



HAL
open science

Expériences et investigations autour des machines arithmétiques de Blaise Pascal

Nathalie Vidal, Aurélie Del Prete, Frédéric Laurent

► **To cite this version:**

Nathalie Vidal, Aurélie Del Prete, Frédéric Laurent. Expériences et investigations autour des machines arithmétiques de Blaise Pascal. Évelyne Barbin, Dominique Bénard et Guillaume Moussard (dir.). Les mathématiques et le réel Expériences, instruments, investigations, Presses Universitaires de Rennes, 2018, 978-2-7535-6531-9. hal-01974177

HAL Id: hal-01974177

<https://uca.hal.science/hal-01974177>

Submitted on 8 Jan 2019

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

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

Expériences et investigations autour des machines arithmétiques de Blaise Pascal

Aurélie DEL PRETE & Nathalie VIDAL
Muséum Henri-Lecoq, Clermont-Ferrand
Frédéric LAURENT
IREM de Clermont-Ferrand

Natif de Clermont-Ferrand, Blaise Pascal (1623-1662) a finalement peu vécu dans cette ville (il la quitte en 1631 pour Paris) et les témoignages de sa vie clermontoise sont aujourd'hui bien rares, à l'instar de sa maison natale dont il ne reste que l'emplacement sur le sol près de la cathédrale. Cependant, la ville a su rendre hommage à sa grande figure locale non seulement en ayant donné son nom à de nombreux édifices, mais aussi, plus récemment, en 2012, en inaugurant un espace qui lui est consacré au muséum Henri-Lecoq. Cet espace a pour vocation de présenter au public ses principaux travaux scientifiques mais également l'une de ses inventions les plus remarquables : la machine arithmétique, machine à calculer mécanique avec report automatique de la retenue. Un exemplaire original y est visible accompagné de reproductions fonctionnelles, d'une maquette à l'échelle 10 permettant de comprendre son mécanisme interne et d'une reproduction virtuelle.

Cette machine arithmétique, communément appelée Pascaline, tient une place singulière dans le parcours et les travaux de Pascal. D'abord par le contexte dans lequel elle fut élaborée et par le défi technique qu'elle représentait pour son inventeur, puis, par le changement de rapport au savoir mathématique qu'elle impliquait. Bien entendu, elle revêt également une importance particulière dans l'histoire des mathématiques car c'est la première d'une longue série de machines à calculer mécaniques ayant abouti à nos calculatrices actuelles. Aujourd'hui ses vertus sont redécouvertes pour des fins pédagogiques tant au niveau technique (utilisation des engrenages) qu'au niveau didactique (apprentissage de l'addition et de la soustraction).

Ainsi, c'est avec un triple regard qu'il nous faut examiner la machine arithmétique de Pascal, ou, plus exactement, les machines arithmétiques, puisque plusieurs exemplaires furent réalisés par son concepteur, avec des spécificités différentes. C'est pourquoi nous détaillerons successivement les caractères historique, épistémologique et pédagogique de cet objet.

Un objet historique (photo 1)

Blaise Pascal est âgé de 19 ans lorsqu'il commence à réfléchir à cette machine à calculer qui doit aider son père dans son travail quotidien. Étienne Pascal est « commissaire député par sa Majesté, nommé par le cardinal de Richelieu, en la Haute Normandie pour l'impôt et la levée des tailles »¹. Lorsque Richelieu décède, Étienne Pascal redouble de travail pour conserver sa place et se fatigue à la tâche. Le jeune Pascal cherche alors une solution pour aider son père. Ayant remarqué que les erreurs de calcul de ce dernier portent essentiellement sur la retenue, oubliée ou décalée, son idée est donc de mettre au point une machine à calculer mécanique qui fasse le report automatique de la retenue.

Pour réaliser cette machine, Blaise Pascal s'inspire de la précision des engrenages des horloges, et se rapproche naturellement des horlogers pour la fabrication des pièces de son mécanisme. Il réalise une cinquantaine de prototypes, réfléchissant à la fois au mécanisme, à l'ergonomie et à l'esthétisme. Après trois ans de recherches, Blaise Pascal présente son modèle

¹ nommé le 19 novembre 1639, auprès de l'intendant de Normandie, CHIRON Yves, *Pascal, le savant, le croyant : une biographie*, Paris, Ed. du Jubilé, 2009, p. 12.

définitif et réalise une vingtaine d'exemplaires. Mais sa machine n'a pas le succès commercial escompté car elle coûte cher. Pourtant, Pascal ne manque pas d'en vanter les mérites grâce à son « avis nécessaire »². De plus, Pascal constate que sa machine est très vite copiée par certains horlogers avec qui il a travaillé. Mais ces copies sont réalisées en toute légalité car le brevet n'existe pas encore. Afin de protéger son invention, Pascal demande au Chancelier Séguier de faire le nécessaire pour obtenir un privilège royal, lui permettant d'être le seul fabricant officiel de sa propre machine. Le privilège est accordé par Louis XIV le 22 mai 1649. À partir de cette date, Pascal ne fabriquera plus de machines mais tentera de les vérifier afin de les certifier exactes ou non.

Tous les exemplaires connus à ce jour se présentent sous la forme d'un caisson en laiton (excepté un exemplaire en palissandre, peut-être un prototype), plus ou moins décoré de pièces d'ébène. Le dessous du caisson est équipé d'une trappe permettant d'accéder au mécanisme installé dans le caisson. C'est sur le dessus de la machine, appelé platine, que se trouvent toutes les commandes de la machine. Une série de limbes équipés de roues étoilées compose l'inscripteur. Pour actionner l'inscripteur, il suffit de placer un stylet entre les branches des roues étoilées, installées dans les limbes, et de faire tourner la roue jusqu'à une butée. Cette action entraîne la rotation de cylindres qui composent le totaliseur. Le résultat des opérations se lit directement à travers des lucarnes taillées dans le métal de la platine. Sous chaque lucarne se trouve donc un cylindre équipé d'une bande de papier et portant deux séries de chiffres, l'une notée de 0 à 9 pour les additions, l'autre de 9 à 0 pour les soustractions. Une baguette mobile installée sur le totaliseur permet d'occulter une des deux séries de chiffres et de choisir ainsi le mode opératoire : addition ou soustraction mais pas addition et soustraction (**photo 2**). Lorsqu'on actionne les roues de l'inscripteur, les pièces du mécanisme transforment le mouvement horizontal en mouvement vertical permettant de faire tourner les cylindres. Entre chaque ensemble de roues, d'axes et de cylindres est installée la pièce maîtresse de la Pascaline : le sautoir (**photo 3**). Lorsque tous les cylindres sont à zéro, les sautoirs sont en mode repos. Quand les roues étoilées commencent à tourner, le sautoir est soulevé par un premier puis un deuxième axe décentré jusqu'à sa position maximale correspondant au dernier chiffre inscrit sur le cylindre. Au cran suivant, le sautoir est libéré et chute. Sa forme particulière, équipée comme une sorte de harpon à l'arrière, vient se placer entre deux « dents » et pousser d'un cran le cylindre suivant, ce qui le fait avancer d'une unité, inscrivant ainsi automatiquement la retenue ! Ceci remet également à zéro le premier cylindre. Un cliquet positionné au-dessus des engrenages permet de caler le système à chaque mouvement, empêchant ainsi les cylindres de tourner dans les deux sens.

Dans sa démarche d'ingénieur et de technicien, Pascal a réalisé une machine de base pour répondre à un problème mathématique lié à un problème technique. Il va tout d'abord réaliser une machine en comptes monétaires pour son père. À l'époque, la monnaie se compose de livres, sols, deniers. Une livre vaut 20 sols et un sol vaut 12 deniers. Pour les machines en comptes monétaires, la première roue étoilée possède 12 crans, la deuxième 20 et les suivantes 10. Blaise Pascal met également au point des exemplaires pour les comptes abstraits, chaque roue étoilée est alors équipée de 10 crans. Il réalise par ailleurs un exemplaire pour les mesures de longueurs de l'époque, en toises, pieds, pouces.

Pascal s'est rendu compte des difficultés d'utilisation de sa machine et il va la perfectionner. Ce fut le cas notamment de la remise à zéro longue et fastidieuse. Le principe consiste à noter deux branches successives des roues étoilées de l'inscripteur d'un signe distinctif. Il suffit ensuite de placer le stylet entre ces deux branches et de faire tourner la roue jusqu'à la butée. Ce principe permet de placer le chiffre le plus élevé des cylindres devant la lucarne du totaliseur. Pour finaliser la remise à zéro, il suffit d'ajouter 1 aux unités et l'ensemble des

² PASCAL Blaise, Œuvres complètes, t. IV, La Haye, Detune, 1779, p. 12-24.

cyndres se met à tourner d'un dernier cran en se positionnant sur le zéro. Blaise Pascal démontrait ainsi le bon fonctionnement de sa machine.

Pour réaliser une addition, il suffit d'inscrire au fur et à mesure les nombres que l'on souhaite additionner et de lire directement le résultat au totaliseur. Pour la soustraction, Pascal utilise le complément à 9. Dans un premier temps, il faut inscrire le premier terme de la soustraction en mode addition puis déplacer la baguette en mode soustraction. Le complément à 9 se décline de la façon suivante : le complément à 9 de 0 est 9 ($0+9 = 9$) ; le complément à 9 de 1 est 8 ($1+8 = 9$), etc. Si le premier terme de la soustraction est 356, on doit inscrire en mode addition le complément à 9 de 356 soit 643. Une fois noté, on fait coulisser la baguette en mode soustraction et l'on voit apparaître 356. Il suffit ensuite de faire directement les soustractions souhaitées sans passer par le complément à 9. Afin de faciliter cette tâche, Pascal équipe les roues de l'inscripteur de rondelles de soustraction. Une numérotation inverse de celle notée sur le limbe permet ainsi d'inscrire directement le premier terme en mode soustraction.

Enfin, des rondelles de mémoire équipent la baguette mobile, mais l'étude détaillée des exemplaires connus montre qu'il ne peut s'agir d'un système permettant de mémoriser un résultat. Les rondelles dotées de chiffres présentent une numérotation commençant à 1. Il manque donc le 0 pour la mémorisation. Il s'agirait plutôt de rondelles de multiplication et de division basées sur le principe de la répétition d'additions pour la multiplication et de soustractions pour la division.

Huit exemplaires de la machine de Pascal sont arrivés jusqu'à nous. Il existe un neuvième exemplaire, appelé Pascaline tardive, réalisé avec des pièces d'origine mais au XVIII^e siècle. La ville de Clermont-Ferrand possède deux originaux. La machine de Marguerite Périer, également appelée machine de Clermont-Ferrand, est actuellement présentée au musée Henri-Lecoq au sein d'un espace consacré à Blaise Pascal le scientifique. Cet exemplaire est en base décimale et possède la remise à zéro rapide. Le deuxième exemplaire, la machine du Chevalier Durant-Pascal, est présentée au musée d'art Roger-Quilliot dans un espace consacré à Pascal le penseur. Elle est en comptes monétaires et c'est le seul exemplaire connu possédant un coffret de transport. Elle bénéficie également de tous les perfectionnements apportés par Pascal. Le musée des Arts et Métiers de Paris présente trois exemplaires ainsi que la Pascaline tardive : la machine de la Reine Christine de Suède, en base décimale et équipée de la remise à zéro rapide et des rondelles de soustraction, possède un autographe de Blaise Pascal à l'intérieur de la trappe attestant sa vérification ; la machine du Chancelier Séguier, en compte monétaire et sans perfectionnement, est l'exemplaire du privilège royal ; la machine de Louis Périer en comptes monétaires et avec tous les perfectionnements ainsi que deux poignées de transport. La machine de Dresde est conservée au musée de mathématique et de physique de Dresde en Allemagne. C'est la plus grande machine connue avec dix roues à l'inscripteur. Il semble qu'elle soit prévue pour les comptes monétaires, la première roue est en base 12 mais la deuxième roue a certainement été changée car elle est en base 10 au lieu d'être en base 20. Elle ne possède aucun perfectionnement. La machine de la firme IBM est la plus complète de tous les exemplaires connus. Prévue pour les comptes monétaires, elle possède tous les perfectionnements ainsi que deux poignées de transport. Elle est conservée au siège social d'IBM à New York. Le dernier exemplaire connu est conservé dans une collection privée. C'est le seul exemplaire dont le caisson est en bois et prévu pour les calculs d'arpentage.

Un objet épistémologique

La lecture de certains textes de Pascal permet de mettre en lumière les enjeux de la réalisation de sa machine arithmétique. Parmi ces textes, l'*Avis nécessaire à ceux qui auront curiosité de voir la machine arithmétique et de s'en servir*³, rédigé en 1645 à l'attention des futurs

³ PASCAL Blaise, Œuvres complètes, t. IV, La Haye, Detune, 1779, p. 12-24.

utilisateurs, la *lettre dédicatoire à Monseigneur le Chancelier*⁴ qui lui est contemporaine et adressée au Chancelier Séguier pour qu'il garantisse l'invention et enfin, la *lettre de Pascal à la Reine Christine*⁵ datée de 1650 à l'attention de la reine de Suède à laquelle il offrit un exemplaire. À ce corpus, il convient d'ajouter le *privilège du Roi pour la machine arithmétique*⁶, signé en 1649 de la main de Louis XIV alors âgé de 11 ans, ainsi que la *Vie de Blaise Pascal par Gilberte Pascale*⁷ (Madame Périer), sa sœur, publiée la première fois en 1684.

La quête d'ergonomie

L'*Avis* apparaît comme un texte très structuré dans lequel Blaise Pascal démontre, par un grand nombre d'arguments tirés de sa propre expérience d'ingénieur, toutes les qualités de sa machine. Il en vante tous les mérites en une sorte de texte publicitaire, tout en réfutant les principaux reproches qui pourraient être formulés à son encontre. Il commence par évoquer l'accueil favorable qu'elle reçut de la part des autorités (le Chancelier Séguier) et de la communauté mathématique : « Je puis sans présomption espérer qu'elle ne te déplaira pas, après que Monseigneur le Chancelier l'a honorée de son estime, et que dans Paris ceux qui sont les mieux versés aux mathématiques ne l'ont pas jugée indigne de leur approbation⁸. » Cette assertion se confirme à la fin du texte où il mentionne que c'est Roberval lui-même qui organise la démonstration du fonctionnement de la machine et auprès duquel il est possible de l'acquérir. Dans le *privilège du Roi*, on peut encore lire : « Il serait enfin arrivé à la construction d'un modèle achevé qui a été reconnu infaillible, par les plus doctes mathématiciens de ce temps, qui l'ont universellement honoré de leur approbation, et estimé très utile au public⁹. »

Dans un second temps, Pascal explique pourquoi il ne fournit ni notice d'utilisation ni détails concernant l'agencement interne des pièces qui la composent. Il réfute ensuite l'apparent paradoxe selon lequel la machine serait trop complexe par rapport à la simplicité des opérations qu'elle entend mécaniser : « Je sais qu'il y a nombre de personnes qui font profession de trouver à redire partout et qu'entre ceux-là il s'en pourra trouver qui te proposeront que cette machine pouvait être moins composée¹⁰. » Il explique alors de façon très précise comment, grâce à de nombreux essais préalables, il est parvenu à améliorer son modèle de telle sorte qu'il réponde à des exigences de simplicité, de facilité et de commodité d'utilisation, de fiabilité, de rapidité d'exécution, de solidité et de durabilité. Il est intéressant de noter ici que la machine arithmétique renvoie à deux espaces distincts : l'intérieur, caché de l'utilisateur et réservé à l'ingénieur, contient des éléments simples (engrenages et sautoir notamment) agencés de façon complexe, de sorte que, sur l'extérieur les mouvements soient les plus simples et commodes. Pascal montre comment sa recherche vise à l'ergonomie, aucun détail n'étant laissé au hasard.

L'*Avis* prend ensuite la forme d'un avertissement concernant les contrefaçons éventuelles. En s'appuyant sur l'épisode du plagiat par un horloger de Rouen, Pascal justifie sa demande de privilège royal, sorte d'ancêtre du brevet d'invention. Ses mots sont particulièrement durs vis-à-vis des faussaires et de leurs œuvres : « Il lui [au Chancelier] plut de retrancher le mal dès sa

⁴ *Ibid.* p. 7-11.

⁵ *Ibid.* p. 25-29.

⁶ *Ibid.* p. 30-33.

⁷ PÉRIER Gilberte, PÉRIER Marguerite et PASCAL Jacqueline, *Lettres, opuscules et mémoires*, Paris, Auguste Vaton, 1845, p. 1-45.

⁸ PASCAL Blaise, *Œuvres complètes*, t. IV, La Haye, Detune, 1779, p. 12.

⁹ *Ibid.* p. 31.

¹⁰ *Ibid.* p. 14.

racine [...] par la grâce qu'il me fit de m'accorder un privilège, qui n'est pas ordinaire et qui étouffe avant leur naissance tous ces avortons illégitimes qui pourraient être engendrés¹¹. »

Avant de conclure, il revient sur la forme finale donnée à sa machine, fruit de nombreux perfectionnements (jusqu'à 50 prototypes) qui permirent grâce à des améliorations successives d'obtenir un modèle robuste, maniable et aisément transportable. Comme il a été dit, il ne donne aucune précision sur les pièces nécessaires pour la construction de la machine, ni sur leur agencement. Arguant qu'il serait trop fastidieux d'évoquer ces questions par écrit, et pensant sans doute le lecteur trop peu averti en la matière, il trouve peut-être, ce faisant, un moyen de laisser planer une part de mystère sur l'espace intérieur de la machine, sensée aiguïser la curiosité – comme le titre de l'*Avis* le suggère – mais sans doute également de préserver le secret de son invention face aux tentatives d'imitation. De même, il ne fournit aucune indication concernant la façon d'utiliser la machine, privilégiant la présentation orale et l'expérimentation. Enfin, l'*Avis* reste silencieux sur le prix de l'objet alors qu'il y est bien question de vente. C'est le *privilège du Roi* qui nous renseigne sur sa cherté (« ledit instrument est à présent à un prix excessif qui le rend, par sa cherté, comme inutile au public¹² ») et, par conséquent, sur le fait que Pascal ne réalisa pas le succès commercial qu'il escomptait. La machine qui devait aiguïser la *curiosité*, trouva plus souvent sa place, non sans ironie, dans des cabinets d'amateurs, auprès d'objets hétéroclites, que chez les comptables.

Un défi à la fois théorique et pratique

Dans l'histoire de la réalisation de la machine arithmétique, il est intéressant d'observer les multiples allers-retours entre théorie et pratique. Il faut commencer par s'arrêter sur l'origine du problème que Pascal veut résoudre. Celle-ci est explicitée dans la *Lettre au Chancelier* :

« Les longueurs et les difficultés des moyens ordinaires [il s'agit des méthodes par le jeton ou par la plume] dont on se sert, m'ayant fait penser à quelque secours plus prompt et plus facile, pour me soulager dans les grands calculs ou j'ai été occupé depuis quelques années en plusieurs affaires qui dépendent des emplois dont il vous a plu honorer mon père, au service de sa Majesté en la haute Normandie¹³. »

C'est donc à cause de fastidieux calculs que son père devait effectuer, que Pascal vint à l'idée d'une automatisation des opérations arithmétiques bien connues. La problématique est des plus concrètes, ce qui distingue la machine des instruments pensés pour résoudre des problèmes purement mathématiques : le compas trisecteur de Descartes ou le système articulé de Laisant, par exemple, dont l'invention est motivée par la résolution de problèmes légués par les géomètres grecs comme celui de la trisection de l'angle. Ce qui est plus étonnant, c'est la grande motivation dont Pascal fit preuve pour sa construction matérielle et la recherche d'une parfaite ergonomie.

Pour parvenir à ses fins, il dut résoudre deux problèmes : celui du report automatique de la retenue et celui des soustractions (puisque sa machine est conçue comme additionneuse). Le premier fut résolu de façon technique par l'utilisation d'engrenages et d'un sautoir qui assurent un mouvement en cascade dans la rotation des tambours (à la manière de nos compteurs kilométriques modernes). Le second par le recours aux compléments à 9 qui permet de réutiliser le mouvement de l'addition pour calculer une différence. À en croire Pascal lui-même, il trouva sans peine la solution de ces problèmes puisqu'il affirme dans l'*Avis* : « Je ne sais pas si, après le principe sur lequel j'ai fondé cette facilité, il en reste un autre dans la nature¹⁴. ». Évoquant la vie de son frère, Gilberte Périer, confirme bien que c'est l'agencement rigoureux des pièces qui lui demanda l'effort le plus important : « Ce travail le

¹¹ *Ibid.* p. 22.

¹² *Ibid.* p. 31.

¹³ *Ibid.* p. 8.

¹⁴ *Ibid.* p. 16.

fatigua beaucoup, non pas pour la pensée ou pour le mouvement qu'il trouva sans peine, mais pour faire comprendre aux ouvriers toutes ces choses¹⁵. »

Et c'est lors de la réflexion sur l'assemblage des pièces que Pascal ingénieur mit à profit ses connaissances de mathématicien. Il écrit dans l'*Avis* : « J'étais même obligé, suivant la méthode des géomètres, de représenter par des figures, les dimensions, la disposition et le rapport de toutes les pièces et comment chacune doit être placée pour composer l'instrument¹⁶. » L'auteur de *L'esprit géométrique* reproche d'ailleurs ce manque de connaissances des règles et des principes aux faussaires qui travaillent « en tâtonnant, c'est-à-dire sans mesures certaines et sans proportions réglées par art¹⁷ ». Ce sont aussi ces règles qu'il eut bien du mal à faire comprendre et respecter à ses ouvriers. Car, en effet, Pascal avoue son incapacité à façonner lui-même certaines pièces :

« Il n'était pas en mon pouvoir, avec toute la théorie imaginable, d'exécuter moi seul mon propre dessein, sans l'aide d'un ouvrier qui possédât parfaitement la pratique du tour, de la lime et du marteau, pour réduire les pièces de la machine dans les mesures et proportions que par les règles de la théorie je lui prescrivais¹⁸. »

Malgré les sources de conflit entre eux, il conclut sur la nécessité d'une collaboration entre le théoricien et l'artisan, qui l'un sans l'autre, ne peuvent parvenir seuls à la réalisation de la machine. Pour lui, l'art ne peut atteindre la perfection que par la pratique intense des règles théoriques : « Il faut nécessairement que l'art soit aidé par la théorie, jusqu'à ce que l'usage ait rendu les règles de la théorie si communes, qu'elle les ait enfin réduites en art¹⁹. » Inversement, pour devenir un parfait ingénieur, il faut avoir acquis une sérieuse expérience technique grâce, notamment, à l'observation des artisans, comme le souligne Pappus (IV^e siècle) dans sa *Collection mathématique* : « Celui qui s'est adonné aux sciences et a acquis de l'expérience dans les arts sera un excellent inventeur et constructeur d'ouvrages mécaniques. » Mais sans doute, dans le cas de Pascal, cette capacité d'invention est-elle aidée par la pratique de l'activité mathématique, activité elle-même créatrice, qui mêle étroitement théorie et pratique.

La place du savoir et du geste repensé

Comme Pascal l'évoque dans son *Avis*, c'est non sans un certain acharnement qu'il parvint à réaliser sa machine arithmétique sous une forme satisfaisante. On peut se demander pourquoi il s'est autant employé à parvenir à la construction effective de sa machine alors que sa diffusion et les services qu'elle pouvait rendre étaient nécessairement limités. Il apparaît clairement que la seule conception intellectuelle de l'objet ne lui suffisait pas, alors qu'il ne pouvait l'assembler sans l'aide d'un artisan. L'inépuisable source de motivation chez Pascal réside très certainement dans la nature même de son invention. Car cette machine se substitue à l'esprit humain, à l'intelligence, dans la mesure où l'utilisateur lui délègue le travail le plus complexe lorsqu'il s'agit d'effectuer des calculs.

Dans l'*Avis*, Pascal montre qu'il a pleinement conscience du changement du rapport à la maîtrise des savoirs : « Le plus ignorant y trouve autant d'avantage que le plus expérimenté, l'instrument supplée au défaut de l'ignorance ou du peu d'habitude et par des mouvements nécessaires, il fait lui seul, sans même l'intention de celui qui s'en sert, tous les abrégés possibles à la nature²⁰. » Plus loin, il écrit encore : « Elle fait d'elle-même ce qu'il désire, sans

¹⁵ PÉRIER Gilberte, PÉRIER Marguerite et PASCAL Jacqueline, *Lettres, opuscules et mémoires*, Paris, Auguste Vaton, 1845, p. 9.

¹⁶ PASCAL Blaise, *Œuvres complètes*, t. IV, La Haye, Detune, 1779, p. 13.

¹⁷ *Ibid.* p. 19.

¹⁸ *Ibid.* p. 20.

¹⁹ *Ibid.* p. 20.

²⁰ *Ibid.* p. 17.

même qu'il y pense²¹. » Ainsi, l'usager, comme s'il était esclave de ses calculs, serait délivré par la machine et son esprit libéré par elle : il entre les données, la machine automatise la procédure et sort le résultat souhaité ; il n'a plus besoin d'avoir une connaissance parfaite des techniques opératoires. Ainsi, la machine permet à tous de compter, même à ceux qui ne maîtrisent pas les règles de calcul, et offre le savoir aux ignorants pour peu qu'ils apprennent à s'en servir. Bien entendu, ils peuvent également tout ignorer de son fonctionnement, c'est-à-dire de son espace intérieur, et sont renvoyés à son espace extérieur. Cette innovation semble avoir beaucoup étonné à l'époque de Pascal dans la mesure où elle n'imitait pas un mouvement de la nature, mais la pensée humaine. Sa sœur Gilberte en témoigne : « Cet ouvrage a été considéré comme une chose nouvelle dans la nature, d'avoir réduit en machine une science qui réside tout entière dans l'esprit, et d'avoir trouvé le moyen d'en faire toutes les opérations avec une entière certitude, sans avoir besoin de raisonnement²². »

Cette citation amène à un nouveau paradoxe, celui de l'intelligence artificielle. Lorsque l'homme doit effectuer de longs calculs avec les jetons ou la plume, il peut se tromper (notamment à cause des retenues) là où la machine, grâce à son mouvement réglé, parvient à un résultat infaillible, à condition que les données lui soient correctement fournies. C'est donc parce qu'elle ne pense pas que la machine devient infaillible et dépasse l'esprit humain. Blaise Pascal écrit à ce propos : « Cette machine délivre celui qui opère par elle, de cette vexation, il suffit qu'il ait le jugement, elle le relève du défaut de la mémoire²³. » Il exprime le caractère extraordinaire de son invention : non seulement sa machine est « une troisième méthode pour faire toutes les opérations arithmétiques totalement nouvelle », mais en plus, elle remédie aux faiblesses de l'homme.

Enfin, ayant relégué le calculateur à son espace extérieur, la machine crée un nouveau rapport au geste, la distinguant fondamentalement des instruments de calcul précédents (abaque, boulier, etc.). Alors que l'opérateur devait auparavant intervenir par des gestes guidés par son esprit, la machine impose seulement à celui-ci de lui apporter son énergie mécanique en faisant tourner les roues dentées. Autrement dit, le calcul ne s'effectue plus véritablement à travers le geste de la main. Comparant le calcul à la machine avec les « méthodes de la plume et du jeton », Pascal évoque même la vitesse d'exécution qui « est pareille à l'agilité de la main de celui qui opère ». La main s'inscrit dans le processus d'automatisation du calcul et l'exactitude de ce dernier ne réside plus dans les compétences d'un calculateur mais dans l'habileté d'un manipulateur.

Un objet pédagogique

La machine arithmétique de Blaise Pascal est un lien entre technologie et mathématiques au travers d'un système d'engrenages. Le discours autour de cet instrument permet de faire passer à la fois des notions patrimoniales, mathématiques et techniques.

Dans le cadre de ses activités de médiation, le muséum Henri-Lecoq a mis au point une mallette pédagogique sur les engrenages (**photo 4**). La découverte des engrenages entre dans les programmes du Cycle 3. Cette mallette est donc proposée aux enseignants afin d'approfondir l'étude de ces mécanismes et leur utilisation ainsi que la transmission du mouvement.

Les objectifs de cette mallette sont tant la connaissance que la démarche scientifique : observation, tentative de reproduction, comparaison et déduction devront amener l'élève à la compréhension du montage d'engrenages en s'appuyant sur l'analyse de la Pascaline. La mallette est mise à la disposition des écoles de la région Auvergne pour compléter une visite

²¹ *Ibid.* p. 17.

²² PÉRIER Gilberte, PÉRIER Marguerite et PASCAL Jacqueline, *Lettres, opuscules et mémoires*, Paris, Auguste Vaton, 1845, p. 9.

²³ PASCAL Blaise, *Œuvres complètes*, t. IV, La Haye, Detune, 1779, p. 17.

au musée, ou pour découvrir en classe cette machine à calculer quand les élèves ne peuvent pas se déplacer. Les enseignants doivent par contre venir la chercher au musée, après l'avoir réservée par téléphone. Nous leur proposons un temps de prise en main avec un médiateur du musée lors de la réservation. Ce temps a lieu le jour où ils viennent chercher la mallette. Les professeurs trouvent, sur nos pages internet, le document, au format pdf, présentant les activités. Ils peuvent ainsi commencer à travailler les séquences avant d'avoir le matériel. Régulièrement, nous présentons la mallette lors de soirée enseignants ou lors de portes ouvertes. Nous proposons aussi sa découverte lors d'activité avec les futurs professeurs, en formation à l'ESPE.

La fonction éducative est inscrite dans la définition des missions des musées depuis leur création, à la révolution française. Aujourd'hui, plus de 450 musées sont dotés d'un service éducatif, en mesure de répondre aux demandes des milieux scolaires. La loi n° 2202-5 du 4 janvier 2002 relative aux musées de France précise leurs missions et notamment leur fonction éducative, dans l'article 2, " Concevoir et mettre en œuvre des actions d'éducation et de diffusion visant à assurer l'égal accès de tous à la culture " et dans l'article 7, " Chaque musée de France dispose d'un service ayant en charge les actions d'accueil des publics, de diffusion, d'animation et de médiation culturelles. Ces actions sont assurées par des personnels qualifiés...". Le Musée Henri-Lecoq possède ce label Musée de France et a donc un service des publics. Au sein de ce dernier, il existe un service de prêt et le service éducatif, composé de deux professeurs mis à disposition par l'Inspection académique et le rectorat : le premier est professeur des écoles et le second est professeur de SVT au lycée. Habités à travailler dans le domaine des sciences naturelles, la création de l'espace Blaise Pascal et l'élaboration d'outils pédagogiques ont nécessité de renouveler outils et méthodes de travail. La mallette « Des engrenages pour additionner » fait partie du service de prêt du musée qui est composé de plusieurs mallettes pédagogiques, d'animaux naturalisés, de roches ...

Nos professeurs détachés participent activement à la conception des mallettes pédagogiques et à la préparation des visites commentées ou ateliers. Notre professeur des écoles détaché a travaillé sur cette mallette « Des engrenages pour additionner » et a testé les différentes séquences dans sa classe de CM1/CM2 (**photo 5**). Les médiateurs du musée étaient présents comme observateurs. Les élèves se sont montrés enthousiastes. Par leurs questions et leurs remarques, nous avons amélioré la mallette. Pour notre professeur détachée, les séquences bien cadrées et le matériel mis à disposition ont représenté un atout non négligeable. Une présentation a également été faite auprès de professeurs de collèges et lycées, en formation continue avec la Maison pour la science. Leur question et leur remarque nous ont également permis d'ajuster le contenu de cet outil.

À chaque retour de prêt, nous essayons de prendre quelques minutes avec le professeur pour faire un bilan oral de cet emprunt. Il ressort une satisfaction des élèves à pouvoir manipuler les engrenages. Les professeurs sont quant à eux satisfaits d'allier la découverte des engrenages et la révision de connaissances mathématiques. Une évaluation qualitative plus précise serait à présent à mettre en place.

Découvrir et manipuler des engrenages (séances 1 et 2)

Les premières séances reposent sur l'observation et la manipulation des engrenages. L'objectif est de se familiariser avec la transmission et la transformation d'un mouvement.

Afin de découvrir la machine arithmétique de Blaise Pascal, il est possible de diffuser la vidéo de la démonstration de la machine arithmétique en classe. Lors d'une visite au musée, une démonstration par un médiateur est possible. Les élèves doivent ensuite réaliser trois montages afin d'appréhender les sens de rotations. Ils doivent également maîtriser le

vocabulaire technique associé aux engrenages (dents, roues dentées, engrenages, pignon et couronne) à la fin de la première séance.

La deuxième séance commence par la réalisation d'un nouveau montage qui permet de transformer un mouvement vertical en un mouvement horizontal. Puis dans un second temps, ce montage (pignon et couronne) permet de montrer aux élèves que toutes les roues ne tournent pas à la même vitesse.

Lors de cette séance, les élèves s'intéressent aux roues de l'inscripteur des machines arithmétiques de Blaise Pascal : en base 10, elles sont composées de 10 branches et de 10 crans (numérotés de 0 à 9). Pour celles en base 20, elles sont composées de 20 branches et de 20 crans (numérotés de 0 à 19). Les élèves prennent conscience que la machine peut s'adapter aux différentes bases de numération. Cette adaptation est nécessaire à l'époque de Blaise Pascal car monnaies et mesures ne sont pas en base 10.

Cette deuxième séance permet d'appréhender le rôle d'un système d'engrenages :

- Changer de plan de rotation
- Transformer un mouvement
- Démultiplier une force, c'est-à-dire augmenter la force (au détriment de la vitesse).

Construire avec des engrenages (séance 3)

Les séances d'expérimentation se terminent par une reconstitution partielle des mécanismes à l'œuvre dans la machine de Pascal (atelier proposé lors du colloque). Le rôle du sautoir est ainsi mis en évidence.

La troisième séance commence par une observation du montage de la machine pour essayer de le reproduire :

- il faut quatre roues dentées pour le réaliser : une roue dentée symbolise la roue de l'inscripteur, une autre symbolise le cylindre et deux autres roues dentées permettent le changement de plan de rotation.
- l'axe de la roue de l'inscripteur et l'axe du cylindre du totaliseur sont perpendiculaires.

Les groupes disposent d'un sachet contenant : des roues dentées, des axes et des supports pour réaliser le montage d'un bloc élémentaire de la machine. Une fois le montage réalisé, se pose une première question : comment obtenir une machine complète ? Les élèves échangent leurs idées entre eux ; cette discussion peut être animée par le professeur. Des tests peuvent être faits par le professeur sur demande des élèves. Pour obtenir une machine complète, on peut « coller » les blocs réalisés par les élèves. L'enseignant regroupe donc sur une table les blocs élémentaires réalisés par les élèves. À partir de ces blocs, le professeur va réaliser une opération nécessitant une retenue. Les élèves peuvent alors observer que le report de la retenue des unités aux dizaines n'a pas lieu. Les élèves doivent alors identifier le problème. Il leur est demandé de proposer une solution. L'objectif n'est pas qu'ils inventent le « sautoir » mais qu'ils aient l'intuition qu'il faut placer une pièce qui relie les deux blocs. L'enseignant peut alors introduire le « sautoir » et visionner le film sur le fonctionnement de la maquette du sautoir.

Blaise Pascal a dû faire face à ce même problème : la transmission des retenues. Il a eu l'idée d'inventer une pièce appelée « sautoir » qui permet de pousser la roue des dizaines d'un cran quand la roue des unités a fait un tour complet.

Les engrenages existent dans bien des outils que nous utilisons. Cette troisième partie permet de faire un lien entre la machine à calculer de Blaise Pascal et des objets du quotidien. La fabrication des pièces de la Pascaline nécessitait une grande précision. Blaise Pascal les faisait construire par des horlogers. Afin de montrer la minutie de pièces d'horlogerie, un réveil transparent est fourni. Les élèves peuvent observer que le mécanisme est composé d'engrenages. Il existe d'autres objets qui utilisent des engrenages : essoreuse à salade, batteur

à œufs, boîte à musique, microscope, bicyclette, boîte de vitesse dans les voitures, moulin à vent, correcteur souris, train à crémaillère, tire-bouchon, grue, chignole... Si les élèves ne connaissent pas d'objet utilisant des engrenages, une vidéo peut leur être projetée (disponible sur le <http://www.lesite.tv/>). Une quatrième séquence peut être réalisée pour approfondir la connaissance de ces objets.

Utilisation de la version numérique de la machine arithmétique de Blaise Pascal

Pour aller plus loin, les élèves peuvent manipuler la machine virtuelle sur un ordinateur (**photo 6**). En un clic, ils enlèvent le caisson et accèdent aux différentes pièces : les roues de l'inscripteur, les engrenages, les cliquets, les cylindres et les sautoirs. Il s'agit d'une visite à l'intérieur du mécanisme. Les engrenages et les autres pièces sont visibles en action.

Les élèves sont également amenés à tester librement la façon de faire les calculs. Additions et soustractions sont abordées de manière ludique. Pour observer le sautoir en action, ils vont devoir faire des opérations impliquant une retenue et réfléchir à son rôle fondamental dans le calcul. En effet, les erreurs de calcul sont liées aux retenues. Grâce au sautoir, la machine arithmétique de Blaise Pascal permet de ne plus penser à cette retenue. On peut s'abstraire des erreurs de calculs qu'entraîne son oubli ou sa mauvaise position. Les élèves appréhendent des notions mathématiques et techniques à travers la découverte et l'étude d'un objet patrimonial : la machine arithmétique de Blaise Pascal. Ils prennent conscience de la réflexion plus ou moins complexe, nécessaire pour mettre au point des instruments que l'on utilise au quotidien. Le professeur peut commencer une discussion autour de la technologie (ici les engrenages), de son utilité (simplifier nos actions et éviter des erreurs de calcul) et de son utilisation. Cette discussion peut trouver un écho dans l'éducation au numérique et l'utilisation des nouvelles technologies.

Conclusion

Près de quatre siècles après son invention, on constate que la machine à calculer de Blaise Pascal conserve toute sa jeunesse et reste source de nouvelles inspirations pour les didacticiens d'aujourd'hui autour de la numération (la Pascaline 0+1 élaborée par le Laboratorio delle Macchine Matematiche autour de l'équipe de Michela Maschietto). Elle s'avère être un support technique pour une approche ludique de l'enseignement de la mécanique et l'utilisation des engrenages au programme du cycle 3, mais aussi un moyen de faire comprendre le mécanisme de certaines opérations arithmétiques (notamment celui des retenues) et d'en faciliter l'appropriation. La machine arithmétique de Pascal réalise ainsi une nouvelle synthèse en liant apprentissage des mathématiques et enseignement technique.

Bibliographie

- BASCOUL Christophe, « Java3D et la pascaline », <http://christophe.bascoul.free.fr/spip.php?article20> (consulté le 29 décembre 2015).
- BERNARD Claire, DEL PRETE Aurélie, GARMY Éliane, SCHMALTZ Amandine et VIDAL Nathalie, « Apport scientifique, éducatif et ludique de l'espace Blaise Pascal au muséum Henri-Lecoq de Clermont-Ferrand », *La Lettre de l'Ocim*, n°152, 2014, p. 22-29.
- CHIRON Yves, *Pascal, le savant, le croyant : une biographie*, Paris, Ed. du Jubilé, 2009.
- CLÉRO Jean-Pierre, « Une arithmétique pour la main », in Jean-Pierre CLÉRO (dir.), *Les Pascal à Rouen 1640-1648, Actes du colloque de l'université de Rouen*, Université de Rouen, 2001.
- HÉBERT Élisabeth (dir.), *Instruments scientifiques à travers l'histoire*, Paris, Ellipses, coll. « IREM - Épistémologie et Histoire des Mathématiques », 2004.

MARGUIN Jean, *Histoire des instruments et machines à calculer : trois siècles de mécanique pensante, 1642-1942*, Paris, Hermann, 1994.

MOURLEVAT Guy, *Les machines arithmétiques de Blaise Pascal*, Clermont-Ferrand, La Française d'Édition et d'Imprimerie, 1988.

PASCAL Blaise, *Œuvres complètes*, t. IV, La Haye, Detune, 1779.

PÉRIER Gilberte, PÉRIER Marguerite et PASCAL Jacqueline, *Lettres, opuscules et mémoires*, Paris, Auguste Vaton, 1845.

TATON René, « Sur l'invention de la machine arithmétique », *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, tome 16, n°2, 1936, p. 139-160.

TEMAM Daniel, « La Pascaline, la machine qui relève du défaut de la mémoire », in Alexandre MOATTI (dir.), *Regards sur les textes fondateurs de la sciences*, vol. 1, Paris, Cassini, 2010.

VIDAL Nathalie et VOGT Dominique, *Les machines arithmétiques de Blaise Pascal*, vol. V : *histoire des sciences et des techniques*, Clermont-Ferrand, Muséum Henri-Lecoq, Les collections du Muséum Henri-Lecoq, 2011.

Photo 1 : La machine de Marguerite Périer, exemplaire en comptes décimaux présentée au muséum Henri-Lecoq (cliché Ville de Clermont-Ferrand / Muséum Henri-Lecoq / A. Girard)



Photo 2 : Détail de la forme du sautoir (pascaline virtuelle) et schéma du mécanisme élémentaire de la machine arithmétique de Blaise Pascal (cliché Ville de Clermont-Ferrand / Muséum Henri-Lecoq / C. Bascoul et N. Vidal)

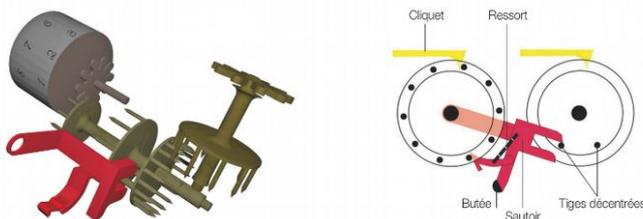


Photo 3 : Détail de la platine de la machine de Marguerite Périer avec la baguette mobile permettant de choisir le mode addition ou soustraction (ici en mode addition) (cliché Ville de Clermont-Ferrand / Muséum Henri-Lecoq / N. Vidal)



Photo 4 : Montage réalisable avec le contenu de la mallette « engrenages » (Ville de Clermont-Ferrand / Muséum Henri-Lecoq /S. Vidal)

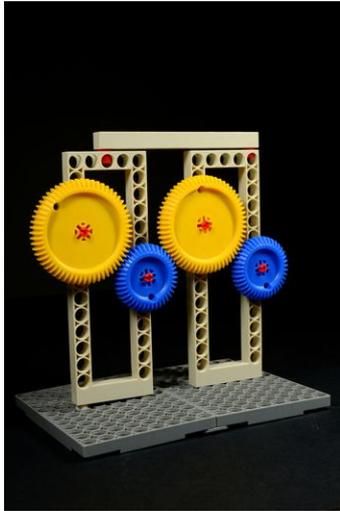


Photo 5 : Manipulation du contenu de la mallette « engrenages » par les élèves (Ville de Clermont-Ferrand / Muséum Henri-Lecoq /S. Vidal)

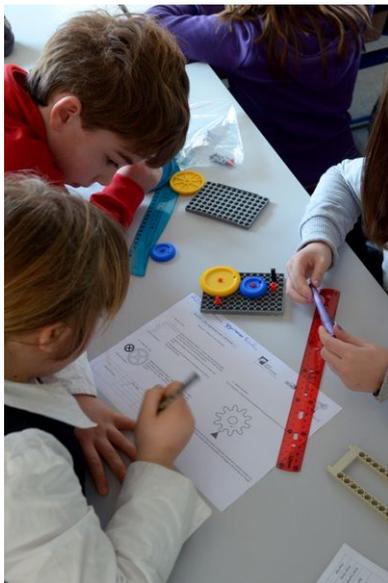


Photo 6 : La pascaline virtuelle, possibilité d'ouvrir la machine et de voir son mécanisme (Ville de Clermont-Ferrand / Muséum Henri-Lecoq / A. Schmaltz)

