



*Journ@l Electronique d'Histoire des
Probabilités et de la Statistique*

*Electronic Journ@l for History of
Probability and Statistics*

Vol 7, n°1; Juin/June 2011

www.jehps.net

L'observation scientifique est-elle un témoignage ?

Michel ARMATTE¹

Résumé

Les historiens des sciences, promoteurs de la notion de révolution scientifique placent l'observation et l'expérimentation au fondement de la science moderne et font jouer au témoignage un rôle de premier plan dans la connaissance des faits, mais leur fiabilité incertaine n'autorise qu'une connaissance probable. Or la théorie des probabilités qui se constitue également à la toute fin du XVII^e comprend une branche importante, la probabilité des témoignages, dont les principales propositions sont dues à Craig, Hooper, J. et N. Bernoulli, d'Alembert, Condorcet, Laplace, Lacroix, Poisson et Cournot. On pourrait s'attendre à ce que la théorie probabiliste des erreurs emprunte à cette tradition. Or il n'en est rien : elle se constitue sur une toute autre base. En retraçant ces deux histoires parallèles, nous essayons d'expliquer les raisons du paradoxe de cette non-rencontre, et des deux historiographies quasi indépendantes du calcul des probabilités sur les témoignages et sur les observations scientifiques.

Problématique

L'émergence d'une mathématique du probable au XVII^e siècle (Meusnier, 1996) est classiquement rapportée à l'épisode légendaire de la correspondance entre Pascal et Fermat de l'été 1654 sur la question des partis – c'est-à-dire des partages de la mise - à prendre au cours d'un jeu de hasard. Et c'est ainsi dans l'univers des jeux de hasard que se fonde un premier calcul, qui passe par la « géométrie du hasard » de Pascal et le petit opuscule de Huygens (1657) avant

¹ Centre A.Koyré. michel.armatte@dauphine.fr

de triompher dans les traités de Montmort (1708) et Jacques Bernoulli (rédigé dans les années 1680 et publié de façon posthume (en 1713), de Nicolas Bernoulli (1709) et de A. de Moivre (1718). Le théorème de Bernoulli (4^e partie de l'Art de la conjecture) offre la possibilité pour une épreuve répétable de déterminer les probabilités d'événements sur la base des fréquences observées sur le passé, avec une précision d'autant plus grande que les observations sont nombreuses. Enfin l'on peut remonter de ces probabilités d'événements observables aux probabilités des causes par la règle de Bayes (...) et Laplace (1774). Cela qui autorisera Condorcet à fonder une mathématique sociale sur l'assimilation des probabilité objectives et subjectives en une mesure du « motif de croire » issu de la répétition des événements. (Cf. les deux sources de probabilité évoqués par Condorcet dans l'article « probabilité » de l'*Encyclopédie*).

Les jeux de hasard ont joué un rôle indéniable dans la mathématisation du hasard, et sa transformation en un calcul des chances, en particulier parce que les jeux de hasard et les tirages dans une urne apparaissent comme les seuls cas (ou presque) où les possibilités peuvent être énumérées et associées à une probabilité *a priori* « tirées de la considération même et du nombre des causes ». Cependant les enjeux de ce calcul allaient bien au-delà des loteries peu pratiquées voire interdites à cette époque. Les philosophes et historiens de la probabilité à l'âge classique ont privilégié deux domaines dans lesquels ce calcul a permis des progrès remarquables, qui sont donc comme deux sources sociétales du probable.

La première filiation est de nature théologique et logique. C'est celle du probabilisme, doctrine des jésuites qui suppose que nos choix peuvent se suffire d'une simple opinion probable pourvu qu'elle émane de quelque autorité ou personne de confiance ; cette doctrine entre en contradiction avec elle-même dès lors que deux opinions attestées par des autorités aussi dignes de foi s'opposent. La solution assez laxiste des jésuites – ne pas condamner une action soutenue par au moins une opinion probable est critiquée par les jansénistes de Port Royal, néanmoins désavoués par la Sorbonne et par le pape, et Pascal vole à leur secours par le texte des *Provinciales* qui met en scène cette querelle de façon très brillante. On retrouve cette même question de l'opinion probable dans plusieurs débats théologiques, en particulier dans la controverse anglaise entre catholiques et protestants « latitudinaires ». On pourra suivre cette thématique du probable dans les travaux de Popkin (1978), Daston (1988), Morini (1992) et Glémain (1993, 2006). Du probable au prouvable, la question devient une thématique de la philosophie de la connaissance, ce qu'illustre parfaitement la quatrième partie de la Logique de Port-Royal (1662), en énonçant très clairement qu'entre la certitude des raisonnements et l'incertitude des témoignages de nos sens, il y a la place pour une certitude morale capable de degrés de probabilité. Ce degré de certitude attribuable à un énoncé ou à un fait apparaît susceptible d'une évaluation et d'un calcul établi selon les règles

d'addition et de multiplication des probabilités totales et composées données par Huygens et Montmort à propos des jeux.

Une seconde tradition, bien établie depuis l'article de Coumet (1970), fonde une bonne partie du calcul dans la tradition des contrats aléatoires que l'on peut observer dès le 16^e siècle dans le Commerce et dans le Droit, et dont on trouve la trace dans la jurisprudence et dans la thèse de droit de Nicolas Bernoulli (1709). Prenant son appui sur la règle de l'espérance mathématique établie par Pascal (pour régler des questions de partage de la mise dans un jeu interrompu), ces contrats substituent à toute loterie une valeur fixe équivalente, juste au double sens de la justesse et de la justice. En dehors du domaine religieux où la question de l'espérance a joué un certain rôle dans le pari de Pascal, cette règle est à l'œuvre dans deux domaines importants de l'activité humaine : dans le commerce maritime d'abord et plus généralement une quelconque activité économique risquée, où les assurances vont jouer ce rôle de substitution d'une juste prime fixe à un aléa des gains et des pertes. Dans les décisions judiciaires ensuite où la décision doit se prendre malgré une situation d'incertitude, comme c'est le cas par exemple dans les questions de successions en l'absence de certains héritiers dont on ne sait s'ils sont morts ou vivants (article absent de l'*Encyclopédie*)

Une troisième branche devrait à mon avis être rajoutée à cette arborescence de l'émergence du probable. Elle est directement liée à la science moderne qui émerge au XVII^e siècle comme une forme de connaissance savante en rupture avec la scolastique et avec la philosophie d'Aristote et qui se fonde sur la lecture du seul livre de la Nature, écrit comme on le sait dans le langage des mathématiques. Or cette histoire qui a quelques connexions avec les questions métaphysiques et théologiques, s'en distingue fortement du fait qu'il doit fonder sa légitimité sur une connaissance certaine, alors que la nature même de sa science vient des témoignages de nos sens à travers l'observation passive ou expérimentale des phénomènes naturels, qui est sujette à des erreurs et des « équations personnelles » et qui ne donne au mieux qu'une connaissance probable. On voit donc que la probabilité devrait ainsi constituer une question logique fondamentale de l'émergence de la science moderne, une nouvelle branche de l'arbre à probabilité, issue de la *Logique* d'Arnaud et Nicole, et visant à dépasser le hiatus entre connaissance certaine et opinion à l'aide d'un calcul du probable, traitant des erreurs de mesure dans les sciences d'observation.

Mais curieusement, les textes fondateurs des philosophes et historiens du calcul des probabilités ne rendent pas compte de ce qui se passe dans ce domaine. Hacking (1975), dans son récit de l'émergence des probabilités, retrace d'abord la genèse des approches en terme de degré de croyance du probabilisme à Port Royal et aux travaux de Leibnitz, puis il enchaîne sur Huygens et Pascal découvrant les principes d'une géométrie du hasard, bientôt appliquée et illustrée par les travaux sur les tables de mortalité. L'*Ars Conjectandi* est une sorte de

point d'orgue fédérateur de ces deux courants. Mais de l'erreur de mesure dans les sciences astronomiques, il n'est point question. L. Daston dans son célèbre article des *Annales* (1989) trace à grands traits ce qu'elle pense être l'interprétation classique des probabilités : celle-ci se ramène à la simple question de « jugement des hommes éclairés » qu'elle situe dans les deux traditions des débats théologiques et des contrats aléatoires (le pari de Pascal relevant des deux traditions). Trois approches ont pu contribuer à la valorisation (le chiffrage) des probabilités : les possibilités égales (fondées sur la symétrie physique et mobilisées dans les jeux), les degrés de certitude subjective (issues du droit, des jugements et des témoignages) et la détermination par les statistiques là où elles existent (natalité et mortalité). Or si la probabilité des jugements est longuement évoquée, rien n'est dit de l'émergence du probable chez les astronomes et les physiciens. Plus surprenant encore, le double volume du groupe de Bielefeld édité par Krüger (1987) et consacré à la révolution probabiliste comprend 35 contributions dont une seule traite de la question des erreurs de mesure². Seul dans cette période, l'ouvrage de Stigler (1986) construit en partie son histoire de la statistique sur le corpus des textes de la théorie des erreurs. Que révèle donc cette absence ? Que la question des erreurs de mesure et de leur traitement ne participe en aucune façon de la logique du probable ?

Second étonnement, la théorie probabiliste des témoignages que l'on trouve à l'œuvre et en débat tout au long du XVIII^e siècle, et qui se constitue comme une branche de calcul des probabilités, présente dans la plupart de ses ouvrages fondateurs, se réfère pour l'essentiel à l'espace judiciaire, celui des jugements prononcés par un juge ou un jury, et celui des témoignages devant les juridictions qui disent et appliquent le droit. Elle ne dit pas un mot du rôle des témoignages dans les sciences d'observation en cours de construction. Est-ce un effet de l'historiographie qui aurait par trop privilégié les sources juridiques du probable, ou bien un effet plus profond des inventeurs d'un art de penser qui ne se réglait que sur les règles et les pratiques du Droit ? Les inventeurs du calcul des probabilités qui étaient principalement des géomètres et des savants accordés par des pratiques académiques ont-ils eu quelque inquiétude à fonder des sciences nouvelles sur les sables mouvants d'une connaissance probable toute entière fondée sur des témoignages ? Où sont dès lors les traces d'un discours des observations qui servirait de prolégomènes à la réduction des erreurs et à un calcul permettant d'extraire les vraies valeurs des grandeurs physiques de leur gangue subjective ?

Ce discours des observations est en fait présent dans un autre corpus que celui de l'histoire du calcul des probabilités, celui de l'histoire des sciences. Je me centrerai sur les études « constructivistes » des dernières décennies qui ont interrogé davantage les pratiques des savants et philosophes de l'époque moderne que le renouvellement des paradigmes théoriques qu'ils mobilisent.

² Il s'agit de Zeno G. Swijtink, *The Objectivation of Observations : Measurement and Statistical Methods in the Nineteenth Century*, in Krüger and al., 1987, p.261-285.

Depuis les travaux de Shapin et Schaffer sur les débats opposant Hobbes à Boyle à propos de la pompe à air (1993) et la thèse de Christian Licoppe sur le discours de l'expérience entre 1630 et 1820, on sait que les philosophes et les savants ont largement discuté de la valeur d'une science fondée sur la seule lecture du Livre de la Nature, par des témoignages des sens qui n'offrent aucune garantie de certitude et de reproductibilité de la chose vue et mesurée. On sait aussi que la légitimité de l'expérience à fonder le discours savant vient largement de la reconnaissance de la qualité des témoignages qui en sont établis à travers différents dispositifs (description, vrais témoins, signatures...). On sait enfin que cette question des témoignages a évolué historiquement et s'est transmutée en une proto-théorie des erreurs et des protocoles qui assurent leur domestication. Passant de l'expérimentation en laboratoire à l'observation *in vivo*, nous avons différents récits d'opérations cruciales d'observation et de mesure (la question de la figure de la terre, ou encore celle de la longitude) qui nous informent sur l'existence d'un langage du jugement de précision qui petit à petit se transformera en protohistoire de la théorie probabiliste des erreurs. Et cependant aucune référence n'est faite dans cette littérature des *sciences studies* à la théorie des jugements empruntée aux Bernoulli, à Condorcet ou à Cournot et Poisson, et ne vient témoigner dans cette littérature d'une influence quelconque de l'histoire juridique des probabilités sur la mise en mathématique du hasard qui se cache dans l'erreur de mesure. Soit qu'ils aient ignoré le débat sur la probabilité des jugements, soit qu'ils l'aient rejeté en connaissance de cause, soit qu'ils aient résolu leur problème avec d'autres outils, les acteurs de la philosophie naturelle aussi bien que leurs historiens semblent avoir ignoré l'émergence du probable et la naissance du calcul des probabilités à l'œuvre dans les contextes théologiques, et juridiques.

Cette dualité apparente de mise en œuvre du probable par des communautés pas si éloignées l'une de l'autre, pouvant aller jusqu'à s'ignorer totalement est une énigme. Mais il y en a une de second niveau qui s'y greffe et qui concerne les historiographies séparées du calcul des probabilités et de l'histoire des sciences. La révolution scientifique et la révolution probabiliste promues toutes les deux dans les années 1980 n'avaient-elles aucun rapport ? Pour répondre à cette double question, nous allons retracer successivement les deux lignes discursives : d'abord revisiter rapidement les grands textes de la théorie des témoignages pour en dégager leur inspiration, leurs principes de calcul et leurs résultats; puis reprendre les débats sur le rôle des témoignages et leur prise en compte dans les canons de la science qui s'établissent au même moment dans les deux domaines différents de la science expérimentale et de la science d'observation. Ayant alors évalué la réalité et les enjeux de la dualité évoquée plus haut entre ces deux histoires, nous utiliserons les matériaux d'une étude de cas sur les expéditions académiques lancées à propos de la figure de la terre, pour suivre, en astronomie et géodésie, l'émergence d'un *autre* calcul des observations, à partir de la réduction et la mathématisation des erreurs. Il sera

possible alors de faire la synthèse des raisons qui ont fait que ce calcul a supplanté celui des témoignages dans le domaine des sciences d'observation.

Théorie des témoignages

La probabilité des témoignages est un courant de recherches qui visent à évaluer la fiabilité d'un témoignage au travers des différentes conceptions et mesures du probable. On peut distinguer trois âges dans ce calcul.

Parmi les philosophes et des théologiens de la fin du XVII^e siècle, plutôt rattaché au second courant de cette philosophie de la croyance ont tenté de systématiser le degré de certitude que l'on peut obtenir sur la base de vérités qui ne sont que probables, et qui ont traité plus spécialement des témoignages, il faut commencer par Craig et Hopper qui ont publié la même année 1699 chacun un opuscule mathématique sur la question. Le chanoine John Craig, par ailleurs mathématicien newtonien auteur de traités de calcul différentiel, publie des *Principes mathématiques de la théologie chrétienne* qui contiennent rien de moins qu'une estimation de la durée de la religion chrétienne (1454 ans !) sur la base d'un calcul des témoignages. "*Qu'est-ce en effet que la foi si ce n'est cette conviction de l'esprit qui nous fait croire sur les bases d'une probabilité moyenne, en la vérité de certaines propositions*" nous dit Craig. Le principe de son calcul est que "*tout ce qui est fondé sur le témoignage des hommes, soit inspiré soit non inspiré, n'est que probable, et que la probabilité diminue en proportion qu'on s'éloigne du tems où vivoient les témoins*". Avec quelques hypothèses supplémentaires (par exemple que *tous les hommes ont un droit égal à être crus, que l'historien transmet 10 fois plus de degré de probabilité quand son témoignage est rendu par écrit plutôt que de vive voix, et dans la même veine que la suspicion d'un copiste fidèle n'est que le dixième de la suspicion d'un témoin fidèle*) Craig établit une formule alambiquée :

$$P = x + s(n-1) + kT^2/t^2 + qD^2/d^2$$

qui donne la probabilité P que l'histoire du Christ, consignée par *c* historiens originaux ("*par historiens originaux j'entends ceux qui tirent la connaissance de l'histoire de leur propre observation ou expérience*") soit vraie, en fonction inverse des carrés du temps *t* et la distance spatiale *d* que l'histoire écrite a du parcourir, et des quantités :

x = la probabilité primitive de cette histoire à la parution du premier exemplaire

n le nombre d'exemplaires

s la suspicion (<0) née de la transcription d'un exemplaire

La formule établissait que la probabilité de l'histoire du Christ devait s'annuler totalement 3150 ans après sa naissance. Ni la formule totalement arbitraire, ni le résultat ne furent pris au sérieux.

A la même date (1699) l'évêque de Bath et Wells, George Hooper, publie un *Calcul de la crédibilité des témoignages humains* qui participe d'un argumentaire contre la tradition orale en vogue chez les papistes, et qui est l'une
 Journ@l électronique d'Histoire des Probabilités et de la Statistique/ Electronic Journal for History of Probability and Statistics . Vol.7, n°1. Juin/June 2011

des premières formalisations d'un calcul des témoignages. Partant de l'idée que *"La certitude morale incomplète a différents degrés qui peuvent être estimés en proportion de la certitude absolue"* Hooper établit quatre propositions, qui s'appuient en fait sur une analogie avec l'arithmétique financière explicitement formulée dans un écrit antérieur :

"Ceux qui sont versés dans le calcul savent qu'il est supposé ici que la continuité d'une tradition orale , ou le progrès d'un rapport, est comme la chaîne composée de plusieurs probabilités ou contingences particulières., dans le même genre de proportion où la présente valeur de l'argent, réduite de l'intérêt composé, diminue en fonction de la distance au futur paiement; et enfin la probabilité de préserver la continuité de la vérité s'affaiblit dans la mesure même où la probabilité de l'interruption et de l'erreur augmente."³

1°) la "crédibilité" ou "part de certitude" P d'un rapport fait par des rapporteurs successifs isolés également crédibles est le produit des parts de certitude p de chaque rapport. en langage moderne: $P = p^n$

2°) La même règle multiplicative régit "l'assurance" donnée par des "attestations parallèles" mais en s'appliquant cette fois ci au manque de certitude: $P = 1-(1-p)^n$

3°) Si le crédit d'un rapport de $n+m$ parties est p , alors le crédit de n parties doit être : $1-n(1-p)/(n+m)$.

4°) On peut évaluer la vérité partielle ou totale d'une tradition successivement transmise et co-attestée par plusieurs lignées de transmetteurs en combinant ces trois formules. La demi certitude d'une transmission orale est alors obtenue en 12 générations de 20 ans soit 240 ans (pour $1-p = 1/24$) tandis qu'elle est de 70 générations de 100 ou 200 ans soit 14000 ans pour une transmission écrite ($1-p = 1/100$). Pour une partie seulement du texte, la longueur de celui ci deviendra un facteur aggravant (Prop. 3)

A la différence de Todhunter qui trouvait ce texte incorrect du point de vue moderne, Karl Pearson (in E.S. Pearson 1978, p.465-469), qui ne savait pas à qui l'attribuer - peut être Halley disait-il - y vit avec raison l'origine d'une théorie probabiliste du témoignage que Nicolas et Jacques Bernoulli, puis Condorcet et Poisson devaient compléter, en faisant remonter le calcul du degré de certitude jusqu'à l'événement lui même.

La thèse de droit de Nicolas Bernoulli (1709), s'inspirant des travaux de son oncle sur l'art de conjecturer, montre par des études de cas (par ex. quand le juge a-t-il le droit de déclarer mort l'absent ? à partir de quel laps de temps ?) tout le parti que les juristes ont tiré, non pas du calcul des probabilités, mais de l'idée d'un calcul de probation dans lequel la fiabilité des témoignages est un cas

³ George Hooper, " A Fair and Methodical Discussion of the First and Great Controversy between the Church of England and the Church of Rome concerning the infallible Guide", *Collected Works*, 1735 p.39.

particulier de l'argumentation, dont l'algèbre combinatoire non additive combinerait le poids et la force de probation des arguments. Le théorème de Jacques Bernoulli n'est plus alors que l'un des arguments en faveur de l'arrivée future d'un événement, tiré de sa fréquence dans le passé.

Je me concentrerai ensuite sur les approches de Condorcet (article probabilité), que l'on trouve reprises dans le traité de Lacroix, et qui forment les bases caractéristiques de cette seconde période d'un calcul des témoignages⁴. Dans l'article « probabilité » de l'*Encyclopédie méthodique*, Condorcet ayant décrit les principes des probabilités puis leur deux sources d'estimation, à savoir celles « qui sont tirées de la nature même et du nombre des causes », et celles « qui sont fondées sur l'expérience du passé », consacre son article à trois cas particuliers, celui des témoignages étant le dernier. Comme toujours, il développe longuement les principes qui doivent précéder tout calcul. Il écrit par exemple qu'il faut prendre en compte 1°) la vraisemblance propre de la chose : « un fait moralement possible ordinaire, conforme au cours réglé de la nature, porte déjà en lui-même plusieurs degrés de probabilité » 2°) l'autorité des témoins, elle-même fondée sur leur capacité et leur intégrité, auxquelles on peut associer deux probabilités distinctes et les combiner par multiplication. 3°) leur nombre, qui joue en faveur de la confiance finale. La règle de calcul pour une conjonction de témoignages est encore celle d'une probabilité composée : « quand deux témoins me disent une chose, il faut pour que je me trompe en ajoutant foi à leur témoignage que l'un et l'autre m'induisent en erreur ». Ma confiance en leur témoignage conjoint (supposé non contradictoire) est donc $p = 1 - \prod(1-p_i)$, si p_i est le degré de confiance que j'accorde à chacun des témoins, et si l'on s'accorde sur l'indépendance de ces témoignages. Il faudrait pouvoir estimer statistiquement les p_i , mais ce n'est guère possible.

Condorcet évoque ensuite le cas des témoignages en chaîne ou par oui dire (l'homme qui a vu l'homme qui a vu l'homme ... qui a vu l'ours) pour lesquels il est vite évident qu'ils ne peuvent qu'affaiblir la confiance dans le fait rapporté. Condorcet, supposant toujours l'indépendance des témoignages, se contente de montrer que la probabilité du fait rapporté s'obtient par le produit des probabilités (ou fiabilités) de chaque témoin : $p = \prod p_i$: pour donner un ordre de grandeur une confiance de 0,95 sera réduite à la demi certitude au 13^e témoin et une confiance de 0,99 sera de même réduit quand le témoignage « aura passé par 70 bouches »⁵. La seule façon dit-il de limiter ce pyrrhonisme historique est de construire des chaînes collatérales ou ...de recourir au livre imprimé.

Laplace concis comme d'habitude écrit dans son *Essai philosophique*: « La plupart de nos jugements étant fondés sur la probabilité des jugements il est bien important de la soumettre au calcul ». D'autant plus que si l'appréciation

⁴ Pour ce qui concerne l'*Essai ...sur la probabilité des Décisions* (1885), qui regarde davantage la théorie des élections et des jugements que celle des témoignages, voir le texte de Brian dans cette même publication.

⁵ Pearson (1978) fait remarquer que cette évaluation est déjà dans le texte de Hooper (1699)

numérique de la véracité des témoins est difficile, « une approximation, lorsqu'elle est bien conduite, est toujours préférable aux raisonnements les plus spécieux ». Et il se jette aussitôt dans l'application de son 6^e Principe sur la probabilité des causes au cas simple où il faut témoigner de la sortie d'un numéro dans une urne qui en contient mille. Dans le cas usuel, sous l'hypothèse d'une équiprobabilité *a priori* sur les valeurs possibles, cette méthode redonne une probabilité *a posteriori* de l'événement qui n'est rien d'autre que « la véracité même du témoin ». Mais cette probabilité est affaiblie dès lors que l'on suppose quelque préférence *a priori* pour une des valeurs, ou dès lors que la véracité du témoin est faible. Il introduit, ce que ne faisait pas Condorcet, la vraisemblance de l'événement lui-même et obtient un second résultat : « la probabilité du mensonge croît à mesure que le fait devient plus extraordinaire ». Enfin, elle est extrêmement affaiblie voir annulée si on a deux témoignages contradictoires. Laplace le montre à partir de l'exemple suivant : supposons deux urnes A et B remplies respectivement de 1000 boules blanches et mille boules noires. On tire une boule au hasard d'une urne et on la replace dans la seconde urne d'où l'on extrait une seconde boule. Deux témoins l'un du premier tirage et l'autre du second attestent dans les deux cas que la boule tirée est blanche. Laplace calcule la probabilité des 4 cas où les deux témoins disent chacun vrai ou faux et il en déduit une probabilité de la double annonce très petite ($81/18\ 000\ 082$) parce qu'un des 4 cas est très peu probable et que les deux tirages ne sont pas indépendants. S'ils l'étaient, par exemple avec deux couples d'urnes distinctes, cette probabilité serait bien supérieure ($81/100$). Laplace en tire une appréciation des témoignages de faits extraordinaires ou merveilleux : le témoignage d'un tel fait extraordinaire, fut-il répété ne saurait affaiblir la confiance dans la constance des lois de la nature, mais nous amener plutôt à diminuer le crédit de ces témoins, qui ainsi « affaiblissent plutôt qu'ils n'augmentent la croyance qu'ils cherchent à inspirer ». Laplace fustige à ce titre les diverses croyances aux miracles, comme la guérison de la nièce de Pascal, ainsi que l'argument du même Pascal en faveur de témoins qui attestent, de la Divinité même, que les croyants jouiront d'une infinité de vies heureuses, un propos dont l'exagération même et l'intérêt affaiblissent la véracité des témoignages en question. L'infiniment grand des vies promises est compensé par l'infiniment petit de cette probabilité du témoignage. Il pense également avoir réfuté par le calcul le raisonnement de Locke selon lequel ces miracles « peuvent être d'autant plus propres à trouver créance dans nos esprits, qu'ils sont plus au dessus des observations ordinaires ».

Le traité de Lacroix offre pour finir une certaine synthèse des travaux de Condorcet avec une petite dose de calculs laplaciens. Il introduit les témoignages contradictoires et il distingue clairement :

a) le cas des témoignages simultanés et indépendants

Dans l'approche la plus simple l'hypothèse est que, sur un nombre donné de dépositions un témoin témoigne dans un rapport constant $v/(v+m)$ de la

vérité, pris pour sa probabilité de témoigner correctement. Un second le fait avec une probabilité $v'/(v'+m')$. Il en résulte 4 cas dont deux où ils s'accordent et deux où ils se contredisent. Si on sait que leurs dépositions s'accordent, la probabilité que cela soit sur la vérité est $vv'/(vv'+mm')$ et cela peut se généraliser à p témoins dans le cas où ils auraient tous la même valeur de v et m par la formule $1/(1+(m^p/v^p))$ où l'on voit que la probabilité de la vérité du rapport des témoins augmente avec leur nombre si $v > m$ (ils ont chacun un taux de vérité $> 1/2$) et décroît si c'est l'inverse. S'ils se contredisent (p affirment et q nient le même fait) alors la probabilité de ce fait se réduit à celle d'une déposition unanime de $p-q$ témoins. Lacroix relate ensuite des travaux de Condorcet visant à introduire la vraisemblance propre du fait attesté et son effet sur les témoins. Il fait aussi remarquer que l'on peut lever l'hypothèse d'indépendance des témoignages mais ne va pas si loin que Laplace sur ce point.

b) Le cas des témoignages en chaîne que Condorcet nomme « par oui-dire » et Lacroix « par tradition » a été validé aussi par Laplace, et pose moins de difficultés : « L'action du temps affaiblit donc sans cesse la probabilité des faits historiques comme elle altère les monuments les plus durables », voilà ce qu'il faut en retenir. Pour ce cas, Lacroix suppose que v et v' désignent cette fois-ci le fait de reprendre le témoignage du précédent témoin tandis que m et m' consistent à en prendre le contre-pied, alors les formules précédentes demeurent, et la généralisation à p témoins en chaîne de même confiance conduisent à une sorte de marche aléatoire entre validation et invalidation du fait. La probabilité qu'en bout de chaîne la vérité apparaisse est donnée par un des termes pairs du développement du binôme $(v+m)^p$.

Les approches probabilistes de Poisson, Quetelet et Cournot sont d'un 3^{ème} genre et se distinguent des précédentes par le fait qu'elles disposent, en France comme en Belgique, de statistiques judiciaires récentes (depuis 1827 en France), s'appuyant ainsi sur une « avalanche de chiffres » selon l'expression de Hacking (1975). De plus ces approches se concentrent sur la question des jugements plutôt que celle des témoignages. Cournot (1843), consacre deux chapitres à la probabilité des jugements mais quatre pages seulement aux témoignages, selon le prétexte que si les témoins ne sont pas de mauvaise foi le problème est le même : « le témoignage de l'un est comme le vote de l'autre ne peuvent être viciés que par une erreur de jugement ». La seule formule qu'il donne est celle de Condorcet sur la probabilité de la vérité du témoignage quand deux témoins sont d'accord soit : $vv'/(vv'+mm')$. Il reconnaît la nécessité de prendre en compte aussi la vraisemblance du fait attesté, mais plus prudent que Laplace, il se garde de tout calcul par combinaison de probabilités impossibles à connaître, et se refuse également à traiter des chaînes de témoignage, pour les mêmes raisons et parce que l'hypothèse d'indépendance adoptée lui paraît gratuite et contraire à la solidarité des faits.

Voici résumés à grands traits les principes fort contestables parfois, et les résultats, bien minces pour finir, de ce que l'on a appelé la théorie des probabilités des témoignages.

Philosophie naturelle : Galilée et Hobbes

Voyons maintenant de quelle façon la philosophie naturelle a posé les conditions d'une science véritable née de l'observation en inscrivant la question des témoignages dans les canons de l'observation scientifique.

Galileo Galilei (1564-1642) fut, selon l'historiographie habituelle, un des premiers grands propagandistes du Livre de la Nature. Et son combat pour faire triompher une physique expérimentale (celle du plan incliné) ou une astronomie d'observation (celle des taches solaires et des corps célestes découverts grâce à la lunette astronomique) était simultanément un combat contre la méthode scolastique et son recours systématique à l'autorité des textes et des docteurs, et plus profondément contre la philosophie d'Aristote qui l'inspirait, contre ses présupposés animistes et téléologiques qui voyaient dans n'importe quel phénomène le résultat d'une propriété intrinsèque des corps (les formes substantielles) indépendantes de la matière, et d'une volonté tendue vers un objectif, contre son anthropomorphisme et contre son finalisme, contre sa distinction fondamentale entre physique terrestre et physique céleste, entre physique naturelle et physique artificielle. Avec lui, et plus tard avec Descartes (1596-1650), Kepler (1571-1630), et Boyle (1627-1691), la métaphore mécanique donne une première forme de légitimité à la preuve expérimentale.

Donc, pour simplifier, deux objets métaphoriques permettent un renversement de la philosophie d'Aristote : le *Livre de la Nature* et l'*Horloge*, l'un pour rendre compte de l'observation, l'autre de l'expérimentation. Mais qu'est-ce que ces deux métaphores pouvaient bien avoir en commun, qui serve une nouvelle forme de connaissance ? Certainement pas la nature de ces objets, mais bien sûr leur forme, leur essence, leur idée, ou plus précisément leur structure mathématique. Galilée l'avait perçu aussitôt :

"La philosophie est écrite dans ce vaste livre qui constamment se tient ouvert devant nos yeux (je veux dire l'Univers), et on ne peut le comprendre si d'abord on n'apprend pas à connaître la langue et les caractères dans lesquels il est écrit. Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont les triangles, les cercles, et autres figures géométriques sans lesquels il est humainement impossible d'en comprendre un mot, sans lesquels on erre vainement dans un labyrinthe obscur⁶"

⁶ Galileo Galilée, *Il Saggiatore*, 1623.

Mais comment faire coïncider vérité physique et vérité mathématique dans les sciences de la nature. N'y aurait-il pas un écart irréductible entre la chose et son modèle géométrique ? Oui sauf à "*défalquer les empêchements*" comme le suggère Galilée. Enlevez les imperfections d'une boule et il en résultera une sphère n'ayant plus qu'un point commun avec un plan tangent. Supprimez viscosité et frottements, et la chute des corps pourra se décrire par une équation mathématique simple $l = gt^2/2$. La mathématisation du réel passe par une idéalisation du réel.

Le *Léviathan* de Hobbes (1651) est connu comme un ouvrage de philosophie politique mais il peut se lire aussi comme un discours épistémologique. Dans cet ouvrage, Hobbes, reprend la distinction des grecs entre *doxa* (opinion ou croyance) et *epistémè* (connaissance démontrée) : "*Il y a deux espèces de connaissance, l'une porte sur le fait, c'est la connaissance propre aux témoins; elle est consignée dans les ouvrages d'histoire. Celle-ci se divise en histoire naturelle et histoire civile (...) L'autre espèce porte sur les consécutives; on l'appelle science, et elle est consignée dans ce qu'on nomme habituellement les ouvrages de philosophie*". La mathématique, et plus précisément la géométrie était le modèle même d'un savoir certain. En effet cette vérité s'établissait sur la base solide d'une *définition* et elle se poursuivait par un raisonnement, c'est à dire une activité logique tout à fait contrôlable par d'autres qui pouvaient vous en sortir si par malheur vous tombiez dans l'erreur. Ce raisonnement, acte de raison, s'apparentait au calcul, car "*Quand on raisonne, on ne fait rien d'autre que de concevoir une somme totale à partir de l'addition des parties; ou concevoir un reste, à partir de la soustraction par laquelle une somme est retranchée*⁷". "*Ainsi quand le discours est formulé verbalement, qu'il commence par les définitions de mots, et se poursuit par la mise en relation de ceux-ci au sein d'affirmations générales, et par la mise en relation de ces dernières au sein de syllogismes, alors l'aboutissement, la somme dernière, est appelée conclusion; et la pensée de l'esprit exprimée par cette conclusion est cette connaissance conditionnelle, ou connaissance des consécutives de mots, qu'on appelle communément science*". La connaissance des faits était par contre, pour Hobbes, parce que fondée sur nos sensations et nos émotions, incapable de conduire à des certitudes, et relevait donc d'un savoir approximatif, probable, qu'il nommait "histoire naturelle" pour le distinguer de la "philosophie naturelle". "*Quand le discours ne commence pas par les définitions, les gens le font commencer soit par quelque considération de leur cru, et alors on le nomme encore opinion, soit par quelque propos d'un autre homme, dont ils ne mettent en doute ni l'aptitude à connaître la vérité ni l'honnêteté pour ce qui est de ne pas se tromper. Le discours ne concerne alors pas tant la chose que la personne, et ce en quoi il se résout s'appelle croyance et foi*"⁸. En somme, Hobbes faisait davantage confiance à des vérités conditionnelles dont le point de départ et le

⁷ Hobbes, op. cit., p. 37.

⁸ Hobbes, op. cit., p. 60-61.

chaînage relevaient de la raison humaine et de la production des hommes, et dont les causes, fussent elles conventionnelles, étaient donc accessibles, qu'à des vérités sensorielles transmises par des témoignages ou des effets de causes d'origine divine à jamais inconnues. Les connaissances sensorielles ne pouvaient fonder la philosophie naturelle "*Vous ne pouvez attendre des causes naturelles autre chose qu'une probabilité*⁹".

Le mot est lâché. Il nous indique l'origine d'un nouveau calcul - une *géométrie du hasard* dira Pascal – qui s'inscrit dans cette dualité de la connaissance, dont on trouve encore une trace manifeste dans la *Logique de Port-Royal*¹⁰: "*Nous sommes plus assurés de nos perceptions & de nos idées, que nous ne voyons que par une réflexion d'esprit, que nous ne le sommes de tous les objets de nos sens*" peut-on lire dans. Dans la dernière partie de la *Logique*, à côté des certitudes indémontrables liées à l'évidence ou à la foi divine, à côté de la certitude géométrique de propositions déduites d'axiomes ou de définitions, qui se démontrent par la règle du syllogisme transportant la vérité du général au particulier, il est fait mention des *certitudes morales*, qui concernent les *faits contingents*, auxquelles il serait ridicule d'appliquer des canons de vérités aussi exigeants, et qui peuvent suffire à guider nos décisions. La même idée se répand dans les écrits des Pascalins¹¹: « *Les voies par où nous acquérons ces sortes de certitudes, pour n'être pas géométriques, n'en sont pas moins infaillibles, et ne nous doivent pas moins porter à agir, et ce n'est même que là-dessus que nous agissons presque en toutes choses* » écrit Nicolas Filleau de la Chaise¹². Mais d'autres restent bien plus prudents: « *Et quand même il se trouverait deux témoins contre qui il ne paraîtrait point de juste reproche, qui diraient qu'ils ont vu le meurtrier qu'ils connaissent, poignardant cet homme, la certitude d'une telle preuve est d'un autre genre que celle de la vérité d'une proposition évidemment prouvée dans une science, et n'a pas le caractère de démonstration, parce qu'il n'est pas impossible que deux témoins se trompent, ou que même ils veuillent tromper. Mais cette preuve n'a sa force que sur ce qu'on présume de leur bon sens qu'ils ne se sont pas trompés, et de leur probité qu'ils ne se trompent point* »¹³.

Ainsi avons-nous appris de Hobbes et des Pascalins que les sciences d'observations, fondées sur le témoignage, ne sont pas des sciences, et ne relèvent que d'une croyance probable, ou au mieux de la certitude morale, ce qui peut suffire à la décision. Mais cela suffit-il pour fonder une science expérimentale ?

⁹ Hobbes, "Seven Philosophical Problems", cité par Shapin et Schafer (1993).

¹⁰ Arnauld A. et Nicolle P., 1662 et 1970.

¹¹ On a donné ce nom au petit groupe de philosophes et théologiens plus ou moins proches de Pascal et qui ont contribué à faire éditer et connaître son œuvre. En font partie les jansénistes de Port Royal comme Arnauld, Nicole, et Domat, le duc de Rouannez, la sœur de Pascal et la famille Périer, et les mathématiciens Filleau des Billettes et Filleau de la Chaise.

¹² Nicolas Filleau de la Chaise, 1672.

¹³ Jean Domat, 1829, p. 137-138.

Le discours de l'expérience : Boyle et Newton

C'est dans cette opposition entre vérités formelles ou discursive et pseudo-vérités factuelle que s'enracine la controverse avec Boyle et les expérimentalistes de la *Royal Society*¹⁴.

Au contraire des réserves faites par Hobbes, soutenant qu'aucune expérience ne saurait jamais donner une certitude aussi forte que le raisonnement contrôlé par ses pairs, la conception de Robert Boyle (1627-1691) et de Robert Hooke (1635-1703) est « d'étendre l'empire des sens » et de fonder la nouvelle science sur le témoignage, un témoignage renforcé par plusieurs dispositifs, reposant selon Shapin et Schaffer (1993) sur trois technologies: technologie matérielle des dispositifs de l'expérience (appareil, pompe), technologie littéraire des rapports à rédiger, technologie sociale de règles et conventions à adopter. « Boyle déclarait que le témoignage était une entreprise collective. Dans la philosophie naturelle, comme dans le droit pénal, la fiabilité d'un témoignage dépendait avant tout de sa multiplicité » écrivent-ils et ils citent Boyle lui-même se référant clairement à une certaine théorie des témoignages : *Les déclarations de deux témoins, pourvu qu'ils aient le même crédit, doivent suffire ordinairement à prouver la culpabilité ; parce qu'on estime raisonnable de supposer que, si chaque témoignage unique est peu probable, le concours de ces probabilités peut équivaloir à une certitude morale, c'est-à-dire à une certitude qui permette au juge de prononcer une sentence de mort contre le coupable*¹⁵ ». Quid des conditions de cette assertion ?

Pour les expériences cruciales ou délicates, Boyle nommait des témoins et précisait leur qualité. Un autre moyen de multiplier les témoignages était de faciliter la reproduction des expériences par les lecteurs. Mais celle-ci ne réussissait pas souvent. Tandis que Hobbes veut éliminer la croyance, Boyle veut la contrôler. Tandis que Boyle rejette les systèmes et veut établir la science expérimentale sur la base de conviction individuelles, Hobbes cherche à dépasser les expériences pour atteindre les causes, donc un système explicatif. C'est moins la réalité que l'intelligibilité que cherche Hobbes.

En comparant les pratiques et discours de l'expérience en France et en Angleterre, la thèse de Christian Licoppe (1996) nous apporte de nombreux témoignages qui vont dans le même sens. Il étudie d'abord le statut de l'expérimentation dans la rhétorique de Pascal et Mersenne, ce dernier « jouant dès les années 1630 un rôle important dans la promotion de l'expérience chez les savants parisiens ». Mersenne par exemple se garde à la fois du probabilisme et du scepticisme pyrrhonien, et cherche à défendre des *experientiae* (naturelles et générales) (et non l'*experimentum* artificielle et singulière). Il accepte néanmoins cette dernière à la triple condition d'un engagement personnel de

¹⁴ Steven Shapin et Simon Schaffer, 1993.

¹⁵ Boyle, *Some consideration about Reason and Religion*, p.182, cité par Shapin et Schaffer, 1993.

l'expérimentateur, d'une validation par le témoignage, et de la répétition (3 critères repris par Boyle). Dans une controverse avec Rey, plus proche de la tradition alchimiste du secret, qui porte sur la chute à même vitesse d'une boule de fer et d'une boule de buis, Mersenne propose de faire signer solennellement plusieurs personnes de qualité qui ont vu et fait l'expérience avec lui. Pascal va plus loin en souhaitant des expériences qui, plutôt que de vérifier une hypothèse et d'en augmenter ainsi la vraisemblance, réfutent avec certitude une hypothèse (comme une vraie démonstration). Pour son expérience du Puy de Dôme, il mobilise des témoins ayant compétence morale (ecclésiastiques par exemple) et philosophiques (c'est-à-dire parfois, mathématiques), voire faisant autorité du fait de leur statut de gentilshommes présentant un bel ethos aristocratique. Ces règles de l'expérience publique devant un public qualifié, complétées par des formes particulières de rhétorique lors du compte-rendu, rédigé sur le mode « je fis et je vis », se généralisent à toute une communauté d'expérimentateurs. Il faut bien voir que ces règles sont à l'opposé de celles de la démonstration de magie ou du phénomène amusant montré dans les cabinets de curiosité, telle qu'ils furent pratiqués encore tardivement.

Dans la seconde partie du XVII^e siècle, Licoppe note quelques glissements importants : la rhétorique de l'épreuve et le ton du témoignage à la première personne, après avoir envahi les correspondances et rapports s'insinuent petit à petit dans certains traités expérimentaux, bien que le plus souvent, les traités gardent la forme de la démonstration syllogistique. Il constate aussi une certaine éviction du sujet au profit du collectif ou du Prince qui garantit par son autorité une opération scientifique. Les institutions de l'Académie royale en France et de la Royal Society en Angleterre, en ne publiant pas les récits d'expérience, en réclamant l'anonymat des mémoires (jusqu'à la fin du siècle) semblent renforcer cette centralisation au dépens de son idéal de diffusion publique.

Si on en reste au milieu des physiciens expérimentalistes, le début du XVIII^e siècle, marqué en France par le nouveau règlement de l'Académie (1699), valide jusqu'à la Révolution, voit la preuve expérimentale changer encore de statut. La notion de témoignage change de contenu et de signification. Le récit lui-même change de style, passant du « je fis je vis » à « je fis et tel phénomène se produisit ». La première expression disparaît, et le rôle du témoignage des sens de l'expérimentateur est amoindri. Le fait s'objective en phénomène échappant à la subjectivité de l'expérimentateur. Les autres témoignages nombreux et de qualité en deviennent secondaires. L'exemple du thermomètre de Réaumur met en évidence l'absolue nécessité de créer des traces répétables et indéformables qui peuvent voyager et permettre des comparaisons. La singularité de l'expérience fait place à sa nécessaire décontextualisation, reproduction et généralisation, rendues possibles par une suite de conventions sur l'appareil et le protocole de sa mise en oeuvre.

Du côté anglais, outre les effets de la codification par Boyle de l'expérimentation dans la construction des faits, il faut considérer le rôle de la

physique théorique Newtonienne sur la première moitié du XVIII^e siècle : le refus des hypothèses ontologiques et du design divin, une hypothèse inutile dira-t-il, le conduit lui aussi comme Descartes, à mettre l'accent sur la mathématisation du réel. Mais en rattachant la physique newtonienne au domaine de la connaissance probable parce que fondée sur l'observation (bien que mathématisée), un philosophe newtonien comme Locke défaisait l'alliance qu'avait construite Descartes et "*réinterprétait la connaissance scientifique elle même en termes de croyance raisonnable*". Le rôle des mathématiques dans la connaissance de l'univers n'était plus le même que chez Descartes. On n'était passé d'une mathématisation métaphysique à une mathématisation empirique, et cela correspondait à une autre vision de l'ordre divin tout autant que de la manière de le découvrir. Le passage suivant du livre de Baker (1988) sur Condorcet est ici très éclairant:

"Les philosophes newtoniens en étaient venus à déclarer que les lois que l'on observe dans l'univers étaient contingentes, eu égard à la volonté directe de Dieu, plutôt que contenues nécessairement dans la nature de la matière et du mouvement. Aussi soutenaient-ils que le système de l'univers révélait un ordre *bien défini*, en ce sens qu'il suivait la volonté même du Créateur plutôt qu'un ordre *déterminé*, en ce sens qu'il était soumis à des lois nécessairement (ou hypothétiquement) contenues dans l'existence de la matière. C'est pourquoi le *dessein* - l'ordre communiqué par une intelligence créatrice - prit tant d'importance dans la philosophie anglaise de la nature. Par définition on ne pouvait pas *démontrer* le dessein en raisonnant sur des principes premiers que sont la matière et le mouvement, car, comme l'avait dit Clarke, cela impliquerait l'idée de déterminisme ou de fatalité. On ne pouvait pas non plus le démontrer en raisonnant à partir de principes qui guident le projet intelligent de Dieu, car ceux-ci par définition ne peuvent être connus que de Dieu seul. Il s'en suivait donc que l'on ne pouvait mettre en évidence le doigt du Créateur dans son ouvrage que par un raisonnement probable, fondé sur les événements observés, qui révélerait des constantes dans les phénomènes qu'on ne pouvait attribuer au hasard.¹⁶"

Newton renouvelle grandement le procédé expérimental, tel qu'il le met en scène pour son *Optiks*. Il ne fait nul appel aux témoins. C'est l'instrument (ici le prisme) qui est au cœur de son dispositif, et les mesures précises qu'il fournit, dans des conditions bien précises et répétées, produiront des tables qui montreront directement la loi. On s'écarte beaucoup des procédés de Boyle pour lesquels la localisation et l'idée de témoignage sont essentielles. Mais les deux

¹⁶ K.M. Baker, op. cit., p.213-214.

conventions portées par Boyle et Newton vont cohabiter et s'hybrider dans les cadrages fournis par la Royal Society. « En Angleterre l'instrument fait le philosophe naturel et vice versa » écrit Licoppe.

A la fin du XVIII^e siècle, l'observation expérimentale de physique n'est plus directe et qualitative. Elle passe par des appareillages de mesure dont les qualités deviennent essentielles. Prenant le cas de l'étude par Coullomb des propriétés de torsion de fils métalliques très fins, Licoppe montre que le récit d'expérience est totalement centré sur les conditions qui permettent une mesure précise de la période d'oscillation du dispositif en fonctions des poids que l'on y suspend et des diamètres et matériaux des fils, et que ce récit de l'expérience conduit à la constitution d'une table, qui sera la véritable trace circulant dans la communauté des physiciens expérimentalistes. Ils pourront ainsi directement se convaincre de la loi mathématique qui relie les variables de la table. La preuve expérimentale est tout entière dans cette table. Elle ne repose plus principalement sur la description fine des perceptions sensibles, ni sur leur confirmation par des témoignages dignes de foi, mais sur l'authenticité des valeurs reportées dans les cahiers de laboratoire. Cette instrumentalisation de l'expérience par les appareillages de mesure est visible dans le vocabulaire utilisé pour désigner ces instruments : le suffixe passe de scope à mètre. Le prix à payer est important. D'une part il convient d'isoler encore mieux les phénomènes mesurés de toute influence d'effets parasites : pour mesurer les variations de température des caves de l'Observatoire, J.D. Cassini doit le fermer au public et faire murer les avenues qui y arrivent. D'autre part il convient de se doter d'appareils très sensibles. Mais cette sensibilité elle-même est de deux sortes : la précision et l'exactitude. Dans le premier cas il s'agit d'être capable de discriminer des différences le plus petites grâce à une dispersion faibles des mesures répétées d'un même phénomène. Dans le second cas, il s'agit bien d'éviter tout biais systématique, c'est-à-dire tout écart entre le milieu des mesures et la vraie valeur.

Cette substitution de l'instrument au témoignage que Licoppe repère dans les canons de la méthode expérimentale, on va la retrouver au niveau des observations in situ dans la nature, qui depuis l'adaptation par Galilée de la lunette à l'observation astronomique, sont médiatisée par des dispositifs et des instruments.

La mesure du monde : Une étude de cas sur l'erreur d'observation

L'observation du monde, et même de l'univers, a précédé sa mesure. Elle n'est qu'une longue histoire de récits et témoignages. Dans le domaine scientifique, un très bel exemple est celui de Biot faisant rapport à la classe des sciences mathématiques de l'Institut de la chute de la météorite de l'Aigle en

avril 1803¹⁷. Son enrôlement des témoins est remarquablement développé et transformé en argument de vraisemblance des faits rapportés :

« De toutes les probabilités recueillie jusqu'à présent sur la chute des masses météoriques, la plus forte résulte de l'accord qui existe entre l'identité de leur composition et l'identité d'origine que les témoignages leur attribuent exclusivement. Cet accord, déjà vérifié par un grand nombre d'observations, donne à la probabilité dont il s'agit une valeur très approchante de la certitude, et qui n'est nullement infirmée par les objections que l'on a tirées du peu de lumières des témoins; car, en raison même de ce peu de lumières, les témoignages devraient, si le fait était faux, s'appliquer à des substances diverses, à des circonstances dissemblables; et dans un sujet de cette nature, où l'intérêt particulier n'entre pour rien, la chance du concours des témoins est unique, tandis que celle de leur divergence est infiniment multipliée. »

« Remarquons que les témoignages acquièrent ici une grande force par l'état et les qualités morales des témoins. C'est d'abord une dame très-respectable, qui ne peut avoir aucun intérêt d'en imposer; ce sont deux ecclésiastiques, qui ne peuvent, sans aucun motif, avoir l'intention d'altérer la vérité, surtout devant des personnes dont l'estime et la confiance leur sont nécessaires; enfin c'est une femme âgée, qui paraît depuis longtemps attachée à cette maison, et qui, persuadée que ce phénomène est un avertissement du ciel, n'aurait pas osé en dénaturer les circonstances, surtout en parlant devant des personnes qu'elle est habituée à respecter. Enfin le témoignage du garde forestier est lui-même un garant de la vérité des autres. »

Le soin mis à situer et multiplier les témoins est-il le même quand il est question plus seulement d'observer mais aussi de mesurer ? Le livre de Philippe Despoix, *Le monde mesuré*, se présente comme une réflexion sur les dispositifs de l'exploration des mondes inconnus à l'âge des Lumières. C'est en quelque sorte le prolongement des précédents si l'on quitte les sciences expérimentales pour les sciences d'observation in vivo. Son premier chapitre est un récit détaillé de la controverse bien connue¹⁸ qui a opposé astronomes et artisans horlogers – auteurs de deux principes de témoignage – pour la détermination de la longitude en mer. Il évoque beaucoup la mesure comme témoignage, sans jamais cependant de référer à sa probabilité, sa force de probation. Il est particulièrement utile pour comprendre comment l'expédition, en organisant le couplage de l'enquête et du livre imprimé permet de relayer la connaissance scolastique par une connaissance par « l'inscription des témoignages visibles de la nature », ceux que produit l'expédition scientifique. Pour attester de la découverte et de l'appropriation de l'île de Tahiti, Bougainvillers doit par exemple dresser un procès verbal qui associe « *le témoignage des officiers français concernant la prise de possession au nom du roi, et le témoignage de la*

¹⁷ Je dois à Patrick Parmentier de m'avoir signalé ce document, disponible sur <http://www.bibnum.education.fr>.

¹⁸ Voir le récit romancé de Dava Sobel, 1995.

position de la lune qui donne celle de l'île telle qu'elle a été calculée par l'astronome de l'expédition Verron ». Le journal de voyage avec récit, dessins, calculs, résultats est le témoin et le signe de la conquête; il est transmis à l'Amirauté et à la Royal Society. Il en sera de même en France à l'Académie des Sciences après 1680. Traces et témoignages stables, décontextualisés et répliquables sont les ingrédients de l'accumulation scientifique et de la mathématisation du monde. Dans le cas des entreprises de la science astronomique, nous ne verrons ni mise en scène particulière, ni témoins de circonstance, mais un rapport totalement inédit à la puissance du Roi(-Soleil), relayé par l'Académie qui assure la promotion, le suivi scientifique et diplomatique, et la centralisation des résultats tangibles en forme de publications, de tables et d'étalons, et une série de dispositifs pour assembler des témoignages distincts et discordants et construire ainsi une vision intersubjective du monde.

Nous allons pour notre part détailler les expéditions astronomiques et géodésiques au pôle et à l'équateur liées à la question de la figure de la terre : est-elle ronde comme une orange, aplatie comme un melon de Cavaillon ou allongée comme un melon d'Espagne ? Rappelons les enjeux des expéditions académiques françaises de 1735 : il s'agit de mesurer, par triangulation, la longueur d'un degré de méridien à l'équateur d'une part, au pôle d'autre part et d'en déduire une figure à la terre, soit aplatie aux pôles soit allongée aux pôles, qui départagerait les hypothèses physiques et les calculs théoriques de Newton, Huygens et Descartes, et qui permettrait aussi d'établir sur une base plus solide, les cartographies marine et terrestre, et les bases d'une mondialisation de la science par un système d'unités universelles, le système métrique (Ken Adler, 2005).

La figure de la terre : une expédition épique en Équateur

L'expédition du Pérou est dirigée par l'astronome Godin (1704-1760), qui s'est adjoint le mathématicien P. Bouguer (1698-1758), le chimiste et géographe La Condamine (1701-1774) et le naturaliste Jussieu (1704-1779). Couplet, géographe, Hugot, horloger, Verguin, ingénieur, Morainville et Godin des Ordonnais, techniciens, et Seniergues, chirurgien, font partie de la mission, ainsi que les officiers espagnols G. Juan et A. de Ulloa désignés par Madrid. L'expédition partie de la Rochelle le 16 mai 1735, ne se regroupe à Quito qu'en juin 1736, et c'est en ordre dispersé, que se feront les retours, 8 et 9 ans plus tard pour Bouguer et La Condamine, 34 ans plus tard pour Jussieu! Les difficultés ont été considérables, et il convient d'en donner une rapide description, pour mieux connaître la chaîne des circonstances que recouvre le terme d'erreurs de mesure. Cette narration s'appuie sur les premières publications de Bouguer et La Condamine, respectivement *La Figure de la terre* (1749) et *La Mesure des trois*

premiers degrés (1752) complété par le *Journal du voyage...*(1751)¹⁹. Elle nous fournira les matériaux d'une première approche théorique de l'erreur de mesure.

Le lieu des opérations est un sillon de 2000 mètres d'altitude en moyenne entre deux chaînes de la cordillère qui dépassent le plus souvent les 5000 mètres. Le relief volcanique, le climat et les intempéries gênent considérablement le travail. L'isolement par rapport à l'Europe est très grand: le courrier met six à sept mois dans chaque sens. C'est ainsi que les résultats de l'expédition de Maupertuis en Laponie ne seront connus qu'en 1739 à l'arrivée à Cuenca. Les académiciens sont livrés à eux mêmes, avec des problèmes de santé, des ressources financières insuffisantes, et des difficultés diplomatiques que ne résolvent pas leurs laissez-passer. Les savants débarquent dans un royaume de Quito mal contrôlé par la couronne espagnole, et soumis à des luttes ethniques entre Créoles et Indiens. Couplet meurt de fièvre maligne le 19 septembre 1736 et la mesure de la base de Yarouqui commence huit jours plus tard. Dès 1737, La Condamine doit partir 3 mois à Lima pour se procurer des fonds - "*Les fonds que nous avons tirés de nos lettres de change étaient consommés*" -, mais à son retour, un conflit a déjà commencé entre l'administration locale et "la Compagnie" qui se solde par un premier procès où il est accusé de contrebande pour la vente de ses biens personnels aux créoles de la ville, avec complicité des jésuites qui les protègent. La triangulation commencée en 1738 se fait dans des conditions climatiques épouvantables. De plus, les académiciens n'ont aucune autorité sur les indiens embauchés sur place qui s'évanouissent dans la montagne au moindre danger ou qui participent à une hostilité déclarée de la population: les signaux qui marquent les sommets de la triangulation sont fréquemment détruits ou déplacés²⁰. L'esclave nègre de Bouguer, qui est lui de parfaite confiance, est assassiné mystérieusement. Le 29 août 1739, Le docteur Seniergues qui a malencontreusement noué une intrigue amoureuse et financière avec la fille d'une famille bourgeoise de Cuenca, se fait assassiner en pleine corrida selon un scénario rocambolesque²¹. Peu de temps après, la guerre qui éclate entre l'Angleterre et l'Espagne, ravive la méfiance des colons espagnols vis à vis des membres de l'expédition qui sont l'objet de nombreux actes d'hostilité. Ils sont accusés de piller le pays, d'y chercher des trésors.

"Qu'est-ce qui pourrait inciter des gens de qualité à mener une vie aussi misérable, aussi extraordinaire et aussi fatigante, à franchir des montagnes et des déserts, à observer les étoiles, sinon un gain considérable ?" dit un gentilhomme de Quito cité par Hélène Minguet. Ce gentilhomme, ni plus ni moins étonné que

¹⁹ Charles-Marie de La Condamine, 1981 (1745), *Relation abrégée ...*

Pierre Bouguer, 1749, *La Figure de la terre...*

Ch.-M. La Condamine, 1751, *Mesure des trois premiers degrés du méridien.*

Ch.-M. La Condamine, 1751, *Journal du voyage fait par ordre du roi à l'Équateur..*

²⁰ "*par des pâtres indiens que la figure humaine distingue à peine de la brute ...ou des métis, espèces d'hommes qui n'a que les vices des nations dont elle est le mélange*" dit La Condamine dans son Journal.

²¹ Cette "chronique d'une mort annoncée" est l'objet d'une *Lettre à Madame ...*[Godin] de La Condamine, Paris 1745 [BN 8°Ln 93]

les milliers d'autochtones par le spectacle de ces hommes de cour transformés en aventuriers, nous rappelle simplement ce qu'est à ses débuts la science occidentale, et que l'on un peu oublié: une opération de tous les dangers, dont le très haut risque est la mesure même des enjeux, des trésors qu'elle vient chercher dans les contrées les plus hostiles. La mesure du monde s'inscrit dans la découverte de nouveaux mondes, commencée deux siècles plus tôt par les conquistadores. La conquête des richesses, la conquête des territoires, la conquête des âmes et la conquête d'une représentation du monde vont de pair, et de fait les académiciens frayent sur le terrain avec les colons espagnols, avec le sabre et le goupillon. Les frictions sont inévitables avec les autres chercheurs d'Eldorado.

Trois séries de procès vont occuper une grande part de l'énergie des savants missionnaires: la première se rapportait aux prétendues activités commerciales de La Condamine, la seconde a trait à l'affaire Seniergues dont La Condamine cherche en vain à faire juger les meurtriers, et la dernière au sabotage des petites pyramides que Bouguer et La Condamine avaient fait ériger aux points remarquables de la base de Yarouqui. Pour la seule première affaire, La Condamine parle de *"trois ans de procédures suivies de ma part sans relâche, et qui remplissent un volume in-folio de près de mille pages"*. L'étirement de la mission sur tant d'années ne s'explique pas par la seule hostilité des autochtones et les résistances naturelles. D'eux-mêmes, les académiciens s'investissent dans un très grand nombre de projets scientifiques, ou pseudo-scientifiques. Bien sûr, l'observation d'une éclipse de lune, les études sur la réfraction atmosphériques, les variations de la pesanteur dues aux masses montagneuses, la détermination barométrique des altitudes, la longueur du pendule, la dilatation des règles métalliques, la vérification des instruments étaient des tâches annexes du programme de mesure du méridien. Mais l'exploration des fleuves, l'observation ethnographique des peuplades indiennes, les études sur la flore et la faune par Jussieu, les mesures de la vitesse du son, la découverte et l'étude du *cahutchuc*, du curare, du platine et du quinquina, la poursuite des mythiques femmes amazones ne faisaient pas toujours partie du programme scientifique, même si la richesse de ces découvertes est incontestable. Il serait en tout cas très arbitraire et téléologique de séparer les activités proprement géodésiques des savants de cet ensemble d'observations et de mises à l'épreuve à travers lesquelles ils construisent de nouvelles alliances: le réseau de triangles pour l'établissement duquel ils sont censés dépenser toute leur énergie n'est rien sans le réseau de savoirs sur les peuples du monde et leurs environnements qui se construit à la même date. Il n'en est que la métaphore, base d'une conquête scientifique qui ira de pair avec la conquête coloniale.

Le plus grand des dangers n'est pas d'ailleurs dans l'hostilité des hommes et de la nature que rencontre l'expédition mais dans ses dissensions internes. Deux équipes se sont constituées dès le début avec d'un côté Godin et les officiers espagnols, de l'autre Bouguer et La Condamine, et la mésentente règne

très vite entre ces deux équipes, au point qu'elles refusent de se communiquer leurs résultats. "A l'égard de la communication réciproque de nos observations, je pense avoir déjà eu l'honneur de vous dire que je ne desirois nullement, ni n'avait aucun besoin des vôtres. Les miennes, (...) je vous les communiquerai, comme j'ai toujours eu dessein de le faire, mais de telle manière que vous ne les pourrez pas comparer aux vôtres" écrit Godin le 13 octobre 1740 à son collègue Bouguer. Le 28 mars 1742, il commence à coder ses résultats : "Gardons chacun nos nombres acquis et à acquérir. Que si vous pouvez déchiffrer ce qui suit, vous saurez la valeur que je trouve jusqu'à présent au degré en ajoutant dix toises. aabcccdeeffffüüüüüllmmnooooossssttttyzuxxx"

Les opérations géodésiques terminées au bout de trois ans, il faudra encore quatre ans pour les mesures astronomiques qui doivent établir l'écart de latitude entre les points extrêmes du réseau de triangulation, et dont les deux premières années se soldent par un échec. Les instruments se dérèglent et se déforment dans le trajet entre les deux bases astronomiques. C'est finalement par une observation simultanée que Bouguer et La Condamine réussissent à évaluer l'amplitude de l'arc de méridien avec une précision qui les satisfait. En mars 1743, Bouguer abandonne brutalement les mesures qu'il faisait de concert avec La Condamine et décide de rentrer en France. Son compte-rendu à l'Académie des Sciences le 14 novembre 1744 n'est pas une révélation car il y a déjà sept ans que la relation de Maupertuis a (définitivement pour Voltaire) démontré l'aplatissement de la figure de la terre, et plusieurs journaux ont rendu compte des découvertes les plus remarquables faites au Pérou, relatées dans les courriers des académiciens. La Condamine pendant ce temps là entreprend la descente de l'Amazone avec l'explorateur Maldonado, puis attend un bateau à Cayenne de février à août 1744 et n'arrive à la Haye qu'en novembre, où il reste de longs mois à attendre un passeport, et apprendre que Bouguer a déjà livré au public et à l'Académie les principaux résultats de l'expédition, et qu'il a unilatéralement donné pour vrais ses seuls résultats. Commence alors une polémique entre les deux savants qui ne se terminera qu'à la mort de Bouguer en 1758²². La relation de son voyage en Amazonie à la séance publique de l'Académie du 28 avril 1745 donne pourtant à La Condamine l'avantage médiatique sur son concurrent: Newton ayant gagné sur Descartes, les secondes d'arc de méridien deviennent beaucoup moins intéressantes que les histoires d'indiens, d'amazone, de caoutchouc et de quinquina.

Il en est de même d'ailleurs pour certains des membres de l'expédition pour lesquels le détour par le Pérou que nécessitait la question de la figure de la terre

²² Bouguer répond à la publication de La Condamine par une "Justification des Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de 1744 et du Livre de la Figure de la terre déterminée par les observations faites au Pérou sur plusieurs faits qui concernent les opérations des Académiciens" en 1752. La Condamine lui répond à la même date par un *Supplément au Journal historique du Voyage à l'Equateur et au livre sur la mesure des trois premiers degrés de Méridien*, suivi d'une *Histoire abrégé de la dispute présente, d'un Résumé des principales objections de M. Bouguer et de mes réponses*, et de diverses *Pièces justificatives*. La controverse se poursuit en 1954 par un *Deuxième Supplément...* de La Condamine et un échange de *Lettre à M****.

est une boucle qui ne se referme pas sur le projet originel mais se perd dans les mirages de la forêt amazonienne, quand il ne se termine pas plus tragiquement: Couplet, Seniergues, Morainville et Hugot sont morts au Pérou. Godin des Ordonnais s'installe à Cayenne en 1745, s'intègre à l'administration coloniale, retrouve 18 ans plus tard son épouse péruvienne (mais pas sa fille décédée en 1767), et rentre en France en juin 1773. Les destins de Godin et Jussieu, seuls survivants de l'expédition encore sur place, sont à ce titre si exemplaires qu'on en a eu plusieurs récits romancés. Godin et Jussieu sont abandonnés sans ressources par l'Académie. Louis Godin n'obtient pas de celle-ci le soutien pour un poste d'enseignant à Lima, mais tout juste de quoi récupérer la toise qu'il avait gagée! Lui et Jussieu sont réquisitionnés par le gouvernement de Lima à la suite du tremblement de terre du 28 octobre 1746. L'été 1748 voit nos deux savants explorer la cordillère et rejoindre La Paz pour se séparer à nouveau. Godin s'embarque pour Lisbonne en 1751, et s'installe à Cadix comme professeur de mathématiques. La mort de sa femme, celle de sa fille et sa radiation de l'Académie, entament sa santé. Rétabli comme pensionnaire vétérinaire, il rédige et envoie enfin la relation de sa mission, qui ne sera jamais publiée, et meurt en 1760. Jussieu lui, s'est fixé près des mines d'argent du Potosi où il herborise et soigne les indiens. Gravement malade lui-même, il rentre à Quito où il achève de perdre la raison. C'est de force qu'il est renvoyé en France, où il arrive en 1771, trente-six ans après son départ, démuné de tout souvenir mental et matériel - ses caisses pleines de dossiers, de plantes séchées et d'animaux naturalisés sont restées à Quito - pour mourir quelques années plus tard aveugle et paralysé.

De ce récit épique développé et romancé par Florence Trystam (1979), je ne veux retenir que le fait que la science est alors une grande aventure qu'elle n'est plus et que ce contexte donne des conditions d'observation bien moins contrôlées que celles de l'expérience. Voyons de plus près maintenant les controverses qui surgissent à ce sujet entre les savants de l'expédition.

Erreurs, témoignages et controverses

- méridien vs équateur : enjeux de la précision

Un calcul d'erreur fait *a priori* par Bouguer chiffre à 7 à 8'' l'erreur sur la latitude et 2' sur la longitude. C'est un maximum, un maximum de l'erreur que l'on a minimisée par tous les moyens. 1/60 d'erreur relative sur l'équateur pour 1/1500 d'erreur sur le méridien, voilà qui détermine entièrement la stratégie à choisir pour départager Newton et Descartes. La précision d'une mesure est un indicateur de sa valeur sur le marché de la preuve; elle indique le poids de l'argument qu'il est possible de développer à partir de son résultat. Plus précisément, la précision est elle-même la mesure du rendement coût/avantage de l'entreprise. La Condamine conteste ce résultat dans sa huitième objection. En travaillant sur 3° de longitude au lieu de 2, avec 3 observateurs dont un au centre qui produit le signal avec un tas de poudre enflammée (méthode également préconisée par Lacaille en 1738), en utilisant l'heure de médiation d'une étoile

bien choisie, "qui peut être connue à moins de 1/4 de seconde près en prenant le milieu des observations", et en comptant moins de 1 seconde de temps d'erreur sur l'horloge, "on aurait pu avoir la mesure du degré d'équateur à 40 toises près" prétend La Condamine. Or 40 toises sur 57000, cela fait 1/1425 d'erreur relative, et le projet équatorial redevient concurrentiel.

- La dalle de Quito : faut-il graver un témoignage dans la pierre ?

La mesure d'une base est un exploit : Une première base est mesurée sur près de 13 kilomètres à Yarouqui, près de Quito, en novembre 1736, concurrentement par les deux groupes. Bouguer et La Condamine avancent dans un sens, en alignant ses perches de bois de 20 pieds à même le sol sur des cales qui les maintiennent horizontales, le long de cordes tendues, et en alignant les extrémités des perches au fil à plomb. Il a fallu abattre des murs et des arbres pour avoir une ligne droite d'environ 3 km, légèrement en pente. Godin opère en sens inverse en maintenant ses perches sur des chevalets à hauteur d'homme. Les uns rampent, les autres doivent étayer et protéger du vent leurs échafaudages. Il faut veiller à l'horizontalité des perches, à la correspondance parfaite de leurs extrémités, à leur état thermique et hygrométrique constant. Enfin il faut faire les corrections qui ramènent la corde à l'arc de cercle d'altitude zéro. Bouguer obtient une base horizontale de 6272 toises 4 pieds et 5 pouces, "*dont 11 pouces pour toutes les petites équations dont nos mesures avaient besoin*". Godin obtient 3 pouces de moins. La valeur finale est en fait le résultat de longues négociations.

La dalle de Quito vise à sceller un pacte et stabiliser la base du degré : la métrologie de l'univers, et le futur système métrique. Elle doit elle-même être scellée à la terre qui lui sert de référence, et un sceau doit marquer cette base de l'autorité royale au nom de laquelle se fait toute l'entreprise. L'Académie avait pensé à ce problème dès la conception de l'expédition du Pérou, nous dit La Condamine²³, pour éviter que les marques de la base de Yarouqui ne subissent le sort de celles de Picard à Villejuive et Juvisy, plusieurs fois détruites ou déplacées. Un projet de plaque commémorative avait même été concocté par l'Académie des Inscriptions et Belles Lettres. En 1736, La Condamine se contente d'enterrer deux grosses pierres de meules avec un jalon en leur centre aux deux extrémités de la base, d'envoyer le résultat officiel à l'Académie (il se perd) et de le faire enregistrer auprès d'un notaire de Quito. En 1740, après la triangulation, il entreprend de construire, à l'emplacement des meules, deux pyramides de pierre de 5 à 6 mètres de côté qui porteront l'inscription. Les quinze mille quintaux de pierre sont pris dans la montagne à plusieurs lieues, treuillées du fond d'un ravin et descendues en chariot ou à dos de mule. La dalle se brise dans le transport. Enfin, un graveur qui ne sait ni lire ni écrire, y inscrit, lettre par lettre, le texte fixant les grandeurs de la base et du degré, ainsi que diverses autres mesures, et l'on y scelle une règle en bronze de la longueur du

²³ La Condamine, "Histoire des Pyramides de Quito", in *Journal de Voyage*, op. cit., p. 219-271

pendule battant la seconde. 18 mois de construction pour ce soi disant symbole, voilà la mesure de son importance. Malgré les assurances prises par La Condamine, auprès des autorités espagnoles et françaises, la construction et l'inscription furent doublement et violemment contestées. Les officiers espagnols de l'expédition jugent l'inscription et les fleurs de lys qui l'ornent infamantes pour la couronne espagnole, et saisissent l'Audience de Quito pour un premier jugement qui conduit à effacer les inscriptions, puis un second procès, gagné au Palais mais finalement perdu sur le terrain. Les pyramides sont rasées après le départ des académiciens, et avec elles disparaissent la trace et la preuve de l'inscription naturelle de la science occidentale. Leur rétablissement dans une position approximative un peu plus tard ne change rien à la perte.

- La toise du Pérou contestée

Les perches qui servirent à la mesure de la base étaient régulièrement comparées à une règle métallique étalon - la toise de l'Académie - qui représente la référence finale de toute la chaîne de mesures. Lalande, qui raconte en détail l'histoire de ces toises²⁴ rappelle que "*l'étalon de Châtelet, abandonné, pour ainsi dire, au public, a été usé & même chauffé de manière que dès l'année 1735, il ne pouvait plus désigner une mesure fixe & exacte*", et que "*la toise de Picard avait été perdue*". Mais au moins pouvait-on penser, comme Camus et Bouguer l'assurèrent à l'Académie le 23 juin 1756, que les toises de Laponie et du Pérou faites par le même artisan Langlois et comparées à une même troisième (celle de Mairan) étaient au moins semblables entre elles. Or cette équivalence, qui est au principe même de la mesure, est très douteuse et même franchement controversée: les mesures faites en 1756 révèlent, au bout de 20 ans, des différences entre les trois toises de l'ordre du dixième de ligne et l'on ne sait si ces différences existaient au temps des expéditions ou si elles résultent des outrages du temps, aidés par quelques incidents fâcheux: la toise du nord rouillée par le naufrage n'a-t-elle pas été un peu trop astiquée ? Si on a dû, en 1756 et selon Camus, limer l'étalon de la toise du nord pour qu'elle y rentre, était-ce l'étalon (victime du feu) ou la toise elle-même qui avait changé ? Certains auteurs disent même que la toise du Pérou a disparu lors du naufrage de deux navires de l'expédition Lapérouse en 1788. Or cette toise du Pérou est officiellement substituée à celle du Châtelet par Louis XV en 1766 comme étalon de longueur, et reproduite à 80 exemplaires pour les Parlements de province.

- A quoi se fier, mur ou cheveu ?

La méthode des latitudes des points extrêmes de l'arc de méridien consiste 1°) à suspendre l'appareil à un point fixe sans qu'il oscille par rapport au plan vertical 2°) à faire coïncider à tout moment ce plan vertical avec la direction du méridien 3°) à placer l'astre au centre de la lunette en coïncidence avec le fil du micromètre. La simultanéité de ces conditions autant que l'exigence de chacune

²⁴ Lalande, *Astronomie*, op. cit., Livre XV

est un défi permanent. La pesanteur seule doit assurer automatiquement la première condition. Les précautions pour assurer la seconde condition sont draconiennes et la science de nos académiciens semble tenir à un cheveu, celui qui est tendu dans l'alignement de la méridienne et sert à diriger le limbe du secteur dans le plan du Méridien. Un système de visée sur les lignes du dos d'une carte à jouer, la précision était remarquable : *On ne pouvait guère se tromper d'une demi division ou de 1/4 ' , ce qui vu la longueur du limbe de 25 pouces, nous assurait de la direction au moins à 1'1/2 près.*²⁵

Or les premières mesures de l'hiver 1739-40 à Tarqui révèlent une disparité tout à fait alarmante: 6" d'écart entre la première mesure et la seconde, chacune étant déjà une moyenne de plusieurs visées²⁶. "*Cette différence de 6 secondes que l'on trouve entre nos deux conclusions, et dont une partie doit être attribuée à des erreurs qui ne sont erreurs que parce que nous n'en savons pas précisément la cause*" inquiète Bouguer, qui, craignant on ne sait quelle manipulation, fait faire en janvier 1740 un procès verbal de ces mauvaises opérations et des négociations qui aboutissent à la moyenne , contresigné par Verguin et La Condamine, et certifié par un notaire de Cuenca. Les mesures de la seconde équipe (Godin, Juan, Ulloa) faites à Quito, Caracol, Quayaquil et Panama révèlent une disparité encore plus inquiétante avec un écart-type de l'ordre de 30" sur 10 à 20 mesures en un même lieu.

Dès lors commence un procès qui n'est plus celui des activités marchandes de La Condamine, ni celui de l'assassinat de Seniergues, ni celui des inscriptions de Quito. C'est d'abord un procès à huis clos instruit par les académiciens eux-mêmes, quitte à se traduire par des enregistrements devant notaire de leurs accords et désaccords. Mais la publication des pièces et des plaidoiries en constitue un appel avec audience publique, et nous permet donc d'y avoir accès. C'est le procès des erreurs dans lequel on suspecte tantôt les instruments, tantôt les observateurs et tantôt les étoiles elles mêmes. L'appareil se déforme dans les voyages : on bloque les vis de l'appareil. On fait planer le limbe. On accuse alors l'observateur qui n'est jamais constamment le même : erreur de parallaxe, ou tout simplement équation personnelle : Bouguer est presbyte et voit l'image en deçà du micromètre ; La Condamine est myope et la voit au-delà des mêmes fils. On corrige cela par des dispositifs (diaphragmes ...) mais rien n'y fait la dispersion continue même pour un seul observateur. On finit par sceller l'appareil au mur d'une maison mais une lunette pointée dans la direction de l'étoile. Or cette étoile réputée fixe vue dans une lunette fixe, elle bouge! Donc les murs bougent, et on ne peut *a priori* compter sur rien, pas même la solidité d'un mur, moins fiable qu'un cheveu d'indien. A moins que...mais peut-on oser même cette pensée, à moins que l'étoile fixe ne soit point tout à fait fixe elle

²⁵ La Condamine, *Mesure de trois degrés...*, p. 115.

²⁶ Les mesures de la seconde équipe (Godin, Juan, Ulloa) faites à Quito, Caracol, Quayaquil et Panama révèlent une disparité encore plus inquiétante avec un écart-type de l'ordre de 30" sur 10 à 20 mesures en un même lieu (voir le tableau dressé par A. Lafuente, p.145)

même, qu'il n'y ait donc pas de référent commun et unique à toutes ces mesures: "*malgré tout cela il était possible que les variations que nous avions aperçues de nos étoiles eussent aussi quelque chose de réel*", dira Bouguer en 1749.

Toutes ces opérations faites pour éliminer l'essentiel des erreurs systématiques dues à des défauts de l'instrument (décentrage, déformation, défaut de gravure) ou des conditions de l'observation (équation personnelle, brumes), il reste des disparités inexplicables : on les appellera erreurs accidentelles. Quels sont les effets de ces erreurs sur l'opération de triangulation ? Comment se transmettent-elles à la détermination de la longueur de degré de méridien ?

- La compensation des triangles

Bouguer et La Condamine osent quelques éléments de calcul sur la base de la formule de Cotes appliquée à la trigonométrie du triangle. La Condamine abandonne bien vite des calculs fort complexes (En 1902, le général Perrier dira encore qu'il y a une infinité de manières de compenser un réseau.) et se fie à une règle simple de partage à part égale entre les angles des excès ou défaut de la somme des trois angles dont l'optimum sous certaines conditions ne sera démontré que bien plus tard par Legendre. Il débouche alors sur une règle empirique grossière qu'il appliquera à la détermination finale : toute combinaison d'erreurs angulaires qui conduit à une erreur d'une toise sur la seconde base conduit à un excès de 18 toises sur la méridienne. Bouguer ne réussit pas mieux à mener un calcul d'erreur complet, mais il propose un raisonnement d'un type tout à fait nouveau, un raisonnement aléatoire :

« S'il est possible que nous nous trompions sur chaque angle, il ne l'est pas moralement que toutes les erreurs soient égales, ni dans un sens précis qui font qu'elles s'accordent à s'ajouter ensemble dans le résultat. Il faudrait pour cela se tromper de propos délibéré (...) Dans quelques triangles il n'y aura pas d'erreur du tout, dans les autres, il y en aura un peu, mais elle sera de différents sens, et il se formera de tout cela *une espèce de compensation*. (...) Deux dés donnent souvent une raflé de 6 et il y a cependant tout au monde à parier que 60 dés jetés ensemble ne s'accorderont jamais du premier coup à donner cette même raflé.²⁷ »

On trouve ici un raisonnement explicitement probabiliste qui est l'un des premiers à faire allusion à la loi binomiale comme loi de la combinaison des erreurs²⁸, et qui témoigne surtout d'une véritable dualité du raisonnement et du calcul sur la combinaison des erreurs: la première forme de raisonnement en terme d'erreur maximale (maximin), conduit au calcul d'erreur sous forme de calcul différentiel, pour lequel les erreurs absolues (maximales) s'ajoutent dans

²⁷ Bouguer, 1749, p. 96 et 97

²⁸ Voir Bernard Bru, La place et la critique probabiliste des mesures géodésiques, in H. Lacombe et P. Costabel, 1988.

une somme (la dérivée d'une somme est la somme des dérivées); la seconde forme de raisonnement assimile l'erreur à un aléa et le calcul aléatoire établit alors que les erreurs se compensent dans une somme. Dans cette proto-théorie des erreurs, on sait tout juste traduire le premier raisonnement en un calcul (celui de Cotes), et on ne sait pas encore, ou on n'ose pas encore traduire le second : ce calcul est encore une bizarrerie qui n'entre pas dans la culture des académiciens. Bouguer signale pourtant aussitôt que les résultats confirment pratiquement la supériorité du second raisonnement: la différence entre base mesurée et base calculée est de 2 pieds, *"et non pas de 250 pieds comme cela arriverait si un hazard qui n'est pas possible avait fait accumuler toutes les erreurs particulières, en les portant outre cela à leur plus grand degré, car le concours serait nécessaire de ces deux différents hazards, qui dépendent eux-mêmes d'un si grand nombre d'autres."*

- Que faire des observations discordantes ?

Pour finir, il nous faut noter le désaccord complet entre les rapports des astronomes en ce qui concerne la façon de se prémunir des erreurs systématiques et de gérer les erreurs accidentelles : 44 Objections sont relevées par La Condamine contre Bouguer dans son Supplément au Journal mais les principales portent sur cette question : que faire des observations discordantes ?

Selon Bouguer (1749), " il fallait réduire en Art autant qu'il était possible la manière de peser le mérite des observations, et d'assigner à chacune son degré de bonté. " Mais cet Art est encore dans un état embryonnaire, et Bouguer signale un seul auteur, sans doute de Moivre, qui aurait traité de ce problème en 1738. Il reste une pratique qu'il décrit sans état d'âme: "Quelques fois on se permet de supprimer les observations qui s'éloignent un peu trop des autres et l'on donne de cette sorte aux moyennes que l'on adopte une plus grande apparence de conformité.²⁹" Dans la Justification de 1752, il se plaint des révélations de La Condamine qui "a cru pouvoir se dispenser d'assigner aux observations qu'il rapporte le rang précis qui leur convenait quant au degré d'exactitude (...) Nous devons choisir [par un choix éclairé et non pas arbitraire] entre certains résultats auxquels nous sommes parvenus, puisqu'ils diffèrent trop entre eux pour qu'il soit permis en les fondant ensemble, de les admettre tous (...) Plusieurs résultats ont été publiés sans ma participation. Je pensais que M. de La Condamine les supprimerait, en se conformant à l'usage reçu de toutes les Académies qui laissent à chacun rendre compte de ses propres tentatives. J'avais eu attention de ne pas rapporter les observations qui occupèrent cet Académicien à Quito pendant tout 1741 et en général avant août 1742." Pour le Mathématicien qu'est Bouguer, l'expérimentation ou l'observation est une boîte noire qui doit rester transparente au public et qui n'est destinée qu'à fournir des données fiables.

²⁹ Bouguer, 1749, p. 262.

La position de son contradicteur est différente mais nuancée. Certes il convient d'éliminer du calcul final les observations sujettes à caution, mais pas avant d'en avoir fait la critique et le procès public. "*Ce sera uniquement de ces dernières observations [1742-43] faites dans le même temps aux deux bouts de la Méridienne que je tirerai, comme nous en sommes convenus M. Bouguer et moi, la valeur du Méridien; mais ce ne sera qu'après avoir examiné le degré de confiance que mérite chacune de nos diverses suites d'observations, et qu'après avoir exposé les raisons que nous avons eu de rejeter les anciennes.*³⁰". Il se montre également plus attaché à la critique publique du protocole d'observation: "*J'ai laissé le lecteur juge, et pour cela je n'ai rien supprimé sauf les mesures de 1741 avec la lunette scellée*". Le désaccord porte principalement sur la publicité à donner à ces négociations et aux valeurs qui sont à rejeter.

- Epilogue

Pour finir, Bouguer et La Condamine donneront deux résultats de la longueur du degré à l'équateur de 56753 toises et 56750 toises avec un écart de 3 toises seulement et de 18 toise les espagnols Juan et Ulloa. Ces mesures obtenues avec tant de difficultés et de conflits et avec 15 ans de retard sur l'expédition en Laponie confirmaient que la terre était aplatie aux pôles. S'ouvrait alors une autre controverse que nous ne suivrons pas : quelle valeur pouvions nous fixer à cet aplatissement et comment en déduire la base du système métrique et d'une nouvelle cartographie.

Théorie des erreurs

Ayant vu dans l'étude de cas précédente comment se posent sur le terrain la question des témoignages et des mesures dans le contexte d'un expédition académique, et comment la disparité des observations est l'objet d'un procès continu des erreurs, il nous faut maintenant rendre compte rapidement des principales caractéristiques de la théorie mathématiques et probabiliste erreurs ? Nous les résumons très rapidement :

La question des erreurs est d'abord une question métaphysique ou physique totalement liée à l'observation instrumentale. Seule une connaissance précise des instruments des protocoles et des objets observés permet de mener à bien le procès à charge et à décharge des causes d'erreurs possibles qui entachent chaque observation. Cette même compétence est nécessaire pour apporter les corrections appropriées aux causes d'erreurs identifiées lors de ce procès. Il n'y a pour cette étape aucune théorie générale possible. La mathématisation de l'erreur ne peut opérer que sur les erreurs accidentelles, celles qui restent quand on a supprimé physiquement, matériellement, les causes des erreurs systématiques.

³⁰ La Condamine, *Mesure de Trois degrés...*, 1751, p.126

Sur les erreurs accidentelles, celles dont les causes n'ont pu être établies, il y a deux mathématisations possibles.

1. La première, historiquement, raisonne en erreurs absolue maximum estimée *a priori*. Pour une grandeur S qui serait la somme de n observations X_1, X_2, \dots, X_n , l'erreur absolue maximale sur S est logiquement la somme des erreurs absolues maxi sur chaque X_i .
2. La seconde approche considère comme le fait Bouguer qu'il serait déraisonnable de penser que l'erreur réelle sur chaque X_i soit toujours maximale et dans le même sens. Bien plus vraisemblable est l'idée que cette erreur est aléatoire et suit une loi de probabilité dont on ne sait rien de la densité sauf qu'elle est sans doute symétrique (paire), décroissante et bornée. C'est du moins ce qui est postulé depuis Galilée. Dès lors l'erreur aléatoire sur S est toujours la somme des erreurs aléatoires du X_i mais ces variables se réalisent dans des valeurs différentes et il y a un phénomène de compensation des erreurs.

On suppose le plus souvent que les mesures sont faites dans les mêmes conditions et sont indépendantes entre elles, donc que les mesures X_i sont de même loi (H1) et indépendantes (H2). Le mathématicien Simpson a établi en 1750 pour des distributions simples (triangulaires) une chose générale à savoir que sous ces deux hypothèses, la moyenne des observations S/n a une dispersion \sqrt{n} fois plus petite que X . Donc la moyenne des observations permet une compensation des erreurs et se révèle plus précise que chacune des observations. C'est d'ailleurs le principe mis en œuvre dans le cercle répétiteur de Borda qui a succédé au quart de cercle pour la mesure des angles.

Ce genre de résultats se multiplie pour toutes sortes de lois dans les années 1770 sans vraiment déboucher sur une méthode générale. En fait la pratique des astronomes de pratiquer des moyennes d'observations est plutôt confortée par ce résultat, mais d'aucuns remettent en question sa validité générale pour toutes les lois d'erreurs, et l'on ne sait pas laquelle s'impose. Les critères d'optimisation du problème sont multiples (solutions de Boscovich, de Laplace, de Mayer...) et aucun de l'emporte sur les autres, pour le problème simple des observations directes que nous avons considéré mais aussi pour les observations indirectes de plusieurs quantités a_j inconnues reliées aux observations de variables x_j par une équation linéaire de la forme $y_i = \sum_j a_j x_{ij}$ (cas par exemple d'un nuage de points à ajuster par une droite)

La solution n'émerge qu'au début du XIXe avec la solution des moindres carrés mise en avant par Legendre en 1805, mais revendiquée comme pratique antérieure par Gauss. Cette méthode offre l'avantage de produire simplement les vraies valeurs des inconnues a_j à l'aide d'un système linéaire, et dans le cas simple des observations directes, ce résultat est la moyenne des observations. Ce qui justifie une pratique astronomique très ancienne.

Une autre justification des moindres carrés viendra des travaux de Gauss et Laplace qui l'associent à la seconde loi de Laplace comme loi des erreurs (Celle que l'on appellera loi normale à la fin du siècle) par une série de théorèmes mathématiques en utilisant chacun un principe différent (maximisation de la probabilité des observations pour Gauss, théorème de convergence de Laplace, et enfin critère du minimum d'écart quadratique (variance) pour la détermination des coefficients par Gauss.

Ces trois solutions – moyenne, moindre somme des carrés et loi normale - resteront associés fortement dans cette synthèse qui domine le XIX^e siècle sans pourtant faire l'affaire de tout le monde : il y a d'autres solutions au problème – par exemple en associant médiane et norme L1. La loi de Laplace Gauss va jouir d'un statut exceptionnel et non mérité de loi des erreurs par excellence.

Pourquoi les deux traditions n'ont-elles rien appris l'une de l'autre ?

Revenons maintenant à la question paradoxale du début de l'exposé. La notion de témoignage apparaît comme centrale et dans le discours de savants expérimentateurs ou observateurs et dans celui des philosophes qu'ils sont parfois aussi. Une observation est un témoignage, et même un triple témoignage : celui que l'observateur reçoit de ses sens, celui qu'il transmet à la communauté scientifique qui le reçoit, celui des autres observateurs et témoins qu'il ne manque pas de solliciter. A priori, ce témoignage ne peut offrir une certitude totale, mais seulement une connaissance probable. Malgré cela il faut établir une science qui soit générale, délocalisée et jouissant d'une certitude morale du même ordre qu'une vérité mathématique. On a vu que les expérimentateurs d'un côté et les astronomes de l'autre ont contourné cette obsession des philosophes de la nature par l'introduction de différents dispositifs à bas de techniques instrumentales, littéraires, juridiques, et sociales visant à asseoir les sciences d'observation sur des bases aussi solides que celles des raisonnements mathématiques, et permettant une certaine mathématisation probabiliste de la physique et de l'astronomie.

Comment se fait-il dès lors que la tradition de la probabilité des témoignages n'ait eu quasiment aucun écho dans le monde de l'astronomie et de la géodésie ? N'était elle pas la principale application développée dans l'article « probabilité » de l'Encyclopédie méthodique ? Comment se fait-il, à l'inverse, que la théorie probabiliste des témoignages n'ait pas profité des avancées exemplaires de la théorie des erreurs ?

A la suite des analyses qui précèdent, nous proposons quelques pistes d'élucidation de cet apparent paradoxe.

1. C'est d'abord une question de chronologie. Suivant les travaux de Licoppe sur un peu plus d'un siècle, nous voyons que le rôle des témoignages dûment enregistrés est fondamental et constitutif de la légitimité de l'expérience
 Journ@l électronique d'Histoire des Probabilités et de la Statistique/ Electronic Journal for History of Probability and Statistics . Vol.7, n°1. Juin/June 2011

au début du 17^e siècle, mais qu'il a complètement perdu cette propriété un siècle plus tard au profit d'une médiation de tout phénomène sensible par un appareillage de mesure et d'enregistrement qui court-circuite le témoignage des sens de l'expérimentateur, tandis que le témoignage écrit qu'il en donne repose davantage sur des tables et des calculs. La présence de témoins supplémentaires, dignes de foi, a elle-même totalement disparu. A l'époque où la question des erreurs s'installe en astronomie, milieu XVIII^e, cette évolution est déjà bien avancée.

2. De quelle probabilité parle-t-on dans les deux cas ? La probabilité des jugements fait référence bien davantage au premier sens de la probabilité - une opinion probable - qu'au sens de mesure subjective ou objective, qu'il prendra par la suite. Elle n'a pu se développer d'une façon appliquée, quantitative et critique, que lorsque sa théorie a rencontré des données statistiques, c'est-à-dire des observations quantifiées et répétées, essentiellement dans les deux domaines de la science politique (les votes dans les assemblées) et de l'administration judiciaire (décisions des juges et jurys). Les premières datent au mieux de la Révolution (Condorcet 1785) et les secondes de la production de la mise en place de Bureaux de Statistique à la Statistique Générale de la France et au Ministère de la Justice, à la fin des années 1820, déclenchant alors les études de Quetelet et Cournot. Les témoignages n'ont pas fait l'objet d'évaluation statistique. Les tables des astronomes et des actuaires ont circulé bien plus tôt, et vers 1826, la théorie mathématique des erreurs est totalement achevée. Elle repose sur un hasard épistémique (on ne sait rien des causes d'erreurs accidentelles) dominant chez Condorcet et Laplace, avec des probabilités qui ont une interprétation tantôt subjective (un degré de croyance) et tantôt, plus souvent, objective (on peut a posteriori en déterminer les valeurs et probabilité par la statistique).

3. On doit noter aussi qu'une mesure est plus qu'une observation. La question des témoignages est posée dans un univers à logique binaire où les faits sont déclarés vrais ou faux (un essai de logique ternaire par Lambert n'a guère de postérité). L'observation astronomique porte parfois sur l'existence ou non de tel phénomène, mais dans la presque totalité des cas elle se précise en une mesure de grandeur quantitative - une distance ou un angle - qui varie continûment. En ce sens une observation est un témoignage, mais une mesure est plus qu'un témoignage. Elle suppose un dispositif qui rend des observations comparables dans leur grandeur selon un protocole et des conventions qui sont, on l'a vu, essentiels pour que les traces mobiles mais indéformables du phénomène puissent circuler, s'échanger dans la communauté scientifique.

4. La condition indispensable pour un traitement mathématique et probabiliste des erreurs a été la séparation radicale - le grand partage - entre erreurs systématiques et erreurs accidentelles. Seules les secondes pouvaient donner lieu à un traitement mathématique probabiliste, et à l'attribution d'une loi de distribution des probabilités d'erreur. Cette séparation renvoie en partie à la

différentiation que fait Cournot entre probabilité philosophique et probabilité mathématique. Il appartient à la critique philosophique (et métaphysique) de spécifier les conditions de ce grand partage, mais une fois qu'il est fait la probabilité mathématique peut s'appliquer aux erreurs accidentelles. Que pouvait être alors dans le domaine des témoignages l'équivalent d'un tel partage ? Et d'une loi de distribution des écarts de jugement ? Déjà difficile à établir pour les erreurs de mesure, elle semble encore plus difficile à transposer dans l'univers des témoignages.

5. Par contre la notion de juste milieu qui possède une signification dans un grand nombre de domaines et qui a inspiré conjointement les contrats aléatoires du commerce et du droit est visiblement à l'œuvre dans l'usage des moyennes en astronomie et en démographie. Y a-t-il aussi une notion de juste milieu en théorie des témoignages ? Pas dans ce que nous en avons relaté. Mais il n'est pas indifférent de noter que c'est l'article « milieu » du supplément de l'Encyclopédie qui contient les premiers éléments de la théorie des erreurs, tandis que la question des témoignages est traitée à l'article « probabilité ».

6. L'hypothèse d'indépendance des erreurs adoptée Gauss pour sa théorie des erreurs semble l'avoir été aussi pour les témoignages multiples en série ou en parallèle. Bien sûr cela rend les calculs plus facile mais cela n'a de sens en astronomie que parce qu'on a réduit les erreurs à leur seule composante accidentelle. Même dans ce cadre d'erreurs purgées de toute composante systématique, l'hypothèse d'indépendance des erreurs faites sur des mesures prises dans les mêmes conditions par les mêmes personnes semble tout à fait abusive. On devrait plutôt admettre que des causes communes restent à l'œuvre mêmes si elles restent inconnues. En sociologie des témoignages on imagine fort bien, comme cela s'est passé en économie, une guerre impitoyable entre les tenants de l'individu rationnel indépendant dont la somme forme la société et ceux du holisme d'individus interdépendants, structurés en classes, ayant des comportements et jugements sujets aux rapports de force, au mimétisme et à la dépendance.

7. La stratégie qui s'impose au début au XVII^e siècle pour résoudre le problème de la construction d'une science « dure » avec des observations erronées reposait entièrement sur le jugement subjectif de l'astronome qui savait les observations qu'il devait rejeter, celles qu'il devait conserver et comment il pouvait les combiner. La science était une construction intersubjective, comme le fut la probabilité des jugements. A la fin du XIX^e siècle le même problème est réglé par une routine automatique de moyenne généralisée par les moindres carrés qui peut s'appliquer à tous les cas, qui ne nécessite aucun tri entre les observations, aucun jugement, et se satisfait même de mesures mal faites. On ne voit pas ce que serait une procédure d'évaluation des témoignages, des jugements, et des décisions démocratiques qui aurait acquis cette routinisation et cette automatisations... sauf peut-être les sondages d'opinion qui peuvent se penser comme des procédures d'agrégation de témoignages, rendus

commensurables par le protocole étroit de l'enquête et l'imposition de questions fermées, et de ce fait analogues à la combinaison des observations, pour déterminer non pas le lieu vrai d'un objet céleste, mais l'opinion de l'homme moyen. On retrouve bien ici le transport analogique de Quetelet d'une moyenne astronomique objective en une caractéristique du centre de gravité de la société des hommes.

Conclusion

Terminant par cette suggestion, on aura ainsi été au bout de notre tentative pour répondre à la question posée par ce texte : l'observation scientifique est-elle un témoignage. En comprenant mieux ce que l'observation et la mesure astronomique pouvaient avoir de commun avec un témoignage, un avis, une opinion, nous sommes allés plus loin : nous avons compris comment le jeu des outils mathématiques du probable pouvait ou ne pouvait pas circuler entre ces deux domaines, et justifier que la probabilité d'un témoignage et celle d'une mesure assortie d'une erreur aient quelques similitudes et beaucoup de différences.

Bibliographie

- Adler Ken, 2005 (2002), *Mesurer le monde, 1792-1799 : l'incroyable histoire de l'invention du mètre*, Trad.fr., Champs histoire.
- Alembert (d'), Article « probabilité », Encyclopédie.
- Andoyer H., 1908, Théorie des erreurs, d'après J. Bauschinger, Encyclopédie des sciences mathématiques pures et appliquées, Paris, Gauthier-Villars et Leipzig, Teubner.
- Arnaud Antoine et Nicole Pierre, *La Logique ou l'art de penser*, 1970 (1662), Champs Flammarion.
- Armatte Michel, 1995, *Histoire du Modèle linéaire. Formes et usages en Statistique et en Économétrie jusqu'en 1945*, Thèse EHESS, sous la dir. de J. Mairesse.
- Armatte Michel, 2010, *La Science économique comme ingénierie. Quantification et Modélisation*, Paris, Presse des Mines
- Baker K. M., 1988 (1975), *Condorcet, raison et politique*, trad. M. Nobile, Paris, Hermann.
- Bernoulli Nicolas, 1992 (1909), *De usu artis conjectandi in jure*, Basel, 1909 ; trad. Fr. Norbert Meusnier, Nicolas Bernoulli, l'usage de l'art de conjecturer, CAMS.
- Bouguer P., 1749, *La Figure de la terre, déterminée par les observations de MM. Bouguer et La Condamine, de l'Académie royale des sciences, envoyés par ordre du roi au Pérou pour observer aux environs de l'équateur*, Paris.
- Condorcet J. A. (de), 1784, "Arithmétique politique" et "Probabilité", *Encyclopédie méthodique*, 132-136 et 656-663, Panckoucke, Paris.
- Condorcet J. A. (de), 1793, "Tableau général de la science qui a pour objet l'application du calcul aux sciences politiques et morales", *Journal d'instruction sociale*, 22 juin et 6 juillet 1793.
- Condorcet J. A.(de) , 1805, *Elémens du calcul des probabilités et son application aux jeux de hasard, à la loterie, et aux jugemens des hommes*, Paris, Royez, 169 p.; réédité par IREM, Université Paris VII, 1986.
- Coumet E., 1970, "La théorie du hasard est-elle née par hasard", *Annales ESC*, N°3, mai-juin, p. 574-598.
- Cournot Antoine-Augustin, 1984 (1843), *Exposition de la théorie des chances et des probabilités*, Oeuvres Complètes, Ed Bru, Vrin, Paris.
- Craig John, 1699, *Theologiae christianae principia mathematica*, Londres.
- Daston L., 1988, *Classical probability in the Enlightenment.*, Princeton, Princeton Univ.Press.
- Daston L., 1989, L'interprétation classique du calcul des probabilités, *Annales E.S.C.*, N°3, mai-juin, p. 715-731.

- Despoix Philippe, 2005, *Le monde mesuré. Dispositifs de l'exploration à l'âge des Lumières*, Librairie Droz, Genève.
- Desrosieres A., 1993 & 2000, *La politique des grands nombres*, Paris, La Découverte.
- Domat Jean, *Les lois civiles dans leur ordre naturel*, 1689-1694; *Œuvres complètes*, t.II, Paris, Firmin-Didot, 1829, p. 137-138.
- Faa de Bruno, 1869, *Traité élémentaire des erreurs*. Gauthier-Villars, Paris.
- Filleau de la Chaise Nicolas, *Discours sur les Pensées de Monsieur Pascal*, Paris, Desprez, 1672, in *Pensées*, ed V. Giraud, Bossard, 1922
- Finetti B. de, 1968, "Probability : Interpretations", *Internat. Encycl. of Social Sciences*, p.496-505.
- Fourier J., 1826, Mémoire sur les résultats moyens déduits d'un grand nombre d'observations, in *Recherches statistiques sur la Ville de Paris et le département de la Seine*, Vol. III, et *Oeuvres*, 1890, p. 525-545
- Fourier J., 1829, Second Mémoire sur les résultats moyens et sur les erreurs de mesure, in *Recherches statistiques sur la Ville de Paris et le département de la Seine*, Vol. IV, et *Oeuvres*, 1890, p. 549-590
- Gauss C. F. 1855 (1809) , "Theoria motus...", in *Méthode des moindres carrés. Mémoire sur la combinaison des observations*, Trad.J.Bertrand , Mallet-Bachelier, Paris
- Gauss C. F. 1855 (1821-26), "Theoria Combinationis...", in *Méthode des moindres carrés. Mémoire sur la combinaison des observations*, Trad.J.Bertrand , Mallet-Bachelier, Paris; tr. angl. H.F.Trotter in *Gauss's Work (1803-1826) on the theory of Least Squares*, Princeton Univ.
- Glémain A., 2006, Mémoire de DEA, *jehps*, juin.
- Hacking I., 1975, *The Emergence of Probability. Logic of Statistical Inference*, Cambridge Univ. Press.
- Hobbes Thomas, 1971 (1651), *Léviathan*, trad. F. Tricaud, Paris, Editions Sirey
- Hooper George, 1699, A calculation of the credibility of human testimony, *Phil. Trans.*, 21, p.359-365.
- Kruger L., Daston L., Heidelberger M. (eds) , 1987, *The probabilistic revolution*, Vol 1: ideas in history, MIT Press, Cambridge, England.
- Kruger L., Gigerenzer G, Morgan M.S. (eds) , 1989 , *The probabilistic revolution*, Vol 2: Ideas in the sciences, MIT Press, Cambridge, England.
- La Condamine Ch.-M., 1751, *Journal du voyage fait par ordre du roi à l'Equateur, servant d'introduction historique à la "mesure des trois premiers degrés du méridien"*, Paris, Imprimerie royale, in-4°
- La Condamine Ch.-M., 1751, *Mesure des trois premiers degrés du méridien*, Paris.

- La Condamine Ch.-M., 1981 (1745), *Relation abrégée d'un voyage fait dans l'intérieur de l'Amérique méridionale (...) lue à l'assemblée publique de l'Académie des Sciences le 28 avril 1745*, Paris, in-8°. Réédité avec une introduction d'Hélène Minguet, Paris, Maspero, 1981
- La Condamine Ch.-M., 1752, *Supplément au Journal historique du Voyage à l'Équateur et au livre sur la mesure des trois premiers degrés de Méridien*, suivi d'une *Histoire abrégé de la dispute présente*, d'un *Résumé des principales objections de M. Bouguer et de mes réponses*, et de diverses *Pièces justificatives*.
- Lacombe H. et Costabel P. (dir), 1988, *La figure de la Terre du XVIIIème siècle à l'ère spatiale*", Acad. des Sciences, Paris, Gauthier-Villars.
- Lacroix S.F., 1833 (1816), *Traité élémentaire du calcul des probabilités*, Paris, Bachelier.
- Laplace P. S., 1786 (lu 1783) *Mémoire sur la figure de la terre*, *Hist.Acad.Roy.Sci.*, Année 1783, 17-46., *Oeuvres Compl.* , 1895, XI, 3-32
- Laplace P. S., 1886 (1812), *Théorie analytique des probabilités*, *Oeuvres Compl.*, 1886, VII; 2ème ed 1814: préface; 3ème éd.1820: trois suppléments, *Oeuvres Compl.*, 1904, XIII, 98-120, *Oeuvres Compl.*1886, VII, 531-580, *Oeuvres Compl.*, 1886, VII, 580-616.
- Laplace P. S., 1986 (1825), *Essai philosophique sur les probabilités*, postface B.Bru, d'après la 5ème édition (1825), Paris, C. Bourgois.
- Licoppe Christian, 1996, *La formation de la pratique scientifique. Le discours de l'expérience en France et en Angleterre (1630-1820)*, Paris, La Découverte
- Martin Thierry, 2005, *Actualité de Cournot*, Paris, Vrin.
- Martin Thierry, 2007, l'épistémologie probabiliste de Cournot, in J.-Ph. Touffut (dir), *La société du probable. Les mathématiques sociales après Augustin Cournot*, Albin Michel
- Merriman M., 1901 (1877), *Method of Least Squares*, 8ème édition, N.Y., Wiley.
- Meusnier Norbert, 1996, L'émergence d'une mathématique du probable au XVIIe siècle, *Revue d'histoire des mathématiques*, 2, p.119-147.
- Pearson E.S. (ed), 1978, *The History of Statistics in the 17th & 18th Centuries. Lectures by Karl Pearson at University Copllege of London during the academic sessions 1921-1933*, Charles Griffin and Cy, London.
- Quetelet A., 1846, *Lettre à S.A.R. le Duc Règnant de Saxerr-Cobourg et Gotha, sur la théorie des probabilités appliquées aux sciences morales et politiques*, Bruxelles, Hayez.
- Shapin Steven and Schaffer Simon, 1993 (1985), *Leviathan et la pompe à air. Hobbes et Boyle entre science et politique*, trad fr. T. Piélat, 1993, La Découverte.
- Sheynin O. B., 1973, "Mathematical Treatment of Astronomical Observations", *Arch.Hist.Exact Sci.*, 11, 109-126
- Sobel Dava, 1996, *Longitude*, JC Lattès.

Stigler Steven. M., 1986, *The history of statistics. The measurement of uncertainty before 1900*, Cambridge et London, Belknap Press of Harvard University Press.

Trystam F., 1979, *Le procès des étoiles: récit de la prestigieuse expédition de trois savants français en Amérique du Sud et des mésaventures qui s'ensuivent (1735-1771)*, Paris, Seghers.