

La machine à calculer continue de Tchebychev et le reporteur différentiel

par Alain Guyot



© Государственный музей истории Санкт-Петербурга
(*Musée national d'histoire de Saint-Pétersbourg*)

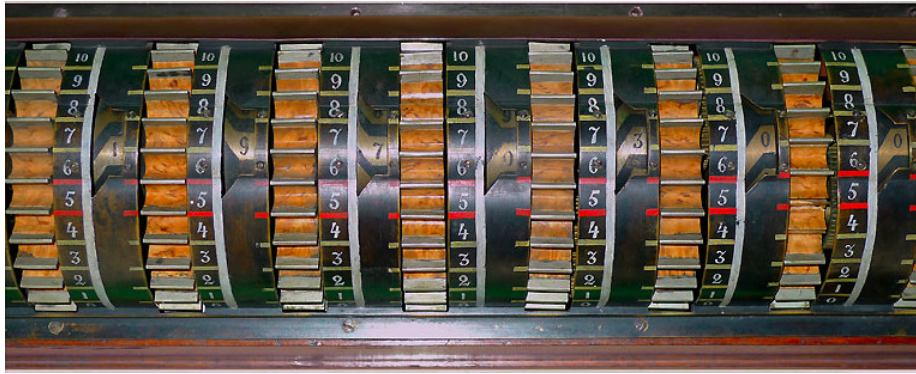
1. Introduction

Dans la plupart des calculateurs mécaniques les nombres entiers sont représentés par des tambours cylindriques enfilés sur le même axe. Les valeurs des chiffres sont peintes séquentiellement sur le périmètre des tambours. Ce système compact facilite l'addition modulo 10 des chiffres. Les tambours ne devraient prendre autour de leur axe que des positions angulaires discrètes, et passer brutalement de l'une à l'autre lors de l'addition. Cependant les engrenages différentiels épicycloïdaux permettent d'ajouter les mouvements continus et en fait d'aller vite.

Nous étudierons l'addition de la machine de Tchébichef de 1876, puis l'évolution d'une machine à additionner Burroughs de 1912 et 1915, et enfin une machine à calculer Marchant de 1945 qui fonce à 1 350 tours/minute.

2. Additionneur de Tchébichef

Le célèbre mathématicien russe Pafnouti Lvovitch Tchebychev (16/05/1821–8/12/1894) est aussi l'inventeur de plusieurs machines à calculer. Celle représentée ci-dessus, fabriquée vers 1876 peut faire des additions et des soustractions de nombres ayant jusqu'à 10 chiffres. Pour le transport, un couvercle en bois protégeait la partie supérieure.



Le mécanisme est caché par un capot hémicylindrique en tôle peint en noir. La somme apparaît en noir sur fond clair dans des lucarnes percées au sommet de ce capot. La valeur affichée sur la photo ci-dessus est 0970300. Des bandes blanches verticales peintes sur le capot délimitent les chiffres. Enfin la partie supérieure de roues crantées fait saillie à travers des fenêtres percées dans le capot. Les crans sont numérotés grâce à des chiffres peints en blanc sur le capot, à droite de chaque cran.

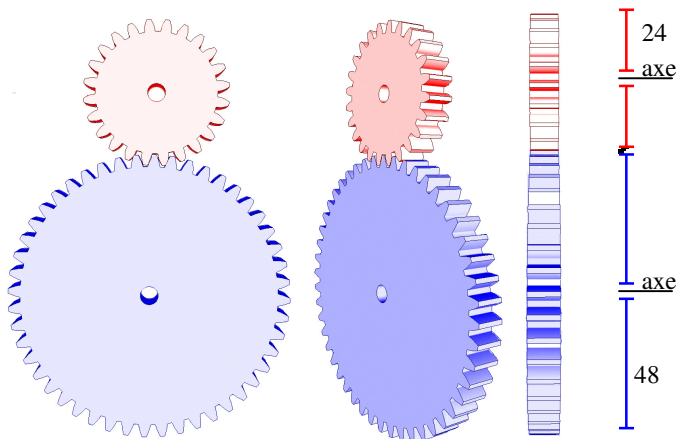
Cette machine fut par la suite complétée pour exécuter aussi la multiplication et la division.

3. Mode d'emploi

Pour ajouter un chiffre, on introduit un stylet dans un cran d'une roue *réceptrice* crantée, à coté de la valeur de ce chiffre peinte en blanc sur le capot, puis on amène ce stylet en butée vers 0, faisant ainsi tourner la roue *réceptrice* d'un angle proportionnel à la valeur du chiffre. Pour ajouter un nombre, on ajoute tous ses chiffres par les roues *réceptrices* correspondant à leur rang, l'ordre de pose des chiffres est indifférent.

Pour soustraire, on fait tourner les roues *réceptrices* dans le sens opposé, c'est-à-dire qu'on introduit le stylet dans le cran à coté du 0 puis on le ramène en face du chiffre inscrit en blanc. Pour remettre à zéro, il suffit de soustraire la somme apparaissant dans les lucarnes.

4. Représentation bâton des engrenages

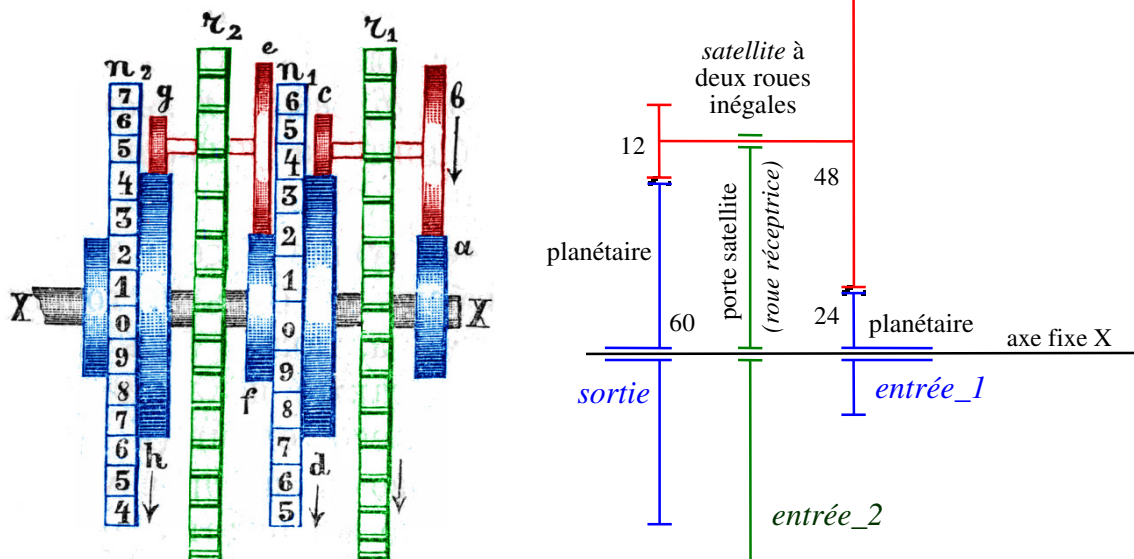


Dans le présent article les engrenages sont représentés par des bâtons colorés. Les axes et les supports fixes sont dessinés en noir. Le nombre de dents des engrenages est indiqué près du bâton représentant l'engrenage.

Les engrenages sur une même verticale sont engrenés et entraînés l'un par l'autre.

5. Fonctionnement des trains épicycloïdaux

La machine de Tchébichef est faite d'un empilement sur un axe fixe X—X de roues *réceptrices* crantées r_i pour la pose des chiffres, alternant avec des tambours d'affichage n_i sur la tranche desquels sont peints les chiffres apparaissant dans les lucarnes. La figure ci-dessous à gauche représente les rangs 1 et 2.



Les tambours d'affichage sont reliés entre eux par un *train épicycloïdal avec satellite à deux roues*. La rotation de la *sortie*, qui porte le tambour d'affichage (non représenté sur la figure de droite) est la somme pondérée des rotations des *entrée_1* et *entrée_2*. L'*entrée_1* est la *sortie* du rang immédiatement à droite et l'*entrée_2* est la *roue réceptrice* crantée.

Faisons tourner l'*entrée_1* seule. Elle entraîne le *satellite* par des engrenages de rapport 24/48. A son tour ce *satellite* entraîne la *sortie* par des engrenages de rapport 12/60. En simplifiant le produit de ces rapports on constate que la *sortie* tourne de 1/10 de l'angle de

$$l'entrée_1 : \frac{24}{48} \times \frac{12}{60} = \frac{1}{10}.$$

Faisons maintenant tourner simultanément l'*entrée_1* et l'*entrée_2* d'un certain angle. Cela entraîne la *sortie* du même angle. On en déduit :

$$sortie = \frac{1}{10} entrée_1 + \frac{9}{10} entrée_2 \text{ (formule de Willis}^1\text{)}$$

Admiron la grande simplicité de ce montage, chaque rang comporte seulement trois pièces mobiles: sur le même axe X—X un tambour d'affichage où sont fixés de part et d'autre deux engrenages de 60 et 24 dents et une roue crantée portant un satellite, et enfin le satellite de deux engrenages de 12 et 48 dents dont l'axe est porté par la roue crantée.

6. Choix du train de réduction

Il y a de nombreuses façons d'obtenir une réduction de 1/10, comme par exemple 10/30×9/30. Tchebichef a choisi des engrenages qui ont le même pas de denture car les sommes des diamètres des deux paires sont égaux: 60 + 12 = 24 + 48.

7. Fonctionnement arithmétique

Lorsqu'un tambour d'affichage a tourné de 10 chiffres (c'est-à-dire passé une fois de 9 à 0) il entraîne par *entrée_1* le tambour immédiatement à sa gauche de un chiffre, réalisant ainsi la propagation de retenue.

Il faut également que la rotation de *n* crans d'une roue *réceptrice* entraîne la rotation du tambour d'affichage suivant de *n* chiffres. Il faut enfin que la demi-part supérieure de la roue réceptrice laissée accessible par le capot comporte au moins 10 crans. Comme le tambour d'affichage doit porter un multiple entier de 10 chiffres, le choix de 30 chiffres sur le tambour

¹ Robert Willis, Principles of mechanism, Longmans, Green & Co., London, 1st edition 1841, 2nd edition 1870

conduit à 27 crans sur la roue réceptrice. On vérifie que l'avancement de n crans, c'est à dire $n/27$ de tour, de la roue réceptrice conduit par l'entrée_2 à $n/30$ de tour, c'est-à-dire avancer de n chiffres la sortie portant le tambour d'affichage : $n \times \frac{1}{27} \times \frac{9}{10} = n \times \frac{1}{30}$.

8. Propagation continue

Faisons une expérience virtuelle. Supposons que les tambours affichent 0999999 dans les lucarnes et qu'on ajoute 1. Alors le tambour des unités va avancer d'un chiffre et passer de 9 à 0. Cependant le tambour des dizaines va avancer d'un dixième de tour, le tambour des centaines d'un centième de tour, et ainsi de suite. Il est probable que certains tambours ne bougent même pas à cause des jeux inévitables des engrenages de la machine. Le résultat est manifestement absurde.

L'erreur vient d'une prémisse : il n'est pas possible d'afficher proprement 0999999. Si le tambour de l'unité affiche 9, alors la position du tambour des dizaines dans la lucarne est 9,9 et celui des centaines 9,99. Ces positions sont très proche² de 0.

Les lucarnes sont assez grandes pour dévoiler à la fois le 9 et le 0 : $0 \frac{9}{9}$ ce qui est ambigu.

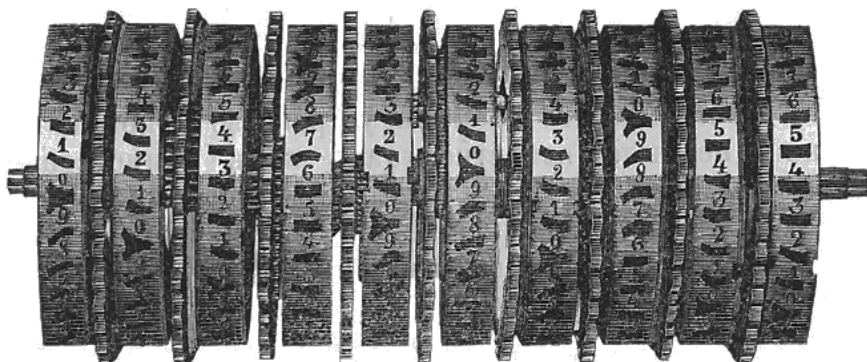
Avant l'addition on affiche : $0 \frac{1}{0} \frac{0}{0} \frac{0}{0} \frac{0}{0} \frac{0}{0} \frac{0}{0} 9$, et après l'addition de 1 : $0 \frac{1}{0} \frac{0}{0} \frac{0}{0} \frac{0}{0} \frac{0}{0} \frac{0}{0} 0$

Si la valeur d'un chiffre est ambiguë, c'est qu'il est suivi à sa droite par un chiffre entre 9 et 0. Si ce chiffre suivant est 9 (ou légèrement inférieur), il faut lire le chiffre du bas de la lucarne, si ce chiffre est 0 (ou légèrement supérieur), il faut lire le chiffre du haut de la lucarne. Si ce chiffre suivant est lui-même ambigu, $\frac{0}{9}$, il faut d'abord lever son ambiguïté.

Heureusement, le chiffre des unités n'est jamais ambigu.

Ainsi $0 \frac{1}{0} \frac{0}{0} \frac{0}{0} \frac{0}{0} \frac{0}{0} \frac{0}{0} 9$ doit se lire 00999999 et $0 \frac{1}{0} \frac{0}{0} \frac{0}{0} \frac{0}{0} \frac{0}{0} \frac{0}{0} 0$ se lire 01000000.

En quelle que sorte, c'est à la lecture du résultat que l'utilisateur propage certaines retenues. Pour aider à retenir ces deux règles, des traits noirs sont dessinés sur les tambours entre les chiffres, pointant vers le bas pour 8 et 9 et vers le haut pour 0 et 1, et vers le milieu pour les autres.



Bien sûr 0000000 ne s'affiche pas non plus. Le chiffre unité ou un chiffre suivi par 4 ou 5 sont seuls centrés³ dans la lucarne.

Au remontage de la machine, il est important d'aligner tous le chiffres 5 des tambours sur une génératrice du cylindre au centre des lucarnes.

9. Problème des jeux

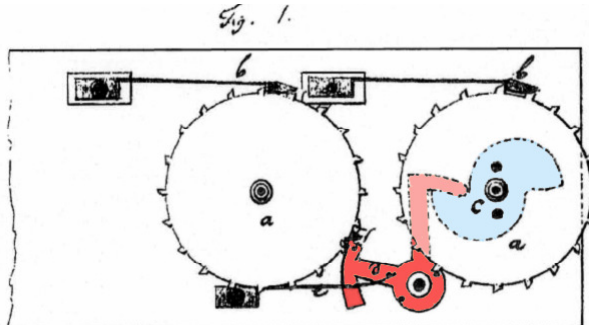
Tchebychev a beaucoup travaillé la théorie des jeux mathématiques. Ici il s'agit des jeux mécaniques des roues sur leur axe et des dents d'engrenages. Les jeux sont en principe nécessaires pour donner un interstice à la lubrification, mais ils sont plutôt dus à des tolérances d'usage. On compte 5 sources de jeu par chiffre (3 axes et 2 engrenements) soit pour dix chiffres 50 sources de jeu qui peuvent se cumuler.

² 9,99 est proche de 0, modulo 10 bien sûr

³ La base de numération a la mauvaise propriété d'être paire, il n'y a donc pas un chiffre équidistant de 0 et 9.

Si on veut que l'imprécision du chiffre poids fort soit imperceptible, disons à 10% de la position des chiffres, comme il y a 30 chiffres par tour, cela demande une précision de 1/300 tour. En combinant avec les 50 sources de jeu, cela exige pour chaque roue une précision moyenne de 1/1500 tour.

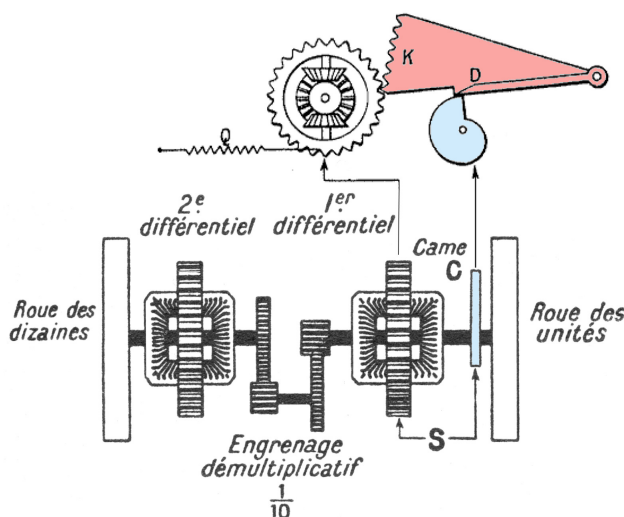
10. Reporteurs à différentiel



Du temps de Tchebychév (1876), la machine à additionner de Blaise Pascal (1645) avait déjà été bien améliorée. La machine du docteur Roth (1842) utilise une came en forme de spirale équiangle ou spirale de Bernoulli⁴ pour bander le ressort à lame du reporteur dont la détente provoque par un cliquet l'avancement de une unité de la roue à sa gauche.

Comparons les machines de Roth et Tchébichef :

- Lecture : Dans les deux machines la lecture se fait à travers une lucarne. Tchébichef utilise un tambour à 3 décades, Roth un disque à 2 décades.
- Affichage : Tchébichef : mouvement continu des chiffres, affichage ambigu, Roth mouvement discontinu, affichage clair et précis
- Opération : la machine de Tchébichef effectue l'addition et la soustraction, le machine de Roth l'addition seulement
- Parallélisme : Pour éviter tout disfonctionnement, il faut entrer les chiffres un par un dans la machine de Roth. Avec la machine de Tchébichef on peut les entrer simultanément. En d'autres termes le système de Roth ne se prête pas à multiplication/division, contrairement à Tchébichef.
- Vitesse : La machine de Tchébichef n'a pas de pièce à mouvement alternatif. Elle est potentiellement beaucoup plus rapide, ce qui présente peu d'intérêt pour l'addition, mais certainement beaucoup pour la multiplication ou la division.



11. Le meilleur des deux

En 1915, la machine à additionner de Burroughs utilise deux différentiels en série. Le principe en est donné ci-contre par René Taton. La came C est semblable à celle du docteur Roth. Quand la roue des unités va de 0 à 9 la came C lève le segment d'engrenage K. Son mouvement dans le 1^{er} différentiel compense exactement le mouvement de la roue des unités et la sortie ne bouge pas. Quand la roue des unités passe de 9 à 0, le segment K est relâché et ramené par le ressort Q, son mouvement se rajoute d'un coup et la sortie du 1^{er}

différentiel qui fait un tour complet. On a donc en sortie de ce 1^{er} différentiel un mouvement discontinu. Le 2^e différentiel est pour l'addition proprement dite. Ce système peut être très rapide, car si le reporteur n'a pas assez de temps pour revenir sous la pression du ressort

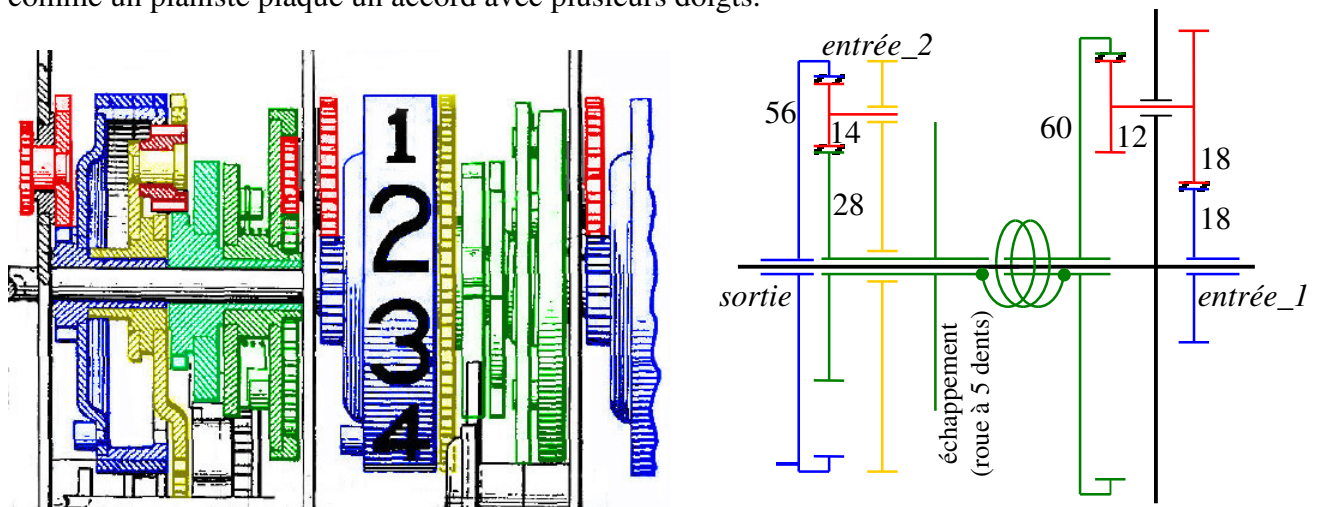
⁴ Le docteur Roth appelle cette came un « limaçon », certainement par analogie avec le limaçon des horloges. Rien à voir cependant avec le limaçon du père de Blaise Pascal.

lorsqu'il est relâché, l'additionneur fonctionne comme celui de Tchébichef. On a une « discrétisation paresseuse⁵ » qui s'exécute lorsque la série d'additions successives est terminée.

12. L'additionneur Burroughs de 1911



Les additionneurs Burroughs sont des machines à clavier complet effectuant l'addition. La manivelle sur le côté est la remise à zéro, que ne possédait pas son concurrent du moment : le « comptometer ». Le clavier complet permet de saisir plusieurs chiffres simultanément comme un pianiste plaque un accord avec plusieurs doigts.



Le modèle d'additionneur Burroughs de 1911 propage la retenue de la façon suivante :

Un premier train d'engrenages divise *entrée_1* par 5 ($18/18 \times 12/60$).

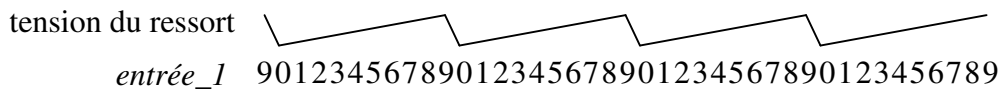
Puis un engrenage différentiel épicycloïdal divise par 2 ($28/14 \times 14/56$).

Un tour complet de *entrée_1* entraîne bien un dixième de tour de la *sortie*. L'engrenage différentiel sert également à ajouter *entrée_2*.

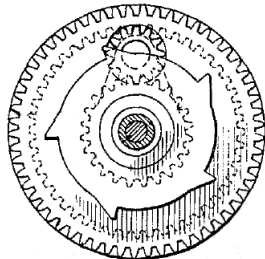
Cependant entre les deux trains d'engrenage, la transmission s'effectue par un ressort enroulé autour du moyeu de l'engrenage à 60 dents. Une roue à 5 dents obliques bloque la

⁵ Paresseux : qui en fait le moins possible et le plus tard possible

transmission et ne la laisse échapper, d'un cinquième de tour, que lorsque la roue *entrée_1* passe de 9 à 0.



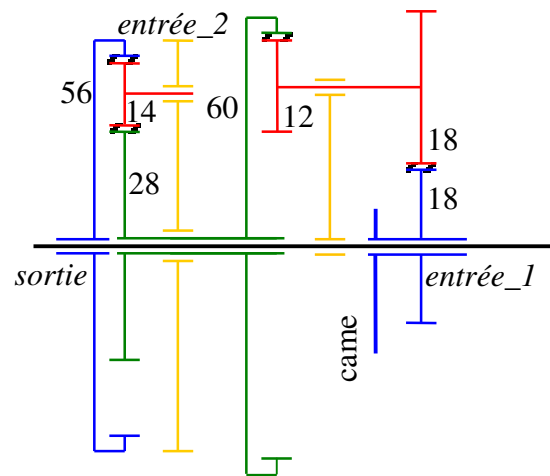
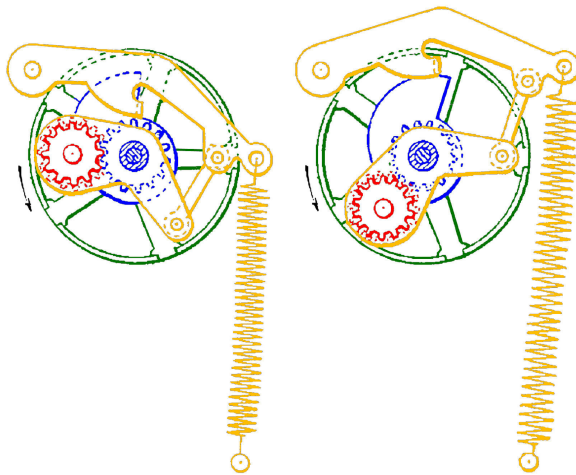
Le ressort utilisé par Burroughs est inspiré du « Comptometer » de Felt et Tarrant de 1887.



Cependant le principe de fonctionnement du comptometer est très différent. Le comptometer fait les additions en deux temps car il n'utilise pas d'engrenage différentiel qui permet d'ajouter simultanément la retenue et *entrée_2*. Dans cette machine, le ressort d'une position est relâché lorsque deux conditions sont satisfaites : - 1) le chiffre précédent est passé de 9 à 0, et - 2) la touche de cette position a été complètement enfoncée jusqu'à la butée, c'est-à-dire que l'addition modulo 10 est terminée. Grâce à cette deuxième condition il n'y a pas de conflit entre l'addition modulo 10 et la retenue.

13. L'additionneur Burroughs de 1915

En 1915, l'additionneur Burroughs est modifié pour supprimer l'échappement et le ressort de transmission. Le train d'engrenages à axes fixes du réducteur 1/5 est remplacé par train épicycloïdal avec satellite à deux roues inégales. L'axe de ce satellite oscille sous l'effet d'une came spirale solidaire de *entrée_1*.



Entre 0 et 9, le satellite soustrait de *entrée_1* une giration égale à celle de *entrée_1* ce qui fait que l'engrenage à 60 dents ne bouge pas. Lors du passage de 9 à 0, le satellite est ramené par le ressort et l'engrenage à 60 dents avance brusquement de 1/5 de tour.

La came ne peut tourner que dans un seul sens (flèche), interdisant la soustraction par inversion du sens de rotation de l'addition.

La photo ci-contre montre le premier différentiel (poids faible) et les satellites à deux roues inégales de l'additionneur de Burroughs.

Le système de came est très peu visible.

Tout le compteur se déplace d'un bloc vers le haut pour désengrèner toutes les *entrée_2* afin de remettre le compteur à zéro.

On remarque le modèle de 1915 tourne en sens inverse de celui de 1912.

14. La MARCHANT FIGUREMATIC de 1945

La machine à calculer électrique Marchant Figurematic conçue en 1945 tourne à grande vitesse : 1 350 tours/minute, soit plus de 22 additions par seconde en pointe. Elle comporte de nombreux verrouillages qui suppriment pratiquement les pannes consécutives aux fausses manœuvres. Elle possède un clavier complet avec viseur de pose et deux accumulateurs sur un chariot mobile : un compteur de tour et un totalisateur.

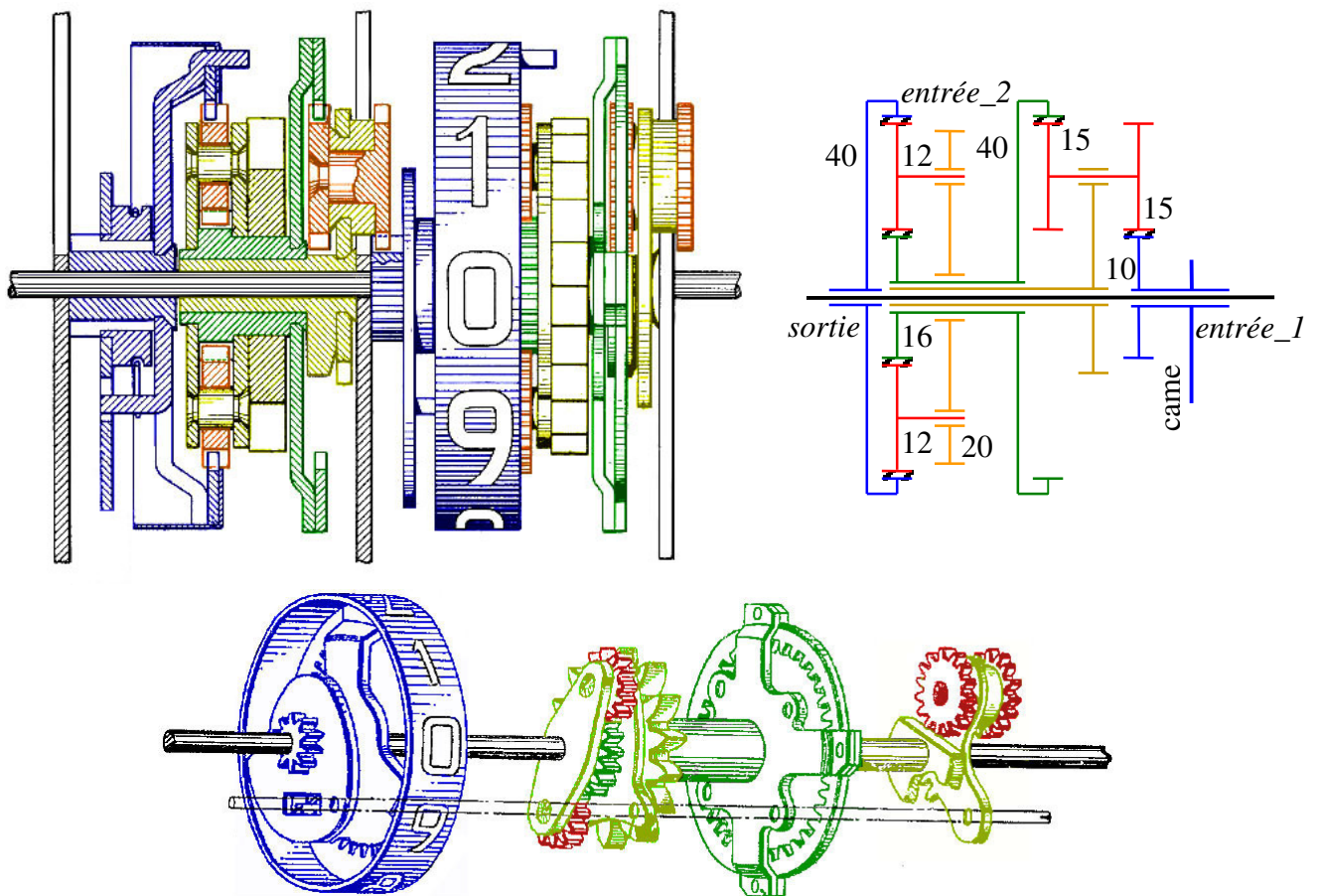


La multiplication est très rapide car elle s'opère pendant la pose du multiplieur à l'aide d'une rangée verticale de touches à droite du tableau, en commençant par le chiffre le plus significatif. La division est automatique après le cadrage manuel du diviseur par rapport au dividende. La machine comprend plus de 4 000 pièces manufacturées.

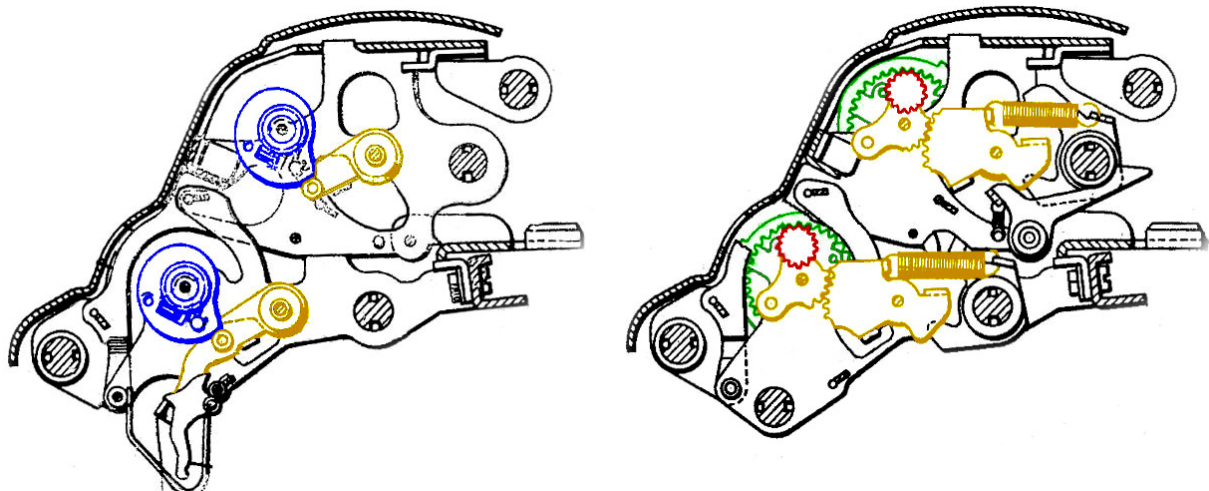
Cette machine a été utilisée jusqu'à la fin des années 60 en travaux pratiques de calcul de la section mathématiques appliquées de l'INP Grenoble.

15. L'addition de la Marchant

Pour chaque chiffre, l'additionneur comprend deux différentiels épicycloïdaux, de rapport $10/40 \times 16/40 = 1/10$ sur le chemin de retenue. Le deuxième différentiel sert à l'ajout de *entrée_2* avec un coefficient de $7/5$. Le premier différentiel sert à brusquer la transmission la retenue. Cependant ce mécanisme est débrayable. Les engrenages sont ajourés et les tambours en aluminium mince pour réduire l'inertie.



Ces deux coupes du chariot de la Marchant Figurematic montrent le totalisateur, en bas, et le compteur, en haut. Sur la figure de gauche les cames poussent des culbuteurs munis d'une roulette. A droite ces culbuteurs sont solidaires de segments d'engrenage ramenés par des ressorts à boudin. Ces segments engrenent le porte satellite.



L'addition fonctionne suivant deux modes :

- 1) Addition à propagation de retenue. Dans ce mode, la chute d'un culbuteur peut déclencher la chute du culbuteur suivant et ainsi de suite. La retenue se propage comme dans les additionneurs de Pascal ou du docteur Roth. La vitesse est alors d'environ 3 additions par seconde.
- 2) Addition continue. Dans ce mode les culbuteurs sont relevés et le premier différentiel est inactif. L'addition se fait comme dans la machine de Tchébichef. La vitesse dépasse alors 22 additions par seconde.

Cependant une série d'additions continues doit se terminer par une propagation de retenue. Par comparaison la Logos 27-2 d'Olivetti est munie d'un système d'anticipation de retenue qui lui permet 10 additions/seconde.

16. Conclusion

L'addition continue sans propagation de retenue a permis de construire des machines extrêmement performantes.

17. Bibliographie

P. Tchébichef « Une machine arithmétique à mouvement continu ». Revue scientifique de la France et de l'Étranger, collège de France, Paris, Germer Baillière, 1882, pages 402 – 404. Cet article est reproduit in extenso en annexe pour le ravissement du lecteur.

P. Tchébichef , Вѣстникъ Опытной Физики (bulletin de physique expérimentale), Moscou 15 janvier 1895, N° 205 pages 5 – 11, N° 207 pages 52 – 56, N° 210 pages 134 – 141 (<http://en.tcheb.ru>)

Maurice d'Ocagne « Le calcul simplifié par les procédés mécaniques et graphiques », Gauthier-Villars, Paris, 1893, 1905, 1928, pages 57 – 60 et pages 201 – 211

Ernst Martin « Die Rechenmaschine und ihre Entwicklungsgeschichte » Hambourg, 1925, (translated and edited by Peggy Aldrich Kidwell and Michael R. Williams), pages 83 – 85

Didier (David) Roth, docteur en médecine à Paris, brevet n° 13269 d'invention pour une machine à calculer, Paris, 7 mai 1842, mise en ligne par Valéry Monnier

Pierre Devaux « Curiosité et principes mécaniques dans les machines à calculer » bulletin « La Nature. Revue des sciences et de leurs applications aux arts et à l'industrie » n° 2906 , Juin 1933, pages 485 – 492

René Taton « Le calcul mécanique » Collection « que sais-je ? » numéro 369, PUF, 1949, pages 36 – 37

Alain Guyot « Olivetti summa quanta »

Allen A. Horton, Burroughs Adding Machine Co. “Adding machine” , US patent 1016501, 6 février 1912

Claibone W. Gooch, Burroughs Adding Machine Co. “Calculating machine” , US patent 1128679, 16 février 1915

Howard M. Dustin, Marchant Calculating Machine Co. “Calculating machine” , US patent 2378472, 13 mai 1941

Walter E. Mathi , Marchant Calculating Machine Co. “Calculating machine” , US patent 2383731, 28 août 1945

Harold T. Avery, Marchant Calculating Machine Co. “Calculating machine” , US patent 2222164, 19 novembre 1940

MATHÉMATIQUES.

Une machine arithmétique à mouvement continu⁶.

Quelque simple que soit la règle de l'addition, il n'est pas facile de l'effectuer par des moyens mécaniques. La difficulté que la mécanique y rencontre vient du changement brusque des chiffres de la somme, qui ne peut être réalisé qu'à l'aide des organes compliqués et délicats. Les nombreuses tentatives, faites avant le docteur Roth pour construire une machine pouvant produire le changement brusque de plusieurs chiffres dans la somme, et la machine du docteur Roth elle-même qui a pu le faire, ont montré clairement combien il est important, pour la simplification des additionneurs, de les délivrer de la nécessité de changer brusquement leurs indications. Il n'y a aucun doute que ces machines, aussi bien que toutes les autres machines arithmétiques qui ne font que répéter l'addition ou la soustraction, deviendraient bien plus faciles à exécuter, si l'on se contentait des changements continuels dans leurs indications. Mais la lecture des chiffres devenant alors plus difficile, il se présente la question suivante: N'est-il pas possible d'affaiblir l'inconvénient provenant de la continuité des changements des indications dans l'additionneur au point où il peut être admis sans risques, en raison des avantages que cette continuité offre pour la construction ?

Dans la machine à additionner que j'ai eu l'honneur de présenter au congrès de Clermont-Ferrand, et qui est maintenant complétée par un mécanisme pour opérer la multiplication et la division, cet inconvénient est presque écarté. Dans les lucarnes de cette machine on voit les bandes blanches, parmi lesquelles on distingue aisément la principale qui paraît dans toutes les lucarnes. Comme dans la première lucarne à droite il n'y a que le commencement de cette bande, il est facile de la suivre en allant de droite à gauche. C'est cette bande qui contient tous les chiffres de la somme.

Passons maintenant aux conditions qui doivent être remplies par le mouvement des tambours qui portent les chiffres de la somme. Nous nommerons *réceptrices* les roues dentées que l'on tourne pour ajouter des nombres et dont chacune correspond à l'unité d'un certain ordre.

Conformément à la règle de l'addition, le mouvement de chaque tambour doit être composé de deux autres : du mouvement déterminé par le chiffre du rang correspondant du nombre ajouté et de celui déterminé par le report des chiffres des rangs inférieurs. La vitesse du premier mouvement doit être en rapport constant avec celle de la réceptrice correspondante; ce rapport sera égal à celui du nombre de dents de la réceptrice et du nombre total des chiffres gravés sur le tambour. En vertu du second mouvement ce tambour tournera d'un angle égal à la distance de deux chiffres, quand le tambour qui le précède tourne d'un angle dix fois plus grand. Donc, dans le cas du mouvement continu et uniforme, ce mouvement d'un tambour quelconque doit être dix fois plus lent que celui du tambour qui le précède. Par conséquent, la vitesse de chaque tambour doit être composée de la vitesse de la réceptrice correspondante, multipliée par un coefficient constant, et de la dixième partie de celle du tambour précédent. Or le mouvement des tambours composé de cette manière est facile à réaliser au moyen *des trains épicycloïdaux* si toutes les *roues réceptrices* et tous les tambours sont montés sur le même axe et si chaque *roue réceptrice* se trouve entre le tambour qui lui correspond et celui qui la précède. Pour y parvenir on n'a qu'à faire porter à chaque *roue réceptrice* un train épicycloïdal dont les roues engrenent avec les roues solidaires aux tambours entre lesquelles elle est placée.

D'après la propriété de ce rouage on trouve que pour donner aux tambours une vitesse, composée conformément à ce que nous venons de voir, il est nécessaire et suffisant de remplir ces deux conditions :

⁶ Communication faite par P. Tchebichef à l'Association française pour l'avancement des sciences dans la séance du 26 août 1882 (1^{re} section du congrès de la Rochelle).

1° Le nombre de dents sur les *roues réceptrices* et celui des chiffres des tambours doivent être dans le rapport de 9 à 10.

2° Le rapport des nombres de dents des roues qui composent chacun des trains épicycloïdaux doit être dix fois plus grand que celui de dents des roues avec lesquelles elles engrènent.

Ces conditions sont très faciles à remplir.

Dans la machine que j'ai fait construire, la première condition est remplie en donnant aux *roues réceptrices* 27 dents et en gravant trois fois les dix chiffres 0, 1, 2, ..., 9 sur les tambours. Conformément à la seconde condition, les roues composantes des trains épicycloïdaux ont 48 et 12 dents, et les roues avec lesquelles elles engrènent portent 24 et 60 dents. De cette façon les échappements qui produisent les changements brusques des chiffres de la somme provenant du report sont remplacés par les trains épicycloïdaux qui produisent le même effet graduellement.

La différence entre la vraie valeur du report et celle que donnent les trains épicycloïdaux étant toujours au-dessous de 1, les écarts angulaires entre la position des tambours dans cette machine et celle qu'ils occuperaient dans une machine à mouvements brusques restent plus petits que la distance de deux chiffres. Par conséquent, en faisant les lucarnes assez grandes pour qu'on puisse y voir à la fois deux chiffres du tambour, il est certain que les vrais chiffres de la somme ne peuvent manquer d'y paraître. Quant à l'ambiguïté qui se présente toutes les fois qu'on voit dans la même lucarne deux chiffres, elle est aisément écartée, comme nous l'avons dit, au moyen des bandes qui sont tracées sur chaque tambour, en ayant égard aux écarts angulaires dans la position des chiffres du tambour suivant.

Telle est la partie essentielle de la machine à additionner.

Les organes accessoires sont les suivants:

1° Des arrêts avec des ressorts qui obligent *les roues réceptrices* de revenir toujours dans leurs positions normales et d'y rester jusqu'à ce qu'on les fasse tourner, ce qui est important pour la justesse du jeu de la machine.

2° Une barre munie de griffes qui arrêtent successivement tous les tambours sur 0, en commençant par le premier à droite, et qu'on fait agir en ramenant vers soi le bouton que l'on voit au côté gauche de la machine. On s'en sert pour réduire à zéro le nombre que l'on lit sur les tambours, après quoi on doit pousser le bouton en arrière pour rendre mobiles tous les tambours et toutes *les roues réceptrices*. En considérant le mouvement des tambours nous n'avons parlé que de l'addition; mais il est clair que pour opérer la soustraction on n'a qu'à tourner *les roues réceptrices*: en sens inverse.

En complétant cette machine par un mécanisme qui ferait ajouter ou soustraire le nombre donné autant de fois que l'on veut, on pourra s'en servir pour opérer la multiplication ou la division. Un tel mécanisme est facile à composer à l'aide des roues dentées qui peuvent engrèner avec *les roues réceptrices*, en montant sur les prolongements de leurs axes des pignons qui peuvent glisser le long de ces axes et qui, à leur tour, suivant la place qu'ils occupent, engrènent avec les roues munies de 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0 dents et collées ensemble, de manière à présenter un cylindre denté. Il est clair qu'en faisant tourner ce cylindre une fois dans l'un ou l'autre sens, on ajoutera ou on soustraira le nombre dont les chiffres de différents rangs sont égaux aux nombres de dents qui pousseront les pignons correspondants.

Pour l'exactitude du jeu de ce mécanisme il est important que les pignons s'arrêtent aussitôt que les dents du cylindre cessent de les pousser. En cherchant à rendre absolument impossibles les fautes qui naissent de ce que les pignons ne s'arrêtent pas toujours assez vite même sous l'action des ressorts, nous avons donné aux dents des pignons et du cylindre une forme telle que les pignons ne restent jamais libres et, par conséquent, cessent de tourner au moment où les dents du cylindre ne les poussent plus.

P. TCHEBICHEF.