



Mathématiser l'anatomie: la myologie de Niels Stensen (1667)

Raphaële Andrault

► To cite this version:

Raphaële Andrault. Mathématiser l'anatomie: la myologie de Niels Stensen (1667). Early Science and Medicine, 2010, 15 (4-5), pp.505-536. halshs-00861430

HAL Id: halshs-00861430

<https://shs.hal.science/halshs-00861430>

Submitted on 13 Mar 2015

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.

MATHÉMATISER L'ANATOMIE :
LA MYOLOGIE DE NIELS STENSEN (1667)

Raphaële ANDRAULT, ENS LYON, UMR 5037*

Abstract: In his *Elementorum Myologiae Specimen*, Steno geometrizes “the new fabric of muscles” and their movement of contraction, so as to refute the main contemporary hypothesis about the functioning of the muscles. This physiological refutation lies on an abstract representation of the muscular fibre as a parallelepiped of flesh transversally linked to the tendons. Those two features have been comprehensively studied. But the method used by Steno, as well as the way he has chosen to present his physiological results, have so far been neglected. Yet, Steno’s work follows a true synthetic order, which he conceives as a tool to separate uncertain anatomical “elements” from the certain ones. We will show that the true understanding of this “*more geometrico*” order is the only way to avoid frequent misconceptions of the scientific aim pursued by Steno, which is neither to give a mathematical *explanation* of the functioning of the muscles, nor to *reduce* the muscles to some mathematical shapes.

Key words: anatomy, geometrization, muscles, contraction, analysis, synthetic order, fabric, functions.

I. *SYNTHETICO ORDINE*

Dans l'épître dédicatoire au Grand Duc de Florence¹ qui introduit son ouvrage, Sténon déclare qu'il convient de réformer l'anatomie conformément aux lois des mathématiques ; sans cette juridiction, la médecine ne pourra pas être considérée comme une science :

Et pourquoi ne donnerions-nous pas aux muscles ce que les Astronomes ont donné au Ciel, les Géographes à la Terre et, pour prendre exemple sur le Microcosme, ce que les auteurs versés en optique ont conféré aux yeux? Ils ont traité des choses naturelles en mathématiciens, afin que la connaissance qu'ils en tiraient fût plus distincte [...]. Il n'y a pas d'autre origine aux innombrables erreurs qui entachent malheureusement l'étude du corps humain, que le fait que l'Anatomie ait jusqu'à présent dédaigné les lois des Mathématiques².

De fait, au sein de l'*Elementorum Myologiae Specimen seu Musculi descriptio geometrica*, Sténon entreprend de décrire le muscle, ses composants et son mouvement de contraction grâce à une représentation géométrique sous la forme d'un parallélépipède.

Si l'originalité et la rigueur de cette représentation, tout comme les outils mathématiques qui l'ont rendu possible, ont fait l'objet d'études récentes, respectivement par Troels Kardel et Domenico Bertoloni Meli, l'ordre géométrique suivi dans l'ouvrage n'a en revanche jamais été

* 15 parvis René Descartes, 69007 Lyon.
raphaele.andrault@ens-lyon.fr

¹ Il s'agit de Ferdinand II, le protecteur de Galilée. Rappelons que Nicolas Sténon (1638-1686), né au Danemark, puis étudiant à Leyde, vit en 1667 à Florence, sous la protection du Grand Duc, où il fréquente les membres de l'*Accademia del Cimento*. C'est à Florence que seront publiés ses deux ouvrages les plus diffusés (outre le *Discours sur l'anatomie du cerveau* publié à Paris en 1669) : le *Specimen* en 1667 et surtout sa remarquable dissertation sur les fossiles, en 1669 (*Prodromus de Solido intra Solidum naturaliter contento*) où Sténon établit que, loin d'être produits par de mystérieux « jeux de la nature », les fossiles sont des vestiges d'animaux ou de végétaux.

² Notre traduction. Voir Nicolas Sténon, *Specimen* (Florence, 1667), dans *Opera philosophica*, éd. Vilhelm Maar, 2 vols. (Copenhague, 1910), 2 : 61-111, 64 : « Volui eo specimine ostendere non posse in musculo distincte partes eius nominari, nec motum eiusdem considerari feliciter, nisi Matheseos pars Myologia fieret. Et quidni musculis id daremus, quod Coelo Astronomi, quod Terrae Geographi, & tu ex Microcosmo exemplum adducam, quod oculis rei opticae scriptores concessere ? [...] Nec alia scaturigo est innumerabilium errorum, quibus humani corporis historia foede inquinatur, quam quod Matheseos leges Anatome hactenus indignita fuerit ». Pour une édition critique et une traduction anglaise du *Specimen*, voir Steno *on muscles*, éd. Troels Kardel, trad. Paul Maquet (Philadelphie, 1994).

étudié pour lui-même³. Cet ordre est pourtant clairement revendiqué par l'auteur – non comme un simple mode d'exposition, mais essentiellement comme un moyen de mieux comprendre la structure des muscles :

Afin de comprendre plus distinctement la conformation des muscles, je proposerai les explications de tous les termes comme les Géomètres ont l'habitude de le faire, selon un ordre Synthétique et sous le nom de définitions, en commençant par la fibre motrice⁴.

Il nous semble que l'« ordre synthétique » revendiqué par Sténon n'a pas retenu toute l'attention qu'il méritait pour deux raisons solidaires. La première tient au fait que ce genre de déclaration préliminaire a pu davantage apparaître comme une *captatio benevolentiae*, voire une clause de style, que comme l'exhibition d'un ordre structurant réellement le propos scientifique. Dans les pages de son *Histoire de la notion de vie* consacrées à l'âge classique, André Pichot rappelle par exemple que si un certain nombre d'ouvrages médicaux sont alors écrits sur un mode géométrique, à la manière de l'*Éthique* de Spinoza, cela ne doit pas faire préjuger du caractère réellement mathématique de leur mode d'exposition : Il ne faut « pas trop accorder d'importance à cette disposition « géométrique » [...], car elle reste souvent au niveau des seules intentions : les propositions, théorèmes et scolies sont articulés assez lâchement⁵ ». Ainsi, et particulièrement dans les sciences du vivant en raison de la complexité de leurs objets, l'appel aux mathématiques resterait-il pour l'essentiel extérieur aux procédures démonstratives réellement adoptées.

La seconde raison de cette négligence tient à ce que la volonté de suivre un ordre géométrique ne constitue pas la plus grande originalité de l'ouvrage de Sténon. En effet, peu après que le *Specimen* a été publié, le grand ouvrage du mathématicien Alfonso Borelli sur le mouvement des animaux paraît à titre posthume en 1680 et 1681. Or ce livre ordonne également son contenu en propositions numérotées. De fait, outre les objets scientifiques visiblement proches (la contraction musculaire pour Sténon, tous les mouvements externes et internes des animaux pour Borelli), la similarité des intentions affichées par les deux auteurs paraît manifeste : tous deux annoncent en introduction l'importance d'une inféodation de l'anatomie aux mathématiques⁶. Ils justifient tous deux l'emploi des mathématiques par la nature de leur objet d'investigation : les corps organiques sont justiciables d'une science de l'étendue et de la figure, selon Sténon ; les organes animaux ayant été construits par Dieu de manière géométrique, la géométrie est l'unique science appropriée pour les étudier, selon Borelli.

Pourtant, dès que l'on veut bien dépasser les déclarations de principe et le contenu des deux préfaces, la différence entre les deux ouvrages est frappante. L'ouvrage de Borelli est en réalité une somme de physiologie sur l'ensemble des mouvements organiques, qu'il s'agisse de la locomotion, de la respiration, de la digestion ou de la circulation sanguine. Et si les mathématiques sont effectivement convoquées dans ce *De motu animalium*, ce n'est non pas parce qu'elles structurent l'ordre de l'ouvrage, mais notamment parce qu'elles fournissent un ensemble de calculs

³ Pour ne citer que les plus récentes : Troels Kardel, « Nicolas Steno's New Myology », *Nuncius*, 23 (2008), 37-64, dans lequel l'auteur montre la pertinence scientifique de la conception sténonienne des muscles qu'il resitue dans son contexte historique et qu'il éclaire à la lumière des développements ultérieurs de la myologie (voir aussi son introduction à l'édition critique du *Specimen* : « *Elements of Myology in Historical Perspective* », dans *Steno on muscles*, 1-56). Et Domenico Bertoloni Meli, « The Collaboration between Anatomists and Mathematicians in the mid-Seventeenth Century with a Study of Images as Experiments and Galileo's Role in Steno's Myology », *Early Science and Medicine*, 13 (2008), 663-709, dans lequel l'auteur montre le rôle qu'a pu jouer le mathématicien Vincenzo Viviani, disciple de Galilée et membre de l'*Accademia del Cimento*, pour l'élaboration de cet ouvrage de Sténon (en particulier pour l'utilisation des figures ; une citation de Sténon, tiré du *Dissectus piscis ex canum genere*, indique que Viviani a été « plus qu'un spectateur », Sténon, *Opera philosophica*, 2 : 154 –et non 119). Il convient aussi de se reporter aux travaux de Mirko D. Grmek, « La notion de Fibre vivante chez les Médecins de l'École Iatrophysique », *Clio medica*, 5 (1970), 297-318, repris dans Id., *La première révolution biologique* (Paris, 1990).

⁴ Sténon, *Specimen*, 4 (*Opera philosophica*, 2 : 68) : « Quo distinctius haec musculi conformatio intelligatur, terminorum omnium explicationes, ut a Geometris fieri solet, ordine synthetico et definitionum titulo proponam, a fibra motrice incipiendo ».

⁵ André Pichot, *Histoire de la notion de vie* (Paris, 2004), 503. À partir de l'étude de la *Médecine raisonnée* d'Hoffmann, A. Pichot invite à ne « pas prendre trop au sérieux les grandes déclarations méthodologiques ou épistémologiques des biologistes », car « elles sont très rarement suivies d'effets ».

⁶ Sans compter leur contexte et lieu de rédaction communs (en Toscane, en lien avec les entreprises scientifiques de l'*Accademia del Cimento*). Selon Theodor Brown, *The Mechanical Philosophy and the Animal Economy* (New York, 1981), 99, « Steno became a major inspiration of Borelli's further research on animal motion ».

permettant d'évaluer la force exercée par les muscles, de la même façon qu'on évaluerait la mécanique d'un levier⁷. À l'inverse, Sténon ne propose aucun calcul et ne donne aucun système physiologique général permettant de comprendre l'origine et les manifestations de tous les mouvements vitaux, ni même de l'intégralité des mouvements musculaires ; et il ne s'attache pas à la locomotion proprement dite. L'objet de l'ouvrage est même particulièrement modeste : il s'agit à la fois de simplement décrire la vraie fabrique, ou structure des muscles – ce qui n'engage qu'une figuration simplifiée des muscles eux-mêmes, à l'exclusion des autres parties organiques –, et de préciser de quelles manières les composants musculaires peuvent se mouvoir au moment où le muscle se contracte. Dans cette deuxième entreprise, et sans présumer de sa pertinence scientifique ni de ses modalités réelles, le propos de Sténon suit effectivement un cheminement synthétique de type hypothético-déductif.

De sorte que loin de s'en tenir à repérer l'expression triviale d'un lieu commun, l'étude de l'ordre géométrique voulu par Sténon nous apparaît au contraire comme un moyen de saisir ce en quoi sa démarche se démarque des tentatives de ses contemporains, desquelles nous verrons qu'elle ne peut être rapprochée que de manière superficielle.

Plus généralement, nous montrerons dans cette étude que seule l'analyse des enjeux de la voie d'exposition synthétique suivie par Sténon permet d'éviter un certain nombre de malentendus, voire de contresens, sur l'objet même de sa démonstration – c'est-à-dire, comme il apparaîtra, sur la limitation des ambitions heuristiques de l'ouvrage. Par ce biais, nous interrogerons à la lumière de son contexte scientifique et philosophique les enjeux, à la fois anatomique et physiologique, de la mathématisation à laquelle Sténon paraît procéder.

II. FIGURER LA CONTRACTION MUSCULAIRE

Il convient de décrire d'abord pour lui-même, et dans l'ordre, le cheminement scientifique suivi dans le *Elementorum myologiae specimen*. Car il nous semble que c'est précisément le caractère technique de l'objet anatomique et le caractère peu intuitif du raisonnement hypothético-déductif qui ont conduit, par souci de simplification ou de synthèse, à reformuler le propos de Sténon de manière bien souvent erronée⁸.

1. Les éléments géométrisés

Sténon donne d'abord une définition des « éléments » anatomiques requis pour expliquer le processus physiologique de la contraction musculaire. Dans le cadre de ces définitions préalables, le muscle est décrit comme une collection de fibres motrices, arrangées de sorte que ces fibres forment ensemble un parallélépipède, tandis que les tendons qui entourent la collection de fibres peuvent être caractérisés comme deux prismes tétragones.

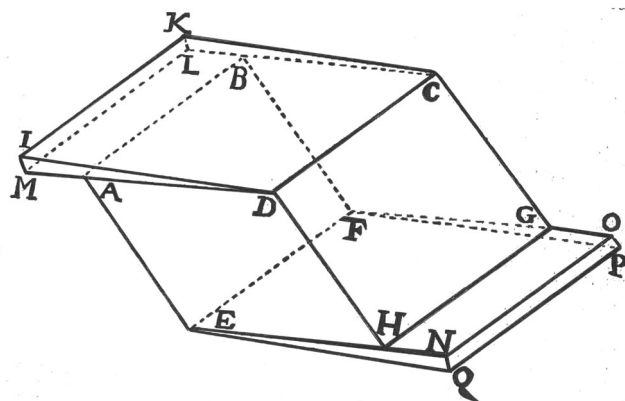


Figure 1. Parallélépipède de chair (ABCEFGH) et tendons (EHNQFGOP et DAMICBLK)

⁷ En particulier dans la première partie ; car dans la seconde, qui porte sur les mouvements internes, le contenu des propositions est essentiellement descriptif, et les appels à l'arithmétique et à la géométrie sont rares.

⁸ Notamment en lisant le *Specimen* à la lumière immédiate des autres ouvrages de Sténon sur les muscles.

La fibre, qui est définie comme le véritable « organe du mouvement », est donc l'élément à partir duquel il est possible de construire par composition les autres parties anatomiques à considérer.

Cependant, pour être premier, la fibre n'est pas pour autant un élément anatomiquement ultime, ou indécomposable, puisqu'elle est définie elle-même comme un « assemblage déterminé » (*certa compages*) de fibrilles très fines immédiatement jointes les unes aux autres longitudinalement. En leur partie centrale charnue, les fibres sont séparées des autres fibres motrices adjacentes par des fibrilles transversales qui sont contiguës à la membrane des muscles. À partir de cette description, sont définies la chair (la partie intermédiaire des fibres qui diffère par la consistance, l'épaisseur et la couleur de ses parties extérieures), les surfaces des fibres et des tendons, ainsi que les différentes structures du muscle.

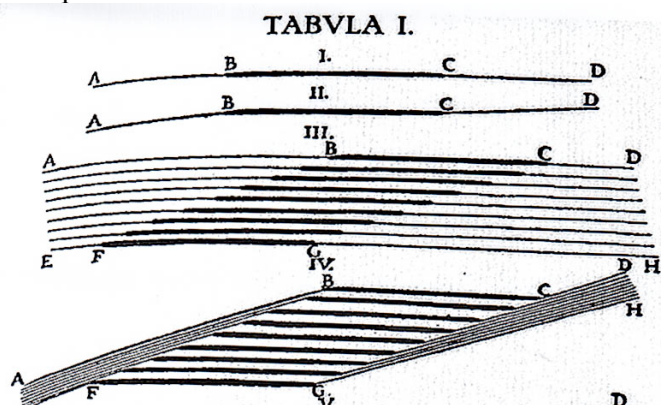


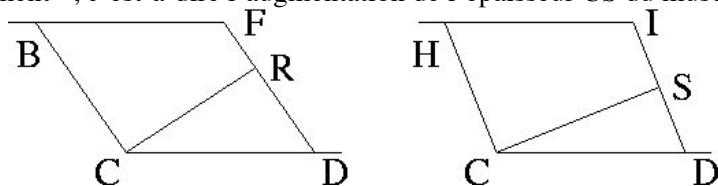
Figure 2: fibre motrice rectiligne. BC et FG sont les parties charnues.

À cette caractérisation de la fibre, succède une série de définitions des différents côtés et surfaces de la chair et des tendons, de leur épaisseur, largeur, longueur, ainsi que des différentes dispositions possibles des fibres (en fonction de l'agencement de leurs fibrilles), et des structures variables des muscles (en fonction des positions respectives de leurs fibres composantes ; selon par exemple qu'elles s'arrangent en « ordre⁹ » ou en « rang [*versus*] »).

2. Le raisonnement hypothético-déductif

À la suite des définitions, des lemmes établissent que *si* l'on pose que le volume d'un muscle non contracté est identique à celui d'un muscle contracté, *alors* on peut démontrer que le muscle gonfle en se contractant¹⁰. Autrement dit, le fait de supposer que le muscle ne change pas de volume ne conduit pas à nier le gonflement.

Qu'entend Sténon par gonflement, puisque ce n'est pas le changement de volume ? Le processus est défini comme étant la simple « augmentation d'une ou de plusieurs dimensions », et en l'occurrence comme une augmentation de l'« épaisseur » du muscle. Si, comme le propose Sténon, on figure le muscle sous la forme d'un parallélogramme, lors de la contraction le muscle conserve la même base (les côtés BF et CD qui représentent l'insertion sur les tendons) et la même hauteur, mais les angles qui étaient les plus aigus se modifient et deviennent plus obtus, tandis que les deux côtés latéraux BC et FD diminuent – ce qui correspond au raccourcissement des fibres. Dans ce cas de figure, l'aire du parallélogramme demeure inchangée. Le seul redressement du parallélogramme, qui passe d'un état où il est très oblique à un état où il est plus droit, produit le « gonflement », c'est-à-dire l'augmentation de l'épaisseur CS du muscle.



⁹ Sténon, *Specimen*, 10 (*Opera philosophica*, 2 : 72) : « Ordo est series fibrarum motricium rectilinearum inaequaliter aequalium... ».

¹⁰ Sténon, *Specimen*, 30 (*Opera philosophica*, 2 : 84). La citation est donnée *infra*.

Une série de figures et des raisonnements géométriques très simples appuient la démonstration. Tantôt à partir de la figure du parallélépipède, tantôt à partir de sa traduction en deux dimensions sous forme de parallélogramme (l'aire, et non le volume, étant alors conservée). En réalité, montrer qu'en postulant le non changement de volume du muscle on peut en déduire tout de même son changement d'« épaisseur » est une manière négative de prouver que le gonflement n'est pas forcément causé par un changement de volume. Le gonflement apparent d'un muscle contracté (la bosse formée sur le bras quand le biceps se contracte, par exemple) peut n'être causé que par la modification de la forme du muscle ; et celle-ci, la simplification géométrique le prouve, peut s'effectuer à volume constant. Et c'est capital ; c'est là tout ce que le raisonnement prétend démontrer : *il est possible* de rendre compte sans changement de volume de la modification de la forme des muscles lors de la contraction.

Dans un second temps, Sténon précise que si ce processus simplifié s'effectue lors de la contraction de tout muscle, le gonflement n'apparaît pas de la même manière dans chaque cas : pour le préciser (et, dans le même temps, pour prouver l'aptitude de ses « éléments » à rendre compte des apparences observables), il propose une représentation géométrique des différentes figures qui causent ces variations phénoménales.

3. L'illustration

Sténon présente enfin des exemples « tirés de la nature » pour prouver que les « éléments de myologie » qu'il a préalablement définis sont bien certains. Toutes les figures des muscles et leurs légendes¹¹ montrent que la diversité des muscles naturels est appréhendable selon la combinaison de « séries de fibres » dont la variété de structures a été préalablement définie dans les lemmes¹².

Lors de cette illustration, Sténon souligne explicitement deux avantages médicaux des « éléments de myologie » :

Tout d'abord, l'avantage physiologique : la représentation géométrique du raccourcissement permet de calculer la force relative des muscles (*virium proportionem inveniendam*)¹³. Plus précisément, si on veut comparer les forces de deux muscles diversement composés, il faut préalablement les réduire à deux muscles simples de la même largeur, et, pour chacun des muscles, calculer la longueur moyenne des fibres si elles sont de longueur variable ; il convient ensuite de comparer les arêtes formées par l'attache des fibres aux tendons : cela donnera le nombre de parties charnues. Ensuite, rapportée à la masse de leur partie charnue, la comparaison de la différence des longueurs des muscles avant et après la contraction donnera leur force respective, puisque la force musculaire est fonction du raccourcissement de ses fibres. Comme le souligne Kardel, la comparaison entre les différents muscles par uniformisation de leur géométrie est un des aspects les plus remarquables du *Specimen* – outre que l'usage de techniques semblables au XX^e siècle révélera *a posteriori* la fécondité d'une telle approche¹⁴.

Ensuite, l'avantage anatomique qui n'a jamais été souligné : ces « éléments » sont le moyen de faire avancer la connaissance des muscles les plus confusément connus dans notre corps (ceux du dos) car il permettent d'établir ce que l'on caractériserait aujourd'hui comme une typologie. C'est-à-dire qu'ils permettent d'ordonner ce qui se présente de manière confuse et chaotique lors de la dissection¹⁵. On peut souligner, à partir de ce qu'en dit Sténon, deux bénéfices : 1) cette typologie facilite à la fois la dissection (et l'apprentissage scolaire des différentes parties des corps) et l'affinement futur des différences entre les muscles en donnant une représentation préalable de leurs structures : elle a donc un but à la fois didactique et heuristique ; 2) elle offre également, réciproquement, la preuve *a posteriori* que les « éléments » de myologie sont bien

¹¹ Sténon, *Specimen*, 34 (*Opera philosophica*, 2 : 86) : « Exposito sic *Elementorum myologiae Specimine*, restat exemplis ex ipsa Natura depromptis eorundem certitudinem demonstrum, figuras variorum musculorum ostendendo potius, quam explicando, cum res adeo evidens sit, ut vel sola inspectio sine explicatione sufficere possit ». Comme l'indique Bertoloni Meli, « The Collaboration », 706, ces figures là décrivent les muscles d'après nature, et ne doivent pas être confondues avec les schémas (« diagrams ») qui représentent les « éléments » géométrisés.

¹² Sténon, *Specimen*, 10-13 (*Opera philosophica*, 2 : 72-73).

¹³ Sténon, *Specimen*, 41 sq. (*Opera philosophica*, 2 : 91).

¹⁴ Kardel, « *Elements of Myology in Historical Perspective* », 19.

¹⁵ Sténon, *Specimen*, 43 (*Opera philosophica*, 2 : 92).

fondés sur l'expérience, et non sur une fiction de l'esprit : aussi la « simple inspection » des muscles gastrocnémiens fait-elle apparaître le bien-fondé de la définition préalable des « ordres » comme séries spécifiques de fibres motrices¹⁶. De fait, grâce à leur homogénéisation géométrique, Sténon décrit à peu de frais¹⁷ le muscle du masséter, les biceps, les deltoïdes, les muscles d'un poisson, ou les muscles adducteurs et abducteurs d'une pince de crabe enfin –en distinguant notamment, avec un vocabulaire anachronique, des muscles unipennés, bipennés ou multipennés.

III. LE RÉDUCTIONNISME EN QUESTION

Voici comment Mirko D. Grmek résume le *Specimen* : « Sténon croit expliquer la contraction musculaire *more geometrico*, c'est-à-dire comme un simple résultat de la disposition géométrique des éléments structuraux¹⁸ ». Ce qui revient à dire que Sténon réduit la contraction musculaire au résultat d'une disposition géométrique : « Sténon voulait réduire à la disposition des fibres non seulement la contraction musculaire mais aussi tous les phénomènes de la vie¹⁹ ». Le résumé comporte en réalité deux affirmations sous-jacentes. La première concerne le rôle que Sténon assigne à ses « éléments » et en particulier à la fibre motrice : dans quelle mesure Sténon *réduit-il* – ou, plus largement, reconduit-il – le muscle à ses « éléments structuraux » ? La seconde affirmation concerne le but de son raisonnement hypothético-déductif : dans quelle mesure Sténon prétend-il *expliquer* la contraction musculaire *par* sa figuration géométrique ? Nous allons examiner ces deux interrogations successivement.

1. *Le statut anatomique et physiologique de la fibre motrice*

Pourquoi la fibre est-elle le point de départ des définitions ? Dans la mesure où, nous l'avons vu, la fibre n'est pas l'élément anatomique ultime, on pourrait se demander pourquoi Sténon choisit de ne pas régresser jusqu'aux fibrilles qui la composent. La réponse donnée est que la fibre est le véritable « organe du mouvement » :

J'appelle [cette fibre] motrice parce qu'elle me semble le vrai organe du mouvement animal ; en effet, le muscle auquel ce titre a été donné jusqu'ici n'est rien d'autre qu'une collection particulière de fibres –ce que montre son analyse sensible–, et n'agit que dans la mesure où chacune de ses fibres agit, comme le démontre la dissection des vivants²⁰.

À partir de ce que Sténon en dit explicitement, il faut retenir deux choses : 1) la fibre mérite le nom de vrai organe du mouvement notamment par opposition aux muscles, auxquels on a donné ce titre jusque là. Le geste d'identification de l'élément musculaire nodal à la fibre dite motrice a donc d'abord une portée polémique, qui ne se comprend que par opposition à la tradition médicale, et en dialogue avec elle : depuis Galien, les muscles sont considérés comme les « organes du mouvement²¹ » ; 2) si Sténon s'oppose à cette tradition ce n'est pas seulement en vertu de la décomposition anatomique possible des muscles (la possibilité de les identifier à une « collection particulière de fibres »), c'est, ce qu'il nous dit comme en passant, pour une raison physiologique : le muscle « n'agit que dans la mesure où chacune de ses fibres agit ».

Comment comprendre cette « action » – comment Sténon l'établit-elle et quel statut lui confère-t-il ? Ici, nous avons pour seule indication l'appel à la « dissection des vivants ». Or dans le *Specimen* lui-même Sténon n'en dira rien de plus, et en particulier n'expliquera pas de quelle manière le muscle n'agit que pour autant que la fibre agit. En revanche, nous trouvons explication de ce choix dans un texte antérieur sur les muscles²² et dans la lettre à Thévenot de 1666 qui a été

¹⁶ Sténon, *Specimen*, 36 (*Opera philosophica*, 2 : 87) : « Sola inspectione patet veritas eorum, quae de ordine supra proposuimus ».

¹⁷ Sténon, *Specimen*, 45 (*Opera philosophica*, 2 : 93) : « Ex dictis liquit, terminis paucis, iisque perspicuis, nec ulli aequivocationi obnoxiiis exprimi posse vertebrales musculos, dum quatuor eorum genera constituuntur... »

¹⁸ Grmek, *La première révolution biologique*, 173.

¹⁹ *Ibid.*, 175.

²⁰ Sténon, *Specimen*, 4 (*Opera philosophica*, 2 : 69) : « Motricem eam appello, quod mihi videatur verum motus animalis organum ; musculus enim, cui illud hactenus datum nomen est, non est nisi talium fibrarum certa collectio, id, quod eius analysis sensibus ostendit, nec agit, nisi dum singulae harum fibrarum agunt, id quod vivorum sectio demonstrat ».

²¹ Thomas Bartholin, *Anatomia reformata* (La Haye, 1651), 25, 450 ; Jean Riolan, *Encheiridium anatomicum*, (Paris, 1658), 87

²² Sténon, *De musculis et glandulis observationem specimen* (Copenhague, 1664).

jointe au *Specimen* lors de sa publication – mais qui est extérieur en tant que tel à l’itinéraire géométrique de l’ouvrage, puisque Sténon s’y explique contre ses détracteurs, c’est-à-dire ceux qui soit se sont opposés aux résultats anatomiques du *De musculis et glandulis observationem specimen* publié en 1664 (le résultat le plus éminent étant que le cœur n’est rien d’autre qu’un muscle), soit les ont taxés de triviaux. Selon ces deux textes de Sténon, il apparaît que même lorsqu’elle est excisée et séparée du muscle, la fibre n’en continue pas moins de se contracter à plusieurs reprises (c’est-à-dire de se raccourcir) sous l’effet d’une stimulation mécanique²³. À l’inverse, des fibrilles toutes seules, désolidarisées de la fibre qu’elles composent ne se raccourcissent pas sous l’effet d’une stimulation. Le point de départ est donc prescrit par la physiologie, et non par l’anatomie (*i.e.* par la limite matérielle de décomposition) : il faut commencer par la partie anatomique dont *dépend* le mouvement du tout (le muscle), mais en deçà de laquelle les composants n’assurent visiblement aucune fonction de manière indépendante. Est-ce à dire que Sténon considère que la fibre est la cause du mouvement musculaire – ou, pour le dire autrement, qu’il faut entendre l’épithète « motrice » dans son sens fort comme ce qui confère au muscle son mouvement ? Nous y reviendrons. Mais notons déjà que dès les premières lignes de son *Specimen*, Sténon prévient une telle interprétation : cette qualification d’« organe du mouvement » ne correspond pas à l’assignation d’une cause déterminante ; elle n’est explicative que parce que la fibre est physiologiquement *plus* déterminante que le muscle.

Lorsque je désigne la fibre motrice comme le vrai organe du mouvement animal, je ne détermine pas si cette partie du muscle qui se raccourcit se contracte par elle-même ou si en vérité ce sont plutôt les fibres qui la parcourent transversalement qui la raccourcissent par leur vibration, ou si enfin la contraction s’accomplit d’une quelconque autre manière : en effet, quoi qu’il se produise réellement parmi ces possibilités, c’est davantage la fibre motrice que le muscle qu’il faut désigner comme l’organe du mouvement animal²⁴.

Si l’on éclaire l’ouvrage de Sténon à la lumière de ceux de ses contemporains, deux éléments sont notables dans le point de départ choisi, et de là dans les « éléments » retenus pour composer ce *Specimen* de myologie.

Le premier est la réduction des *explicantia* à une partie anatomique jugée physiologiquement nodale (la fibre motrice), et à l’arrangement structurel des fibres entre elles, à l’exclusion de l’ensemble des organes ou humeurs généralement invoqués par les contemporains. On ne trouve ni mention des esprits animaux (ou même du sang) habituellement considérés comme la cause motrice du mouvement, ni mention des rapports entre les différents muscles entre eux (par exemple pour apparier les antagonistes), ni appel aux nerfs, ni référence à l’anatomie entière du corps organique, et à la place qu’y occupent les muscles. Sténon ne dit absolument rien de cela dans le *Specimen*, et ne justifie cette absence que dans la lettre à Thévenot : il l’explique par notre ignorance de la nature des parties fluides auxquelles est habituellement conféré un rôle causal dans l’explication du mouvement musculaire. Selon Sténon, parler d’esprit animaux, de suc nerveux, de partie du sang la plus subtile, de sa vapeur ne nous fait rien connaître : ce sont des mots n’exprimant rien²⁵ ; et avant que la chimie, et plus généralement la compréhension de la nature spécifique des fluides n’aient davantage progressé, il ne sera rien possible d’en dire. L’anatomiste se doit donc de les passer sous silence.

Dans le *Specimen* proprement dit, le caractère abstrait du traitement est explicitement revendiqué, non pas tant dans le choix des éléments définis, que dans la définition qui est donnée de la fibre motrice. C’est le second élément : devant une objection qu’on pourrait lui adresser,

²³ Lettre à Thévenot, dans Sténon, *Specimen*, 59 (*Opera philosophica*, 2 : 101) : « Quid itaque mirum est e corpore extractum cor repetitis ictibus moveri, licet nec novus in vasa eius influat sanguis, nec per nervos a cerebro novi influant spiritus ». Nous le verrons plus loin, cette expérience a été pratiquée en partie avec (et peut-être à la suite de) Jan Swammerdam (1638-1680), ami de Sténon à Leyde puis à Paris entre 1661 et 1665 – il restera ensuite son correspondant. Voir pour le récit de l’expérience : Swammerdam, « Proefnemingen van de particuliere beweeging der Spieren in de Kikvorsch », *Bybel der Natuure-Biblia Naturae*, éd. Herman Boerhaave (Leide, 1737-1738), 835-860, 848.

²⁴ Sténon, *Specimen*, 4 (*Opera philosophica*, 2 : 69) : « Dum fibrā motricem verum motus animalis organum appello, non determino, an illa eius pars, quae brevior fit, in se ipsa coeat, an vero transversim per eam incedentes fibrillae illam crispando breviorē reddant, aliove quocunque demum modo contractio peragatur : quicquid enim horum contigerit, fibra motrix potius, quam musculus, motus animalis organum appellanda est ».

²⁵ Lettre à Thévenot, Sténon, *Specimen*, 63 (*Opera philosophica*, 2 : 103).

Sténon admet qu'en réalité la chair est tellement délicate qu'il n'est pas toujours possible de déterminer avec certitude la situation de ses parties latérales (et donc d'établir les angles que ces parties forment avec les autres surfaces du muscle, notamment les tendons). Pour autant, Sténon souligne que l'abstraction est légitime dans la mesure où elle repose sur une comparaison d'un grand nombre de fibres motrices entre elles : sans vouloir « faire croire au lecteur qu'[il a] examiné tous les muscles de tous les animaux », et qu'ainsi il tiendrait « pour certain que la position respective des surfaces est dans tous les types de chairs telle qu'il l'a décrite », il affirme simplement avoir trouvé la position de celles-ci « dans beaucoup de cas » ; « cela suffit pour démontrer que cette fabrique régulière de la chair [qui est] la mesure simple des autres fibres n'est pas avancée gratuitement »²⁶.

Aussi la fibre motrice régulière définie par Sténon est-elle décrite explicitement comme la « norme » de toutes les autres fibres qui se trouvent effectivement dans l'organisme ; et la simplification que Sténon s'autorise est caractérisée par l'auteur comme une démarche analogue à celle de « tous ceux qui expliquent par des voies ordinaires et simples les difficultés qui ont lieu dans des choses composées et moins ordinaires²⁷ ». À partir de ce qu'en dit Sténon lui-même, on peut remarquer que l'abstraction intervient à deux niveaux. D'une part dans le retranchement expérimental des différences observables pour déceler ce qui est commun à toutes les fibres (ainsi, les différentes couleurs ne sont pas prises en compte pour compléter la typologie des espèces de fibres et de muscles²⁸). D'autre part, dans la traduction de la structure observée des parties anatomiques en « éléments »²⁹, c'est-à-dire figures géométriques mesurables qui seront le support de la démonstration physiologique *more geometrico* : pour se faire, Sténon s'attache surtout à établir les angles que les différentes parties (chair, insertion sur les tendons) forment entre elles. Cette double simplification n'est cependant visiblement permise qu'en raison de la nature particulière des muscles – ce qui suffirait à expliquer que cette géométrisation soit un hapax dans l'ensemble des œuvres de Sténon : comme l'indique de nouveau non pas le *Specimen myologiae*, mais le *De musculis et glandulis observationum specimen* qui l'a rendu possible, lors de la dissection des muscles des membres inférieurs d'un lapin, une section sur toute leur longueur révèle à la vue « la figure la plus simple de toutes », formée par l'agencement des tendons et des fibres musculaires. Elle montre que les fibres s'ordonnent parallèlement les unes aux autres et transversalement entre les tendons – les fibres charnues ne s'étendent donc pas d'une extrémité du muscle à l'autre selon le modèle admis jusque-là³⁰. Dans cette mesure, on pourrait dire que la simple inspection anatomique des muscles révèle qu'ils sont organisés selon une « figure très simple » qu'on peut ordonner en un « système géométrique ». C'est donc que l'objet obéit déjà en partie à une structure mathématisable : il apparaît déjà en lui-même représentable à partir de la seule position respective des tendons et des fibres charnues. Ainsi peut-on comprendre un élément déroutant du *Specimen* : Sténon y souligne à la fois que sa fibre motrice est idéalisée, et que le « système géométrique des muscles », étant « tiré de l'expérience », n'est pas une « fiction de l'esprit »³¹. Autrement dit : selon l'auteur, la fibre motrice ne ressemble pas qualitativement aux fibres que l'anatomiste peut mettre au jour ; car elle est une norme. Mais le lien entre les différents « éléments » musculaires que Sténon met d'autant plus facilement en évidence qu'il en a simplifié la description paraît, en revanche, directement tiré de la position observée dans les muscles

²⁶ Sténon, *Specimen*, 7 (*Opera philosophica*, 2 : 70-71) : « Nollem tamen Lectori imponere, ac si omnes omnium animalium musculos examinasset, adeoque certo crederem, ubique talem esse planorum inter se in omnium carnibus situm, qualem modo eum descripti : quocirca id duntaxat certo hic affirmo me in plurimis talem deprehendisse ; id quod sufficit ad demonstrandum simplicem hanc, & regularem carnis fabricam, reliquarum mensuram gratis a me non afferri ».

²⁷ Sténon, *Specimen*, 6 (*Opera philosophica*, 2 : 70) : « Potuissem unica responsione omnibus satisfacere, dicendo, me solam fibram regularem, aliarum, omnium normam, hic describere, quod mihi non minus liceret, ac aliis omnibus, qui difficultates, quae in rebus compositis, et minus ordinatis occurrunt, per ordinatas, et simplices explicant ».

²⁸ Sténon signalant que la plupart du temps les fibres sont rouges, mais elles peuvent être également grises et blanches ; Sténon, *Specimen*, 5 (*Opera philosophica*, 2 : 69).

²⁹ Les *Éléments* d'Euclide sont connus de Sténon à travers Clavius : Gustav Scherz, *Niels Stensen, Denker und Forscher im Barock, 1638-1686*, (Stuttgart, 1964), 20.

³⁰ Sténon, *De musculis* (Copenhague, 1664), dans *Opera philosophica*, 1 : 173.

³¹ Sténon, *Specimen*, 1 (*Opera philosophica*, 2 : 67) : « per figuras idem illustrabo, eum in finem hic adducendas, ut pateat musculorum systema geometricum, quod hic propositum sum, non esse ab ingenio confictum, sed ab experientia depromptum ».

disséqués – dès lors, au moins, selon son propre aveu, qu'un certain nombre de muscles ont été disséqués et que l'on veut bien s'attacher à ce qui est commun à tous.



Figure 3: Sténon, *Nova musculorum & cordis fabrica*, Leyde, 1663 (*Opera philosophica*, II, 158)

Le fait que cette figuration géométrique et mesurable de la fibre soit présentée comme une *norma omnium [fibrarum]* peut contribuer à élucider le statut et les limites de la géométrisation de l'objet :

Il apparaît d'abord que ni dans la démarche, ni dans le propos explicite, la démonstration de Sténon ne suppose de considérer qu'il y ait des qualités sensibles que l'on doive « réduire » aux effets mécaniques et géométrisables des mouvements de corpuscules, lesquels seuls pourraient être considérés comme réels ou indépendants de nos perceptions sensibles. La signification spécifique que Sténon assigne à sa description géométrique se révèle d'ailleurs très bien par la comparaison avec Borelli. En effet, dans son *De motu animalium*, celui-ci estime par exemple que « bien que les fibres musculaires apparaissent rouges et pleines de sang, en réalité elles sont toutes blanches³² ». Contrairement à Sténon qui, on l'a vu, rapporte que les fibres peuvent être de couleur variable, mais en fait abstraction pour proposer des « éléments » qui soient généraux, et valable pour tout muscle, Borelli souligne le caractère superficiel de la couleur, la nature de la fibre apparaissant lorsqu'on la vide de son sang. Cela signifie que chez Borelli, la décision d'ignorer la couleur de la fibre est une décision ontologique : il s'agit de distinguer les propriétés réelles de l'objet par rapport à celles qui sont seulement apparentes. Et de façon très classique dans une entreprise qui promeut une intelligibilité mathématique des phénomènes du vivant et qui hérite de la physique galiléenne, ce sont les qualités premières, c'est-à-dire les figures, grandeurs et mouvements, qui sont dites naturelles. On peut dire en ce sens que les différences qualitatives des parties anatomiques sont réduites à leur forme géométrique. À l'inverse, la décision de Sténon est présentée comme méthodologique : dans ce qu'il en dit explicitement, la figuration géométrique opère principalement comme un outil, et la simplification qu'elle suppose est autant légitimée par les expériences sensibles sur lesquelles elle s'adosse que par la nature de l'*explicandum*. On voit par exemple que bien que leurs dimensions soient prescrites par les mesures effectuées lors des dissections, certaines figures ne sont pas considérées comme la reproduction exacte des fibres de la nature : « les tendons [par exemple] sont exprimés par des trapèzes, sans que les fibres soient distinguées, tant parce que leur usage n'est pas requis pour expliquer le mouvement des muscles, que parce qu'elles ne peuvent pas être toutes représentées exactement dans un espace si exigü³³ » (nous soulignons). Pour le dire autrement, il ne s'agit manifestement pas de réduire les qualités hétérogènes de couleur et de consistance, irréductibles les unes aux autres, à des grandeurs homogènes (et donc comparables entre elles) en déréalisant les premières. Mais il convient de faire abstraction des qualités hétérogènes pour autant, d'une part, qu'elles n'apportent rien ni à la rectification de la fabrique des muscles, ni à l'explication de leur mouvement, et d'autre part, qu'elles ne peuvent pas être appréhendées intégralement par des figures.

En se fondant uniquement sur le texte lui-même, on peut donc écarter trois malentendus possibles : Sténon ne « réduit » la contraction musculaire à la fibre motrice ni en ce qu'il en fait un composant anatomique ultime, ni en ce qu'il l'identifierait à la cause cachée dont les dispositions variables suffiraient à produire les effets observables, et moins encore en ce qu'il assignerait plus

³² Alfonso Borelli, *De motu animalium* (La Haye, 1743), I, 5 : « Insuper licet fibrae musculosae appareant rubicundae & sanguineae, tamen omnes sunt albae, et tinctura illa rubicunda ab affluxu cruoris pendent, a quo veluti spongiae... »

³³ Sténon, *Specimen*, 34 (*Opera philosophica*, 2 : 80) : « Figurarum pleraeque plana ordinum referunt, ubi singula latera, singulique anguli eadem magnitudine exhibentur, qua in cadavere a me mensurata sunt. Tendines per trapezia expressi sunt, nulla facta fibrarum distinctione, tum quod in motu musculi explicando nullus eorum usus, tum quod non potuissent in tam exiguo spatio omnes exacte repraesentari ».

généralement aux fibres organiques le rôle physiologique nodal, ou même moteur³⁴, qui a pu parfois être attribué au contraire aux esprits animaux, considérés, selon la tradition héritée conjointement de Galien et d'Hippocrate, comme les *impetum facientia* de l'organisme.

2. Sténon « explique-t-il » la contraction musculaire ?

Nous l'avons vu, le raisonnement hypothético-déductif a pour but de montrer que le changement de la figure du muscle lors de la contraction n'est pas nécessairement lié à une augmentation du volume total de ce muscle. C'est là le seul résultat positif de l'utilisation des propositions d'Euclide dans l'élucidation du mouvement de contraction (c'est-à-dire abstraction faite de ce qu'on a dit des avantages typologiques et de l'évaluation de la force des muscles).

Il faut distinguer deux choses : 1) ce que Sténon dit explicitement, dans son *Specimen* même, de la finalité de son propos ; 2) ce que ses autres ouvrages et la connaissance du contexte historique nous en apprennent.

Commençons par le second aspect, qui permet d'établir que le but de l'ouvrage de Sténon est essentiellement critique. Au moment où Sténon écrit, tous les ouvrages publiés sur les muscles rapportent la contraction à l'afflux, et parfois aussi à la fermentation, d'esprits animaux dans le muscle. Le gonflement manifeste du muscle contracté par rapport à son état au repos serait donc le produit d'un réel changement de volume : selon cette théorie, les parties intérieures sont enflées par l'arrivée depuis l'extérieur d'un liquide qui augmente le volume total du muscle contracté. Cela correspond par exemple à l'hypothèse cartésienne. William Croone envisage pour sa part que les esprits animaux produisent une sorte de fermentation lorsqu'ils rencontrent le sang resté dans les muscles. *Mutatis mutandis*, et après la publication du texte de Sténon, Thomas Willis proposera le même type d'explication³⁵. Alfonso Borelli s'accorde avec ce modèle explicatif, qui suppose une réaction chimique à l'intérieur du muscle, mais il le complète en déterminant ce que sont les composants microscopiques du muscle. Troels Kardel résume le conflit entre Sténon d'un côté et l'ensemble de ses contemporains de l'autre par l'opposition frontale de deux théories incompatibles : celle du raccourcissement des fibres et celle de l'inflation³⁶. Dans la mesure où les explications concurrentes à celle de Sténon ont bien été établies dans la littérature, nous ne nous y attarderons pas. Nous nous concentrerons sur ce qu'en dit Sténon lui-même.

Encore une fois, non dans le *Specimen*, mais dans la lettre à Thévenot, Sténon rappelle que rien dans la dissection des muscles ne permet d'attester l'arrivée d'un fluide extérieur qui gonflerait les fibres, ni d'en déterminer la nature³⁷. Seul le raccourcissement de la fibre est avéré. Quant à l'hypothèse de l'absence de changement de volume du muscle au cours de la contraction, ce sont, en amont de la géométrisation, les expérimentations pratiquées par et avec Jan Swammerdam qui en accréditent l'idée. Selon un protocole décrit dans la *Bybel der Natuure*, l'expérience de Swammerdam consistait à placer une fibre musculaire fraîchement excisée dans une seringue en verre se terminant vers le haut par un tube très étroit³⁸. Une goutte de liquide colorée est déposée dans ce tube. Le nerf rattaché au muscle sort de la seringue par un petit trou que l'on bouche tout autour du nerf par de l'empois. En piquant le nerf, on voit les fibres du muscle se raccourcir, mais la goutte d'eau reste au même endroit, et ne s'élève pas, témoignant du fait que le volume du muscle n'a pas augmenté au cours de la contraction. Selon Swammerdam, cette expérience et celle de la stimulation mécanique répétée d'un même muscle excisé ont persuadé

³⁴ Grmek (*La première révolution biologique*, 172) qualifie la fibre motrice de Sténon comme une fibre « active » (vs inerte).

³⁵ William Croone, *De ratione motus musculorum* (Londres, 1664) ; Thomas Willis, *Exercitationes medico-physicae duae de sanguinis accensione et de motu musculari* (Londres, 1670). Cf. Kardel, « *Elements of Myology in Historical Perspective* », 1-56 ; et Id., « Nicolas Steno's New Myology », 48 sq.

³⁶ Kardel, « Nicolas Steno's New Myology », 56.

³⁷ Lettre à Thévenot dans Sténon, *Specimen*, 63 (*Opera philosophica*, 2 : 103) : « De fluido musculi, quam incerta, quam nulla est nostra cognitio [...] Nec scitur, cui nam eorum fluidorum, quae nobis cognita existimamus, ullum ex hisce fluidis simile sit. Spiritus animales, subtiliorem sanguinis partem, vaporem eius, et nervorum succum multi nominant, sed verba haec sunt, nihil exprimentia. Qui ulterius pergunt, salinas, sulphureasque partes, vel spiritui vini analogum quid adferunt, quae vera forsan, sed nec certa, nec satis distincta. Ab assumpto vini spiritu spiritui restitui exhaustas vires experientia docet, sed ipsi hoc humori, quem spiritum vocamus, an alii materiae adscribendum, quae spiritum fluidum reddit, aut aliam forte ob causa milli iuncta est, qui determinaverit ? »

³⁸ Swammerdam, « Proefneming », 849.

Sténon qu'aucun afflux de matière n'envahit le muscle lors de la contraction et que son volume n'augmente pas³⁹. Ce sont donc aussi bien ces expérimentations actives que l'observation anatomique relatée par Sténon lui-même qui n'autorisent pas à adopter les hypothèses des contemporains.

Il nous faut préciser ici que s'il est vrai que les observations de Swammerdam que nous venons de mentionner n'ont été publiées qu'au XVIII^e siècle, on ne peut pour autant dire avec George Canguilhem que leurs résultats aient été jusqu'à cette date ignorés du public⁴⁰. Tout d'abord, Swammerdam précise dans ces textes qu'il a pratiqué ces expériences devant Sténon⁴¹. Ensuite, Sténon, dans la lettre à Thévenot, se réfère aux expériences de son ami Swammerdam⁴². Ainsi, l'*infirmation* proprement dite de l'hypothèse de l'afflux de matière et d'un changement de volume, est bien délivrée par l'expérience, et non par la démonstration *more geometrico* du *Specimen*.

En effet, dans l'ouvrage proprement dit, le raisonnement géométrique ne démontre qu'une chose : on *peut* rendre compte du gonflement manifeste d'un muscle contracté sans l'associer à un changement de volume (la géométrie nous le prouve), et de ce fait sans invoquer l'afflux de liquide qui est censé en être la cause.

Autrement dit, le contexte et les autres ouvrages de Sténon nous apprennent que c'est à partir de l'expérience qu'est réalisé le partage entre faits et hypothèses. Ensuite, la figuration des éléments, puis la démonstration géométrique du processus (c'est-à-dire du changement de figure d'un parallélépipède à l'autre) ont pour unique but de montrer que les éléments avérés, effectivement mis au jour par les dissections, suffisent à décrire le processus physiologique. C'est en tout cas l'unique intention physiologique revendiquée du *Specimen*, là où figurer la vraie fabrique des muscles est l'unique intention anatomique :

Ainsi, je pense avoir abondamment démontré que dans tout muscle, lorsqu'il se contracte, un gonflement se produit *même si* aucune *nouvelle* matière n'entre dans le muscle : c'est ce que j'avais promis que je démontrerais, tant pour montrer qu'aussi ingénieuses soient-elles, les hypothèses qui sont avancées par beaucoup sur l'influx d'une nouvelle matière dans le muscle sont cependant loin d'être certaines, tant pour rendre manifeste l'usage de la nouvelle fabrique [des muscles] dans l'explication de leurs mouvements. Et si maintenant je démontrais que dans une fibre motrice disséquée transversalement toute partie de la chair se contracte de la même manière que la chair entière se contracte, et cela même quand les artères, les veines et les nerfs ont été enlevés, il ne resterait plus rien de leur système⁴³ (nous soulignons).

Ainsi, aussitôt convoquées, les raisons d'aller plus loin dans la démonstration sont congédiées. Et Sténon se contente d'invoquer sur un mode irréel (« si je démontrais... ») les expériences physiologiques qu'il lui aurait été nécessaire de décrire s'il avait voulu montrer non seulement qu'on n'a pas besoin d'invoquer l'afflux de nouvelle matière dans le muscle, mais aussi que cette matière ne peut arriver dans le muscle lorsque la fibre excisée se contracte. Ce n'est manifestement pas l'objet du *Specimen*. Il est donc inexact de dire, comme le fait Bertoloni Meli par exemple, que « *Steno wished to show mathematically that a muscle contracts and swells without any overall change in volume and without any incoming matter but only as a result of the sliding of the tendons*⁴⁴ ». Il serait plus juste de dire que Sténon veut démontrer *mathématiquement* que le

³⁹ Une expérience consistant à accrocher les deux tendons qui sont aux extrémités d'un muscle à des épingles plantées légèrement dans des bouchons de liège permet d'attester le raccourcissement des fibres musculaires pendant la contraction : on voit en effet les deux têtes des épingles se rapprocher l'une de l'autre, puis s'éloigner lorsque le muscle se détend.

⁴⁰ George Canguilhem, *La formation du concept de réflexe aux XVII^e et XVIII^e siècles* (Paris, 1977), 62.

⁴¹ Swammerdam, « Proefnemingen », 851.

⁴² Lettre à Thévenot dans Sténon, *Specimen*, 59 (*Opera philosophica*, 2 : 101) : « ...idem modo nominatus Amicus meus Swammerdammius in ranis iam ante observaverat ».

⁴³ Sténon, *Specimen*, 30 (*Opera philosophica*, 2 : 84) : « Atque ita quidem abunde demonstratum puto in omni musculo, dum contrahitur, tumorem contingere, etiamsi nulla nova musculo accederet materia : id quod me demonstraturum promiseram, tum quo pateret, ut ut ingeniosa sint, nondum tamen esse certa, quae de novae materiae in musculum influxu a multis proponuntur, tum ut fabricae novae usu in motu musculorum explicando evaderet manifestus. Quod si iam demonstrarem, quamlibet partem carnis in fibra motrice transversim dissecta pari ratione contrahi, ac contrahebatur tota caro, idque resectis etiam arteriis, venis, et nervis, nihil amplius de illorum systemate restare ».

⁴⁴ Bertoloni Meli, « The Collaboration », 702.

gonflement ne suppose pas le changement de volume, et de là l'arrivée de matière ; et qu'il ne fait ici qu'allusion à ce qui requerrait certainement un autre mode d'exposition et une autre modalité discursive (comme le récit d'expériences), c'est-à-dire la réfutation de l'augmentation de volume. Compte tenu de la manière dont Sténon invoque les expériences de Swammerdam dans la lettre à Thévenot, il nous semble légitime de supposer qu'il n'accorde probablement pas à ses expériences le même caractère certain qu'il accorde à ses « éléments » anatomiques.

Soulignant la dimension hypothétique de son point de départ, Sténon affirme en effet ne pas être « certain » du fait qu'un muscle contracté soit égal au même muscle non contracté (c'est à l'expérience de l'attester), mais l'admettre à titre de supposition permet de produire la démonstration géométrique qui montre le lien possible entre un gonflement manifeste et un simple changement d'angles et d'épaisseur :

Je suppose la cinquième proposition [un muscle contracté est égal au même muscle non contracté], non parce que je la tiens pour certaine, mais parce qu'en l'ayant admise, je démontre le gonflement qui a lieu dans chacun des muscles tandis qu'il se contracte. Il y en a qui tiennent cette cinquième proposition pour très certaine, et disent que la largeur du muscle augmente autant que sa longueur diminue, de la même manière qu'un rectangle oblong se change en un carré de même grandeur. Mais de même que je n'ai encore vu personne démontrer cette supposition de façon certaine, de même l'explication par des rectangles⁴⁵ ne peut convenir à la nature, pour ne pas parler des autres explications qui peuvent être invoquées à cette occasion⁴⁶.

Nous voyons là une nouvelle fois la preuve que Sténon ne conçoit pas ses propres parallélogrammes comme des éléments anatomiques réels, mais comme des supports méthodologiques permettant de faire le tri entre les différentes hypothèses ; en tout cas, et c'est fondamental, la géométrisation, c'est-à-dire ici la reconduction du complexe au simple, n'opère pas comme l'exhibition des vraies causes structurelles et intimes du complexe.

Et il est remarquable qu'autant parmi ses lecteurs de l'âge classique que chez la plupart de ses interprètes actuels, son entreprise ait été comprise à tort comme l'assignation de la vraie cause du mouvement musculaire, et son ouvrage comme une explication générale de ce mouvement. Sans nous prononcer sur le type d'obstacle épistémologique expliquant ce malentendu, signalons seulement qu'à l'instar de Borelli, Bernoulli a compris la théorie de Sténon comme étant celle qui identifie la cause de la contraction musculaire au changement de position des fibres (en réalité à leur raccourcissement)⁴⁷. Ainsi estime-t-il que l'explication de Sténon est « ridicule » en ce qu'elle fait appel au seul changement de forme sans invoquer « l'arrivée dans le muscle d'une nouvelle substance ». Nier cet afflux depuis l'extérieur du muscle reviendrait à imputer directement à la volonté la cause ultime de la contraction, et donc à déroger à l'« axiome de physique » selon lequel « tout ce qui est mu l'est par quelque chose d'autre ». Dire que le muscle se contracte parce que les fibres se raccourcissent ne donne pas la cause de ce raccourcissement. En réalité, nous allons le revoir, Sténon identifie seulement le raccourcissement des fibres au processus physiologique essentiel qui conditionne le mouvement des muscles. En plus d'une opposition de principe liée au fait que la communauté scientifique partage à ce moment-là l'explication de la contraction par afflux de liquide dans le muscle, il y a donc bien un malentendu sur l'objet scientifique du *Specimen*.

IV. ARS INVENIENDI/ARS DEMONSTRANDI

Plusieurs fois dans son ouvrage, Sténon fait allusion à ce que montre l'« analyse ». Il signale notamment que c'est « l'analyse » et la mesure qui permettent d'établir la vraie structure des

⁴⁵ Il s'agit probablement d'une allusion à la théorie présentée dans Walter Charleton, *Natural history of nutrition, life and voluntary motion* (Londres, 1659), 183, cf. Kardel, « *Elements of Myology in Historical Perspective* », 10.

⁴⁶ Sténon, *Specimen*, 17 (*Opera philosophica*, 2 : 76-77) : « Quintam suppono [musculus contractus aequalis est eidem musculo non contracto], non quod eam certam credam, sed quod demonstrem, ea posita, in singulis musculis tumorem futurum dum contrahuntur. Sunt alii, qui hanc quintam suppositionem certissimam credunt, dicuntque latitudini musculi id accedere, quod longitudini eius decedit ; pari ratione, ac dum rectangulum oblongum in quadratum aequale mutatur. Sed ut necdum ab ullo vidi hanc meam suppositionem certo demonstratam, sic neque per rectangula explicatio Naturae convenit, ut caetera taceam, quae hic possent afferri ».

⁴⁷ *Dissertatio de motu musculorum*, 1694 (Londres, 1708), in Jean Bernoulli *Opera omnia*, 4 vols. (Lausanne, 1742), 1 : 98.

muscles (« *nostra methodo musculorum analysin instituere*⁴⁸ »). Il rappelle d'entrée de jeu que c'est l'analyse qui montre aux sens que les fibres agissent isolément, indépendamment de leur composition dans le muscle, et qu'elles sont donc le vrai « organe » du mouvement⁴⁹. Pourtant, comme nous l'avons mentionné, il entend exposer son *Specimen* « comme les Géomètres ont l'habitude de le faire, selon un ordre synthétique⁵⁰ ». Comment comprendre le lien entre d'un côté l'analyse, qui correspond visiblement à l'ordre de la découverte des éléments musculaires, et de l'autre l'ordre synthétique adopté pour les exposer ? Et quel est le gain de ce *modus exponendi* synthétique là où Sténon aurait pu se contenter, comme dans ses autres ouvrages, de rapporter ses découvertes dans l'ordre prescrit par la dissection qui va au contraire du composé au simple ?

Avant de répondre, il nous faut préciser que bien qu'il présuppose évidemment le résultat de nombreuses expériences sensibles, c'est-à-dire progresse à partir d'éléments non démontrables, l'ouvrage de Sténon avance bien pourtant à deux égards selon un ordre synthétique : il part du simple pour aller au composé ; il ne présente du simple que ce qui permet de construire le composé. Ainsi avons-nous indiqué qu'aucun des « éléments » qui ne serait pas nécessaire au « composé », c'est-à-dire à la représentation du changement de forme du muscle au cours de la contraction, n'est mentionné ou décrit. À l'inverse, chaque partie de la figure du muscle requise pour le mouvement du tout bénéficie d'une dénomination et d'une définition propre afin d'éviter la confusion qui a, selon l'auteur, prévalu jusque-là⁵¹. Et on peut remarquer que c'est notamment dans respect de cette voie synthétique entendue ainsi que réside l'originalité du *Specimen* – il suffit de penser par différence au *De motu animalium* de Borelli, dont la nature même (il s'agit d'une somme de physiologie sur les mouvements organiques) impose un enchaînement des propositions apposées où de nouveaux objets physiologiques non présentés au préalable font irruption dans le raisonnement.

Notre hypothèse est que ce mode d'exposition synthétique est justement choisi pour sa dimension cognitivement contraignante : 1) parce que c'est le mode d'exposition qui permet le mieux de réfuter l'hypothèse contraire de ses contemporains. 2) parce que cet ordre démonstratif permet de contrôler la légalité de l'analyse dont il expose les résultats.

1) À moins d'assister à la dissection, on peut toujours suspecter sa description de ne pas rendre compte de chaque partie visible ou d'en omettre les propriétés ; la dissection elle-même peut corrompre la situation naturelle de parties et crée des artifices. Ce sont deux écueils des démonstrations anatomiques que Sténon rappelle dans son *Discours sur l'anatomie du cerveau*. Et ils permettent précisément de comprendre que la résolution anatomique suivie par le récit des dissections peut masquer des solutions de continuité dans la régression du composé au simple. À l'inverse, le mode d'exposition synthétique permet de fait au lecteur de vérifier à chaque pas le lien entre les définitions préalables, les propositions qui suivent, et les conclusions qui en dérivent. Ce lien peut être réputé vrai à partir du mode d'exposition, et ce même si les prérequis empiriques ne sont pas reproduits ou admis par tous. Autrement dit, à partir des affirmations de Sténon sur l'aspect critique de sa *Myologie* (l'incertitude des hypothèses concurrentes est démontrée), on peut reconnaître à cet « ordre synthétique » revendiqué les bénéfices que Descartes y voit lui-même, dans ses *Secondes réponses aux objections*⁵².

Selon Descartes, l'ordre géométrique, qui consiste en ce que les « choses proposées les premières doivent être connues sans l'aide des suivantes, et que les suivantes doivent après être disposées de telle façon qu'elles soient démontrées par les seules choses qui les précèdent », se décline en deux manières de démontrer. La manière analytique, qui correspond à la « vraie voie par

⁴⁸ Sténon, *Specimen*, 43 (*Opera philosophica*, 2 : 92) : « Iam vero, ut carni in compositione diversitas, ut planorum extremorum differentia inveniatur, patet necessarium esse, nostra methodo musculorum analysin instituere, eorum latera carnosa, latera tendinosa, latera transversa et quae alia hic proposita sunt, in ipso corpore mensurare ».

⁴⁹ Sténon, *Specimen*, 4 (*Opera philosophica*, 2 : 69).

⁵⁰ *Ibid.*

⁵¹ Lettre à Thévenot, dans Sténon, *Specimen*, 62 (*Opera philosophica*, 2 : 103).

⁵² Sur les relations philosophiques entre Sténon et Descartes, cf. Sténon, *Discours sur l'anatomie du cerveau*, éd. Raphaële Andraut (Paris, 2009), 37 sq., et *Chaos : Niels Stensen's Chaos-manuscript*, Copenhagen, 1659, éd. August Ziggelaar (Copenhague, 1997). Voir aussi les propos de Sténon sur la nature des corps dans l'épître dédicatoire au Grand Duc, *Specimen*, non numéroté (*Opera philosophica*, 2 : 64) : « Organum est corpus nostrum ex mille organis compositum, cuius veram cognitionem, qui absque Matheseos ope investigandam credit, sine extensione materiam, sine figura corpus credat, oportet ».

laquelle une chose a été méthodiquement inventée », n'est cependant pas propre à « convaincre les lecteurs opiniâtres ou peu attentifs ».

La synthèse au contraire [...] démontre à la vérité clairement ce qui est contenu en ses conclusions, et se sert d'une longue suite de définitions, de demandes, d'axiomes, de théorèmes et de problèmes, afin que, si on lui nie quelques conséquences, elle face voir comment elles sont contenues dans les antécédents et qu'elle arrache le consentement du lecteur, tant obstiné et opiniâtre qu'il puisse être⁵³.

De fait, comme nous l'avons mentionné, à l'inverse de tous les ouvrages anatomiques de Sténon où il s'agit de ne rien passer sous silence (que ce soit l'apparence des parties mises au jour, les manières de démontrer ou l'ordre de la dissection)⁵⁴, c'est le principe de sélection qui domine et parcourt tout le *Specimen* : comme l'auteur le souligne lui-même, le but n'étant pas strictement anatomique, il ne convient d'y exposer que ce qui *suffit* à montrer l'usage de la vraie fabrique des muscles dans leur mouvement, afin de prouver le caractère incertain des explications admises jusque-là. À plusieurs reprises Sténon mentionne ce qu'il laisse de côté pour ne pas invoquer d'éléments inutiles ou inutilement compliqués. Il entend d'abord ne décrire que ce qui aura un « usage » dans les étapes ultérieures de la démonstration (*cum mihi animus sit ad ostentationem nihil, ad usum omnia accomodare, illa sola describo, quorum usus in sequentibus necessarius erit*) : il faut se contenter par exemple d'appréhender le parallélépède de fibres charnues en deux dimensions, comme un parallélogramme. Comme il le rappelle plus loin, « il répugne aux lois de la méthode d'employer un solide là où une surface plane suffit⁵⁵ ». Ensuite, il précise qu'il ne sert à rien de mentionner l'épaisseur des tendons puisqu'elle ne produit « aucune différence notable⁵⁶ » dans le mouvement des muscles. Enfin, et plus généralement, ses détracteurs qui taxeront sa « nouvelle fabrique des muscles » de chimère devront au moins reconnaître qu'il a suivi les « traces de la nature » et n'a « rien rapporté sans nécessité⁵⁷ », tout comme si l'économie des réquisits et des démonstrations fonctionnait comme une preuve de l'exactitude de son *Specimen* :

[II] n'est pas dans mon intention de présenter [tous les] éléments de myologie, *mais seulement* d'en exposer un échantillon qui *suffise* à comprendre distinctement la fabrique des muscles. Puisque je crois avoir rempli cette tâche dans ce que j'ai proposé jusque là, il reste à expliquer l'usage de cette fabrique dans le mouvement des muscles, ce que je montrerai en peu de mots, non afin d'expliquer le vrai mode du mouvement, dont j'avoue qu'il m'est inconnu, mais pour montrer que le mode proposé par les autres n'est pas encore suffisamment certain⁵⁸.

Si l'on nous autorise la comparaison du *Specimen* avec l'éclaircissement cartésien sur la synthèse, il apparaît bien que l'intention de Sténon est « d'arracher le consentement des lecteurs opiniâtres » (*i. e.* l'ensemble des physiologistes de son temps). Et ce d'autant plus que la démonstration géométrique de Sténon prouve une corrélation contre-intuitive : un gonflement apparent n'est pas forcément produit par une augmentation de volume.

⁵³ Descartes, « Méditations, Secondes Réponses », dans Descartes *Œuvres*, éd. Adam et Tannery, 11 vols. (Paris, 1996), 9a : 121-122.

⁵⁴ Sténon, *Discours sur l'anatomie du cerveau*, 117 : cela permet au spectateur de vérifier qu'aucun artifice n'a été créé lors de la dissection.

⁵⁵ Sténon, *Specimen*, resp. 11 et 26 (*Opera philosophica*, 2 : 81) : « Potuissem idem ex 34.11 Eucl. in solido musculi demonstrasse, planorum transversorum alterum pro basi, eorumque distantiam pro altitudine habendo, sed methodi legibus repugnat solidum adhibere, ubi planum sufficit ».

⁵⁶ Sténon, *Specimen*, 13 (*Opera philosophica*, 2 : 74) : « Sed cum in motu musculi explicando tendinum crassities nullum usum habeat, pars vero eorum extra carnem protensa [...] notabilem differentiam raro producat, praestat tantum considerare illa tendinum plana, in quibus extrema plana carni sunt, ut adeoque in musculo, du motum eius consideramus, non nisi tria planorum paria occurrant... ».

⁵⁷ Sténon, *Specimen*, 3 (*Opera philosophica*, 2 : 68) : « Videor mihi videre multos, qui ad prim haec verba pedem figentes, novam musculi fabricam, novam chimaeram pronuntiatum sunt. Sed illos ego perhumaniter rogatos volo, donec totum discursum pervoluerint, sententiam suspendere ne recusent. Agnoscent enim me Naturae vestigiis insistentem, sine necessitate nihil attulisse ».

⁵⁸ Sténon, *Specimen*, 16 (*Opera philosophica*, 2 : 76) : « Quod hic factum, cum non mihi animus sit ipsa elementa myologiae proponere, sed duntaxat tale illorum specimen edere, quod sufficeret fabricae musculi distincte intelligendae. Id quod cum in hactenus propositis a me praestitum crediderim, reliquum est, ut huius fabricae usum in motu muscularum explicando, paucis ostendam, non quidem veru motus modum explicando, quem mihi incognitum profiteor, sed ab aliis propositum modum, nec dum satis certum esse, ostendo ».

2) S'il ne correspond pas au processus de découverte, l'ordre synthétique peut aussi contribuer à en attester la rigueur. Selon nous, sa fonction critique n'est donc pas seulement externe et négative (mieux s'opposer à ses détracteurs), mais aussi positive et interne (parcourir en sens inverse l'analyse pour en contrôler le cheminement). En effet, la voie synthétique est le moyen de vérifier que les éléments simples dégagés lors de la résolution anatomique⁵⁹ suffisent à démontrer le mécanisme complexe qui les suppose : elle permet de vérifier l'ajustement entre l'*explicandum* et les *explicantia*. Précisons ce point. Nous avons montré que Sténon commence par définir l'élément anatomique qui assure la fonction nodale de se raccourcir sous l'effet d'une stimulation, qu'il soit ou non séparé du tout dans lequel il est inséré, le terme de l'analyse n'étant alors pas tant l'ultime élément anatomique matériellement dissécable (les fibrilles) que celui qui est structurellement et physiologiquement pertinent. On pourrait en effet, au contraire de Sténon, choisir de faire régresser l'analyse non seulement au-delà de ce que la dissection révèle, mais encore au-delà du sensible. C'est le cas de Borelli par exemple, qui s'emploie à montrer que les fibres musculaires se composent encore de vésicules rhomboïdes unies en séries continues comme les anneaux d'une chaîne, et qui doivent être conçues comme de « petites machines »⁶⁰ : pour se faire, non seulement il régresse en deçà des produits de la résolution matérielle pratiquée à l'aide du scalpel (il a eu besoin du microscope⁶¹), mais en outre, il en appelle à l'analogie entre « le connu et l'inconnu » pour établir la façon dont les fibres « doivent » être composées pour pouvoir se contracter et se détendre⁶². Au-delà même de cette reconstruction mécanique des causes du mouvement musculaire, Borelli propose des hypothèses sur sa raison chimique⁶³.

Par opposition à une telle tentative, et parce que Sténon affirme ne vouloir ni dépasser l'appui sensible de la dissection, ni se prononcer sur la cause du mouvement musculaire, la voie synthétique suivie dans son ouvrage critique permet de contrôler que le point d'arrêt de l'analyse fonctionnelle est le point de départ suffisant pour rendre compte du gonflement des muscles dans la contraction. Non seulement parce que le propos est surtout de reconstruire l'usage de la (vraie) fabrique des muscles dans leur mouvement, mais encore parce que cela éviterait de faire des hypothèses non corroborées par l'expérience, et de ce fait plus trompeuses qu'éclairantes. On pourrait donc dire, en se fondant sur les résultats de Sténon, que la voie synthétique est ce qui permet de contrôler la légalité de l'« analyse », étant entendu que celle-ci ne s'identifie pas tout à fait avec l'opération de la dissection. En effet, il y a deux indices montrant que l'analyse, mentionnée à trois reprises, ne se réduit pas à une décomposition indifférente des corps à l'aide du scalpel, mais qu'elle est plutôt une procédure soumise à des lois, permettant d'éviter de couper hâtivement des parties continues ou de dissimuler sous l'effet de ce découpage le rôle physiologique des parties disséquées. Le premier indice apparaît dans la lettre à Thévenot : Sténon précise qu'en l'absence provisoire de toute entreprise de « résolution chimique », la dissection des muscles doit s'appuyer sur une division des muscles conforme aux « lois de la mécanique »⁶⁴. Le second se trouve dans le *Discours sur l'anatomie du cerveau*, où Sténon invoque les « lois de l'analyse » qui doivent permettre d'établir hypothétiquement les différentes façons d'expliquer les

⁵⁹ Nous attribuons au terme « résolution » le sens anatomique défini par exemple par Marco Aurelio Severino dans son livre *Zootomia democritaeva* (Nuremberg, 1645), 43 : l'anatomie est « la résolution artificielle, selon les délimitations naturelles [...], de tout l'assemblage du corps humain en parties les plus petites possible ». La résolution est notamment distinguée du simple découpage des organes : elle désigne une dissection intelligente, puisqu'elle ne consiste pas à séparer violemment les tissus et permet la compréhension des fonctions et de l'agencement des parties entre elles. Par ailleurs, Sténon mentionne la résolution à propos de la chimie, qui décompose les corps en ses éléments (voir *infra*). Par analyse, dont nous précisons le sens plus loin, nous entendons d'abord uniquement l'ordre de la découverte que Sténon mentionne explicitement.

⁶⁰ Borelli, *De motu animalium*, I, prop. 113-116, 103 sq.; II, prop. 15, 201 ; prop. 17, 203. Par ailleurs, il s'agit sûrement d'une illusion créée par le croisement des fibres transversales sur les fibres longitudinales.

⁶¹ *Ibid.*, I, prop. 1, 3.

⁶² *Ibid.*, I, prop. 113, 103 : « Fila tendinosa, & nervea, quae post distractionem contrahuntur necessario componi debent ex pluribus machinulis longo ordine inter se connexis, ad instar catena ex arcubus contrahibilibus compositae. Cum naturae dictamine a notis ad ignota procedere debeamus... quare concendendum est, fibram carneam, vel filum chalybeum constare ex tot machinulis formam arcus imitantibus ».

⁶³ *Ibid.*, II, prop. 15-16, 201 sq.

⁶⁴ Lettre à Thévenot, dans Sténon, *Specimen*, 62 (*Opera philosophica*, 2 : 65) : « Sed ut fibrae motricis vera resolutio Chimica necdum ab ullo instituta, sic neque vera sectio musculi, quae per varia plana ad mechanicae leges instituitur, ab alio tentata est ».

actions animales (sensation et mouvement) mécaniquement –i.e. à partir des figures et des déplacements des parties composantes⁶⁵. Il s'agit bien, par l'analyse, soit théorique (et donc hypothétique), soit sensible *via* la dissection, d'associer les structures avec les mouvements qu'elles contribuent à produire.

C'est d'ailleurs le point d'arrêt dans la régression analytique, et donc la limitation des ambitions heuristiques de l'ouvrage, qui ont visiblement rendu perplexes ses contemporains, comme nous l'avons signalé. Sténon ne mentionne la « cause » de la contraction que pour rappeler son ignorance ; lui ne prend parti que sur le « mode » du mouvement des muscles, c'est-à-dire sur la manière dont s'accomplit le processus. Et ce en s'appuyant uniquement sur ses propres dissections et expériences directes, à l'inverse de Borelli, et surtout Bernoulli, qui procèdent de manière revendiquée à partir de ce que les autres ont démontré ou en reconstituant au-delà du sensible les causes structurelles ou chimiques des processus visibles⁶⁶ : l'usage des mathématiques en anatomie, aussi bien défendu par Sténon et Borelli que Bernoulli, peut donc entretenir des rapports extrêmement divers avec l'expérience sensible qui lui fournit son matériau. La diversité des parties anatomiques mathématisées ne peut être l'unique cause de la variété de traitement, puisque les trois auteurs se sont donnés notamment pour mission d'éclaircir le fonctionnement de la contraction musculaire.

En conclusion, l'élucidation de l'ordre synthétique suivi par Sténon permet non seulement de réfuter certains malentendus tenaces sur l'objet de son ouvrage, mais aussi de comprendre de manière interne l'enjeu scientifique de la mathématisation, outil de distinction : c'est à la fois la *présentation synthétique* de l'ouvrage et la *figuration géométrique* des muscles qui conditionnent la séparation des éléments structuraux entièrement connus qui sont indispensables à l'accomplissement de la fonction musculaire, d'un côté, et, de l'autre, l'ensemble des parties anatomiques qui sont incertaines ou brouillent la visualisation du mouvement.

⁶⁵ Sténon, *Discours sur l'anatomie du cervau*, 115.

⁶⁶ Borelli, *De motu animalium*, I, prop. 80 sc., 81 ; et Bernoulli, *Dissertation de fermentatione et effervescentia*, § 12, dans *Opera omnia*, 1 : 17.