0 Les machines analogiques

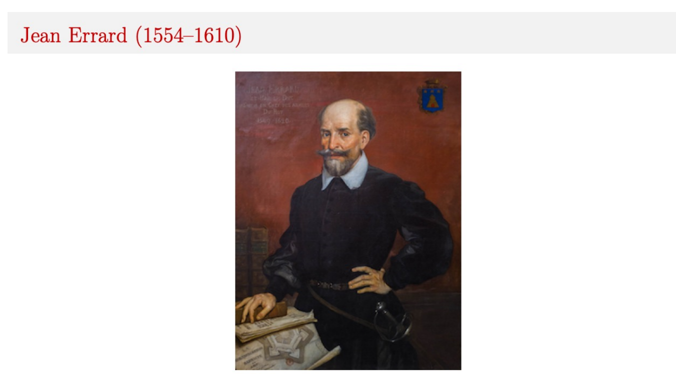
Nous avons pris l'habitude de n'avoir plus qu'une seule machine, qui fait tout : l'ordinateur. Quelle que soit la question, il va se débrouiller pour tout transformer en zéros et en uns, et faire ce qu'on lui demande. Mais avant l'ordinateur qu'y avait-il ? Est-ce qu'on calculait tout à la main avec une feuille et du papier ? Non, pas forcément. Il y avait aussi des machines « analogiques ».

1 Mécanisme d'Anticythère (87 av. J.-C.)

La toute première machine connue est le mécanisme d'Anticythère. Elle prédisait le mouvement des planètes, sur un principe probablement conçu par Archimède. Elle n'utilisait pas de nombres : tous les mouvements circulaires étaient figurés par des engrenages qui tournaient comme les planètes qu'ils représentaient : c'était donc une analogie.

Toutes les machines astronomiques, jusqu'à récemment, utilisaient la même idée : c'était des machines analogiques ; à commencer par les horloges.

2 Jean Errard (1554–1610)

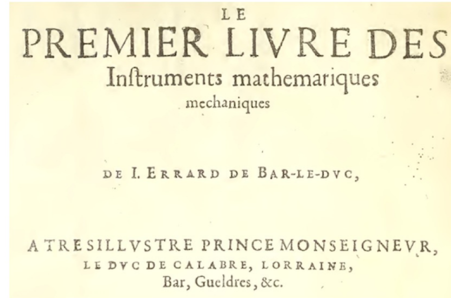


Il faut s'imaginer un temps où toutes les activités d'ingénieurs relevaient des mathématiques : l'architecture militaire par exemple. Les mathématiciens ou ingénieurs donc, se mettaient au service des puissants pour concevoir entre autres, des machines de guerre. Comme Léonard de Vinci, comme Tartaglia, ou comme cet homme, Jean Errard.

3 Livre des instruments mathematiques mechaniques (1584)

Il s'est présenté toute sa vie comme Jean Errard « de Bar le Duc ». En 1584, il est au service du Duc de Lorraine, et il publie à Nancy ce livre des instruments mathématiques mécaniques.

Livre des instruments mathematiques mechaniques (1584)
Jean Errard (1554–1610)


LE PREMIER LIVRE DES Instruments mathemariques mechaniques

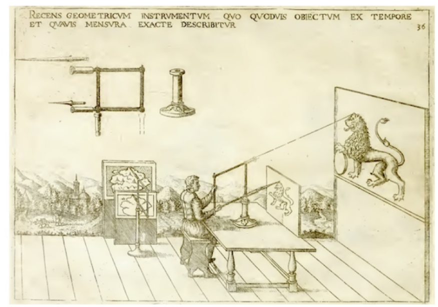
DE I. ERRARD DE BAR-LE-DVC,

A TRES ILLVSTRE PRINCE MONSEIGNEVR, LE DVC DE CALABRE, LORRAINE, Bar, Gueldres, &c.

4 pantographe

On y trouve cet instrument : un parallélogramme articulé pour dessiner à l'échelle. Il existe toujours : ça s'appelle un « pantographe ». C'est un instrument à matérialiser des homothéties.

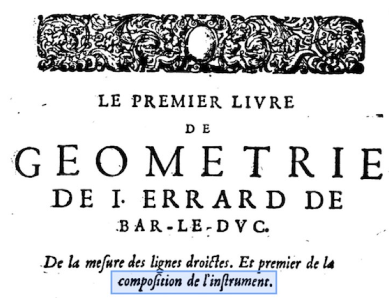
pantographe
Errard, livre des intruments mathematiques mechaniques (1584)



5 La géométrie et pratique générale d'icelle (1620)

Passé au service d'Henri IV, il publie ce livre de « Géométrie et pratique générale d'icelle » qui sera plusieurs fois réédité. Comme vous le voyez, pour faire de la géométrie, il faut commencer par se fabriquer un instrument.

La géométrie et pratique générale d'icelle (1620)
Jean Errard (1554–1610)

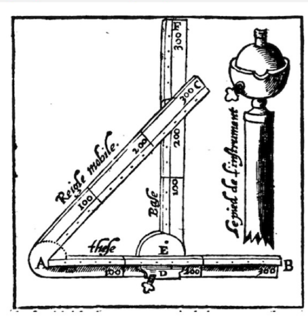

LE PREMIER LIVRE DE GEOMETRIE DE I. ERRARD DE BAR-LE-DVC.

De la mesure des lignes droictes. Et premier de la composition de l'instrument.

6 Composition de l'instrument

Cet instrument le voici. Ce sont trois règles graduées (en laiton précise-t-il) qui sont articulées entre elles, et montées sur un pied. Ces trois règles permettent d'effectuer des visées, d'évaluer des angles et des hauteurs, bref des opérations de géométrie euclidienne élémentaire.

Composition de l'instrument
Errard, La géométrie et pratique générale d'icelle (1620)



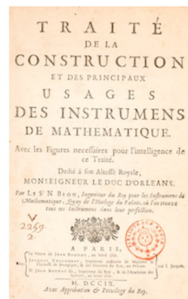
7 Nicolas Bion (1652–1733)

Nicolas Bion (1652–1733)
Ingénieur du Roy pour les instrumens de mathematique

Au siècle suivant, Nicolas Bion se présente comme l'ingénieur du roi (Louis XIV donc) pour les instruments de mathématique (c'est ce qui est écrit autour de son portrait).

8 Traité de la construction... (1709)

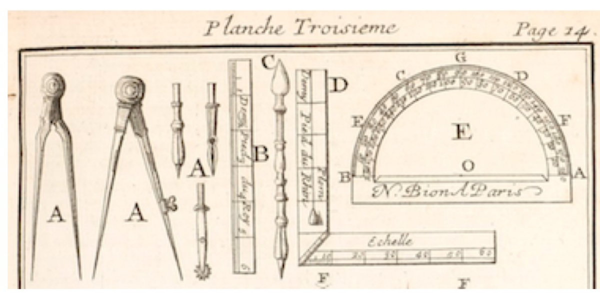
Traité de la construction... (1709)
Nicolas Bion (1652–1733)



Il publie ce « Traité de la construction et des principaux usages des instruments de mathematique » qui sera maintes fois ré-édité, et même traduit en anglais.

9 compas, règle, équerre, rapporteur

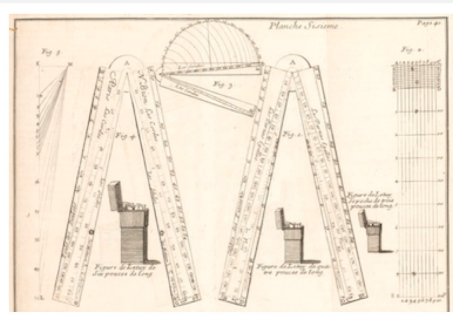
compas, règle, équerre, rapporteur
Bion, Traité de la construction... (1709)



Pour Nicolas Bion, quels sont les instruments de mathématique ? Tout d'abord, comme depuis toujours, la règle, le compas, l'équerre, et le rapporteur.

10 le compas de proportion

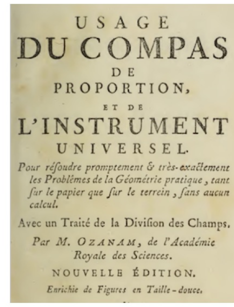
le compas de proportion
Bion, Traité de la construction... (1709)



Et puis cet instrument, proche de celui de Jean Errard, qu'il appelle un « compas de proportion ». Vous voyez deux règles articulées, graduées sur leurs deux faces, avec leur étui.

11 Usage du compas de proportion (1709)

Usage du compas de proportion (1709)
Jacques Ozanam (1640–1718)

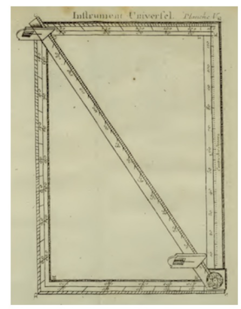


USAGE
DU COMPAS
DE
PROPORTION,
ET DE
L'INSTRUMENT
UNIVERSEL.
Pour réſoudre promptement & très-exactement les Problêmes de la Géométrie pratique, tant ſur le papier que ſur le terrein, ſans aucun calcul.
Avec un Traité de la Diviſion des Champs.
Par M. OZANAM, de l'Académie Royale des Sciences.
NOUVELLE ÉDITION.
Enrichie de Figures en Taille-douce.

Beaucoup de livres de géométrie de l'époque décrivent l'usage du compas de proportion. Certains lui sont même dédiés, comme celui-ci, de Jacques Ozanam. C'est un professeur célèbre, grand producteur de best-sellers, en particulier ses « Récréations mathématiques ». Dans l'édition que vous voyez ici, il ajoute au compas de proportion, un « instrument universel », de son cru.

12 Instrument Universel

Instrument Universel
Ozanam, Usage du compas de proportion (1709)



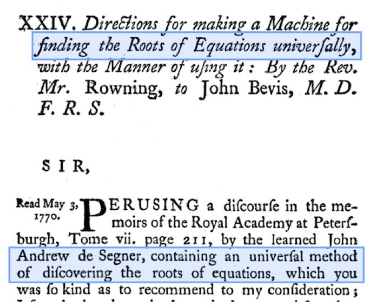
Qu'est-ce que c'est que cet instrument universel ? C'est un cadre gradué avec une tige articulée : rien de bien plus compliqué que le compas de proportion. Il permet dans toutes sortes de situations d'appliquer le théorème de Thalès et la trigonométrie élémentaire.

13 finding the Roots of Equations universally

Beaucoup plus tard, on va commencer à s'affranchir de la géométrie d'Euclide, pour appliquer celle de Descartes. Par exemple, en 1770, John Rowning écrit des « Instructions pour fabriquer une machine qui trouve universellement les racines des équations ». Il explique qu'il a lu la méthode dans un autre article, de Segner, paru dans les mémoires de l'Académie de Saint-Pétersbourg.

Quelle est l'idée ? Si on veut résoudre une équation linéaire de degré un, il suffit de regarder l'intersection d'une tige droite avec un axe. Si on fait en sorte que l'ordonnée d'une tige droite soit la pente d'une autre droite, on obtient un polynôme de degré deux. Et on peut ainsi relier entre elles des tiges droites pour calculer des ordonnées pour un polynôme de degré quelconque. C'est le principe de l'algorithme de Horner.

finding the Roots of Equations universally (1770)
John Rowning (ca. 1701–1771)



XXIV. *Directions for making a Machine for finding the Roots of Equations univerſally, with the Manner of uſing it: By the Rev. Mr.* Rowning, *to* John Bevis, *M. D. F. R. S.*

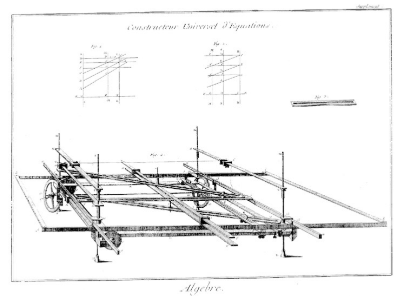
SIR,

Read May 3, 1770. PERUSING a diſcourſe in the memoirs of the Royal Academy at Peterſburgh, Tome vii. page 211, by the learned John Andrew de Segner, containing an univerſal method of diſcovering the roots of equations, which you was ſo kind as to recommend to my conſideration;

14 Constructeur Universel d'Equations

Constructeur Universel d'Equations

d'Alembert, Encyclopédie (1772)



Voici une représentation de cette machine pour le degré deux. C'est une planche de l'Encyclopédie. À l'article « Équation », d'Alembert détaille longuement le principe. Pour l'étendre aux degrés supérieurs, il suffit d'ajouter des tiges.

Tout cela reste assez théorique. Malgré la publicité que lui a donnée l'Encyclopédie, je ne pense pas que ce constructeur universel ait jamais été construit !

15 Balance romaine

Balance romaine

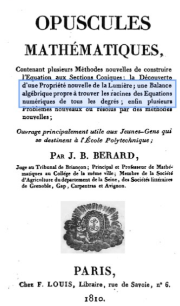
résoudre une équation du premier degré

D'ailleurs il y a une autre manière de traduire le même principe. On peut voir une balance romaine comme une machine à résoudre les équations linéaires du premier degré : à l'équilibre, le poids à gauche multiplié par la longueur à gauche est égal au poids à droite multiplié par la longueur à droite. En empilant les fléaux, on peut composer des fonctions affines, donc résoudre des équations de degré supérieur à un.

16 Opuscules mathématiques (1810)

Opuscules mathématiques (1810)

Joseph-Balthazard Bérard (1763–1844 ?)



OPUSCULES

MATHÉMATIQUES,

Contenant plusieurs Méthodes nouvelles de construire l'Equation aux Sections Coniques : la Découverte d'une Propriété nouvelle de la Lumière ; une Balance algébrique propre à trouver les racines des Equations numériques de tous les degrés ; enfin plusieurs Problèmes nouveaux ou résolus par des méthodes nouvelles ;

Ouvrage principalement utile aux Jeunes-Gens qui se destinent à l'École Polytechnique ;

PAR J. B. BERARD,

Juge au Tribunal de Briançon ; Principal et Professeur de Mathématiques au Collége de la même ville ; Membre de la Société d'Agriculture du département de la Seine, des Sociétés littéraires de Grenoble, Gap, Carpentras et Avignon.

PARIS,

Chez F. LOUIS, Libraire, rue de Savoie, n° 6.

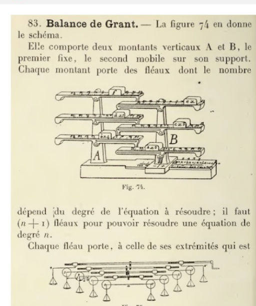
1810.

Ce principe a été exprimé pour la première fois par un certain Bérard dans ses opuscules mathématiques. Il se présente comme juge au Tribunal de Briançon ; principal et professeur de mathématiques au collège de la même ville. Il parle à la fois d'une nouvelle propriété de la lumière et d'une « Balance algébrique pour trouver les racines des équations numériques de tous les degrés. »

17 Balance de Grant (1896)

Balance de Grant (1896)

George Barnard Grant (1848–1917)



83. **Balance de Grant.** — La figure 74 en donne le schéma.

Elle comporte deux montants verticaux A et B, le premier fixe, le second mobile sur son support. Chaque montant porte des fléaux dont le nombre

Fig. 74.

dépend du degré de l'équation à résoudre ; il faut $(n+1)$ fléaux pour pouvoir résoudre une équation de degré n.

Chaque fléau porte, à celle de ses extrémités qui est

Fig. 75.

Plusieurs modèles de balances à équations seront réalisés après Bérard, en particulier celle de Grant.

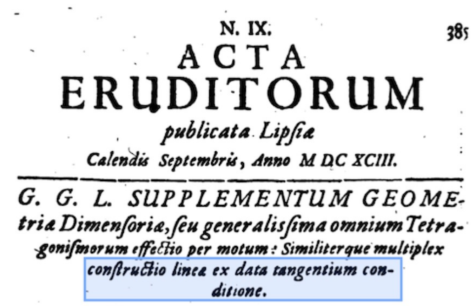
18 Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716)

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716)

Quand il s'agit de fabriquer une machine pour automatiser un problème quelconque, on peut s'attendre à voir Leibniz pointer le bout de son nez.

19 Acta Eruditorum (1693)

Acta Eruditorum (1693)
Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716)



N. IX. 385

ACTA ERUDITORUM

publicata Lipsiæ

Calendis Septembris, Anno M DC XCIII.

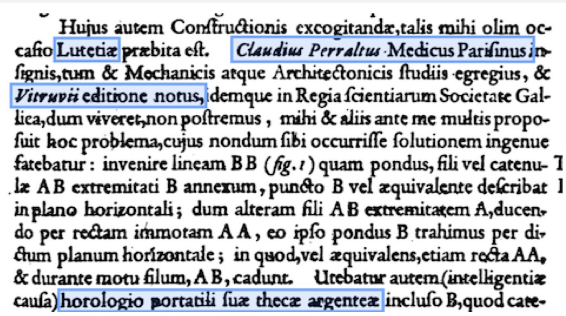
G. G. L. SUPPLEMENTUM GEOMEtriæ Dimensoriæ, seu generalissima omnium Tetragonismorum effectio per motum: Similiterque multiplex constructio lineæ ex data tangentium conditione.

Ça ne manque pas. Moins de dix ans après avoir inventé le calcul différentiel, il publie un article aux Acta Eruditorum.

Il y propose une méthode pour construire une courbe quand on se donne une condition sur ses tangentes.

20 Acta Eruditorum (1693)

Acta Eruditorum (1693)
Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716)



Hujus autem Constructionis excogitandæ, talis mihi olim occasio Lutetiæ præbita est. *Claudius Perraltus* Medicus Parisinus insignis, tum & Mechanicis atque Architectonicis studiis egregius, & *Vitruvii* editione notus, idemque in Regia scientiarum Societate Gallica, dum viveret, non postremus, mihi & aliis ante me multis proposuit hoc problema, cujus nondum sibi occurrisse solutionem ingenue fatebatur: invenire lineam BB (*fig. 1*) quam pondus, fili vel catenulæ AB extremitati B annexum, puncto B vel æquivalente describat in plano horizontali; dum alteram fili AB extremitatem A, ducendo per rectam immotam AA, eo ipso pondus B trahimus per dictum planum horizontale; in quod, vel æquivalens, etiam recta AA, & durante motu filum, AB, cadunt. Utebatur autem (intelligentiæ causa) horologio portatili suæ thecæ argenteæ incluso B, quod cate-

Qu'est-ce qu'il entend par là ?

Il raconte que quand il était à Paris (c'était en 1673), un certain Claude Perrault, médecin, mais aussi spécialiste de mécanique et d'architecture, connu pour avoir publié une édition de Vitruve, lui avait posé un problème tout simple. Vous le voyez en bas de la page, Perrault avait sorti sa montre avec un boîtier en argent et l'avait posée sur la table. Puis il avait pris l'extrémité de la chaîne, avait tiré dessus à vitesse constante, et il avait demandé à Leibniz quelle courbe décrivait la montre.

21 Claude Perrault (1613–1688)

Claude Perrault (1613–1688)

Claude Perrault, c'est lui. En tant qu'architecte, il est responsable de la construction d'une aile entière du Louvre.

22 Contes du temps passé (1697)

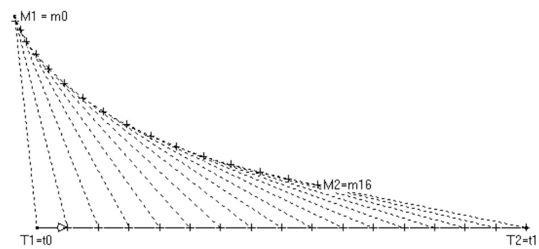
Contes du temps passé (1697)
Charles Perrault (1628–1703)

Euh... non, ce n'est pas l'auteur du Petit Chaperon Rouge : c'est son frère.

23 La tractrice

Le problème que Perrault avait posé à Leibniz est celui de la tractrice. C'est un de ces premiers problèmes de physique auxquels Leibniz et les frères Bernoulli ont appliqué le tout nouveau calcul différentiel. Trouver l'équation de la tractrice est un exercice classique : c'est résoudre une équation différentielle.

La tractrice

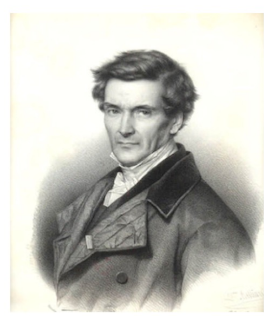


Mais Leibniz avait remarqué autre chose. Tirer une montre sur une table, c'est un moyen mécanique de traduire une équation différentielle. La trajectoire de cette montre était une solution de ladite équation différentielle. Et comme c'était Leibniz, il s'est dit : et si on généralisait ? étant donnée une équation différentielle quelconque, on pourrait construire une machine, qui tracerait une courbe, solution de cette équation différentielle.

C'était trop tôt : ni Leibniz, si ses successeurs du dix-huitième siècle n'ont poursuivi.

24 Gustave-Gaspard de Coriolis (1792–1843)

Gustave-Gaspard de Coriolis (1792–1843)

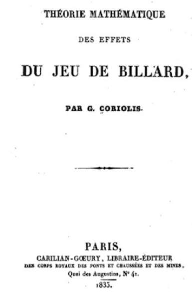


Au dix-neuvième siècle, les choses changent. C'est le siècle des machines, et des résultats « positifs » comme on disait alors. Le premier à concrétiser l'idée de Leibniz, c'est Coriolis. On ne s'en souvient que pour la « force de Coriolis ».

25 Théorie mathématique des effets du jeu de billard (1835)

C'est dommage : il a tout de même écrit 200 pages de mathématiques sur les effets qu'on peut donner aux boules de billard, et les trajectoires qui s'ensuivent.

Théorie mathématique des effets du jeu de billard (1835)
Gustave-Gaspard de Coriolis (1792–1843)


THÉORIE MATHÉMATIQUE

DES EFFETS

DU JEU DE BILLARD,

PAR G. CORIOLIS.

PARIS,
CARILIAN-GŒURY, LIBRAIRE-ÉDITEUR
DES CORPS ROYAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES,
Quai des Augustins, N° 41.
1835.

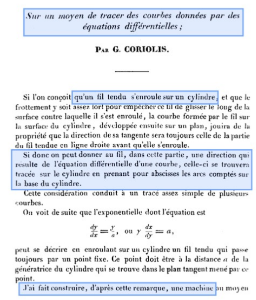
26 Sur un moyen de tracer des courbes données. . . (1836)

Il a aussi écrit cet article : « Sur un moyen de tracer des courbes données par des équations différentielles ». Il explique l'idée de manière tout à fait claire. Il propose d'enrouler un fil tendu sur un cylindre.

« Si donc on peut donner au fil une direction qui résulte de l'équation différentielle d'une courbe celle-ci se trouvera tracée sur le cylindre en prenant pour abscisses les arcs comptés sur la base du cylindre. »

Comme il le raconte ensuite, il a effectivement fait construire cette machine. Elle n'a jamais fonctionné qu'à titre de curiosité, ou à des fins pédagogiques. Les vraies applications viendront dans la seconde moitié du dix-neuvième siècle.

Sur un moyen de tracer des courbes données. . . (1836)
Gustave-Gaspard de Coriolis (1792–1843)


Sur un moyen de tracer des courbes données par des équations différentielles ;

PAR G. CORIOLIS.

Si l'on conçoit qu'un fil tendu s'enroule sur un cylindre, et que le frottement y soit assez fort pour empêcher ce fil de glisser le long de la surface contre laquelle il s'est enroulé, la courbe formée par le fil sur la surface du cylindre, développée ensuite sur un plan, jouira de la propriété que la direction de sa tangente sera toujours celle de la partie du fil tendue en ligne droite avant qu'elle s'enroule.

Si donc on peut donner au fil, dans cette partie, une direction qui résulte de l'équation différentielle d'une courbe, celle-ci se trouvera tracée sur le cylindre en prenant pour abscisses les arcs comptés sur la base du cylindre.

Cette considération conduit à un tracé assez simple de plusieurs courbes.

On voit de suite que l'exponentielle dont l'équation est

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y}{a}, \quad \text{ou } y\,\frac{dx}{dy} = a,$$

peut se décrire en enroulant sur un cylindre un fil tendu qui passe toujours par un point fixe. Ce point doit être à la distance a de la génératrice du cylindre qui se trouve dans le plan tangent mené par ce point.

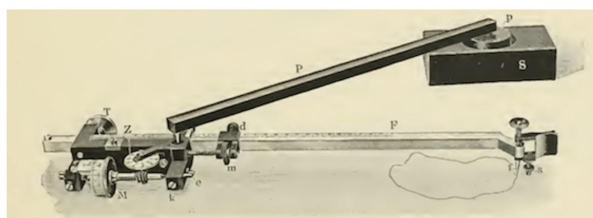
J'ai fait construire, d'après cette remarque, une machine au moyen

27 Planimètre polaire (1854)

Calculer une surface, c'est intégrer une équation différentielle d'un type très particulier. Mais calculer une surface, a de vraies applications. Par exemple pour le cadastre, on veut pouvoir évaluer la surface d'une parcelle à partir d'un plan.

Une machine à calculer des surfaces, c'est un planimètre. Il en existe selon deux principes, en fonction du système de coordonnées qu'on a choisi : coordonnées cartésiennes, ou coordonnées polaires, comme sur cette image.

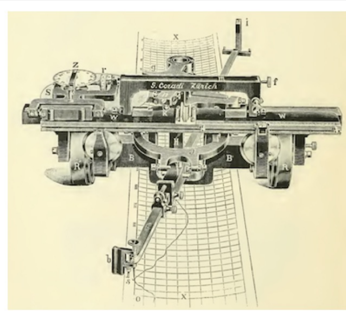
Planimètre polaire (1854)
Jacob Amsler-Laffon (1823–1912)



28 Planimètre de précision (1872)

Il devait bien y avoir une demande, puisqu'on s'est même mis à construire des planimètres de précision.

Planimètre de précision (1872)
G. Coradi, Zürich



29 Louis Frédéric Gustave Jacob (1857–1930)

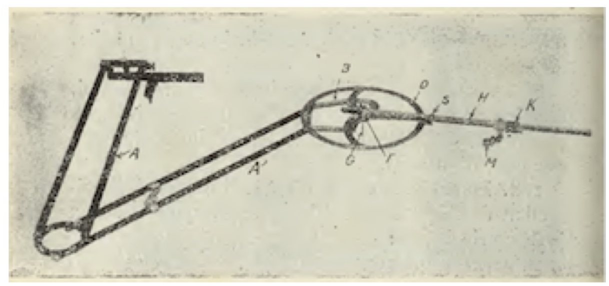
De vraies applications à l'intégration des équations différentielles, il n'en manquait pas non plus. Sinon quelqu'un d'aussi sérieux qu'un « ingénieur général de l'artillerie navale » qui a son portrait sur une vignette de chocolat, ne se serait pas mis à construire des « intégromètres » : pour Jacob, l'application c'était le calcul de la portée des boulets de canon en fonction de l'angle de tir et de la vitesse initiale : ben oui, artillerie navale oblige !

Louis Frédéric Gustave Jacob (1857–1930)
Ingénieur général de l'artillerie navale

30 Intégromètre équations de Riccati (1908)

Il avait donc inventé une machine à intégrer les équations de Riccati. Il y a eu au début du vingtième siècle, des ingénieurs et des chercheurs dont toute la carrière a été consacrée à la construction de machines analogiques pour toutes sortes d'équations : en principe une même machine ne pouvait servir qu'à un type particulier d'équations.

Intégromètre équations de Riccati (1908)
Louis Frédéric Gustave Jacob (1857–1930)

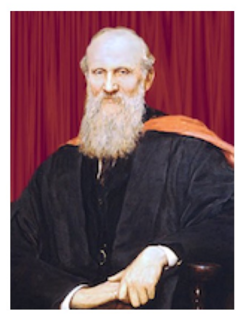


31 William Thomson (Lord Kelvin) (1824–1907)

À part les équations différentielles, il y avait toujours les calculs astronomiques, et en particuler comme application d'usage quotidien, la prédiction des marées.

Celui qui s'est attaqué au problème n'était pas n'importe qui : Lord Kelvin, celui des degrés Kelvin, un des plus grands physiciens de la seconde moitié du dix-neuvième siècle.

William Thomson (Lord Kelvin) (1824–1907)



32 Tide predictor (1872)

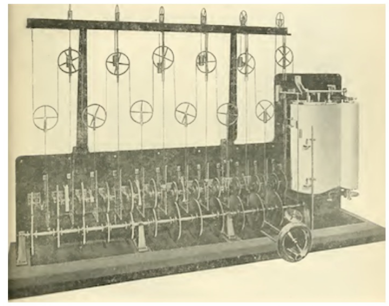
Voici une reconstitution de sa première machine.

Tide predictor (1872)
William Thomson (Lord Kelvin) (1824–1907)

33 Tide predictor (1878)

Tide predictor (1878)

William Thomson (Lord Kelvin) (1824–1907)

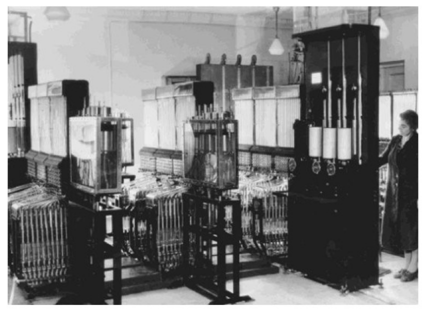


Voici une photo de la seconde. Ce qui était intéressant dans l'approche de Kelvin, c'est que comme il avait à combiner des mouvements périodiques, il avait utilisé la décomposition en série de Fourier. Ses machines calculaient en fait des termes de séries trigonométriques.

34 Intégrateur à eau (1936)

Intégrateur à eau (1936)

Vladimir Lukyanov



Pendant toute la première moitié du vingtième siècle, il y a eu une sorte d'escalade dans la précision et le gigantisme des machines analogiques. En Union Soviétique, dans les années 1930, on a construit des intégrateurs à eau, qui occupaient toute une grande pièce avec des centaines de tuyaux qui se vidaient les uns dans les autres, et des tubes gradués pour lire les résultats. L'analogie était l'écoulement des fluides, pour résoudre des équations différentielles.

35 références

références

- M. d'Ocagne (1928) *Le calcul simplifié par les procédés mécaniques et graphiques*, 3e éd., Paris : Gauthier-Villard
- J.S. Frame (1945) Machines for solving algebraic equations, *Mathematics and computation*, 1(9), 337–353
- L. Jacob (1911) *Le calcul mécanique*, Paris : Doin
- D. Tournès (2003) L'intégration graphique des équations différentielles ordinaires, *Historia Mathematica*, 30, 457–49
- D. Tournès (2014) Construire pour calculer, *in : Les constructions mathématiques avec des instruments et des gestes, É. Barbin ed.*, Paris : Ellipses, 265–296

C'est au moment où les machines analogiques atteignaient cette sophistication extrême, que le calcul électronique est arrivé, et elles sont tombées dans l'oubli, en très peu de temps.

Une espèce qui grandit, grossit, devient de plus en plus forte, juste avant qu'une autre, mieux adaptée, ne la fasse disparaître : ça ne vous rappelle rien ça ? … Ben allez-y, traitez-moi de dinosaure tant que vous y êtes !