

BERNARD BRU

**Problème de l'efficacité du tir à l'école d'artillerie de Metz.  
Aspects théoriques et expérimentaux**

*Mathématiques et sciences humaines*, tome 136 (1996), p. 29-42

[http://www.numdam.org/item?id=MSH\\_1996\\_\\_136\\_\\_29\\_0](http://www.numdam.org/item?id=MSH_1996__136__29_0)

© Centre d'analyse et de mathématiques sociales de l'EHESS, 1996, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Mathématiques et sciences humaines » (<http://msh.revues.org/>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme  
Numérisation de documents anciens mathématiques  
<http://www.numdam.org/>

## PROBLÈME DE L'EFFICACITÉ DU TIR A L'ÉCOLE D'ARTILLERIE DE METZ.

Aspects théoriques et expérimentaux.

Bernard BRU<sup>1</sup>

**RÉSUMÉ** — *Cet article décrit la façon dont était étudiée et enseignée aux futurs officiers, au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle, la question de la précision des tirs au canon et de la dispersion des points d'impact autour de la cible.*

*Notamment, il oppose la doctrine de l'École d'Artillerie de Metz (armée de terre, basée sur une théorie probabiliste, à celle de l'École d'Artillerie Navale de Lorient, purement empirique.*

**SUMMARY** — The problem of the efficiency of gun's firing at French "Ecole d'Artillerie de Metz". Theoretical and empirical aspects.

*This paper describes the study and learning (to future officers), in the mid 19th century, of the gun's firing precision and its dispersion.*

*Namely, it emphasize the opposition between the theoretical method used at the French "École d'Artillerie" implanted in Metz, and the empirical method in use at the "École d'Artillerie Navale", in Lorient's harbour.*

### 1. INTRODUCTION

L'enseignement théorique de l'École de Metz, fondé pour l'essentiel sur les mathématiques et la mécanique rationnelle, va se trouver confronté dès l'origine avec le problème évidemment fondamental du mouvement réel des projectiles d'artillerie et tous les problèmes qui lui sont associés, comme ceux de l'effet réel de la poudre ou celui de l'efficacité réelle d'un tir sur un objectif donné.

On le sait, en effet, aucun de ces problèmes n'est résolu de façon satisfaisante par la mécanique analytique de l'époque. Le seul cas abordé par la théorie est celui d'un boulet idéalement sphérique, propulsé par une charge de poudre de composition idéale qui lui communique une vitesse initiale idéalement connue, lancé par un canon à âme idéalement lisse, dans un air de composition idéalement uniforme, or non seulement ces conditions ne sont jamais réunies et sont très loin de l'être, mais surtout l'artillerie du XIX<sup>ème</sup> siècle est révolutionnée par la mise au point de l'adoption des canons rayés à projectiles oblongs qui eux, ne peuvent relever de la théorie classique et dont on ignore le comportement véritable, faute d'expériences assez prolongées.

Quant à la théorie de l'effet des poudres, même sous la forme relativement sophistiquée que lui fera prendre Piobert, elle est bien loin de rendre compte des phénomènes physico-

---

<sup>1</sup> Université René-Descartes (Paris V), et C.A.M.S.-E.H.E.S.S.

chimiques extrêmement complexes, produits lors d'une explosion, d'autant que ce n'est qu'à la fin du siècle qu'on saura fabriquer des poudres à combustion plus lente et mieux contrôlable.

L'École de Metz a dû prendre conscience assez vite de ces difficultés puisqu'elle a décidé en 1831 de remplacer le cours traditionnel de balistique par un cours sur les "principes de l'artillerie" confiée précisément à Guillaume Piobert (1793-1871) dont l'expérience théorique et pratique était reconnue. Dans le même temps, une Commission sur les "principes du tir" était constituée à Metz afin d'étudier expérimentalement l'efficacité des matériels en usage et de leurs théories alors enseignées aux jeunes polytechniciens de l'École.

Sensiblement à la même époque, Félix Hélie (1795-1885), lui-même ancien élève de l'École de Metz, est chargé des mêmes fonctions à l'École d'artillerie de marine de Lorient et à son initiative une commission d'expériences est établie à Gavre, près de Lorient, pour mettre à l'épreuve des faits l'artillerie de la marine et son enseignement. Hélie se trouvera naturellement confronté aux mêmes difficultés, et partout en Europe on se préoccupera de ces questions qui, on le comprend bien, concernent aussi bien les matériels que les hommes et les officiers qui les utilisent en situation de guerre et qu'il s'agit de former de la meilleure façon possible.

Plutôt que de comparer *a posteriori* les options adoptées par les différentes Écoles au vu de leurs résultats immédiats sur les champs de batailles, nous nous contenterons d'examiner rapidement la façon dont progressivement et contradictoirement la théorie de l'efficacité des tirs longs s'est constituée, théorie qui servira de fondement aux procédures de réglages des tirs tels qu'on les enseignera et les pratiquera pendant plus de cinquante ans partout dans le monde et notamment au cours des deux conflits mondiaux du XX<sup>ème</sup> siècle.

Curieusement, on constatera que les prétentions résolument théoriques de l'École de Metz, cette rigueur laplacienne minutieuse qu'elle a héritée des meilleurs géomètres, astronomes et géodésiens de l'Europe savante du temps et qui sans doute n'a pas eu toute l'efficacité militaire escomptée, ont joué dans toute cette affaire un rôle éminent, de sorte que l'École de Fontainebleau n'aurait plus qu'à intégrer dans son programme les enseignements tirés des expériences de Metz et qu'Esprit Jouffret qui déjà enseignait une partie du cours d'artillerie de Metz enseignerait à Fontainebleau un cours sur la dispersion du tir le plus moderne qui soit, lequel serait d'ailleurs largement copié partout en Europe et même à l'École de Lorient qui pourtant on le verra affichait depuis 1830 une hostilité résolue à toute espèce de théorie et particulièrement aux théories messines.

## 2. L'ARTILLERIE FRANÇAISE AU DÉBUT DU XIX<sup>ème</sup> SIÈCLE

Commençons par rappeler rapidement la position et les ambitions de l'Artillerie française à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle.

L'adoption définitive du système Gribeauval en 1765 avait doté l'artillerie française de matériels uniformes fabriqués avec une précision plus grande. De plus une mesure, adoptée en 1765 également, prescrivait d'envoyer les capitaines en second des régiments dans les divers établissements, fonderie, forges, arsenaux, poudreries, pour être formés aux nouvelles techniques. De l'avis unanime des historiens de l'artillerie, ces deux éléments, cumulés avec des campagnes incessantes, avaient fait de l'artillerie française la première d'Europe et de l'artilleur français le modèle du guerrier savant dont l'omniscience et la polytechnicité étaient susceptibles d'assurer l'autonomie, la supériorité et la perfectibilité indéfinie des armes françaises.

Pour donner une idée approximative de l'état d'esprit de certains de ces "artilleurs-savants" de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, citons la préface du *Traité du mouvement des projectiles, appliqué aux bouches à feu* de Jean-Louis Lombard (1722-1794), connu pour avoir construit les premières tables de tir agrées par Gribeauval, mais surtout pour avoir été le professeur d'artillerie de Bonaparte à l'École d'Auxonne en 1786 :

"L'artilleur devenu lui-même chimiste, physicien, mécanicien, géomètre, n'a plus besoin de recourir à des secours étrangers, depuis qu'instruit dans les utiles établissements, dont la France a donné l'exemple à toute l'Europe, il est occupé pendant la paix à acquérir des connaissances en tout genre, et en perfectionnant son art, à se mettre en état de rendre les services les plus signalés, qui le font regarder, à juste titre, comme le plus ferme soutien de l'État..."

L'artilleur en effet, doit veiller à la fabrication des canons dans toutes ses parties et à la "réception" des pièces et des poudres. Il doit connaître la chimie des poudres, la métallurgie, la fonderie, la science des machines et du mouvement de sorte qu'il soit assuré que tous ses matériels sont également dotés de "précision, solidité et uniformité", il y va de sa responsabilité qu'il doit assumer "scrupuleusement".

Lombard ajoutait pour mémoire :

"Je ne parlerai point des fonctions de l'artilleur en présence de l'ennemi, pour diriger l'exécution du tir des bouches à feu ; il se convaincra facilement, par la lecture du livre que je lui présente, que, sans le secours des mathématiques, il n'est pas possible ni de raisonner avec justesse, ni de pratiquer avec discernement cette partie de son art, la plus importante de toutes, et qui en est le complément ; il verra que le service peut souffrir de la perte d'un temps précieux, par la consommation inutile de munitions, si le flambeau de la théorie n'en éclaire, n'en accélère les opérations".

Comme on le sait, Napoléon remettra assez vite l'Artillerie à la place subalterne que sa stratégie de manœuvre et de mouvement imposait naturellement, mais on peut imaginer que les vœux de Lombard ont accompagné les savants rédacteurs des programmes de cours de l'École de Metz, une fois la paix durablement installée, en dépit du fait assez généralement reconnu qu'aucune des théories invoquées par Lombard n'était encore établie sur des principes clairement identifiés, ni confortée par des expériences assez concordantes pour entraîner la conviction. Ni la forge, ni les poudres, ni les contrôles de qualité, ni le mouvement réel des projectiles n'avaient pu être enserrés dans des limites théoriques ou pratiques convenables. Et nombreux étaient les artilleurs qui, en dépit de Lombard, doutaient qu'on puisse jamais espérer des secours réels d'une quelconque théorie, à l'exemple d'Urtubie qui reconnaissait dans son Manuel d'artillerie, contemporain du Traité de Lombard :

"Le degré de hauteur, la véritable charge à donner sont des choses difficiles à trouver. Des causes sans nombre répandent de l'incertitude sur ce service : la résistance de l'air, toujours hétérogène ; la quantité et la qualité de la poudre, jamais bien proportionnées ; les bombes toutes à la rigueur défectueuses en poids, en figures, en dimensions ; la construction du mortier, celle de l'affût, celle de la plate-forme inévitablement dérangée au premier coup ; l'impossibilité de placer la bombe avec précision, de façon que son axe et celui du mortier ne fassent qu'un et que tous les deux soient confondus avec l'alignement du but, une seule de ces deux causes produit des variations étonnantes".

Quant à Puget, qui s'était opposé fermement à Gribeauval, lors de la "querelle de la hausse", il affirmait en 1771 :

"Promettre des certitudes sur la projection des corps mus par une force considérable, c'est de la charlatanerie ou un manque de connaissance des effets de la nature, et particulièrement de la poudre de guerre et des mobiles que nous avons à projeter".

Ces incertitudes multipliées avait conduit les artilleurs de la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle, pour le tir de campagne tout au moins, à se limiter au tir dit "de but en blanc", c'est-à-dire au tir à

charge fixe sur un but aligné avec la génératrice supérieure du canon (ce qui correspond à une inclinaison d'environ un degré et demi). La distance moyenne de combat pour les canons de campagne était ainsi réduite à moins de cinq cents mètres, et ne nécessitait pas de procédures de réglage de tir particulières autres que celles résultant simplement du coup d'œil, du bon sens et du sang-froid du canonnier.

Certes Gribeauval avait introduit la hausse, c'est-à-dire la possibilité de tirer sous des angles supérieurs convenablement choisis selon la distance du but, mais la hausse se limitait à trois degrés, la portée des canons de campagne atteignant alors 800 à 1000 mètres. Encore ces tirs à hausse variable étaient-ils utilisés avec une certaine prudence, leur justesse étant problématique.

Pour les tirs de place ou de siège effectués "de plein fouet", sous des inclinaisons plus fortes, les angles recommandés ne variaient que peu afin que le canonnier expérimenté puisse contrôler son tir.

Dans tous les cas, les réglages de charge et de hausse étaient aussi réduits que possible et laissés à l'appréciation d'un artilleur qui voyait distinctement son objectif et par conséquent n'utilisait pas les rares tables de tir existantes. Cette attitude serait d'ailleurs encore très largement celle des artilleurs de la Première Guerre mondiale commençante. En 1914, les tables de tir restaient "le plus souvent un objet de curiosité qui disparaissait, oublié, au fond d'une cantine", comme le rappelait une note confidentielle sur la préparation et le réglage des tirs, datée de juillet 1917.

L'une des premières causes d'erreur des tirs longs provenait des phénomènes de déviation dus aux défauts de sphéricité des boulets et de régularité des canons qui communiquaient aux projectiles un mouvement de rotation d'axe variable, créant des courbures de trajectoires très rapidement incontrôlables et rétives à toute théorie. Newton, déjà, avait tenté d'expliquer la "ligne courbe" décrite par une balle de paume frappée obliquement et le grand balisticien expérimentateur Benjamin Robins (1707-1715), l'inventeur du pendule balistique, avait bien décrit, dans un mémoire posthume, ce phénomène de dérivation et indiqué qu'on s'en affranchirait par la mise en rotation des projectiles guidés par des rayures convenables de l'âme des canons. Ce procédé était déjà utilisé pour les carabines qui armaient la cavalerie ou la gendarmerie et dont la précision et la portée étaient remarquables.

Certes Euler avait considéré que cette dérivation était négligeable et que d'ailleurs elle s'amortissait, par frottement dans l'air au cours de la trajectoire, mais les expériences prouvaient le contraire, comme d'ailleurs elles contrediraient la première théorie mathématique des effets de dérivation dus à la rotation des boulets proposée en 1835 par Poisson, disciple et continuateur de Laplace.

A cette déviation-là, s'en ajoutaient d'autres, inévitables, imprévisibles et innombrables comme celles liées aux hasards des explosions de poudre, à l'extrême variabilité des conditions météorologiques, aux défauts de pointage, etc..

Toutes les expériences conduites au début du XIX<sup>ème</sup> siècle dans toutes les artilleries européennes démontraient ainsi que la justesse des tirs au-delà du but en blanc était illusoire même dans les conditions idéales des polygones de tir.

Pour ne citer qu'un exemple, indiquons les résultats rapportés par le général von Scharnhorst (1755-1813), le réorganisateur de l'Artillerie prussienne, dans son *Manuel de l'officier d'artillerie* (qui a connu plusieurs éditions de 1787 à 1820, et une traduction

française en 1840) : de 800 à 1000 pas une pièce d'artillerie a touché un but de 6 pieds de haut, 45 fois sur 145 ; à 1500 pas, le même but n'était atteint que 11 fois sur 50 ; à 1800 pas, 1 fois sur 30 et à 2000 pas, aucune fois en vingt coups tirés.

Tout cela n'aurait pas été si grave, les victoires de la République et de l'Empire en apportaient la preuve, si l'armement de l'infanterie de la première moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle n'avait pas été progressivement modernisée par l'adoption de fusils de guerre précis à des portées plus grandes que celles des canons, ce qui, on s'en doute, transformait les artilleurs qui servaient les pièces en autant de cibles sans défense et sans plus d'efficacité.

Les carabines à canons rayés, on l'a déjà rappelé, sont connues et appréciées depuis le XV<sup>ème</sup> siècle. Les raisons de leur succès sont également bien connues : les carabines sont précises à de grandes distances. Les rayures du canon communiquent en effet à la balle, forcée à l'intérieur à coups de maillet, un mouvement de rotation, d'axe sensiblement dirigé selon la trajectoire, qui se trouve ainsi stabilisée, comme dans le cas d'une toupie mise en rotation rapide. De plus, la balle, en adhérant fortement à l'âme de la carabine, rend étanche la chambre de combustion de la poudre, et élimine le "vent" de l'explosion qui a de la sorte un effet maximum.

Mais cette précision et cette plus grande portée des carabines ne compensaient pas le peu d'efficacité des balles en plomb et surtout la lenteur exagérée des opérations de chargement, au point que les retards des carabiniers étaient devenus proverbiaux. Ils arrivaient après la bataille sans doute, mais surtout ils n'avaient jamais assez de temps pour charger leur arme.

Or précisément, en 1828, Gustave Delvigne (1798-1876) va proposer un système de chargement simplifié des fusils rayés. Bien qu'il n'ait pas encore la perfection et la rapidité du chargement par la culasse adopté par les infanteries de la deuxième moitié du siècle, le système Delvigne, expérimenté avec succès à Vincennes, commencera à être mis en service dans l'Armée française en 1830.

Dès cette époque "il devenait évident qu'une batterie de canons lisses ne pourrait plus ouvrir le feu devant l'infanterie armée de carabines, qu'un bâtiment serait privé de son équipage par le feu des petites armes avant même d'avoir pu faire usage de ses gros canons", ainsi que le souligne perfidement et rétrospectivement le rédacteur de "L'histoire de l'expérimentation des canons rayés à Gavre", publiée en 1873 dans le tome 1 du *Mémorial de l'artillerie de marine*.

De toutes façons il fallait augmenter la portée utile et l'efficacité des canons, tout le monde en convenait au Comité de l'artillerie comme ailleurs, que l'on croie ou que l'on ne croie pas en l'avenir incertain des canons rayés dont la mise au point était particulièrement difficile. Sans esprit de polémique on peut même affirmer qu'il devait être assez clair dès ce moment-là qu'on atteindrait ce but seulement par une amélioration des matériels et non par l'élaboration d'une théorie exacte des canons et des poudres en usage, d'autant que cette dernière était hors d'atteinte de la science du temps et pour longtemps encore, et cela quand bien même les commissions de tir de Metz ou d'ailleurs pourraient expérimenter indéfiniment toutes ces sortes de théories et que le Comité de l'artillerie, l'Académie des Sciences et les élèves officiers de Metz, contraints et forcés quant à eux, seraient disposés à les apprécier ou à les entendre. Mais il était certainement utile que de telles tentatives aient lieu, puisqu'elles conduiraient à d'autres résultats dont l'importance pratique et pédagogique serait, elle, manifeste.

Comme le rappelait Scharnhorst dans son manuel déjà cité :

"Le monde moral, comme le monde physique, semble être soumis à cette éternelle loi de mécanique, qu'on perd en temps ce qu'on gagne en force ; et que ce n'est que par la longueur du temps qu'on peut obtenir de grands résultats".

Il est bien vrai que dans sa période messine, l'Artillerie française a perdu beaucoup de temps et que de nombreux élèves-officiers formés à Metz ont dû penser qu'on leur faisait perdre le leur, en les accablant de mille cours appliqués qui de fait ne s'appliquaient pas. Qu'ils se rassurent ! La force qui en est résultée a conduit à des résultats un peu tardifs certains mais incontestables.

### 3. L'EFFICACITÉ DU TIR À L'ÉCOLE DE METZ

Commençons par donner la parole à l'accusation, de façon à laisser le dernier mot à l'École de Metz, comme il se doit.

L'accusation, on l'a déjà laissé entendre, sera développée très tôt à l'École de Lorient par Félix Hélie, le fondateur et premier "rapporteur", de 1834 à sa mort, de la célèbre Commission de Gavre qui a expérimenté tous les canons d'artillerie de marine depuis ce temps-là et qui a notamment mis au point les premiers modèles du canon de 16 rayé, utilisé au siège de Sébastopol en 1855.

Hélie part du constat que :

"Toutes les questions relatives au tir de projectiles et à leurs effets destructeurs sont du ressort de la Balistique. Les principes de la Mécanique rationnelle ne suffisent point pour les résoudre, les forces et les résistances qui se trouvent en jeu ne peuvent être appréciées que par l'observation".

Il faut donc fonder une nouvelle science, la "Balistique expérimentale", dont Hélie sera le prophète. Entreprenant et combatif, Hélie va inlassablement expérimenter, cinquante années durant. Ses résultats sont présentés dans un grand *Traité de balistique expérimentale*, publié pour la première fois en 1865 et dont on peut penser qu'il reprenait aussi le cours qu'il professait à l'École de Lorient. Ce traité sera considérablement augmenté et refondu en 1884 avec l'aide d'Hugoniot. Nous parlerons de cette seconde édition plus loin, au préalable nous examinons brièvement l'édition de 1865, qui est une attaque réglée contre le triumvirat théorique des généraux-académiciens de l'École de Metz, Morin-Piobert-Didion.

Le style d'Hélie est direct et sans équivoques, selon lui :

"Les recherches qualifiées du nom de théoriques sont toutes fondées sur des hypothèses en désaccord avec les faits observés et dont le seul mérite est de rendre les questions plus ou moins accessibles au calcul. Ce n'est pas en substituant à la réalité un état de choses purement imaginaire qu'on peut espérer de faire avancer la science de l'artillerie. Force est de recourir aux formules empiriques...".

Aucune des formules théorique de Piobert en théorie du mouvement des gaz ou de la résistance de l'air ne lui paraissent correspondre à la "nature des choses", certaines de ces recherches sont "fort curieuses" (elles conduiront d'ailleurs leur auteur à l'Académie), mais

"Les nombreuses hypothèses qui leur servent de base, et dont chacune n'est motivée que par la facilité plus ou moins grande qu'elle offre au calcul, s'écartent trop des circonstances que présente la pratique pour qu'elles puissent conduire à quelques résultats vraiment utiles".

Pire encore, Hélie en plusieurs endroits accuse implicitement Piobert et Didion d'avoir discrètement biaisé certains de leurs résultats expérimentaux pour qu'ils s'accordent davantage

avec leurs formules, ou bien d'avoir fait varier au gré de leurs expériences, les constantes que les dites formules renferment, voire même d'avoir "altérer la pesanteur", pour qu'elles concordent mieux avec les résultats expérimentaux. Quant aux recherches de Didion sur l'équation de la trajectoire d'un projectile lancé sous de plus grands angles, elles conduisent à des formules "fort compliquées" qui n'ont jamais été appliquées en dépit des tables que le général Didion avait dressées et dont il était assez fier, à juste titre d'ailleurs.

Dans tous les cas, Hélie propose de remplacer les formules théoriques par des formules "empiriques" obtenues sans théories en interpolant les résultats des expériences, formules les plus simples possibles dont il a pris soin de vérifier qu'elles étaient applicables et enseignables. C'est ainsi par exemple qu'il ajuste au mouvement des projectiles une équation du troisième degré à coefficients déterminés expérimentalement, et selon lui : "cette formule offre toute l'exactitude dont on peut avoir besoin". Quant à la formule binôme de la résistance de l'air proposée par Piobert et vérifiée expérimentalement à Metz par Didion, elle est inutile puisqu'on peut aussi bien ajuster aux résultats des expériences de Metz une formule monôme plus simple (puissance  $5/2$  de la vitesse par exemple).

Ce point de vue empirique a au moins l'avantage d'éviter les idées préconçues et peut expliquer en partie que Gavre ait accueilli en 1845 les expériences proposées par Delvigne sur les canons rayés alors qu'elles avaient été rejetées à plusieurs reprises par le Comité de l'artillerie et le Maréchal Soult (conseillé n'en doutons pas par la clique messine qui n'en avait pas fait au préalable la théorie).

La cause semble entendue, Hélie en luttant seul contre l'obscurantisme théorique et obtus de l'École de Metz a sauvé malgré elle l'artillerie française terrestre et navale de l'abîme sans retour où elle s'était fourvoyée.

Que dire dès lors pour la défense de l'École de Metz dont les intentions, quoiqu'en ait pu penser Hélie, étaient pures et légitimes : former par la science aux armes savantes, quand bien même ces armes et cette science n'auraient pas encore toute la scientificité souhaitable, quand bien même d'autres tâches plus urgentes sans doute, préparer l'artillerie à la guerre moderne par exemple, s'imposeraient.

D'autres que nous ont dit déjà les lourdeurs administratives et les conflits inévitables qu'a suscités la coexistence forcée à Metz du Génie et de l'Artillerie. On pourrait soutenir sans doute qu'elle a entraîné aussi dans l'enseignement comme dans la recherche une sorte de surenchère théorique, chaque arme faisant assaut de théorie pour l'emporter sur l'autre et que cette émulation *a priori* saine et souhaitable a conduit à des débordements et des scléroses insupportables. Mais nous ne ferons pas le procès des savants de l'École de Metz. Au contraire nous allons essayer de montrer que certes ils sont coupables, comme tout le monde, mais que cette culpabilité-là, inévitable, n'est pas sans grandeur ni sans enseignements.

Commençons par Piobert, le plus savant sans doute, titulaire du premier cours d'artillerie de Metz et membre de la Commission des principes du tir depuis sa création en 1831, jusqu'à ce qu'elle cesse ses travaux en 1850, travaux qu'elle reprendrait d'ailleurs sous une autre forme en 1855, après que l'expérimentation des nouveaux canons rayés eut été décidée par le Comité d'artillerie.

Au sein de cette commission Piobert va déployer une activité théorique très remarquable, on l'a dit, notamment en tentant d'élucider le mouvement des gaz lors d'une explosion de poudre. L'expérimentation des effets de la poudre est inscrite au programme de la Commission en 1833. Il s'agit bien sûr d'abord de tester les formules théoriques de Piobert et Morin dont l'intérêt immédiat et rétrospectif est mince mais il faut souligner l'ingéniosité

des procédures d'expérimentation proposées en 1835 par Piobert lui-même telles qu'on peut les lire par exemple dans le tome 5 du Mémorial de l'artillerie (1842, p.501) ou dans le tome 2 du Traité d'artillerie de Piobert. On peut considérer sans exagération qu'il s'agit-là des toutes premières tentatives de planification scientifique des expériences en contrôle de fabrication, menées sur une grande échelle.

Pour déterminer par exemple la "charge de rupture" des projectiles creux, Piobert "fit éclater un grand nombre de projectiles de vingt espèces différentes, variant soit par la grandeur du calibre, soit par l'épaisseur des parois ; 14 de ces espèces qui n'étaient pas en usage, furent coulées tout exprès de manière à comprendre toutes les épaisseurs de parois de 14 à 41 millimètres et de 6 diamètres de 118,5 mm à 320,5 mm. Dix à quinze projectiles neufs de chaque espèce sont choisis parmi ceux dont le poids, les dimensions et la pesanteur spécifique diffèrent le moins entre eux, et de la moyenne de 50 projectiles de leurs séries respectives.

"Afin d'éviter des anomalies, chaque obus n'a été tiré qu'une seule fois ; on les a tirés successivement avec des charges de poudre que l'on augmentait quand ils résistaient et que l'on diminuait quand ils éclataient, de manière à obtenir l'un et l'autre résultat avec des charges très peu inférieures ou supérieures à celle dont le plus grand effet est de faire éclater le projectile. La charge calculée par les formules sert de point de départ pour le premier obus de chaque série, afin de diminuer les tâtonnements ; les autres obus n'étaient chargés que successivement, au fur et à mesure du tir, de manière à pouvoir augmenter ou diminuer la quantité de poudre, suivant que le projectile avait résisté ou non".

On peut reconnaître-là une des premières utilisations de la méthode "up and down" qui sera mise en œuvre au siècle suivant pour déterminer par exemple la résistance au choc des explosifs ou les doses médianes létales de poisons (la LD50 des anglos-saxons) et bien d'autres choses encore. On date généralement cette méthode de la Seconde Guerre mondiale et sa théorie statistique n'a été faite que dans les années 50, après l'adoption généralisée des procédures statistiques séquentielles ("successives" comme l'explique Piobert). Sans chercher à donner à Piobert plus qu'il ne faudrait, notons simplement qu'on ne connaît pas actuellement d'exemples antérieurs d'emploi systématisé de cette méthode-là. D'autant que les tableaux de résultats de Piobert (tome 2 du *Traité*, p.374) sont tout à fait explicites et démonstratifs de l'intérêt de sa méthode.

Comme on l'a souvent souligné, tout le XIX<sup>ème</sup> siècle fera des expériences, accumulant d'innombrables résultats, sans souci d'ordre ni de méthode. Cournot parle ainsi de l'exubérance statistique de son siècle, et Bienaymé dénoncera sans cesse les abus sans nombre que l'on fait de tant de chiffres à qui l'on fait tout dire, à moins qu'ils ne découragent par leur multitude même. Dès lors l'empirisme ne suffit plus, n'en déplaît à Hélié, il faut des théories en amont pour éviter de trop longs "tâtonnements", il faut aussi en aval des expériences planifiées scientifiquement (il faudrait même une théorie des plans d'expériences mais n'anticipons pas trop), expériences dont il soit possible de tirer des conclusions assez significatives pour emporter la conviction non seulement d'académiciens bienveillants ou d'un Comité d'artillerie convaincu d'avance mais des plus farouches opposants, Hélié par exemple. De ces nécessités, la Commission de Metz, en dépit de ses œillères théoriques supposées, a pris conscience dès 1835 et les programmes de l'École de Metz en conserveront l'empreinte, ainsi que les officiers formés à Metz, les meilleurs d'entre eux au moins. Et nulle part autant qu'à la Commission de Metz, on n'entreprendra de développer la planification des expériences. Pour trouver des tentatives aussi intéressantes, quoique plus tardives et sur une plus petite échelle, il faut attendre les expériences de Pasteur de la fin du siècle sur le charbon du mouton ou les maladies des vers à soie.

Venons-en maintenant plus précisément au problème de la détermination expérimentale de l'efficacité du tir.

En fait, les meilleurs auteurs de balistique expérimentale du XVIII<sup>ème</sup> siècle avaient déjà proposé des "règles et observations générales à suivre dans les épreuves d'artillerie", c'est le cas de Scharnhorst notamment qui énumère onze règles générales devant guider les commissions d'expériences. La première règle précise :

"On ne peut obtenir des résultats exacts qu'en prenant l'effet moyen d'une somme d'effets qui auront été produits dans les expériences particulières, toutes circonstances égales".

Et la deuxième ajoute :

"L'effet moyen dont il est parlé dans la règle précédente sera une expression d'autant plus exacte du résultat cherché que le nombre des expériences particulières d'où il aura été extrait sera plus considérable".

La troisième règle indique assez que les expérimentateurs eux-mêmes doutaient qu'on puisse obtenir par l'expérience des précisions sur l'efficacité comparée des pièces d'artillerie :

"Quoique Robins et des écrivains plus récents sur l'artillerie prétendent : que les résultats tirés des portées sont entièrement faux ; que l'action des causes fortuites occasionne des différences plus grandes entre les portées toutes choses égales d'ailleurs, que n'en produisent, dans les cas ordinaires, le plus ou moins de longueur des pièces, ou le plus ou moins de force des charges, cela n'en est pas moins une erreur".

Ainsi il ne manquait pas d'auteurs pour considérer que non seulement la balistique théorique ne traitait que des cas sans rapport avec la réalité, mais encore que la balistique expérimentale ne saurait non plus décider de la plus ou moins grande efficacité des bouches à feu, tant étaient prépondérantes les causes fortuites dont nous avons déjà parlé. Quant à ceux qui pensaient différemment, Scharnhorst, Lombard ou d'Antoni par exemple, ils n'avaient pas même une façon commune de comparer les portées moyennes.

C'est la raison pour laquelle le Comité de l'artillerie avait mis au concours, pour l'année 1829, le sujet suivant : "Indiquer, en se fondant sur les principes connus de la théorie des probabilités, le meilleur mode à adopter pour la recherche des portées moyennes, discuter le mérite relatif des divers procédés en usage". A ce premier thème le Comité en ajoutait un autre : "L'étendue superficielle de l'objet à frapper et sa position relativement à la batterie étant données, assigner, pour chacune des bouches à feu, la fraction exprimant le rapport entre le nombre total de coups et les coups à effet".

C'est cette seconde question qui constitue le problème dit de l'efficacité du tir, quelle est la probabilité qu'une bouche à feu donnée atteigne son but ?

Des trois mémoires qui ont concouru en 1829, il nous reste celui du Capitaine Prosper Coste, de Metz, intitulé : *Des déviations ou de la probabilités du tir des projectiles*. Coste décrit très bien les phénomènes de dérivation évoqués plus haut et analyse diverses expériences faites en 1771 à la Fère, en l'An 11, à Metz et en 1818 à Lens. Il en déduit un certain nombre de lois empiriques assez simples, comme par exemple que les déviations des projectiles sont en raison inverse de leurs diamètres ou que les rapports des déviations aux portées sont constants, quant à l'efficacité du tir, il énonce que la probabilité de toucher des buts de même largeur est à peu près en raison inverse de leurs distances et qu'à distance égale la probabilité de toucher des buts de différentes largeurs ne croit pas autant que ces largeurs.

Les résultats publiés par Coste confirmaient par ailleurs que la probabilité d'atteindre un but de 4 mètres de large à plus de 800 mètres était des plus faibles.

Coste ne s'appuyait pas sur les principes de la théorie des probabilités, ni d'ailleurs sur ceux d'aucune théorie identifiable, aussi Poisson, examinateur de l'artillerie, résolut de présenter les formules de la grande théorie laplacienne des moyennes, à l'ensemble des artilleurs-savants, qui visiblement les ignoraient. Il publia dans le tome 3 du *Mémorial de l'artillerie* un article intitulé : "Formules de probabilité relatives au résultat moyen des observations" qui présente très clairement la théorie des erreurs de Laplace et notamment la loi de probabilité d'une moyenne prise sur un grand nombre d'observations, la fameuse "loi des erreurs" que l'on appellera au vingtième siècle "la loi normale". Cette loi des erreurs ne dépend que d'un paramètre que l'on peut facilement déduire des observations et qui n'est autre que l'écart-type empirique. Dorénavant, à Metz au moins, on devra appliquer les formules de la "théorie analytique des probabilités" dès que l'on fera des moyennes de mesures de même nature, par exemple lorsqu'on calculera des portées moyennes, ou bien les écarts moyens au centre d'une cible. Et l'on jugera de la précision d'une arme lorsque la loi de probabilité de ces écarts moyens sera la plus resserrée possible autour du but. En fait les artilleurs préféreront très vite mesurer la précision d'une arme en utilisant le cercle "probable" centré sur le but et contenant la "meilleure moitié" des coups tirés mais l'on passe d'une mesure à l'autre très simplement dans les bons cas. On peut alors, en principe, comparer deux armes différentes très simplement en comparant les rayons de leurs cercles probables. On montre par exemple, et Didion le fera dans la seconde édition de son *Traité de balistique* de 1860 et dans son *Cours élémentaire de balistique* en 1858, que le fusil d'infanterie à balle sphérique a un cercle probable de 9,40 mètres de rayon, à 400 mètres de distance, alors que le cercle probable de la carabine de chasseur modèle 1842 à balle aplatie, à la même distance, a un rayon de 90 cm et que, pour la carabine à tige à balle oblongue (le dernier modèle rayé), ce rayon n'est plus que de 26 cm.

En revanche, Poisson ne traitait pas la seconde question du Comité de l'artillerie, celle concernant l'efficacité du tir, quelle est la probabilité d'atteinte d'un but de forme déterminée ? Pour Poisson cette probabilité existe mais n'est pas assignable théoriquement, seule l'observation des coups à effet permet de l'évaluer empiriquement, comme l'avait fait Coste dans son mémoire et d'autres avant et après lui.

Le premier savant de l'École de Metz qui se soit intéressé à cette question est Isidore Didion (1798-1878), qui a succédé à Piobert au cours d'artillerie en 1837 et dont le traité de balistique, plus accessible sans doute que le traité de Piobert, a dû servir de base de tous les cours de Metz jusqu'en 1870. Ce traité a connu deux éditions en 1847 et 1860 assez différentes entre elles. Ainsi la première édition n'évoque que pour mémoire l'existence d'armes rayées de petits calibres, alors que l'édition de 1860 traite sommairement du mouvement des projectiles oblongs tirés par des canons rayés, tout en s'inquiétant, à tort comme les expériences le prouveront, de l'excessive dérivation de tels projectiles que l'on force à tourner dans un sens arbitrairement fixé, détruisant la merveilleuse et toute théorique symétrie des projectiles idéalement sphériques de la théorie classique dans laquelle la résistance de l'air est idéalement réduite à une force dirigée suivant la tangente à la trajectoire. La mise en rotation des obus créait artificiellement un couple résistant dont on ne savait rien et dont on pouvait craindre le pire, tant que la théorie n'en aurait pas décidé autrement.

Il serait sans doute intéressant de préciser davantage ces réticences messines aux canons rayés que l'on devine souvent mais qu'il est difficile de mettre en lumière, tant les preuves directes sont rares.

Isidore Didion est par ailleurs l'auteur d'un très intéressant ouvrage sur le calcul des probabilités appliqué au tir des projectiles publié en 1858, dont nous allons parler bientôt.

Didion est absolument fidèle à "l'esprit de Metz" (il parviendra d'ailleurs, *in extremis* il est vrai, à se faire élire correspondant de l'Académie des Sciences en 1873). Ses travaux théoriques sont reconnus, notamment sa belle méthode d'intégration par arcs de l'équation de la balistique, qui sera utilisée, quoiqu'Hélie en ait dit, et reprise par le très grand balisticien italien Siacci.

C'est donc un "théoricien" et d'ailleurs l'une des têtes de turc favorites d'Hélie. Pour Didion :

"Les expériences servent essentiellement à fournir certaines données indispensables dans les applications, et à vérifier l'exactitude des formules".

Nous ne parlerons pas des premiers travaux de Didion sur la dispersion des tirs de bombes en 1823, et des tirs de balles en 1838 qui nous mèneraient trop loin dans l'analyse. Nous commencerons avec les travaux de la Commission de Metz de l'année 1846. Il s'agissait cette année-là, d'étudier le mouvement des projectiles. Didion qui était en train de rédiger son traité de balistique et qui cherchait des illustrations expérimentales, eut l'idée d'utiliser les résultats des expériences pour vérifier la loi des moyennes de Laplace, qui depuis Poisson faisait partie du programme obligé de Metz.

Dans son *alcul des probabilités* de 1858 Didion affirme que dès ce temps-là, il avait trouvé la solution théorique du problème de la probabilité des coups à effets mais que pris par le temps et ses obligations, il en a différé la publication. Il aurait d'ailleurs communiqué cette solution au capitaine Fèvre, professeur à l'École normale de tir de Vincennes, qui l'aurait intégrée à son enseignement. Nous n'avons pu vérifier ces affirmations. Quoiqu'il en soit, il semble que ces expériences de 1846 aient enfin permis à Didion de donner une consistance théorique aux multiples expériences sur la précision des tirs auxquels il avait participé depuis 1823.

Non seulement les moyennes sont distribuées suivant la loi des erreurs, affirme Didion, mais les tirs eux-mêmes le sont. Pour s'en rendre compte il suffit de comparer les résultats expérimentaux de Metz avec les tables théoriques de la loi des erreurs imprimées un peu partout (voir son livre p.61 où Didion compare la fonction de répartition théorique de la loi des erreurs de Laplace à la fonction de répartition empirique de 100 coups de canon de siège de 16, mesurés horizontalement et verticalement).

Si les affirmations de Didion sont bien exactes, et pourquoi en douterions-nous ? il s'agit-là d'un des tout premiers exemples d'ajustement de la "loi des erreurs" à des données autres que des "erreurs". Le premier exemple connu est celui des tirs de poitrine des soldats écossais analysés par Quetelet en 1846. Les coups de canons de Didion lui seraient donc presque contemporains.

Didion va d'ailleurs plus loin que Quetelet, ses données sont bidimensionnelles, un coup de canon est repéré par deux nombres qui fixent sa position par rapport au but verticalement et horizontalement. En supposant, ce qu'il fait explicitement, que les causes de déviations horizontales et verticales sont indépendantes entre elles, il forme la loi de probabilité du couple : c'est une loi normale à deux dimensions indépendantes mais de variances différentes et par conséquent les courbes d'égale probabilité sont des ellipses d'axes parallèles aux axes de coordonnées.

Mais bien sûr ! Ces ellipses, Didion les connaissait depuis longtemps, puisque déjà en 1823 il avait tracé les courbes d'égale probabilité des points de chute de 1300 bombes des expériences de Douai de 1818, courbes empiriques qui ressemblaient autant qu'il est possible à des ellipses.

Didion dut ressentir à cet instant (en 1846 ou en 1858, peu importe !) cette jubilation intellectuelle que Galton ressentirait en 1886 lorsque Dickson lui apprendrait que ses ellipses empiriques étaient précisément celles d'une loi mathématique uniforme qui réglait toutes les erreurs de mesure et mille autres choses encore.

Au sein même des épreuves d'artillerie les plus prosaïques qui soient, observer la chute des boulets de canon, se trouvait présente une théorie mathématique merveilleusement sophistiquée, la théorie de Laplace, le Mont-Blanc des mathématiques. Voilà qui justifiait au-delà de toute espérance l'esprit de Metz et peu importe que les prussiens pendant ce temps-là se préparassent de toute leur industrie à gagner la guerre, ils avaient dès ce moment perdu la seule bataille qui compte, la bataille théorique. Les boulets de canon français, les premiers au monde, tombaient suivant la loi des erreurs !

Didion pouvait enfin résoudre le problème de l'efficacité du tir dans toute sa généralité, quelle que fût la forme de la cible. On obtient la probabilité de succès en intégrant la fonction de Laplace sur la surface déterminée par la cible. On constate alors que les formules empiriques données par Hélié dans son mémoire de 1854 "sur la probabilité du tir des projectiles de l'artillerie de marine", sont moins bien accordées aux résultats expérimentaux que les formules théoriques de Didion, au point qu'Hélié, trahi par l'artillerie de marine elle-même, devra en tenir compte dès la première édition de son livre en 1865.

Quant aux élèves de Metz, dès 1860, ils devront apprendre les ellipses d'égale probabilité de Didion qui a pris soin de les intégrer dans la deuxième édition de son traité de balistique.

Il est difficile de suivre très précisément les développements ultérieurs de la probabilité du tir à l'École de Metz, faute de documents. On peut cependant considérer qu'elle a continué à prospérer, puisqu'en 1872, le capitaine Jouffret, professeur adjoint au cours d'artillerie de Metz, puis de Fontainebleau, va publier en trois livraisons ce qui devait constituer son cours de probabilités du tir (*Revue maritime et coloniale* 1872, 4 et 1873, 3 ; *Revue d'artillerie* 1873, 2). Le cours de Jouffret est un modèle du genre qui sera encore amélioré par le cours un peu plus tardif d'Henry qui succédera à Jouffret aux mêmes fonctions, en 1886.

Jouffret précise très bien le rôle joué par la loi normale en probabilité du tir à l'aide du schéma des causes multiples de Laplace. La dispersion du tir d'un projectile d'artillerie est la résultante d'un très grand nombre de causes perturbatrices, elle est donc régie, suivant le théorème de Laplace, par la "loi des erreurs". Ainsi, selon Jouffret :

"Si on tire un très grand nombre de coups, et qu'ensuite on aille placer l'un au-dessus de l'autre, en chaque point du sol, tous les projectiles tombés en ce point, la surface enveloppe de ces projectiles sera semblable à une cloche".

Et cette si jolie image de la cloche, reprise par Joseph Bertrand dans son livre de calcul des probabilités de 1887, connaîtra le destin fulgurant que l'on sait au point que l'on oubliera la "loi des erreurs" de Laplace pour ne plus parler que de courbe en cloche, projection de la cloche véritable formée par l'empilement des boulets de canon de Jouffret.

Sauf erreur, cette cloche est messine et sonne le triomphe de la théorie terrestre sur l'empirisme naval. En effet les expériences de Gavre, celles de la seconde Commission de Metz transplantée à Châlons-sur-Marne en 1862, et celles malheureusement en vraie grandeur de la guerre de 1870, démontreront au-delà de toute évidence la précision des tirs longs rayés. La "dérivation" des obus, forcée par leur mise en rotation, n'écarte que très peu le point de chute du plan de tir, et bientôt la théorie, assurée par l'expérience, le confirmera et permettra de dresser des tables de correction.

On peut dès lors envisager de "régler le tir" sur un objectif quelconque à une distance approximativement connue, jusqu'à le détruire. Or la théorie messine de l'efficacité du tir convenablement utilisée, qui fixe les proportions de coups dans une "fourchette" encadrant le but, d'amplitude donnée par une table, permet de proposer des procédures de réglages successifs des tirs, les plus efficaces possibles. Ces études entreprises dans les années soixante-dix par les artilleurs savants de Fontainebleau et d'ailleurs conduiront aux règles de tir du célèbre "aide-mémoire de l'artillerie de campagne" de 1883 et seront encore en service largement après 1918. Ces règles, convenablement améliorées, conjointement avec la mise au point de canons très performants, le 75 notamment, et le calcul de tables de tir plus précises, donneront à l'Artillerie française de la première guerre mondiale la redoutable efficacité qui lui est très largement reconnue.

#### 4. ÉPILOGUE

Ces oppositions radicales des deux grandes Écoles françaises d'artillerie des trois premiers quarts du XIX<sup>ème</sup> siècle, que nous avons sans doute exagérées mais qui sont bien réelles, théories messines, empirisme lorientais, vont être pulvérisées par le désastre de la guerre de 1870. Le temps n'est plus aux polémiques, mais aux remises en cause et aux examens de conscience.

Sans entrer dans trop de détails que d'ailleurs nous ne connaissons que très imparfaitement encore, notons simplement qu'on assiste à un renversement des rôles. Fontainebleau adopte un profil théorique assez bas et expérimente, alors que Gavre rêve de nouvelles théories. Il suffit pour s'en convaincre de parcourir la deuxième édition du *Traité de balistique expérimentale* que Hélie fait paraître en 1884 avec l'aide d'Hugoniot, son assistant à l'École de Lorient. On peut y lire un exposé assez complet et fort bien fait de la balistique théorique du moment et de la théorie du mouvement des gaz de Piobert. Peu de temps après, Hugoniot (1851-1887), va publier deux mémoires très remarquables sur la théorie du mouvement des gaz (*Journal de l'École Polytechnique*, 33, 1887) qui inspireront, comme on le sait, les travaux fondamentaux de Duhem et d'Hadamard.

A partir de ce temps-là, la Commission de Gavre et les ingénieurs de l'artillerie navale, formés à Lorient, multiplieront les travaux théoriques de première importance, citons pour mémoire les noms de Charbonnier, de Garnier ou d'Ottenheimer, mais nous sortons de notre sujet.

Il y eut une fois, il y a très longtemps, une École qui croyait aux théories et une autre qui n'y croyait pas. En fait, depuis toujours il y avait eu des théories mais tous le monde savait qu'elles ne s'appliquaient pas aux objets qu'elles étaient censés décrire, d'ailleurs ces objets-là tout le monde pensait qu'il fallait en changer et que le plut tôt serait le mieux. Il y avait aussi que les théories des nouveaux objets dont la mise au point était très difficile, étaient elle-mêmes encore plus difficiles en l'absence d'observations préliminaires. Il aurait sans doute été plus sage pour la première École de commencer par expérimenter, de façon à laisser au moins à la théorie une chance de ne pas trop s'égarer. Mais il n'en fut rien, et avec une belle constance elle théorisa. L'autre École qui elle expérimentait le plus qu'elle pouvait, avait bien raison de se moquer de sa concurrente, d'autant que cette dernière avait la redoutable responsabilité de former les futurs chefs de l'armée du pays en question et que toutes ces théories sans utilité réelle ne pouvaient guère y contribuer. Mais parmi les théories proposées par la première École, il y en eut une très modeste qui se proposait justement de faire la théorie des expériences elles-mêmes, et celle-là, par une curieuse ironie dont l'histoire est friande, on put l'appliquer aux objets fabriqués par la seconde École pour en déterminer l'efficacité. Plus tard, les observations se multipliant, on put même refaire utilement de la

théorie. A ce moment-là, la première École aurait pu triompher, il n'en fut rien et c'est bien dommage, mais elle expérimenta à la place et mit au point l'un des meilleurs objets qu'on puisse imaginer, tandis que la seconde École théorisait à sa place. Ainsi tout le monde finit par comprendre qu'il ne servait à rien de décider de programmes d'enseignement et de recherche appliqués, sans tenir compte de l'état des objets auxquels on voulait effectivement les appliquer. Mais la morale de cette histoire s'oublie plus vite qu'elle ne s'impose et la suite de l'histoire le démontre amplement sans qu'il soit utile pour nous de la développer davantage.

#### NOTE BIBLIOGRAPHIQUE

"Histoire de l'expérimentation des canons rayés à Gavre", publiée en 1873 dans le tome 1 du *Mémorial de l'artillerie de marine*.

Capitaine Prosper COSTE, *Des déviations ou de la probabilités du tir des projectiles*, 1829.

DIDION, Isidore, *Calcul des probabilités appliqué au tir des projectiles*, 1858.

DIDION, Isidore, *Cours élémentaire de balistique*, 1858.

DIDION, Isidore, *Traité de balistique*, deux éditions en 1847 et 1860.

HÉLIE Félix, *Mémoire sur la probabilité du tir des projectiles de l'artillerie de marine*, 1854.

HÉLIE Félix, *Traité de balistique expérimentale*, publié pour la première fois en 1865.

HÉLIE Félix, *Traité de balistique expérimentale*, 1884 (avec l'aide d'Hugoniot, son assistant à l'École de Lorient).

Capitaine JOUFFRET, "Cours de probabilités du tir", en trois livraisons, in *Revue maritime et coloniale*, 1872, 4 et 1873, 3 ; et *Revue d'artillerie*, 1873, 2.

LOMBARD Jean-Louis (1722-1794), *Traité du mouvement des projectiles, appliqué aux bouches à feu*.

PIOBERT Guillaume, *Traité d'artillerie*, tome 2 ou tome 5 du *Mémorial de l'artillerie*, 1842, p.501.

Général von SCHARNHORST (1755-1813), *Manuel de l'officier d'artillerie* (plusieurs éditions de 1787 à 1820, et une traduction française en 1840).

URTUBIE, *Manuel d'artillerie*, contemporain du "Traité" de Lombard.