

# Éléments d'histoire de l'informatique

Sacha Krakowiak

Université Grenoble Alpes & Aconit

## 1. Introduction Préhistoire

CC-BY-NC-SA 3.0 FR

### Pourquoi s'intéresser à l'histoire de l'informatique ?

- ❖ **Une aide pour comprendre le présent**  
comment on est arrivé à la situation actuelle  
quels sont les défis

Les avancées, mais  
aussi les échecs...

- ❖ **Une vision des idées, non seulement des faits**  
le contexte, les liens de causalité

*"We would know  
what they thought  
when they did it"*

R. W. Hamming, 1976

- ❖ **Un instrument pédagogique**  
comprendre les concepts et les techniques  
à travers leur émergence et leur évolution

- ❖ **Un intérêt propre**  
les «chefs d'œuvre» du passé  
les acteurs de l'informatique

Des éléments de stabilité  
dans une discipline qui  
évolue vite

# C'est quoi, l'informatique ?

## ❖ Quatre facettes



Une science

Science de l'artificiel ...

... mais pas seulement

Une technique et une industrie

Matériel, logiciel, services

Des applications

Dont le champ est croissant

Un impact sociétal

## ❖ Quatre concepts



## ❖ Une méthode

La modélisation et l'abstraction

Un va-et-vient théorie-pratique

Des outils issus de l'informatique

## ❖ Une diffusion vers d'autres sciences

### Information

Un réducteur d'incertitude

Une représentation codée

La base de la communication

### Algorithme

La notion clé !

d'Euclide à Turing

### Machine

Réelle ou virtuelle

### Langage

Exprime un algorithme

pour une machine

3

# L'histoire de l'informatique, une suite de ruptures...

## ❖ Technologiques

transistors, tores de ferrite, circuits intégrés, microprocesseurs...

## ❖ Architecturales

*mainframes*, minis,

micros, super...

## ❖ Conceptuelles

programme enregistré, langages de haut niveau, abstraction, modularité...

## ❖ D'usage

interfaces homme-machine (écran, souris, voix...)

## ❖ Sociétales

la « numérisation du monde »...

### L'accélération des performances

1950

1970

1990

2010

Kilo

Mega

Giga

Tera

Peta

4

# Chronologies par thèmes

- ❖ La naissance de l'informatique

De Turing à von Neumann : 10 années décisives  
Les ordinateurs à programme enregistré

- ❖ Le développement d'une industrie

Du *mainframe* au mini et au micro  
Les supercalculateurs  
La technologie : transistors, circuits intégrés

Le dialogue théorie-pratique  
Les domaines d'application

- ❖ Les langages et le génie logiciel

- ❖ Les systèmes d'exploitation

- ❖ La révolution de Xerox PARC

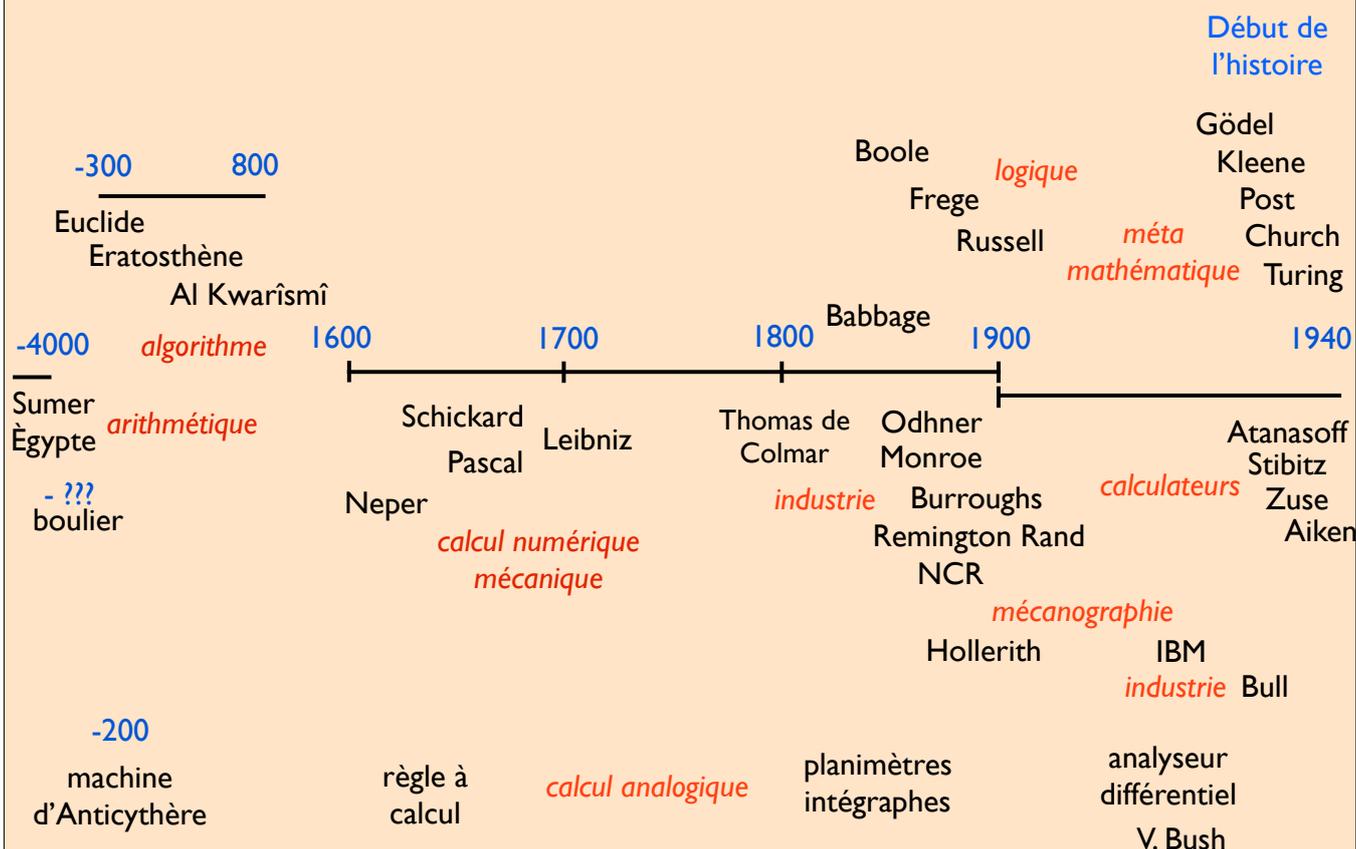
- ❖ L'Internet

- ❖ Des données aux connaissances

Les bases de données  
L'intelligence artificielle

Faute de temps, tout n'est pas traité ...  
sécurité, tolérance aux fautes  
interaction homme-machine,  
jeux  
...

## La préhistoire de l'informatique



## Au sommaire...

- ❖ La notion d'algorithme
- ❖ Le calcul arithmétique mécanique
- ❖ Babbage et Boole
- ❖ Le calcul analogique
- ❖ La mécanographie

## Naissance de la notion d'algorithme

### ❖ Une notion pratique

Domaines initiaux : arithmétique et géométrie

Une démarche constructive organisée pour résoudre un problème donné...

... en utilisant des outils spécifiés

les opérations de l'arithmétique

les constructions géométriques (règle et compas)

### ❖ Les points clés

Bien présents : l'aspect systématique et la généralité

Partiellement vu : la preuve de validité

Manques initiaux

une notation symbolique pour la description

la notion de terminaison

les limites de la puissance d'expression

# Naissance de la notion d'algorithme

## Sumer, Égypte (~ -3000)

Arithmétique (opérations, fractions)

Géométrie (aires, volumes)

crédit : Motty



Wikimedia Commons

## Al-Khwârizmî

9-ème siècle

Calculs pour l'arpentage et l'astronomie

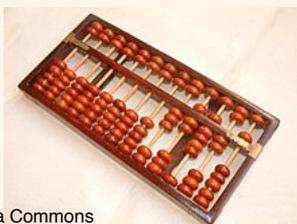
Premières réflexions sur les algorithmes

De très nombreux algorithmes sont inventés, mais la notion même d'algorithme évoluera peu jusque dans les années 1930...

# Le calcul arithmétique mécanique

## ❖ Le boulier

origine lointaine, en multiples régions



Wikimedia Commons

boulier  
chinois

## ❖ Les bâtons de Napier (1617)

facilitent la multiplication, la division  
et l'extraction de racine carrée

il faut poser les additions à la main

$7 \times 1 =$	7	
$7 \times 2 =$	14	
$7 \times 3 =$	21	
$7 \times 4 =$	28	
$7 \times 5 =$	35	
$7 \times 6 =$	42	
$7 \times 7 =$	49	
$7 \times 8 =$	56	
$7 \times 9 =$	63	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
0/1	0/2	0/3	0/4	0/5	0/6	0/7	0/8	0/9	0/0
1/1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	1/9	1/0
2/1	2/2	2/3	2/4	2/5	2/6	2/7	2/8	2/9	2/0
3/1	3/2	3/3	3/4	3/5	3/6	3/7	3/8	3/9	3/0
4/1	4/2	4/3	4/4	4/5	4/6	4/7	4/8	4/9	4/0
5/1	5/2	5/3	5/4	5/5	5/6	5/7	5/8	5/9	5/0
6/1	6/2	6/3	6/4	6/5	6/6	6/7	6/8	6/9	6/0
7/1	7/2	7/3	7/4	7/5	7/6	7/7	7/8	7/9	7/0
8/1	8/2	8/3	8/4	8/5	8/6	8/7	8/8	8/9	8/0
9/1	9/2	9/3	9/4	9/5	9/6	9/7	9/8	9/9	9/0

Bâtons de Napier

CC BY-SA 3.0 by Fabienkhan

# L'origine des calculateurs mécaniques

## ❖ Wilhelm Schickard (1592-1635)

professeur d'hébreu et d'astronomie  
à l'université de Tübingen

décrit une machine capable de faire  
des additions et soustractions

intègre des bâtons de Napier pour  
les multiplications et divisions

l'unique exemplaire est détruit par le feu avant d'être terminé...



Wikimedia Commons



CC-BY-SA 3.0, [Herbert Klaeren](#)

## ❖ La machine de Schickard reconstituée

en 1960 par Bruno von Freytag Löringhoff  
(université de Tübingen)

corrige une erreur dans les plans initiaux

# La pascaline

## ❖ Blaise Pascal (1623-1662)

philosophe, mathématicien, physicien

invente et fait construire une machine  
arithmétique, initialement pour aider  
son père dans le calcul de taxes

cesse son activité scientifique en 1654



## ❖ La pascaline (1642)

première machine arithmétique à avoir  
fonctionné (addition-soustraction)

une vingtaine d'exemplaires fabriqués,  
mais commercialisation difficile

neuf exemplaires parvenus à nous  
(4 au Musée des Arts et Métiers)



MAM, Paris - photo J.-C. Wetzel

# La pascaline : un peu de technique

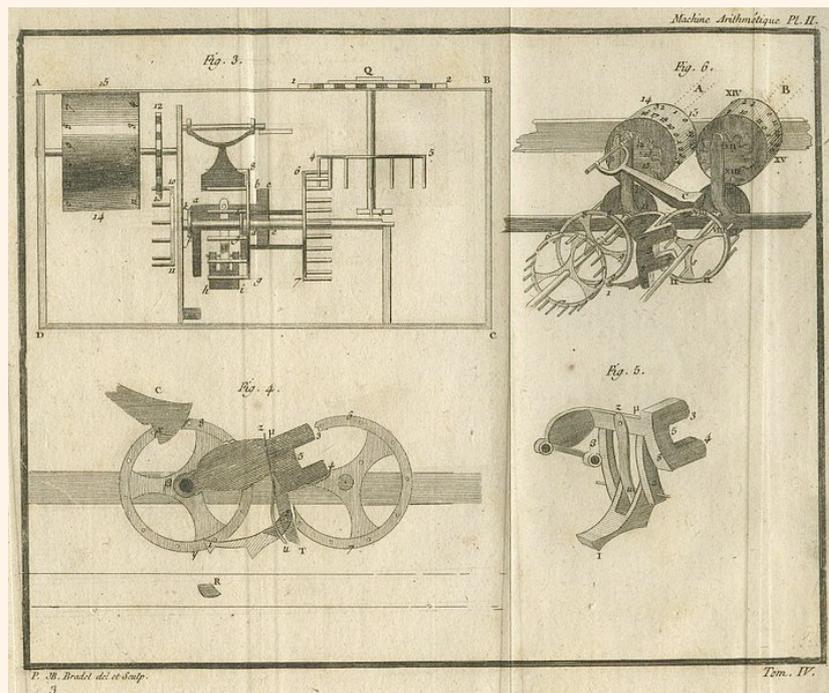
## À noter

Le mécanisme d'inscription

La double graduation des inscripteurs (non visible ici) :  
0-9, 1-8, ... pour la soustraction

Le cliquet maintenant les roues  
dans leur position correcte

Le sautoir pour la propagation  
de la retenue (détails plus loin)

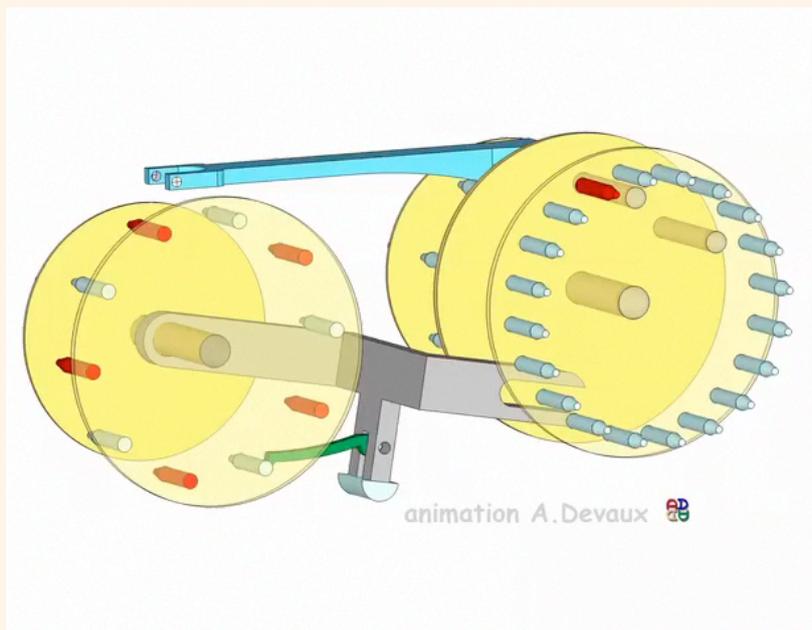


Extrait des *Œuvres de Pascal* (Chez Detune, La Haye, 1779)  
Wikipedia, domaine public

# La pascaline : report de la retenue

Le mécanisme du  
sautoir de la pascaline

Principal intérêt : rendre les  
roues indépendantes les  
unes des autres, pour éviter  
le blocage en cas de report  
multiple de retenues



Extrait du site d'André Devaux sur les calculateurs mécaniques :  
<http://calmeqa.free.fr/>

# La machine de Leibniz

## ❖ Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716)

philosophe, mathématicien, physicien  
découvre la pascaline à Paris en 1672 et  
décide de l'améliorer  
sa machine fait aussi les multiplications et les  
divisions

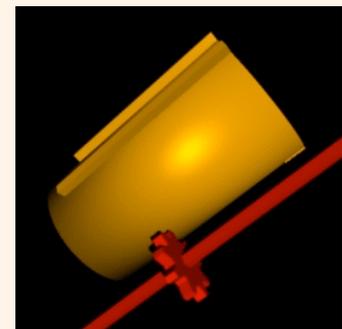
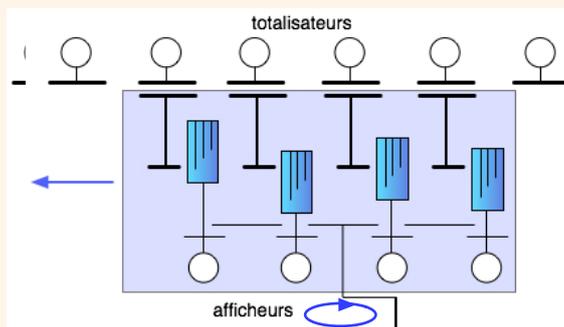


## ❖ La machine de Leibniz

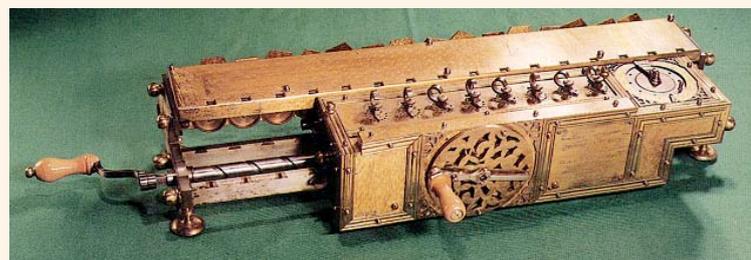
deux exemplaires construits,  
un préservé  
l'ancêtre de tous les  
calculateurs mécaniques



## La machine de Leibniz : un peu de technique



CC-BY-SA 3.0, [Ezrdr](#)



## Après Leibniz...



CC-BY-SA  
3.0. [BastienM](#)

### ❖ Thomas de Colmar (1851)

L'arithmomètre, version industrielle de la machine de Leibniz  
Améliore son interface et sa réalisation

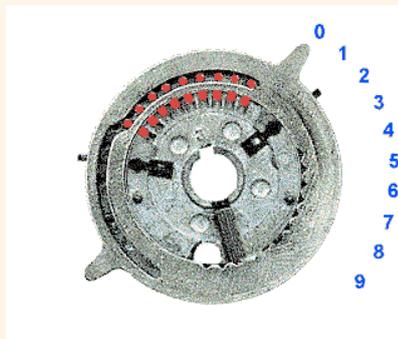
### ❖ Vers les calculatrices modernes

Odhner (1878) et Baldwin (1911)  
inventent des équivalents «légers»  
du cylindre de Leibniz



Wikimedia  
Commons

Roue  
d'Odhner



Extrait du site d'André Devaux : <http://calmeqa.free.fr/>

Machine Odhner des années 1960 (collection Aconit)

## L'arithmomètre



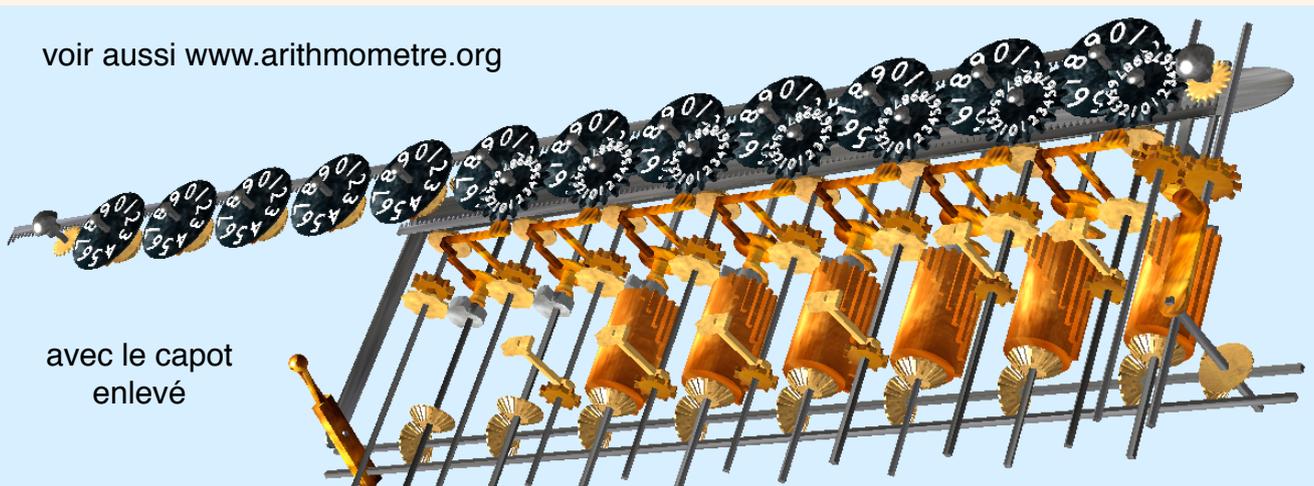
©Aconit

Un simulateur réalisé par des étudiants  
L3 Maths-Info IMAG 2015-2016.

Clémence Barbier, Mama Dembele, Julien  
Dides, Thomas Gerspacher, Julien Girard,  
Gwendal Le Quelleneq, Noah Lee, Corentin  
Moirant et Mathilde Sapet.

Voir [www.aconit.org/arithmometre](http://www.aconit.org/arithmometre)  
pour faire tourner le simulateur

voir aussi [www.arithmometre.org](http://www.arithmometre.org)



avec le capot  
enlevé

# L'essor industriel

## La mécanisation du bureau et du magasin

- ❖ Remington (après 1927, Remington Rand)  
La machine à écrire (1873)



St Andrews School of History

- ❖ Burroughs  
L'additionneur à touches (1886)



Image Courtesy of the Computer History Museum

- ❖ National Cash Register (NCR)  
La caisse enregistreuse (1884)

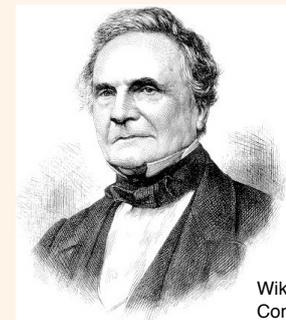


Wikimedia, domaine public

# Charles Babbage (1791-1871)

- ❖ **Carrière**

Professeur de mathématiques à Cambridge  
Co-fondateur de l'*Astronomical Society*  
Autres intérêts : économie, politique



Wikimedia Commons

- ❖ **Un précurseur de l'informatique**

La machine à différences (1822-1849)

Calcul de tables, deux versions

Soutien du gouvernement, mais le projet est abandonné

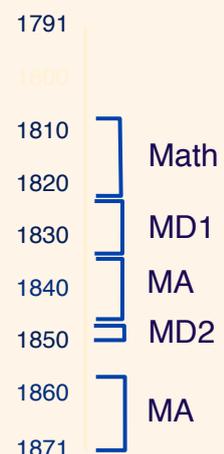
La machine analytique (1832-1871)

Calculateur universel programmable  
(par cartes perforées)

Distinction entre processeur et mémoire

Peu de soutien officiel, conflit avec le constructeur

Quelques parties seulement sont réalisées



# La machine à différences

## ❖ Principe

Les différences d'ordre  $n$  d'un polynôme  $p(x)$  de degré  $n$  sont constantes

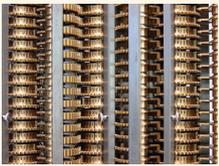
D'où le calcul des valeurs de  $p(x)$  pour une suite de valeurs de  $x$

$x$	$p(x)=2x^2-4x+1$	$\Delta 1(x)=p(x+1)-p(x)$	$\Delta 2(x)=\Delta 1(x+1)-\Delta 1(x)$
0	1	-2	4
1	-1	2	4
2	1	6	4
3	7	10	4

## ❖ La machine de Babbage met en œuvre ce principe

La machine ne fut jamais terminée

Une machine a été réalisée suivant les plans de Babbage en 1989-91 au Science Museum de Londres



CC-BY-SA-2.5, Carsten Ullrich

4000 pièces, 2,6 tonnes

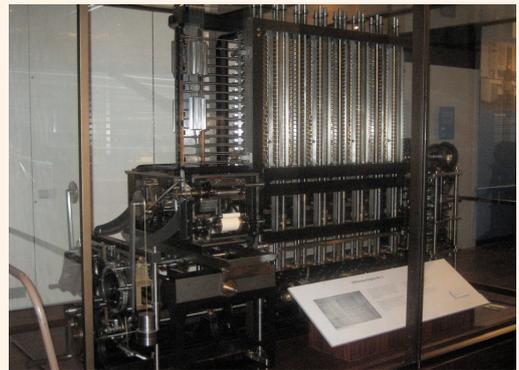


photo SK

# La machine analytique (1)

## ❖ Un objectif ambitieux

Réaliser n'importe quel calcul par des moyens mécaniques

## ❖ Une entreprise surhumaine

Plus de 10 versions du plan  
Pas de plan complet définitif  
Des réalisations très partielles

## ❖ Des idées novatrices

Séparation entre organe de calcul et organe de mémorisation

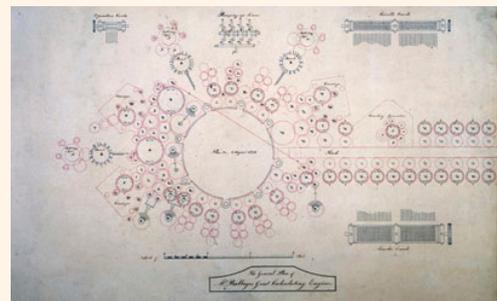
*(the mill and the store)*

«Programmation» à deux niveaux

opérations de base («microprogrammes»), programmes d'utilisateur

Entrée des programmes et données par cartes perforées (Jacquard)

Mécanisme de retenue élaboré



Science Museum, London

## La machine analytique (2)

### ❖ Un jeu d'instructions complet

Opérations arithmétiques (base 10)

avec précision contrôlée, et double précision

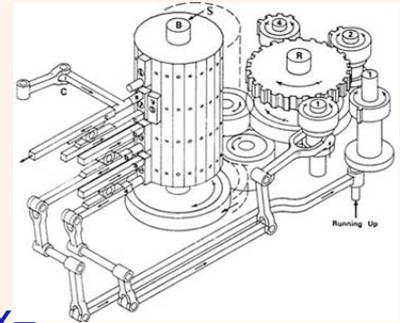
Décalages

Test (zéro, positif, négatif)

sert au contrôle de boucles

Communication avec la mémoire

Allan G. Bromley



### ❖ Une mise en œuvre technique complexe

Ci-contre, détail d'un cylindre réalisant un «microprogramme»

CC-BY-2.0 Flickr, Karoly Lorentey

### ❖ Des programmes et données sur support externe

Allan G. Bromley. The Evolution of Babbage's Calculating Engines, *IEEE Transactions on the History of Computing*, 9: 113-136 (1987)



## Utiliser la machine analytique

### ❖ Le « langage machine »

Exemple : résoudre le système d'équations  $\begin{cases} mx + ny = d \\ m'x + n'y = d' \end{cases}$

$$x = (dn' - d'n)/(n'm - nm')$$

$$y = (dm' - d'm)/(nm' - n'm)$$

Number of the operations	Operation-cards	Cards of the variables		Progress of the operations
	Symbols indicating the nature of the operations	Columns on which operations are to be performed	Columns which receive results of operations	
1	×	$V_2 \times V_4 =$	$V_8 \dots\dots$	$= dn'$
2	×	$V_5 \times V_1 =$	$V_9 \dots\dots$	$= d'n$
3	×	$V_4 \times V_0 =$	$V_{10} \dots\dots$	$= n'm$
4	×	$V_1 \times V_3 =$	$V_{11} \dots\dots$	$= nm'$
5	-	$V_8 - V_9 =$	$V_{12} \dots\dots$	$= dn' - d'n$
6	-	$V_{10} - V_{11} =$	$V_{13} \dots\dots$	$= n'm - nm'$
7	÷	$\frac{V_{12}}{V_{13}} =$	$V_{14} \dots\dots$	$= x = \frac{dn' - d'n}{n'm - nm'}$

Les  $V_i$  désignent des « colonnes » contenant des valeurs numériques

#### Limitations

- pas de notation symbolique
- « programme » sur support externe
- supports séparés pour programmes et données
- forme réduite de boucles

Extrait d'un article de L. Menabrea <http://www.fourmilab.ch/babbage/sketch.html>

# L'héritage de Babbage

## ❖ Une vision prospective, mais non exploitée

Une démarche révolutionnaire

séparation calcul-mémoire  
préfiguration des programmes  
« microprogrammation »

Une mise en œuvre difficile

complexité intrinsèque  
limitations de la technologie  
manque de financement

## ❖ Transmission

Peu de documents publiés sur la machine analytique

une description par Luigi Menabrea (avec ajouts d'Ada Lovelace)  
un très grand nombre de notes internes, encore peu exploitées

Peu d'héritiers directs

Percy Ludgate, Torres y Quevedo, Vannevar Bush  
Howard Aiken (la machine Harvard-1), voie sans issue



Wikimedia  
Commons

# Trois précurseurs peu connus

## ❖ Percy Ludgate (1883-1922)

plan pour une «machine analytique» portable  
initialement sans connaître le travail de Babbage



## ❖ Leonardo Torres y Quevedo (1852-1936)

une machine électromécanique inspirée  
de la machine analytique de Babbage  
une machine jouant une finale aux échecs (R et T contre R)



## ❖ Vannevar Bush (1890-1974)

Analyseur différentiel (analogique, 1921)  
Plans pour la *Rapid Arithmetic Machine* (1937)  
*As We May Think* (1945)



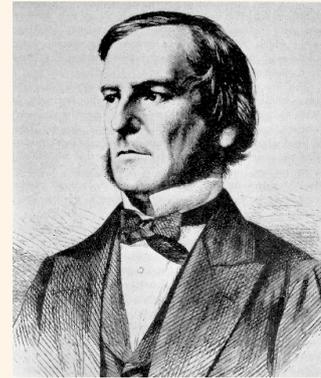
Brian Randell, From Analytical Engine to Electronic Digital Computer: The Contributions of Ludgate, Torres, and Bush, *IEEE Annals of the History of Computing*, vol. 4, n° 4, October 1982

Vannevar Bush, *As We May Think*, *The Atlantic*, July 1945 <https://www.w3.org/History/1945/vbush/vbush-all.shtml>

# George Boole (1815-1864)

## ❖ Carrière

Enseignant, directeur d'école  
Autodidacte en mathématiques  
Professeur de mathématiques à Cork (Irlande)  
à partir de 1849



## ❖ Contributions

Analyse, probabilités  
Logique

Un réexamen et une systématisation de la logique  
*An Investigation of the Laws of Thought*

## ❖ La logique symbolique

Définition de l'«univers du discours»  
L'algèbre de Boole : représentation des propositions logiques  
par des formules algébriques

# L'héritage de Boole

## ❖ Une ressource longtemps inexploitée...

Babbage aurait pu exploiter l'algèbre de Boole  
une redécouverte : la thèse de Master de Claude Shannon  
(MIT, 1938)

L'algèbre de Boole comme outil pour la conception de machines à relais

## ❖ Un outil de base pour l'informatique

Conception de circuits combinatoires

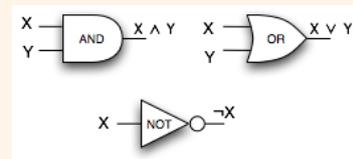
Représentation des opérateurs par des expressions booléennes

Langages de programmation

Variables et opérations booléennes

Expression de spécifications

Démonstration de propriétés



# Le calcul analogique

## ❖ Qu'est-ce que c'est ?

Représenter un objet (réel ou abstrait) par un modèle physique qui lui soit «analogue» (par exemple régi par les mêmes équations)

L'analyse du modèle permet de résoudre les problèmes relatifs à l'objet initial

Exemples : les horloges astronomiques ; les règles à calcul ; les souffleries aérodynamiques ; les calculateurs analogiques électromécaniques ou électroniques

## ❖ Analogique vs numérique

Le calcul analogique utilise des entités physiques variant de façon **continue** (longueurs, angles, vitesses, intensité électrique, etc.)

En cela il s'oppose au calcul numérique, à base d'éléments **discrets**

Il existe des conversions entre les deux mondes (ex : modems)

# Les débuts du calcul analogique

## ❖ La machine d'Anticythère (- 150 ?)

Horloge astronomique

Premier usage des engrenages

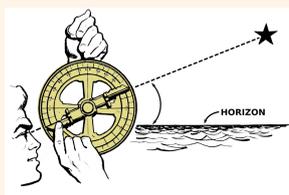


CC-BY-SA-3.0, Marsyas



CC-BY-SA-3.0,  
A. Bromley, F. Percival

## ❖ L'astrolabe



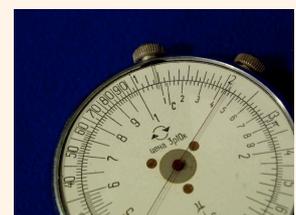
P. S. Foreman, domaine public

Mesure de la hauteur des astres

Calcul de l'heure

## ❖ La règle à calcul (1627)

Utilise les logarithmes

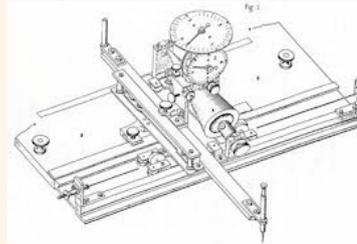


Collection Aconit

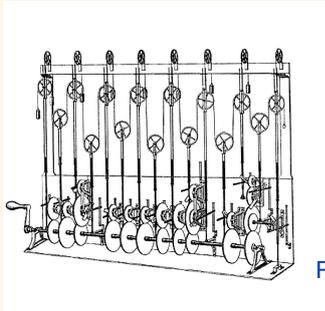
# 1850-1950 : l'apogée du calcul analogique

## ❖ Planimètres

Calculent l'aire d'une région de forme quelconque



Science Museum, London



Plan d'un prédicteur de marée  
Wikimedia, domaine public

## ❖ Calculateurs spécialisés

Prédicteur de marée et analyseur harmonique

William Thomson (Lord Kelvin), 1872

## ❖ Analyseurs différentiels

Intègrent des équations différentielles

Vannevar Bush, 1921

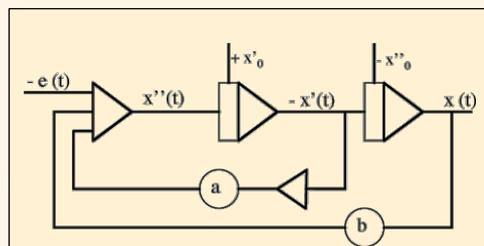
Vannevar Bush et son analyseur différentiel, vers 1935, MIT Museum



# Calculateurs analogiques électroniques

## ❖ Principe

Construire un circuit électrique représentant l'équation différentielle à intégrer



Interstices  
A. Brochier,  
F. Rechenmann

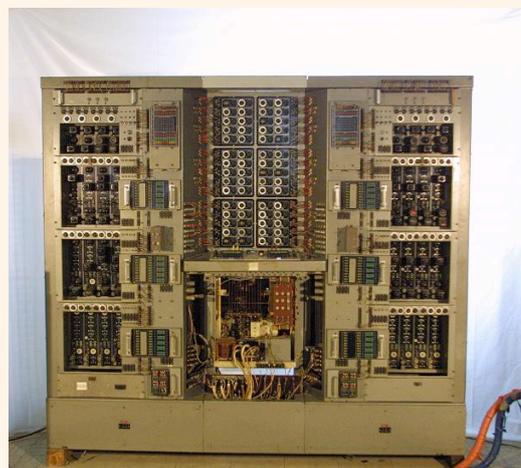
$$x''(t) + ax'(t) + bx(t) = e(t)$$

## ❖ Exemples

Calculateurs spécialisés

Calculateurs généraux

Encore en service dans les années 1960-70



Calculateur SEA OME-P2, Collection Aconit

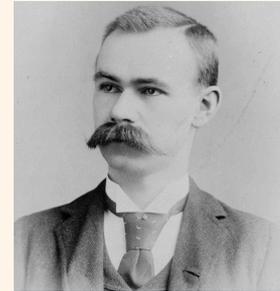
# L'invention de la mécanographie

## ❖ Un défi : le recensement de la population des États-Unis

1880 : dépouillement en 7 ans  
feuilles remplies à la main

## ❖ Une avancée spectaculaire

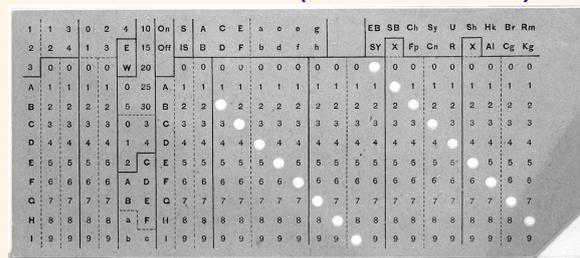
1890 : dépouillement en 2 ans et demi  
56, puis 100 tabulatrices à cartes perforées  
premier chiffre (total) en 6 semaines



## ❖ Un inventeur de génie : Herman Hollerith (1859-1929)

L'idée de base

utiliser des cartes perforées  
à champs multiples  
les traiter par des moyens  
électromécaniques



Wikimedia, domaine public

# La mécanographie : éléments de base

## ❖ La perforatrice



Perforatrice manuelle Bull  
Collection Aconit

## ❖ La tabulatrice



Tabulatrice de Hollerith,  
1890 (copie)



Tabulatrice Bull BS120 et son panneau de connexion  
Collection Aconit



## ❖ La trieuse



Trieuse IBM 82  
Collection Aconit

# La mécanographie : essor d'une industrie

## ❖ La première entreprise

*Tabulating Machines Company* (TMC) : Hollerith, 1896

Introduit la programmation par tableau de connexion

## ❖ Une fusion déterminante

TMC + CSC + ITR = CTR : Thomas J. Watson, 1911

CTR devient *International Business Machines* (IBM) en 1924

## ❖ Un modèle rentable

Location plutôt que vente

Vente des cartes, source de profit



## ❖ Une croissance rapide

En 1905, dominance des calculatrices (NCR, Burroughs, ...)

En 1925, dominance des tabulatrices (IBM,...)

En 1940, IBM emploie plus de 12 000 personnes

# À l'aube de l'histoire ...

## ❖ Situation vers 1935...

La mécanographie, industrie prospère

Le calcul analogique limité à des «niches»

Boole et Babbage dans l'oubli

La métamathématique

## ❖ Le début de l'informatique (1936-46) : deux courants indépendants

Les premiers calculateurs électroniques ou électromécaniques

Atanasoff, Stibitz, Zuse, Aiken, Eckert et Mauchly, Flowers et Newman

L'élaboration de la notion d'algorithme

Post, Kleene, Church, Turing

## ❖ La jonction se fera en 1945

von Neumann

# Travaux personnels

## ❖ Deux objectifs

Initiation à la démarche historique en sciences et techniques  
Évaluation (pas d'examen)

## ❖ Réalisations

Travail personnel, par bi- ou trinômes

Rédaction de mini-mémoires sur un sujet précis (non approfondi en cours)

Préparation de *posters* ou de vidéos

Choix et présentation d'un « objet de promotion »

Un objet lié à l'histoire de l'informatique, emblème des promotions (ENSIMAG-UFR)  
voir par exemple hall du bâtiment IMAG

## ❖ Les thèmes

Propositions disponibles sur chamilo

Toute autre proposition sera accueillie et examinée

# Réalisation de vidéos

## ❖ Objectif

Illustrer un point de l'histoire de l'informatique, de manière accessible à un public non spécialiste

## ❖ Modalités

Durée : quelques minutes

Copies d'écran fixes ou animées, exposés ou dialogues, animation, photos, ...

## ❖ Thèmes

Possible regroupement en grappes autour d'un thème

Les premiers ordinateurs : ENIAC, EDSAC, Colossus, ...

L'interaction homme-machine : les premiers jeux, la naissance de l'IHM (de Sutherland à Engelbart), la maturité (de Xerox PARC à Apple) ...

## Lectures recommandées

### ❖ Le site Interstices

site de diffusion de la culture informatique : [interstices.info](http://interstices.info), rubrique «C'était hier» (voir par ex. : mécanographie, calcul analogique)

### ❖ Sur les machines de Babbage

Article de Luigi Menabrea (+ Ada Lovelace) accessible via Interstices

Projet de reconstruction de la Machine Analytique : [plan28.org/](http://plan28.org/)

### ❖ Le site d'André Devaux sur le calcul mécanique

[calmecca.free.fr](http://calmecca.free.fr)

voir aussi [www.arithmometre.org/](http://www.arithmometre.org/)

### ❖ Le site de Gilles Dowek épistémologie de l'informatique

### ❖ La revue *IEEE Annals of the History of Computing*

accessible en ligne sur médiathèque MI2S,  
avec identification

### ❖ Deux sites très riches

Computer History Museum : [www.computerhistory.org](http://www.computerhistory.org)

Charles Babbage Institute : [www.cbi.umn.edu](http://www.cbi.umn.edu)

#### Deux livres en prêt

M. Campbell-Kelly, W. Aspray, N. Ensmenger, J. R. Yost  
*Computer: A History of the Information Machine*, 3rd ed., 2014

P. E. Ceruzzi, *A History of Modern Computing*, 2nd ed., 2003

## Prochaines séances

### ❖ 26/09 : De Turing à von Neumann

Thèmes : ENIAC, Zuse, Harvard Mark 1, Colossus, Rapport EDVAC

### ❖ 03/10 : La machine à programme enregistré

Thèmes : EDSAC, Manchester Baby et Mark1, Eckert-Mauchly  
Comp. Corp., UNIVAC, EDVAC, IAS, Whirlwind

### ❖ 10/10 : L'industrie : du *mainframe* au mini-ordinateur

Thèmes : les diverses machines développées entre 1951 et 1970,  
les aspects techniques et stratégiques

### ❖ 17/10 : L'industrie : du micro au supercalculateur

Thèmes : les circuits intégrés, la naissance et l'impact du  
microprocesseur ; l'exploitation du parallélisme et les premiers  
supercalculateurs