

Éléments d'histoire de l'informatique

Sacha Krakowiak

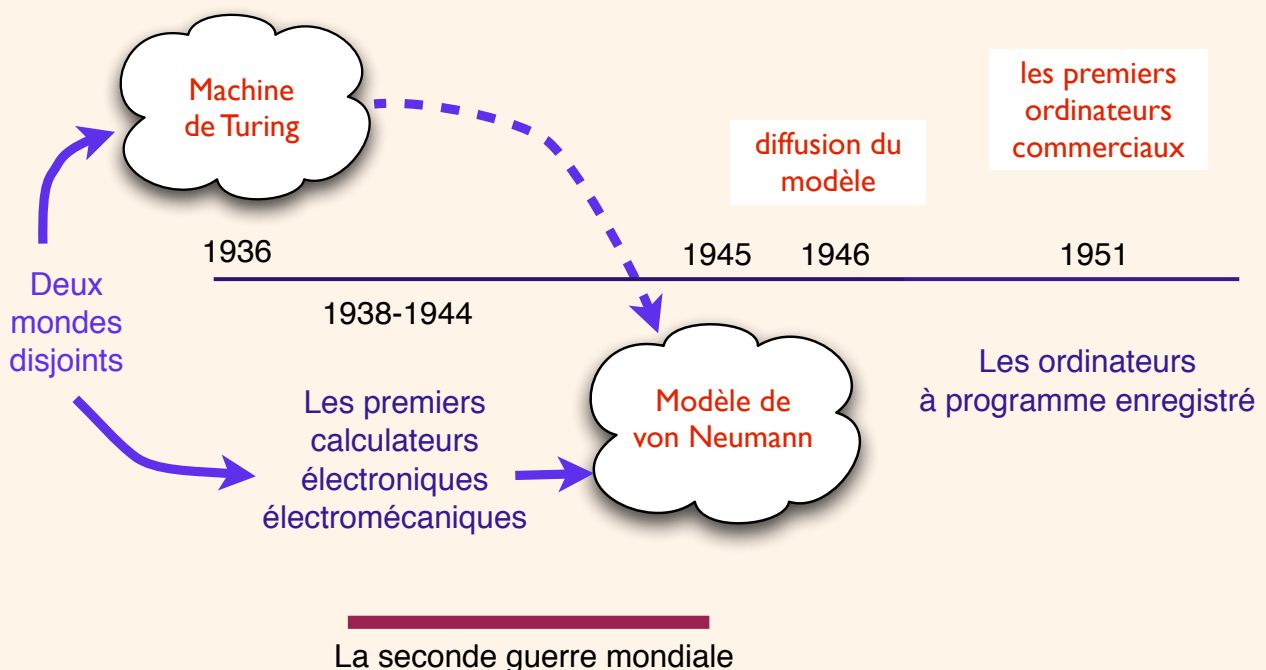
Université Grenoble Alpes & Aconit

2. De Turing à von Neumann

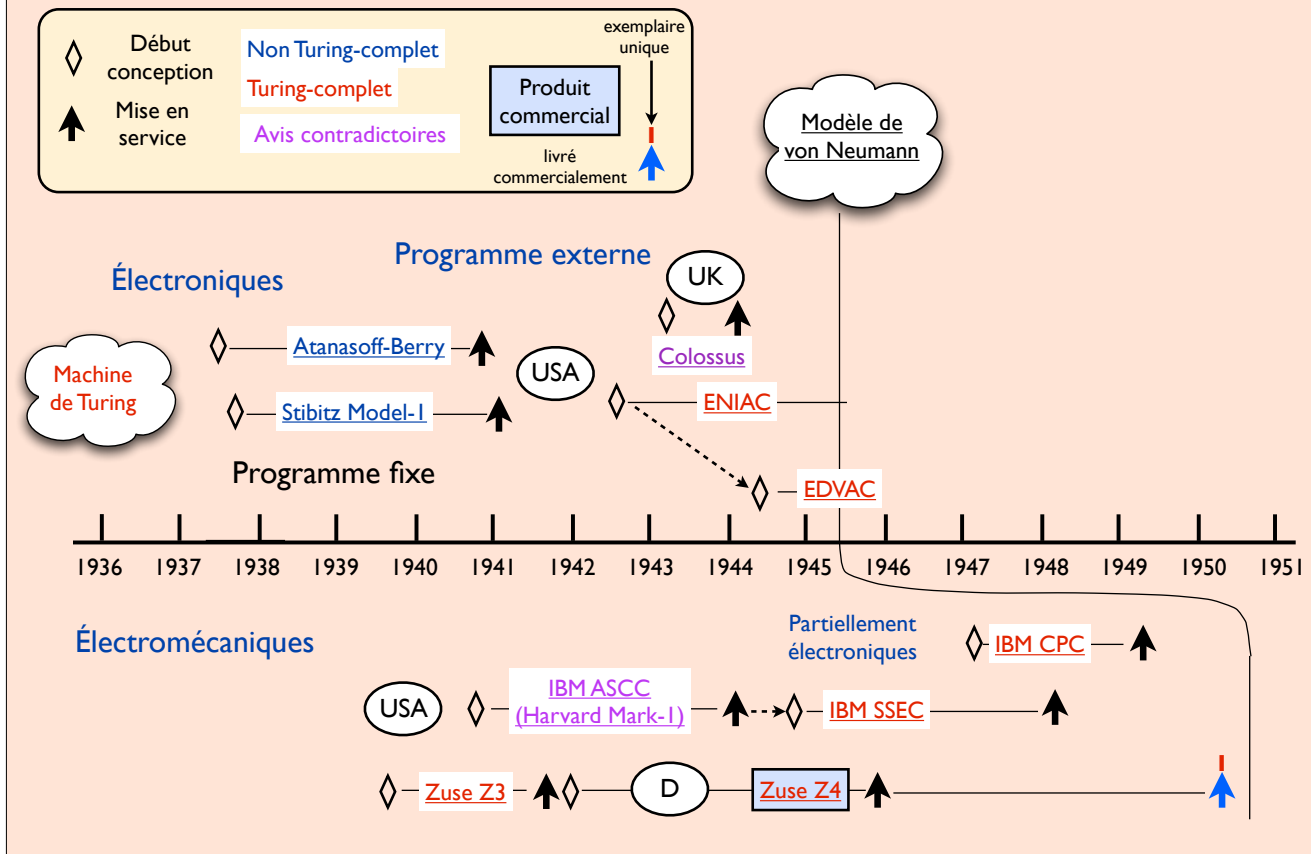
CC-BY-NC-SA 3.0 FR

De Turing à von Neumann

❖ 1936-1946 : la décennie décisive



Les premiers ordinateurs



Repenser la notion d'algorithme

❖ Le problème de la décision

Posé par Hilbert en 1928

Peut-on déterminer de façon mécanique (par un algorithme) si un énoncé est un théorème dans une théorie donnée (logique égalitaire du premier ordre, arithmétique de Peano, ...)

❖ Résultat (obtenu indépendamment, 1936) par Church et Turing

La réponse est **négative**

La démonstration amène à préciser la notion d'algorithme

Church : le lambda-calcul

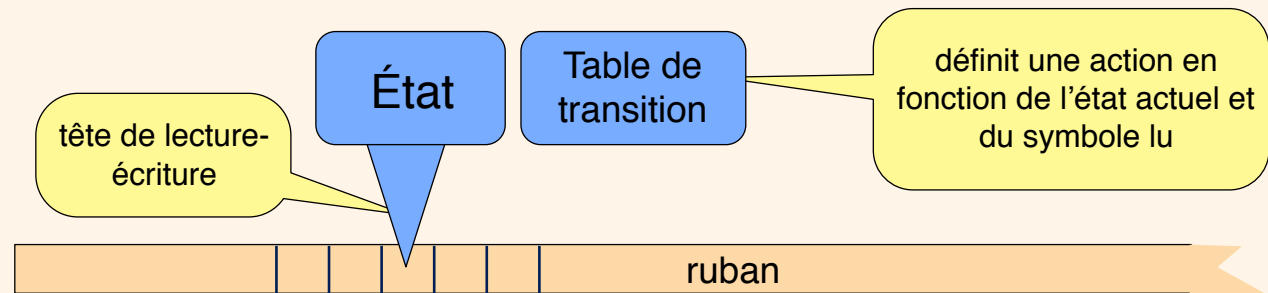
Turing : sa machine (abstraite)

❖ La thèse de Church-Turing

Un algorithme est ce que peut exprimer la machine de Turing (ou le lambda-calcul, ou tout système équivalent)

Indémontrable par nature, mais non contredite à ce jour

La machine de Turing (1)



Alan Turing
(1912-1954)

National Portrait Gallery

On définit un nombre fini d'états et un nombre fini de symboles

On définit un état initial, des données inscrites sur le ruban, et une position initiale de la tête

Actions possibles après lecture d'un symbole (selon table de transition) :

Changer d'état

Écrire un symbole sur le ruban

Déplacer la tête vers la droite ou la gauche

La machine peut

s'arrêter (état final)

se bloquer (opération impossible)

tourner indéfiniment

La machine de Turing : résultats fondamentaux

❖ La machine universelle

Il existe une machine de Turing universelle (en fait une infinité), capable d'émuler le comportement de toute machine de Turing (dont on lui fournit la table de transition)

En filigrane : un programme comme *donnée* d'un autre programme

Un système de calcul (machine, langage) est dit Turing-équivalent, ou **Turing-complet**, s'il a la même puissance expressive que la machine de Turing universelle

❖ Le problème de l'arrêt

Il n'existe pas d'algorithme général permettant de déterminer si une machine de Turing va ou non s'arrêter

Une limite intrinsèque pour les preuves de validité des programmes

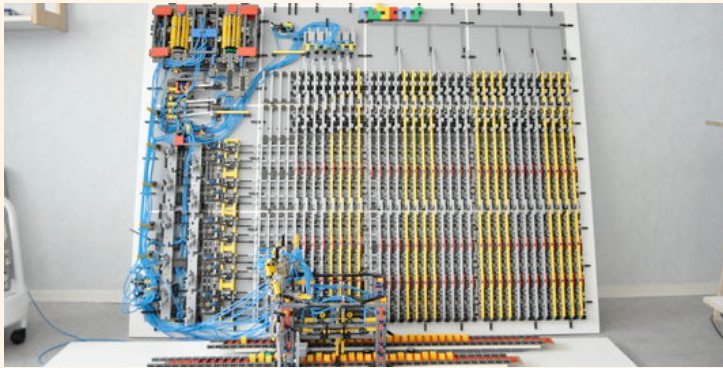
Une expérience originale...

❖ Une machine de Turing en Lego®

Réalisée en 2012 par des étudiants de l'ENS de Lyon

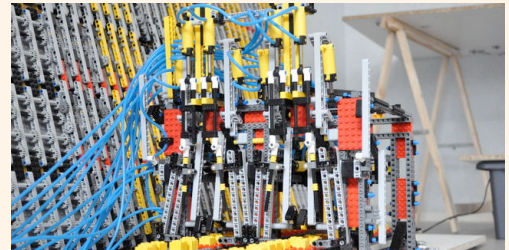
Programme : inverser un mot de 3 lettres

temps d'exécution : 15 minutes



Crédit : ENS Lyon

Énergie : pneumatique
Environ 30 000 pièces
50 mètres de tuyaux



Détail

La machine de Turing en perspective

❖ Un modèle pour l'ordinateur ?

Une interprétation *a posteriori*

D'abord une définition précise de l'algorithme...

... mais sans doute une inspiration pour la machine ACE
de Turing

❖ De la calculabilité à la complexité algorithmique

Les extensions de la machine de Turing (non-déterministes,
multi-rubans) comme outil de la théorie de la complexité

Les premiers calculateurs

	Date	Technique	Numération	Programme	Turing complet
Atanasoff-Berry Computer (ABC)	1937-41	électronique	binaire	non	non
Bell Labs (Stibitz) Model 1	1937-39	electromécanique	binaire	non	non
Zuse Z3 Zuse Z4	1939-41 1942-45	electromécanique	binaire	externe (film perforé)	oui
Harvard Mark1 (IBM ASCC)	1938-44	electromécanique	décimal	externe (ruban perforé)	?
Colossus	1943-44	électronique	binaire	externe (tableau de connexion)	non
ENIAC	1942-46	électronique	décimal	externe (tableau de connexion)	oui

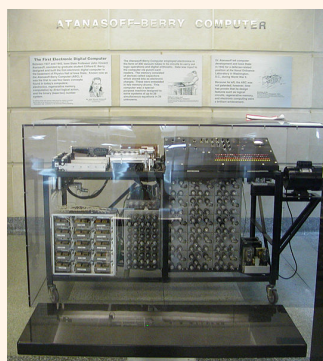
Les premiers calculateurs

❖ Atanasoff-Berry Computer (Iowa State Univ.), 1939-41

Spécialisée (systèmes linéaires), non programmable

Machine à tubes, arithmétique binaire, non Turing-complète

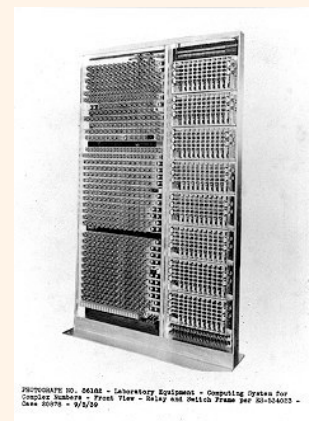
ABC



Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0 by Manopp

Stibitz Model-I
1939

Model-K, 1937
Model-I à Model V,
1939-1946



Courtesy of Computer
History Museum

❖ Bell Labs (George Stibitz)

Électro-mécanique (relais), non programmable

Spécialisée (calculs sur nombres complexes), 5 versions

Konrad Zuse (1910-1995)

❖ Carrière

1935-39, ingénieur chez Henschel (avions)

Z1 et Z2, calculateurs électromécaniques

1939, au front 6 mois, puis retour à Henschel

1941 : Z3, électromécanique, Turing complet

1942, crée son entreprise

Zuse Ingenieurbüro und Apparatebau, Berlin

Contrat pour le Z4

1944-45, raids alliés

Destruction du Z3, évacuation du Z4 à Göttingen

Apprend l'existence du Harvard Mark1 et de l'ENIAC

Commence à travailler sur le langage Plankalkül

Après la guerre : recrée Zuse KG (plus de 1000 employés vers 1960)

Z4 loué à ETH Zürich jusqu'en 1954, puis à Saint-Louis (recherche)

Série de machines : Z5 (relais), Z22 (tubes), Z23 (transistors), ...

Zuse KG vendu à Brown Boveri (1964) puis Siemens (1967)



CC-BY-SA-3.0
Wolfgang Hunscher, 1992

Les premières machines de Zuse

❖ Z1, Z2 : l'apprentissage

❖ Z3 : le premier calculateur programmable (expérimental)

Machine à relais

600 : unité arithmétique flottante binaire

1400 : mémoire de 64 mots de 22 bits

Programme externe sur film perforé

Multiplication ou division en 3 secondes

Reconstruit en 1960



Zuse Z3, Deutsches Museum
CC-BY-SA-3.0, Venusianer

❖ Z4 : Version opérationnelle de Z3

Machine à relais

Jeu d'instructions étendu

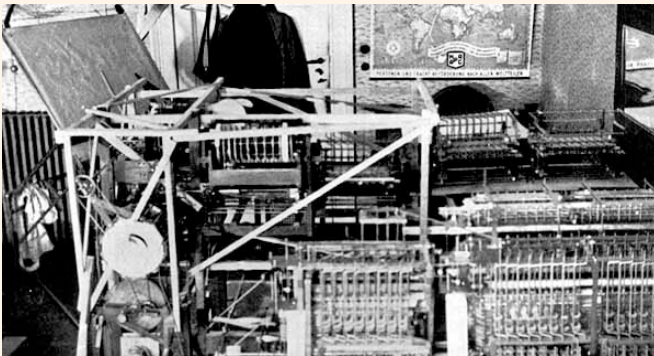
Mémoire électromécanique



Zuse Z4, Deutsches Museum
CC-BY-2.5, Andreas Pfeiffer

Du Z1 au Z3

Le Z1 vers 1938



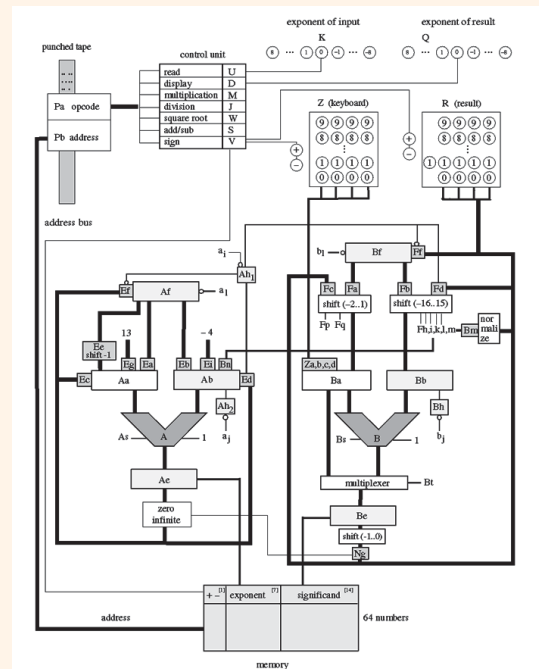
Credit : Raúl Rojas
Freie Universität Berlin

Mémoire mécanique

Z2 : expérimentations avec
relais électromécaniques

Mémoire à relais

Architecture du Z3



© 2017, IEEE
Annals of the History of Computing

Howard Aiken (1900-1973)

❖ L'héritage de Babbage

1936 : Aiken à Harvard, l'idée initiale

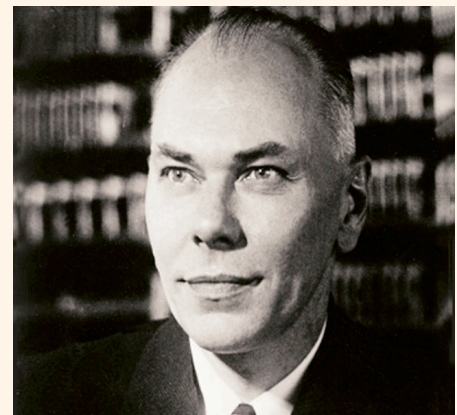
intégrer des équations différentielles

1937 : approche des industriels

Monroe (échec), IBM (accord)

1938-43 : Construction de la machine
chez IBM (IBM ASCC, Harvard Mark 1)

1944 : Machine livrée à Harvard
Divorce d'avec IBM



Wikimedia Commons, public domain

❖ La suite...

IBM : Selective Sequence Electronic Calculator (SSEC)

Aiken : Harvard Mark II, Mark III, Mark IV

Création à Harvard du premier département d'informatique

Harvard Mark 1

❖ Caractéristiques

Décimal, mots de 23 chiffres

72 registres additionneurs

60 constantes

Unités séparées : multiplication,
division, interpolation

Fiable, mais lent (~3 op./s)



CC-BY-SA 3.0, [Uploaded by Topory](#)

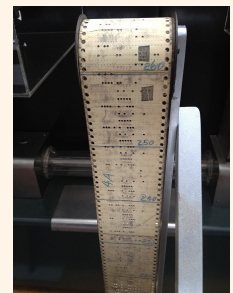
❖ Programmation

Entrée sur ruban perforé, séparation programmes-données

Format d'instruction élémentaire : 3 champs de 8 bits

source, destination, code opération

pas de branchement conditionnel (opération manuelle)



CC-BY-SA 3.0 [ArnoldReinhold](#)

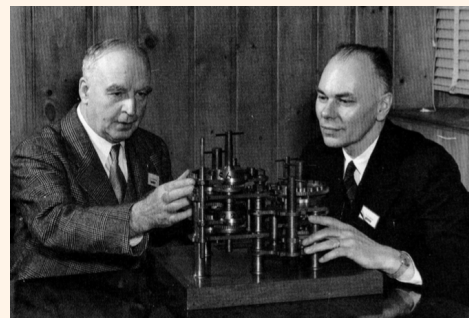
❖ Apport

Image, formation de nombreux programmeurs, premier
département d'informatique

La machine de Harvard, fragments d'histoire

❖ Aiken, héritier de Babbage

Howard Aiken en compagnie de
Richard Babbage, arrière-petit-fils de
Charles Babbage, en 1947



Paul Donaldson, Croft Laboratory, Harvard U.

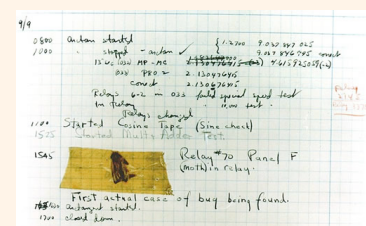
❖ Grace Hopper



L'une des principales figures du
laboratoire de Harvard, et de
l'histoire de l'informatique.

Nous la retrouverons.

Le premier bug...



Harvard Mark II, 1947

L'informatique à Bletchley Park (1940-44)

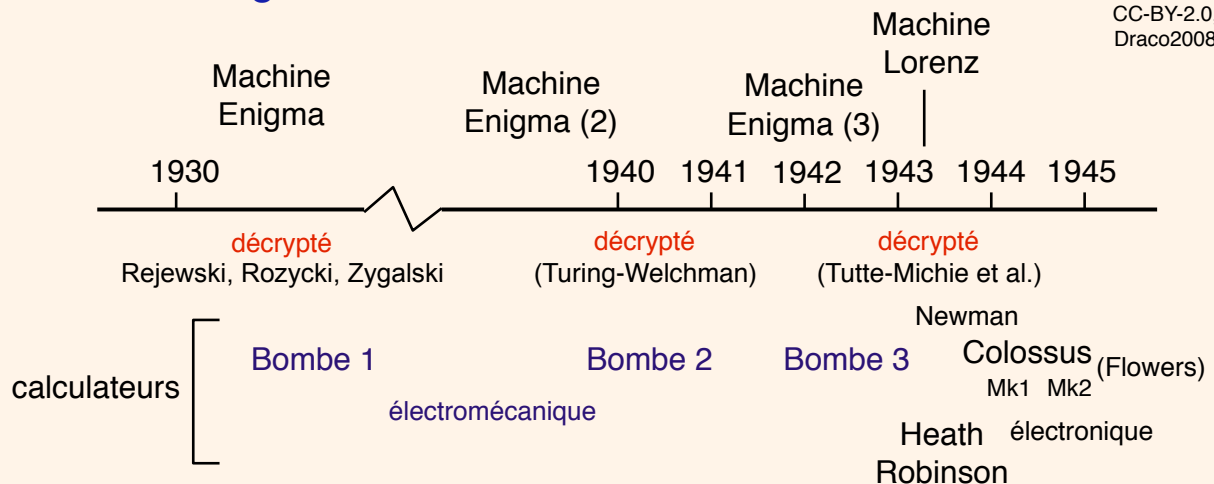
❖ Bletchley Park (UK)

centre dédié au décryptage
des messages de l'armée allemande
Jusqu'à 7500 personnes



CC-BY-2.0,
Draco2008

❖ Chronologie



Le Colossus

❖ Un tour de force technique

Construction en 11 mois

V1 : 1600 tubes, lecteur 5000 car/s

V2 : 2400 tubes, 5 fois plus rapide

Direction : Max Newman

Réalisation : Tommy Flowers



Max Newman
London Mathematical Society



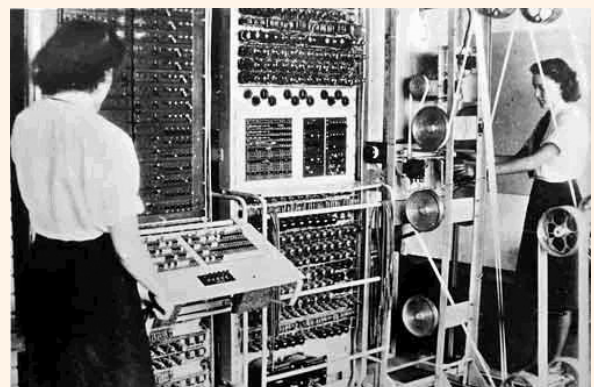
Tommy Flowers
Wikimedia Commons

❖ Le premier calculateur électronique programmable

Programme sur tableau de
connexion (comme tabulatrices)

Calculateur spécialisé
(décryptage)

10 exemplaires construits



National Archives, UK

Le Colossus

❖ Après la guerre ...

L'existence et les plans du Colossus sont déclarés secret militaire

Les 10 exemplaires sont détruits

❖ La résurrection

Le secret est (partiellement) levé
en 1975

La machine est reconstituée d'après
des plans (illégalement) conservés
(Tony Sale, 1994)

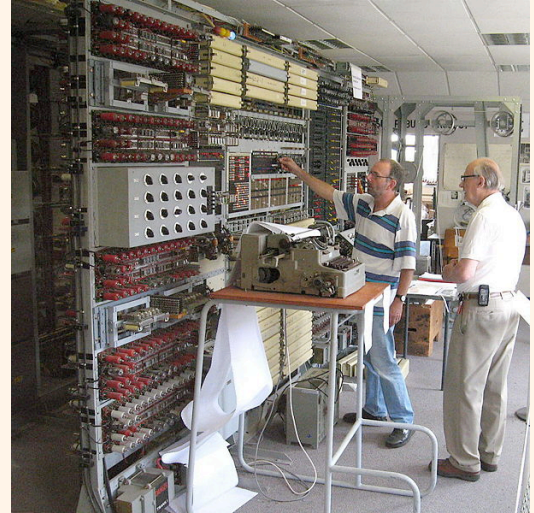
❖ Des questions ouvertes...

Le rôle de Turing

apparemment marginal

Turing complète ?

non, mais il manquait peu



CC-BY-SA-3.0, by MaltaGC, Wikipedia

L'ENIAC

(Electronic Numerical Integrator and Computer)

❖ L'origine

Le calcul des tables d'artillerie (Ballistics Research Laboratory, BRL)

Réalisé à la main, avec l'aide d'un analyseur différentiel

Un problème devenu critique au début de la guerre

1942 : plan pour un calculateur électronique (Eckert-Mauchly,
Moore School, U. Pennsylvania)

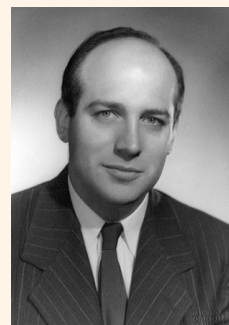
1943 : Herman Goldstine, officier
de liaison et mathématicien,
donne le feu vert (contrat BRL)

❖ La réalisation

1944 : plan pour l'EDVAC (successeur)
arrivée de von Neumann

1945 : le rapport EDVAC

1946 : l'ENIAC entre en service



J. Presper Eckert
(1919-1995)

technique
électronique



John W. Mauchly
(1907-1980)

mathématiques
programmation

Images courtesy of the Computer History Museum

L'ENIAC

❖ Caractéristiques

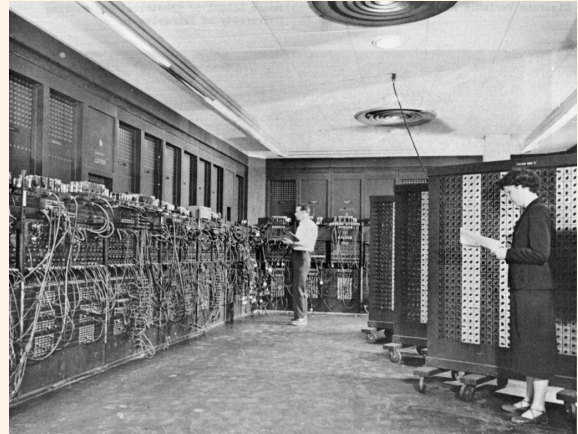
27 tonnes, salle de 18m X 9m
42 modules disposés en U
18 000 tubes, 1 500 relais, 7 500 diodes
70 000 résistances, 10 000 capacités
150 KW, refroidi par air

❖ Performances

Par seconde :

5 000 additions, 385 multiplications,
40 divisions, 3 racines carrées

Nombres décimaux, 10 chiffres + signe
Possibilité de calcul en double précision
Possibilité de parallélisme (géré à la main)



Wikimedia Commons

❖ Fiabilité

Au début
MTBF : qq heures
Après 1948
MTBF : 2 jours

L'ENIAC

❖ Architecture

20 accumulateurs (capables de faire addition/soustraction avec un autre accumulateur ou une constante)

La multiplication, la division et la racine carrée utilisent 4 accus

Les constantes sont lues sur des cartes

Les accumulateurs sont connectés via des «bus de données»

Représentation des nombres : compteurs réalisés par flip-flops

Entrées-sorties

entrée lecteur de cartes IBM (2 cartes/s)

perforateur de cartes IBM (5 cartes/3 s)

❖ Programmation

Un «plan de travail» définit la séquence des opérations à effectuer

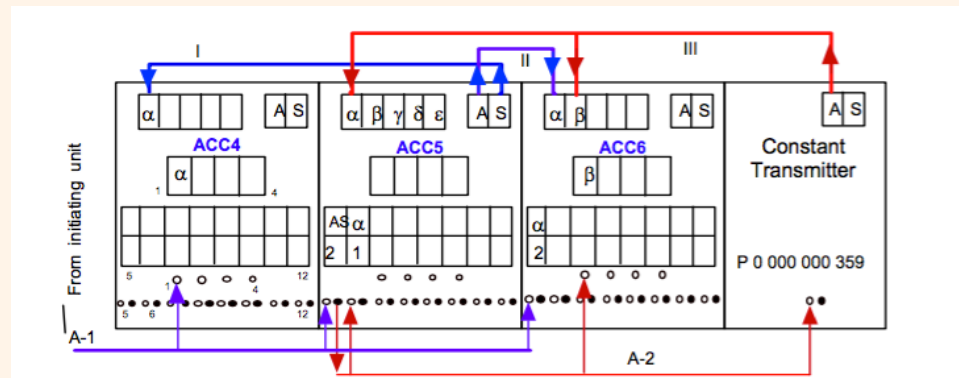
Il est réalisé par câblage des unités sur un tableau de connexion

Le branchement conditionnel (initialement absent) est possible

Aperçu du fonctionnement de l'ENIAC

Chemins de données

Chemins de commande



J. Van der Spiegel, J. F. Tau, T. F. Ala'ilima, and L. P. Ang (2000). The ENIAC: History, Operation and Reconstruction in VLSI. In: R. Rojas, U Hashagen (eds.), *The First Computers - History and Architectures*, MIT Press, Cambridge, 2000.

Si a , b , c sont les contenus initiaux des accumulateurs ACC4, ACC5 et ACC6, ce schéma calcule en parallèle : $a - b$, $b + 359$, $c + 2b + 359$ et place ces résultats dans ces 3 accumulateurs

Bilan de l'ENIAC

❖ A résolu le problème initialement posé

Calculs balistiques

Opérateurs humains, avec calculatrices : 20 heures

Analyseur différentiel : 15 minutes

ENIAC : 30 secondes

❖ Des défauts inhérents à la technique et à la conception

Fiabilité réduite (grand nombre de tubes, à faible durée de vie)

Ne peut traiter que des problèmes de taille limitée

Et surtout

Programmation complexe, très longue, sujette aux erreurs

❖ Ouvre la voie aux ordinateurs modernes

Via la conception de son successeur, l'EDVAC

John von Neumann

❖ Un esprit universel

1926-30 : enseigne les mathématiques à Berlin

1930 : Institute of Advanced Studies, Princeton

[prend la nationalité américaine](#)

1942-45 : Projet Manhattan

1944-46 : consultant pour ENIAC et EDVAC

1946 : retour à l'IAS

Contributions en mathématiques, physique,
économie



John von Neumann
(1903-1957)

[Wikimedia Commons](#)

❖ En informatique

Le rapport fondateur du «modèle de von Neumann»

La conception de la machine IAS

La théorie des automates cellulaires

Le rapport EDVAC

❖ *A First Draft of a Report on the EDVAC*

par John von Neumann, diffusé le 30 juin 1945 par H. Goldstine

❖ Principales contributions

La séparation mémoire-processeur

La séparation unité de commande-unité arithmétique

La mémoire unique, support des données et des programmes
(la machine à programme enregistré)

❖ Autres aspects

Indications sur

[schéma logique des opérations](#)

[technologie de mémoire](#)

Orienté vers le calcul numérique

[calcul en binaire](#)

[tables de fonctions](#)

Quelques ordres de grandeur

Mémoire de 4 à 8K mots de 32 bits

Multiplication : 1 à 1,5 ms

Addition : 30 à 50 μ s

Un rapport inachevé...

peu de choses sur

les entrées-sorties

la programmation

Le rapport EDVAC

❖ Une publication controversée...

Ne rend pas justice au travail d'Eckert et de Mauchly
Met les résultats dans le domaine public, sans leur accord
empêche le dépôt de brevets

❖ Une influence déterminante

Une large diffusion, via notamment les *Moore School Lectures*
Pratiquement tous les projets d'ordinateur post-1945 adoptent
l'architecture proposée

Le modèle «de von Neumann»

❖ von Neumann (avec Eckert et Mauchly)

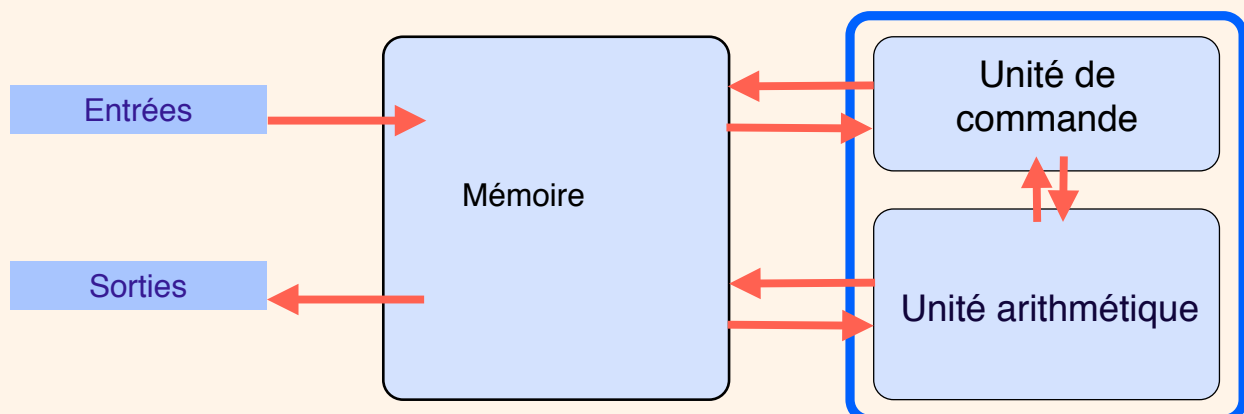
❖ Traits essentiels

Séparation mémoire-unité centrale
Séparation calcul-séquencement
La mémoire contient les données et
les instructions



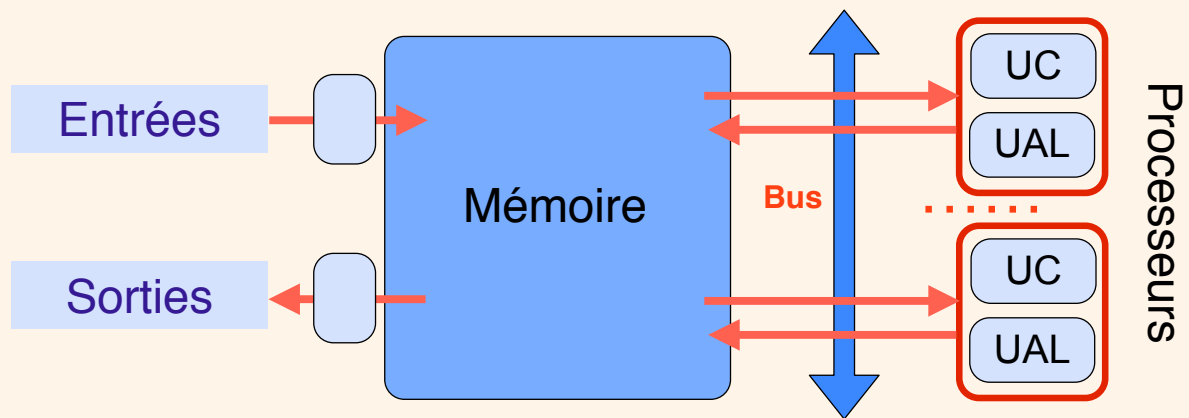
Wikimedia Commons

Unité centrale
(ou processeur)



Le modèle «de von Neumann» (2)

❖ Le modèle aujourd'hui



❖ Le «goulot de von Neumann»

Des palliatifs : les caches multiniveaux, la mémoire distribuée

L'ENIAC, phase finale

❖ Novembre 1945 : l'ENIAC entre en service

Programme enregistré à partir de 1948

Sera transférée dans un laboratoire de l'armée

Servira aux calculs pour la bombe H

❖ Printemps 1946 : dispersion de l'équipe

Eckert et Mauchly

en conflit avec l'université de Pennsylvanie (brevets)

refusent les offres d'IBM

créent leur entreprise, Electronic Control Company (ECC)

von Neumann (avec Goldstine et Burks)

revient à Princeton (Institute of Advanced Studies)

lance le projet de la machine IAS

L'équipe ENIAC de Moore School

une partie rejoint ECC

les autres continuent la réalisation de l'EDVAC

Moore School Lectures

❖ École d'été (juillet-août 1946)

Objectif : rendre publics les résultats du travail sur l'ENIAC et l'EDVAC

Financement : Département de la Défense des États-Unis

Participants : environ 30 personnes, sur invitation

Cours le matin, séminaire l'après-midi

❖ Intervenants

Principalement Eckert, Mauchly, Goldstine.

Aussi : von Neumann, Aiken, Stibitz, membres de Moore School

Un seul européen, Douglas Hartree

❖ Retombées

Quasiment tous les concepteurs des premiers ordinateurs étaient là

Première conférence sur l'informatique, Harvard 1947

Création de l'ACM (*Association for Computing Machinery*) en 1947

Les pistes ouvertes en 1946

❖ von Neumann

IAS

❖ Eckert-Mauchly

EMCC, UNIVAC

❖ Retombées de Moore School

EDSAC

ENIAC

autres

EDVAC

prog. enregistré

❖ Retombées de Bletchley Park


ACE

Manchester

❖ Retombées de Harvard

Mark II, III, IV

IBM SSEC



Ces efforts aboutiront
en 1951
à la naissance de
l'industrie
informatique