénieurs et les mathématiciens et occulte ainsi la dynamique d'appropriation des arts et de transformation des mathématiques qui, à [son] avis, est au centre du mouvement galiléen » (« *mette d'altro canto in ombra le tensioni e i conflitti fra ingegneri e matematici e finisce dunque col trascurare quella dinamica di appropriazione delle arti e di trasformazione delle matematiche che, a [suo] giudizio, è al centro del movimento galileiano* » Maffioli, *op. cit.* in n. 25, VIII).

du problème qui se pose avec urgence dans la coupole de Brunelleschi. La dépendance excessive de Viviani à l'égard de la représentation visuelle le pousse à faire usage pour traiter des *screpoli* du dôme d'un modèle mathématique valable seulement pour les *fessure* des colonnes des Offices. En toute rigueur, il lui faudrait donc passer à d'autres formes de représentation et qui s'affranchissent de la ressemblance visuelle à l'objet représenté. C'est précisément de cet outil que se dote, par exemple, Leibniz en développant son calcul infinitésimal⁹³. L'analyse différentielle leibnizienne s'exprimant dans le langage symbolique de l'algèbre n'est plus dépendante que de schémas structurels réduits. D'ailleurs Leibniz, contrairement à Viviani, ne semble pas savoir dessiner et ses papiers de travail sont plutôt recouverts des symboles d'une pensée qu'il considérait aveugle, une *cogitatio caeca*⁹⁴.

C'est ce glissement dans le mode de représentation mathématique, du visuel vers le symbolique, et ses conséquences importantes sur le développement de la physico-mathématique qui justifient le point de vue de Michael Mahoney en opposition à la thèse de Samuel Edgerton. Selon Mahoney, cette perspective mathématique permet de remettre en cause l'idée que la représentation visuelle est responsable de l'invention de nouvelles machines et du développement conséquent de la science mécanique ainsi que d'une vision mécaniste du monde :

*Whatever the mathematician's eye is seeing here, it has little to do with new pictorial techniques for the accurate representation of physical objects in three-dimensional space. It is the mind's eye that is looking here, and it is peering into the structural relation among quantities belonging to many different conceptual (rather than perceptual) spaces. The more abstract those quantities and their relations become, the less helpful or revealing it is to model them in a graphic space analogous to the pictorial space of the body's eye*⁹⁵.

⁹³ - Viviani et Leibniz, qui travaillaient sur les mêmes problèmes mathématiques de détermination de tangentes et de calculs de quadratures, se sont rencontrés à Florence en 1689 avant de s'affronter autour d'une énigme géométrique en 1692, Viviani clamant la supériorité de la géométrie euclidienne sur la nouvelle analyse (cf. notamment Clara Silvia Roero, Leibniz and the Temple of Viviani: Leibniz's prompt reply to the challenge and the repercussions in the field of mathematics, *Annals of Science*, 47/5 (2006), 423-443).

⁹⁴ - Sybille Krämer, The 'eye of the mind' and the 'eye of the body': Descartes and Leibniz on truth, mathematics, and visibility, in Friedrich G. Barth, Patrizia Giamperi-Deutsch et Hans-Dieter Klein (dir.), *Sensory Perception: Mind and Matter* (Vienne : Springer, 2012), 369-382.

⁹⁵ - Mahoney, *op. cit.* in n. 76, 209. Une thèse également avancée par Wolfgang Lefèvre en particulier à propos de l'usage de représentations graphiques, d'images, en mécanique pratique : « *in the period under scrutiny, graphical representations had only very limited cognitive function for mechanicians* » (Wolfgang Lefèvre, The Limits of Pictures - Cognitive Functions of Images in Practical Mechanics - 1400 to 1600, in Wolfgang Lefèvre, Jürgen Renn et Urs Schoepflin (dir.), *The Power of Images in Early Modern Science* (Berlin : Birkhauser, 2003), 69-88, 69).

Nonobstant le fait que l'on pourrait également envisager l'analyse mathématique comme un moyen algébrique de domestiquer l'espace et le temps compatible avec la perspective linéaire, ce qu'oublie de préciser Mahoney c'est que ce glissement de la représentation de l'œil du corps vers l'œil de l'esprit, s'il est un puissant outil d'abstraction mathématique pour la physique, est également tributaire de l'abandon du référent visuel. Bien que Viviani bute sur l'insuffisance du dessin et de la géométrie euclidienne lorsqu'il s'attèle à la *scientia de solidorum*, nous avons vu cependant toute la puissance de sa pratique du *disegno* pour ses travaux d'ingénieur que tout un pan de l'historiographie aura pourtant occulté, tandis qu'à la même époque, les incursions de Leibniz sur le terrain des ingénieurs échouent en se heurtant à son propre mode de connaissance⁹⁶.

En effet, en cette époque qui voit la fin de la philosophie mécaniste, deux modes de connaissance du monde se séparent : la verticalité ontologique d'une recherche des causes matérielles en philosophie naturelle se détache de l'horizontalité épistémologique d'une recherche des relations formelles entre les phénomènes en physico-mathématique. Deux perspectives rassemblées dans un personnage comme Galilée qui aura fait usage autant de la perspective et du clair-obscur pour dessiner la matière lunaire, que des formes géométriques et de la symbolique algébrique pour décrire la forme de sa trajectoire. Ainsi, si l'analyse infinitésimale fait défaut à un Viviani qui pêche par « géométrisation à outrance » et rencontre les insuffisances de son moyen de représentation pour traiter du problème qu'il s'est donné, en aucun cas cela ne s'oppose à d'autres moyens de représentation comme la perspective et le clair-obscur qui traitent, sur d'autres plans, de problèmes d'ordres différents.

⁹⁶ - Dorothea Heinz, « La cosmologie leibnizienne à l'épreuve des mines du Harz, 1677–1686 », Mémoire de M2 en histoire moderne (Paris : Sciences Po, 2011). Voir également Andre Wakefield, Leibniz and the Wind Machines, *Osiris*, 25/1 (2010), 171-188.