

## RESEARCH OUTPUTS / RÉSULTATS DE RECHERCHE

La Machine analytique de Charles Babbage, jalon fondamental de l'histoire des automates à calculer

Gevers, Marie

*Published in:*  
Revue des Questions Scientifiques

*Publication date:*  
2015

*Document Version*  
le PDF de l'éditeur

[Link to publication](#)

*Citation for published version (HARVARD):*  
Gevers, M 2015, 'La Machine analytique de Charles Babbage, jalon fondamental de l'histoire des automates à calculer', *Revue des Questions Scientifiques*, vol. 179, numéro 4, pp. 573-595.

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# La Machine analytique de Charles Babbage, jalon fondamental de l'histoire des automates à calculer

MARIE D'UDEKEM-GEVERS<sup>1</sup>  
*Faculté d'informatique – Université de Namur*  
[marie.gevers@unamur.be](mailto:marie.gevers@unamur.be)

## Introduction

La littérature montre de nombreuses divergences et incohérences au niveau du vocabulaire lié à l'automatisme et aux automates. Commençons donc par proposer quelques définitions, compatibles avec une vision à long terme de l'histoire de la programmation<sup>2</sup>.

Rappelons que le mot 'automate' vient du grec *automatos* et signifie, étymologiquement, qui se meut soi-même. Selon P. Devaux, l'automatisme caractérise un mécanisme dont le « processus plus ou moins complexe des opérations [...] se déroule spontanément<sup>3</sup> dès le déclenchement initial »<sup>4</sup>. Je propose de

- 
1. La traduction en français des nombreuses citations en anglais réalisée dans le texte ci-dessous est due à l'auteur de la présente contribution. Certains termes clés seront toutefois repris en anglais en notes de bas de page.
  2. Cette dernière remonte certainement au moins jusqu'aux Mécaniciens d'Alexandrie, au III<sup>e</sup> siècle avant notre ère.
  3. Autrement dit, sans intervention humaine.
  4. DEVAUX P., *Automates et automatismes*, Que sais-je? Presses universitaires de France (PUF), Paris, 127 p., 1942, p.47.

définir, de façon très large, un automate comme étant une machine<sup>5</sup> (c'est-à-dire un outil<sup>6</sup> complexe) incorporant un automatisme (au sens défini ci-dessus).

À la suite de J. Sablière<sup>7</sup>, B. Jacomy<sup>8</sup> et de B. Gille<sup>9</sup>, considérons deux principes permettant le fonctionnement d'un automatisme : la régulation (ou rétroaction) (impliquant une simultanéité par rapport déroulement du processus régulé) et la programmation (impliquant une antériorité par rapport au déroulement du processus programmé). Précisons ici que ces deux principes ne sont pas incompatibles. La régulation est un contrôle par rétroaction (*feedback*) au sens large. « C'est le principe de l'automate qui régularise et contrôle soi-même son action »<sup>10</sup>. Autrement dit c'est « l'action *en retour* d'un effet sur le dispositif qui lui a donné naissance, et donc, ainsi, sur elle-même »<sup>11</sup>. Quant à la programmation, elle se traduit par, d'une part, la détermination à l'avance de la *séquence* des opérations (ou actions) à faire effectuer par une machine et, d'autre part, l'enregistrement (durable) de cette séquence sur un support matériel qui fait office de *mémoire*<sup>12</sup>. Il n'est pas inutile de souligner que *toute programmation implique donc, par définition même, une mémoire*. Quant au programme, il peut se définir, au sens large, comme étant un « ensemble *ordonné* d'opérations [ou actions ou mouvements] exécutées par un système automatique » (Robert). Précisons encore que la séquence d'opérations en question peut, en toute généralité, être une simple répétition d'une seule opération. Ajoutons enfin que plusieurs niveaux de programmation peuvent intervenir pour une seule et même machine.

Envisageons à présent le cas particulier d'une machine à calculer. Selon la définition de J. Marguin, une telle machine « effectue automatiquement le

- 
5. Il faut noter qu'une machine n'est pas nécessairement un automate et que la mécanisation n'implique pas nécessairement l'automatisation (Daumas M., La petite mécanique et les origines de l'automatisme, in Daumas M. (dir.), *Histoire générale des techniques*. t. 3, p. 172-195, 1969, p. 190). La frontière entre 'mécanisation' et 'automatisation' est floue.
  6. « Objet fabriqué qui sert à agir sur la matière, à faire un travail » (dictionnaire Robert).
  7. Sablière J., De l'automate à l'automatisation, Gauthier Villars, Paris, 127 p., 1966, p. 12-15.
  8. Jacomy B., *Une histoire des techniques*, Éditions du Seuil, 366 p., 1990, p. 76.
  9. Gille B., *Les mécaniciens grecs : la naissance de la technologie*, Seuil, Paris, Collection Science ouverte, 236 p., 1980., p. 225.
  10. Sablière 1966, p. 15.
  11. Wikipédia.
  12. Définition adaptée de Marguin J., *Histoire des instruments et machines à calculer*, Hermann éditeurs des sciences et des arts, 207 p., 1994, p. 12.

report des retenues»<sup>13</sup>. Il s'agit donc à l'évidence d'un automate (tel que défini ci-dessus). Dans l'histoire des machines à calculer, conduisant à l'invention de l'ordinateur, la Machine analytique de Charles Babbage apparaît comme l'un des jalons les plus importants : c'est sur elle que va se focaliser la présente contribution. Cette dernière fera une synthèse de la littérature à ce sujet. Mais elle adoptera essentiellement le point de vue inusité de la mise en œuvre des automatismes (différents niveaux de programmation<sup>14</sup> et régulation) de cette machine.

## Biographie de Babbage

Avant de décrire cette machine, il convient de préciser brièvement qui est Babbage et quelles sont les circonstances dans lesquelles il imagine sa Machine analytique.

Comme le résume le site Web du Musée des sciences de Londres, Charles Babbage est à la fois « un inventeur prolifique, un mathématicien, un scientifique, un politicien, un critique de l'*establishment* scientifique et un économiste politique »<sup>15</sup>. Inventeur dans de multiples domaines<sup>16</sup>, il a conçu notamment plusieurs types de machines à calculer complexes. Mathématicien prestigieux, il a reçu, en 1823, la 1<sup>ère</sup> médaille d'or de l'*Astronomical Society*<sup>17</sup> et eut, de 1828 à 1839, la chaire occupée précédemment par Newton<sup>18</sup>.

Il est né à Londres<sup>19</sup> le 26 décembre 1791 dans une famille aisée : son père, Benjamin Babbage, était banquier. Le jeune Charles étudie les mathématiques à l'Université de Cambridge. En 1821, il rencontre son ami l'astronome William Herschel, pour repérer avec lui les erreurs de tables mathématiques<sup>20</sup>. Il décide

13. Marguin 1994, p. 43.

14. Ce point de vue inhabituel dans la littérature actuelle sur le sujet rejoint cependant celui adopté par Luigi Frederico Menabrea en 1842, quand il entreprend d'expliquer les principes de construction de la Machine analytique de Babbage à partir d'un exemple de programme (Menabrea L.F., Notions sur la machine analytique de M. Charles Babbage, in *Bibliothèque Universelle de Genève*, Nouvelle série 41, p. 352-376, 1842).

15. <http://www.sciencemuseum.org.uk/onlinestuff/stories/babbage.aspx>

16. Swade D., *The Difference Engine*, Viking, 342 p., 2001, p. 183.

17. Swade 2001, p. 38.

18. Swade 2001, p. 56-57.

19. Bromley A.G., The Evolution of Babbage's Calculating Engines, *Annals of the History of Computing*, Volume : 9, Issue : 2, p. 113-136, 1987, p. 113.

20. Swade 2001, p. 17.

de réaliser une machine pour réaliser des tables numériques précises et sans erreur<sup>21</sup> mais aussi pour faire progresser les mathématiques<sup>22</sup>. Dès 1822, Babbage réalise, dans ce double but, un petit prototype d'une machine qu'il appelle 'Machine à différences'<sup>23</sup>. Cette machine est la première de l'histoire des hommes à incorporer avec succès une règle mathématique<sup>24</sup>. Elle est aussi le lieu d'une invention qui va se révéler fondamentale et que les informaticiens appellent aujourd'hui le 'branchement conditionnel'<sup>25</sup>. Puis Babbage connaît une série de déceptions et d'épreuves familiales : en 1827: sa femme, son père et de deux de ses enfants décèdent<sup>26</sup>. À partir de 1829, Babbage commence par ailleurs à se disputer avec son technicien (dessinateur et fabricant d'outils), Joseph Clement<sup>27</sup>. Ce dernier va pendant plusieurs mois le priver des plans de la Machine à différences<sup>28</sup>. Pour cette raison fortuite<sup>29</sup>, Babbage commence, en 1834<sup>30</sup> à travailler intensivement aux plans d'une autre machine: la 'Machine analytique'<sup>31</sup>. Dès 1835, il annonce dans une lettre au statisticien belge Adolphe Quetelet qu'il est en train de concevoir une nouvelle machine<sup>32</sup>. En fait, il va en concevoir, jusqu'en 1846<sup>33</sup>, des plans de différentes versions. Il va aussi écrire différents programmes pour cette machine. Par ailleurs, comme il l'explique lui-même dans son autobiographie, il se rend à Turin en 1840 pour participer à une réunion de Philosophes italiens. Il en profite pour y faire plusieurs exposés, bien documentés, sur sa Machine analytique, en présence «des plus éminents géomètres et ingénieurs d'Italie»<sup>34</sup>. Parmi ces derniers, figure Louis Frédéric Menabrea qui va, sur base de ses notes et avec l'appui de Babbage,

21. Swade 2001, p. 27.

22. Swade D., Automatic Computation: Charles Babbage and Computational Method, *The Rutherford Journal*, Volume 3 (A Special Issue on the History of Computing, edited by B.J. Copeland, C. Posy, O. Shagrir, and P. Bright), 23 p., 2010, p. 3.

23. *Difference Engine*. Swade 2001, p. 32 et 85

24. Swade 2010, p. 7.

25. Ce concept qui laisse la machine faire un choix sur base du résultat d'un test qu'elle effectue correspond à l'instruction si ... alors...sinon en programmation.

26. Swade 2001, p. 52-53.

27. Swade 2001, p. 60-71.

28. Swade 2001, p. 91.

29. Swade 2001, p. 91.

30. Randell B., *The Origins of Digital Computers*, Third Edition, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 580 p., 1982, p. 9 et 13.

31. *Analytical Engine*.

32. Randell 1982 p. 10.

33. Bromley 1987, p. 113.

34. Babbage Ch., *Passages From the Life of a Philosopher*, London, Longman, Green, Longman & Roberts 1864 (Reprinted 1969 by A. S. Kelley, New York), p. 12-13 et 16.

rédiger en français une sorte de mémoire sur la Machine analytique, publié en 1842. Ce texte sera l'année suivante traduit en anglais et, à la suggestion de Babbage lui-même, commenté par Ada Lovelace<sup>35</sup> (fille de Lord Byron)<sup>36</sup>. Quant à Babbage, il ne fait, à cette époque, aucune tentative pour construire cette machine. Puis, en 1846, il change à nouveau de sujet de recherche et, pendant 15 mois, il va se consacrer à « une autre machine qu'il appelle Machine à différences n°2, en profitant des certains mécanismes de calcul développés pour la Machine analytique »<sup>37</sup>. Ensuite, il abandonne, semble-t-il, jusqu'au milieu des années 1850, la conception de machines à calculer<sup>38</sup>. Quand il y revient, c'est pour simplifier sa Machine analytique et commencer à la concrétiser par ses propres moyens. Le 18 octobre 1871<sup>39</sup>, alors que seule une petite portion de cette machine est construite, Babbage meurt, plein d'amertume.



Figure 1 : Portrait nécrologique<sup>40</sup> de Charles Babbage (1791-1871)<sup>41</sup>.

35. Babbage avait rencontrée pour la première fois en juin 1833 Ada Lovelace (Swade 2001, p. 155).
36. Babbage 1864, p. 16-17.
37. Broomley 1987, p. 113.
38. *Ibid.*
39. Voir figure 1.
40. Publié dans *The Illustrated London News* du 4 novembre 1871.
41. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Charles\\_Babbage\\_1860.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Charles_Babbage_1860.jpg)

## Description de la Machine analytique

Les machines conçues par Babbage sont des automates purement mécaniques. Elles doivent être actionnées soit manuellement (par une manivelle) soit par la force de la vapeur<sup>42</sup>. Elles ont en commun d'être très sophistiquées<sup>43</sup> et capables de gérer des nombres comportant beaucoup de chiffres<sup>44</sup> et aussi de recourir à des algorithmes d'addition qui gèrent simultanément plusieurs opérations (autrement dit, de recourir à une technique actuellement appelée 'pipelining')<sup>45</sup>.

Mais alors que la Machine à différences<sup>46</sup> ne devait faire que des additions (selon un séquençement<sup>47</sup> bien précisé par un programme *figé*), la Machine analytique est conçue pour effectuer automatiquement *n'importe quelle séquence d'opérations arithmétiques*. La première est spécialisée et la seconde, universelle. C'est ainsi que Babbage affirmera au sujet de cette dernière : «L'ensemble de l'arithmétique se trouvait maintenant incluse dans des mécanismes»<sup>48</sup>. Ceci représente évidemment une innovation majeure.

Pour réaliser son but, Babbage doit nécessairement recourir à un programme<sup>49</sup> *modifiable et changeable*, de façon à pouvoir être instantié à chaque séquence d'opérations qui va être choisie par l'utilisateur de la machine. Pour ce faire, la première idée de Babbage est de choisir comme support un cylindre à picots<sup>50</sup> (aussi appelés *comes*), analogue à ceux qui sont employés dans des

42. Randell 1982, p.14.

43. Bromley conclut d'une de ses études que la Machine analytique de Babbage s'est révélée beaucoup plus sophistiquée qu'on ne l'avait supposé auparavant (Bromley A.G., Charles Babbage's Analytical Engine, 1838, *Annals of the History of Computing*, Volume : 4, Issue : 3, p. 196-217, 1982, p. 217).

44. Bromley A.G., Difference and Analytical Engines, in Aspray W. Ed., *Computing before Computers*, p. 59-98, 1990, p. 77.

45. Bromley 1987, p. 115. Swade précise que cette technique, dont le nom anglais est utilisé aussi en français, consiste à préparer un résultat préventivement à son utilisation (Swade 2010, p. 8).

46. Son nom s'explique par le fait qu'elle est basée sur la méthode des différences finies.

47. <http://www.sciencemuseum.org.uk/onlinestuff/stories/babbage.aspx?page=4>

48. Babbage 1864, p.2.

49. Ce terme actuel est évidemment non utilisé par Babbage.

50. Bromley 1990, p. 76. Selon Randell (1982, p. 9), la plus ancienne note de Babbage relative à cet usage pour un cylindre à picots date de février 1835.

automates musicaux. Mais après avoir vu des métiers à tisser de Jacquard<sup>51</sup>, il se ravise et opte pour une suite ordonnée de cartes perforées<sup>52</sup>. Ces cartes devaient être fixées les unes aux autres de façon à former une sorte de bande perforée qui pouvait être déplacée, vers l'avant ou vers l'arrière, par la machine<sup>53</sup>. Par ailleurs, Babbage fait le choix<sup>54</sup> de séparer<sup>55</sup> complètement, d'une part, les opérations et, d'autre part, des variables sur lesquelles les opérations doivent se réaliser : il réserve donc des cartes particulières aux variables<sup>56</sup>. Malgré que nous n'ayons pas encore abordé la description de l'implémentation physique de la Machine analytique, il est intéressant de reprendre ici des éléments du début de la synthèse figurant dans le texte de L.F. Menabrea (traduit par Ada Lovelace en 1843) :

Concevons une pile ou une colonne verticale constituée d'un certain nombre de disques circulaires, tous traversés en leur centre par un axe commun autour duquel chacun peut effectuer, indépendamment des autres, une rotation. Si, sur la tranche de chaque disque, sont écrits les dix chiffres<sup>57</sup> qui constituent notre alphabet numérique, nous pouvons alors, en mettant sur une même verticale une série de ces chiffres, exprimer tout nombre désiré. Pour ce faire, il suffit que le premier disque représente les unités, le deuxième les dizaines, le troisième, les centaines, et ainsi de suite. Lorsque deux nombres ont été écrits sur deux colonnes distinctes, nous pouvons proposer de les combiner de façon arithmétique et d'obtenir le résultat sur une troisième colonne. En général, si nous avons une série de colonnes faites de disques que nous désignons par  $V_0, V_1, V_2, V_3, V_4$ , etc., nous pouvons demander, par exemple, de diviser le nombre écrit sur la colonne  $V_1$  par celui de la colonne  $V_4$  et d'inscrire le résultat sur la colonne  $V_7$ . (...) Les arrangements qui peuvent être communiqués aux différentes parties de la machines

- 
51. Babbage (1964 p. 4) souligne que de tels métiers figuraient encore en 1862 à l'Exposition [universelle de Londres].
  52. Il les appelle « *operation cards* » (Babbage Ch., *On the Mathematical Powers of the Calculating Engine*, manuscrit non publié daté du 26 décembre 1837 in Randell B. 1982, pp. 19-54). Il faut remarquer que la longueur d'un programme mémorisé sur un cylindre est forcément très limitée tandis que cela n'est pas le cas d'un programme sur cartes perforées. Voir figure 2 et titres de la figure 3.
  53. Bromley 1987, p. 121.
  54. Actuellement, à la lumière de ce qui se passe dans un ordinateur (voir le dernier paragraphe de cette contribution), ce choix est considéré comme malheureux.
  55. Dès lors l'adressage est direct et la machine ne peut en aucune façon modifier l'adresse spécifiée par une carte (Bromley 1987, p. 127).
  56. Il les appelle « *variable cards* » (Babbage, 1837 in Randell 1982, p. 28). Voir figure 2 et titres de la figure 3.
  57. De 0 à 9.

doivent être classés en deux catégories : premièrement, celle relative aux *Opérations*, deuxièmement, celle relative aux *Variables*<sup>58</sup>.

La suite de cette synthèse est également très éclairante<sup>59</sup> :

(...) tout calcul arithmétique dépend finalement des quatre opérations principales – l'addition, la soustraction, la multiplication et la division. (...) Le recours aux cartes perforées permet une généralisation semblable à celle des formules algébriques, étant entendu qu'une telle formule indique simplement la nature et l'ordre des opérations requises pour arriver à un certain résultat défini et que, de la même façon, les cartes commandent simplement à la machine de réaliser les mêmes opérations; mais pour que les mécanismes puissent agir de façon à atteindre n'importe quel but, les données numériques qui correspondent à chaque cas particulier du problème doivent être introduites. (...) Ainsi donc *les cartes sont simplement* une traduction de formules algébriques, ou, pour plus précisément, *une autre forme de notation analytique*<sup>60</sup>. (...) Donc tout le travail intellectuel se résumera à la préparation de la formule, qui doit être adaptée au calcul par la machine<sup>61</sup>.



Figure 2 : Cartes perforées destinées à la Machine analytique de Babbage : celles destinées aux opérations, à l'avant-plan; les autres, à l'arrière-plan<sup>62</sup>.

- 
58. Menabrea L. F., *Sketch of the Analytical Engine, Invented by Charles Babbage, With notes upon the Memoir by the Translator Ada Augusta, Countess of Lovelace*, from the *Bibliothèque Universelle de Genève*, October, 1842, No. 82, 1843. Traduit en anglais par A. Lovelace, 1843, p. 5.
59. Elle explique notamment, de façon implicite, le nom choisi par Babbage pour sa machine.
60. L'italique est ajouté par l'auteur de la présente contribution.
61. Menabrea traduit en anglais par Lovelace, 1843, p. 13.
62. <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0d/PunchedCardsAnalyticalEngine.jpg>

Il faut bien distinguer conceptuellement le programme tel qu'il peut directement être compris c'est-à-dire est *exécutable* par la machine (ici en l'occurrence la séquence de cartes perforées) et le programme tel qu'il est *écrit* par le programmeur<sup>63</sup>, dans un langage recourant notamment à des notations mathématiques standards (mais non compris par la machine). Le premier exemple de l'histoire des hommes d'un tel programme<sup>64</sup> se trouve sous forme de tableau de huit colonnes dans le texte de L.F. Menabrea traduit par A. Lovelace et est repris à la figure 3. Comme l'explique le texte accompagnateur, il s'agit de la résolution de deux équations du premier degré avec deux inconnues :

$$mx + ny = d$$

$$m'x + n'y = d'$$

Menabrea ajoute qu'il faut supposer que l'axe (ou colonne) (au sens défini ci-dessus)  $V_0$  contienne le nombre représenté par  $m$  ;  $V_1$ , celui représenté par  $n$  ;  $V_2$ , celui représenté par  $d$ ,  $V_3$ , celui représenté par  $m'$  ;  $V_4$ , celui représenté par  $n'$  et  $V_5$  celui représenté par  $d'$ . Cela figure d'ailleurs sous forme concise dans la première colonne du tableau.

63. Environ 50 programmes (fragmentaires) ont été écrits pour la Machine analytique (Bromley 1987, p. 129).

64. Ce premier programme ne possède pas encore toutes les caractéristiques des programmes qui seront élaborés ultérieurement dans l'histoire des techniques.

Columns on which are inscribed the primitive data	Number of the operations	Cards of the operations		Variable cards			Statement of results
		No. of the Operation-cards	Nature of each operation	Columns acted on by each operation	Columns that receive the result of each operation	Indication of change of value on any column	
${}^1V_0 = m$	1	1	×	${}^1V_0 \times {}^1V_4 =$	${}^1V_6 \dots\dots$	$\left\{ \begin{array}{l} {}^1V_0 = {}^1V_0 \\ {}^1V_4 = {}^1V_4 \end{array} \right\}$	${}^1V_6 = mn'$
${}^1V_1 = n$	2	"	×	${}^1V_3 \times {}^1V_1 =$	${}^1V_7 \dots\dots$	$\left\{ \begin{array}{l} {}^1V_3 = {}^1V_3 \\ {}^1V_1 = {}^1V_1 \end{array} \right\}$	${}^1V_7 = m'n$
${}^1V_2 = d$	3	"	×	${}^1V_2 \times {}^1V_4 =$	${}^1V_8 \dots\dots$	$\left\{ \begin{array}{l} {}^1V_2 = {}^1V_2 \\ {}^1V_4 = 0V_4 \end{array} \right\}$	${}^1V_8 = dn'$
${}^1V_3 = m'$	4	"	×	${}^1V_5 \times {}^1V_1 =$	${}^1V_9 \dots\dots$	$\left\{ \begin{array}{l} {}^1V_5 = {}^1V_5 \\ {}^1V_1 = 0V_1 \end{array} \right\}$	${}^1V_9 = d'n$
${}^1V_4 = n'$	5	"	×	${}^1V_0 \times {}^1V_5 =$	${}^1V_{10} \dots\dots$	$\left\{ \begin{array}{l} {}^1V_0 = 0V_0 \\ {}^1V_5 = 0V_5 \end{array} \right\}$	${}^1V_{10} = d'm$
${}^1V_5 = d'$	6	"	×	${}^1V_2 \times {}^1V_3 =$	${}^1V_{11} \dots\dots$	$\left\{ \begin{array}{l} {}^1V_2 = 0V_2 \\ {}^1V_3 = 0V_3 \end{array} \right\}$	${}^1V_{11} = dm'$
	7	2	-	${}^1V_6 - {}^1V_7 =$	${}^1V_{12} \dots\dots$	$\left\{ \begin{array}{l} {}^1V_6 = 0V_6 \\ {}^1V_7 = 0V_7 \end{array} \right\}$	${}^1V_{12} = mn' - m'n$
	8	"	-	${}^1V_8 - {}^1V_9 =$	${}^1V_{13} \dots\dots$	$\left\{ \begin{array}{l} {}^1V_8 = 0V_8 \\ {}^1V_9 = 0V_9 \end{array} \right\}$	${}^1V_{13} = dn' - d'n$
	9	"	-	${}^1V_{10} - {}^1V_{11} =$	${}^1V_{14} \dots\dots$	$\left\{ \begin{array}{l} {}^1V_{10} = 0V_{10} \\ {}^1V_{11} = 0V_{11} \end{array} \right\}$	${}^1V_{14} = d'm - dm'$
	10	3	÷	${}^1V_{13} \div {}^1V_{12} =$	${}^1V_{15} \dots\dots$	$\left\{ \begin{array}{l} {}^1V_{13} = 0V_{13} \\ {}^1V_{12} = 1V_{12} \end{array} \right\}$	${}^1V_{15} = \frac{dn' - d'n}{mn' - m'n} = x$
	11	"	÷	${}^1V_{14} \div {}^1V_{12} =$	${}^1V_{16} \dots\dots$	$\left\{ \begin{array}{l} {}^1V_{14} = 0V_{14} \\ {}^1V_{12} = 0V_{12} \end{array} \right\}$	${}^1V_{16} = \frac{d'm - dm'}{mn' - m'n} = y$
1	2	3	4	5	6	7	8

Figure 3 : Un programme écrit pour la Machine analytique<sup>65</sup>.

La deuxième colonne du programme écrit fait le décompte du numéro d'ordre de chaque opération : c'est donc cette colonne qui est véritablement la gardienne du *séquencement*. Les troisième et quatrième colonnes sont relatives aux cartes opérations : elles en donnent respectivement le numéro et la nature. Les trois colonnes suivantes concernent les cartes variables : la cinquième précise les axes concernés par l'opération en question, la sixième, l'axe qui reçoit le résultat et la septième, l'indication du changement éventuel de valeur d'un axe<sup>66</sup>. Quant à la dernière colonne du tableau, elle reprend l'énoncé de chaque

65. Menabrea dans sa traduction anglaise de Lovelace 1843. Voir [http://www.fourmilab.ch/babbage/figures/menat3\\_1.png](http://www.fourmilab.ch/babbage/figures/menat3_1.png).

66. Nous expliquerons cela ultérieurement.

résultat successif : finalement, pour ce programme-ci, c'est l'axe  $V_{15}$  qui recevra la valeur de  $x$  et l'axe  $V_{16}$ , celle de  $y$ .

Après avoir étudié la programmation de la Machine analytique par l'utilisateur, venons-en à son architecture. Elle est révolutionnaire et s'explique partiellement par les recherches, effectuées avec acharnement par Babbage à partir de 1834, pour minimiser le temps des *reports des retenues*. Babbage lui-même note en 1864 :

La partie la plus importante de la Machine analytique était indubitablement la méthode mécanique du report des retenues. C'est à cela que j'ai travaillé constamment, chaque amélioration successive me faisant avancer d'un pas ou deux. La difficulté ne résidait pas tant dans la complexité plus ou moins grande du dispositif que dans la diminution du temps nécessaire pour effectuer le report des retenues. Vingt ou trente plans et modifications différents ont été dessinés.

Finalement, Babbage a mis au point une méthode très sophistiquée qu'il appela 'report de retenues anticipant'<sup>67</sup> et qui permettait d'éviter d'attendre la propagation des reports de retenues consécutifs<sup>68</sup>.

Mais, comme le souligne Randell :

Les gains de temps obtenus le furent au prix d'une augmentation considérable de la complexité de la machine. Babbage commença alors à entrevoir qu'il y aurait de grands avantages du point de vue de l'économie du matériel à avoir un seul mécanisme arithmétique centralisé, le 'moulin', *séparé* des axes des chiffres c.-à-d. des colonnes de disques qui serviraient essentiellement de mémoire plutôt que d'accumulateurs<sup>69</sup>.

Cette affirmation de Randell suscite plusieurs commentaires. Tout d'abord, il faut noter qu'alors que le *concept* de mémoire dans le domaine des techniques remonte à l'antiquité, le *terme* lui-même n'y est apparu qu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle : Babbage ne l'emploie donc pas. Ensuite, il faut remarquer que l'idée de Babbage de *séparer les fonctions* de mémoire et de calcul se révèle particulière-

67. *Anticipating carriage* selon les termes de Babbage. Ceci est traduit par 'report anticipé' par Ligonnière R., *Préhistoire et histoire des ordinateurs*, Robert Laffont, 356 p., 1987, p. 102.

68. Bromley 1987, p. 120 et Bromley 1990, p. 80-81. Alors que les reports de retenue se propagent séquentiellement dans la Machine à différence, « tous les reports sont propagés simultanément dans la Machine analytique » (Bromley 1990, p. 81).

69. Randell 1982, p. 9.

ment innovante lorsqu'on la replace dans l'histoire générale des machines à calculer : jamais encore personne n'y avait pensé auparavant. Et comme le note Bromley, après la Machine analytique :

Cette distinction ne fut pas bien connue dans les machines modernes jusqu'au travail du groupe de l'EDVAC en 1945<sup>70</sup>, quoiqu'elle se trouve aussi dans les machines d'Atanasoff et le Modèle V de Bell. Les calculateurs modernes antérieurs, tels que l'ENIAC<sup>71</sup> et le *Harvard Mark I* ne comportent pas cette séparation et chaque élément de stockage était aussi une unité d'addition<sup>72</sup>.

Plusieurs versions successives ont été élaborées par Babbage et pas moins de 28<sup>73</sup> plans ont été dressés de sa Machine analytique. Le schéma<sup>74</sup> le plus fréquemment décrit dans la littérature date de 1840 et reflète clairement la séparation des fonctions de mémoire et de calcul inventée par Babbage : il comporte essentiellement deux parties juxtaposées mais en relation l'une avec l'autre : l'une de forme globalement circulaire (pour le calcul) et l'autre se présentant comme un très long rectangle (pour la mémoire). Comme l'explique Babbage lui-même, « les cercles placés autour d'une grande roue centrale constituent le Moulin<sup>75</sup> tandis que la partie adjacente de forme allongée représente le Magasin<sup>76</sup> »<sup>77</sup>. Selon les estimations de Bromley, le moulin devait avoir environ deux mètres de diamètre et cinq mètres de haut tandis que le magasin devait mesurer près de trois mètres<sup>78</sup>. L'ensemble devait donc avoir la taille d'une petite locomotive.

Connaissant cette séparation existant dans la Machine analytique entre calcul et mémoire, revenons un instant au programme de l'utilisateur. Ajoutons que :

(...) la collection d'axes de variables peut être considérée comme étant un *magasin* de nombres qui sont accumulés là par le *moulin*, et qui, obéissant

70. Voir ci-dessous.

71. Voir ci-dessous.

72. Bromley 1987, p. 121.

73. *Ibid.*

74. Le Plan 25, daté d'août 1840.

75. « *The Mill* ».

76. « *The Store* ».

77. Babbage, 1837 (*in* Randell 1982, p. 19) : seul texte de la plume de Babbage décrivant longuement la Machine analytique : il est manuscrit et n'a pas été publié par son auteur.

78. Bromley 1987, p. 129.

aux ordres transmis à la machine au moyen des cartes, passent alternativement du moulin au magasin et du magasin au moulin, de telle façon qu'ils puissent subir les transformations requises par la nature du calcul à réaliser<sup>79</sup>.

Voyons à présent plus en détail comment la version<sup>80</sup> des années 1840 de la Machine analytique de Babbage se présente. Le magasin comprend un nombre très élevé mais indéterminé<sup>81</sup> d'axes comportant 40 disques superposés<sup>82</sup>. En lien avec le magasin, Babbage prévoit, pour consigner les résultats, à la fois une imprimante, un appareil à perforer des cartes et un instrument permettant de tracer des courbes<sup>83</sup>. Quant au moulin, il est complexe et comprend, selon le texte manuscrit de Babbage daté de 1837, dix éléments différents. Seuls les composants les plus importants seront évoqués ici. Il y a tout d'abord ce que Babbage nomme les deux 'axes de chiffres'<sup>84</sup> : on les qualifierait actuellement de cylindres accumulateurs ou de calcul<sup>85</sup>. Il y ensuite les trois axes de reports de retenues anticipant. Il y a aussi neuf axes contenant les tables utilisées lors des multiplications et des divisions. Il y a encore un mécanisme sophistiqué<sup>86</sup> destiné à *exécuter le séquençement commandé par les cartes perforées en assurant le contrôle d'actions plus élémentaires*. Ce mécanisme comprend notamment trois cylindres à picots (ou cames)<sup>87</sup>. Chacun de ces cylindres est compa-

- 
79. Menabrea traduit en anglais Lovelace, 1843, p. 9. Pour pouvoir comprendre la septième colonne du tableau de programme, il faut encore noter le fait qu'un nombre qui passe du magasin au moulin doit être effacé de l'axe qui le représentait dans le moulin. Si un même nombre doit être employé plusieurs fois au cours d'un calcul, il doit être réécrit autant de fois que nécessaire sur un axe du magasin mais cet axe peut être toujours le même (cf. Menabrea traduit en anglais par Lovelace, 1843, p. 8).
80. Le plan datant de 1840 coïncide largement avec la seule description rédigée par Babbage et datant de 1837 (Randell 1982, p. 10).
81. Jusqu'à mille axes sont mentionnés, selon Bromley (1987, p. 129).
82. Bromley 1987, p. 129. Chaque axe peut donc mémoriser un nombre de maximum 40 chiffres.
83. Babbage 1937 in Randell 1982, p. 27.
84. « *The Figure Axes* » (Babbage 1937 in Randell 1982, p. 20)
85. Bromley 1987, p. 129-132. Un cylindre accumulateur est l'équivalent fonctionnel d'un registre accumulateur d'un ordinateur (Bromley, 1982, p. 198).
86. La sophistication de ce mécanisme n'est comprise que depuis les années 1980.
87. Ils étaient désignés par Babbage (1837 in Randell 1982, p. 21) respectivement par le terme *Barrels* (cylindres) et *studs* (picots). (Voir aussi Bromley 1990 p. 86.) Babbage explique que des picots 'peuvent' être fixés en nombre voulu et aux endroits pertinents sur un cylindre. Mon interprétation qui rejoint celle de Ligonnière (1987, p. 98) est de supposer qu'une fois réalisé le travail fastidieux et précis du 'garnissage' en picots d'un cylindre, celui-ci ne devait plus être modifié.

nable à un support de ‘microprogrammes’ dans la terminologie actuelle<sup>88</sup> : *une ligne verticale de picots d’un tel cylindre commande toutes les actions qui doivent avoir lieu en un cycle*<sup>89</sup> du mécanisme de calcul. Babbage appelait cela une ‘verticale’<sup>90</sup>. Un tel cylindre à picots peut en effet effectuer un glissement latéral amenant des picots à appuyer sur les extrémités de leviers, ce qui provoque le déroulement d’actions au niveau de la partie qui calcule de la machine<sup>91</sup>. Une verticale d’un cylindre à picots spécifie aussi notamment l’amplitude et le sens de la rotation<sup>92</sup> de ce même cylindre en fin de cycle<sup>93</sup>. Ce mécanisme permet l’itération et aussi ce que les informaticiens appellent actuellement le ‘branchement conditionnel’ car la rotation d’un cylindre peut être rendue conditionnelle à l’état courant de la machine (par ex. le changement de signe d’un résultat)<sup>94</sup>.

Permettons-nous d’insister ici sur ce dernier concept. Inventé par Babbage dans le cadre de la facilitation de la fonction d’impression pour sa Machine à différence N°1<sup>95</sup>, il devint un élément essentiel de sa Machine analytique : il lui servit initialement à implémenter l’opération de division<sup>96</sup>. Permettant un grand accroissement de l’autonomie de la machine, il s’est révélé au xx<sup>e</sup> siècle

- 
88. Comme l’explique Swade (2010 p. 8), la microprogrammation est l’exécution automatique d’une séquence d’opérations mineures pour exécuter une macro-instruction. Ainsi, les microprogrammes implémentent les séquençements nécessaires pour effectuer des multiplications, des divisions et des additions (Bromley 1987, p. 124).
89. Le cycle est défini par Babbage comme étant le temps pris par un tour de la manivelle actionnant la machine (Babbage 1837 in Randell 1982, p. 50). Un cycle dure 2 à 3 secondes selon Bromley (1987, p. 125).
90. Bromley 1987, p. 124. Il y avait typiquement 70 à 100 verticales par cylindre (Bromley 1987, p. 125)
91. « *When the barrels advance horizontally these studs act on levers which cause various movements in the mill, the stud belonging to each ring giving a different order* » (Babbage 1837 in Randell 1982, p. 21).
92. Comme le fait remarquer Bromley, tous les mouvements des cartes perforées, de même que ceux du cylindre à picots sont relatifs (à la position actuelle) et il n’y a pas d’adressage absolu (Bromley 1987, p. 127).
93. Bromley 1987, p. 124-125.
94. Randell 1982 p. 13 et 1994 pp. 7-8. Babbage fait notamment allusion à ce concept dans son texte de 1864 Ch. VIII p. 15.
95. Bromley 1987, p. 118-119.
96. Bromley 1987, p. 121. En effet, Babbage réalisa « que la division procédait fondamentalement par essai et erreur. Lorsque vous cherchez à trouver le chiffre quotient suivant (le chiffre suivant dans la division), la seule chose possible est de deviner. Le chiffre testé peut être trop grand ou trop petit et donc on multiplie et on soustrait pour trouver le reste de la division. Et ce n’est que sur base de ce reste qu’il est possible de choisir ce qu’il faut faire ensuite » (Bromley 1987, p. 121).

être de la plus extrême importance : il est un concept de base d'un ordinateur. Ajoutons encore que le branchement conditionnel peut être considéré comme un cas particulier de *régulation* (selon le vocabulaire défini ci-dessus), l'un des deux principes envisagés ici de l'automatisation : il s'agit en quelque sorte d'une régulation réalisée par programmation, autrement dit, d'une autorégulation du programme.

Au total<sup>97</sup>, du point de vue de l'automatisation de la Machine analytique, on peut noter que les deux principes décrits dans l'introduction ont donc été mis en œuvre : la régulation et la programmation. La régulation se concrétise par le branchement conditionnel. Quant à la programmation (au sens large, telle que définie dans l'introduction), elle est établie sur une base hiérarchique et comporte plusieurs niveaux. Les deux premiers sont bien soulignés dans la littérature<sup>98</sup>. Je propose ici d'en distinguer un troisième, qui leur est inférieur. Le niveau supérieur est celui de l'utilisateur et a pour support des cartes perforées : tout programme correspondant est donc modifiable manuellement et surtout échangeable avec un autre programme. Le niveau moyen est celui qui correspond à la mise en œuvre du programme supérieur : il est (vraisemblablement) figé et a pour support essentiellement les trois cylindres à picots, assimilables à des mémoires de microprogrammes. Et le niveau inférieur, que je suggère d'ajouter, est celui du report de retenues. Il se justifie par la définition large adoptée ici pour la programmation. Evidemment ce programme est figé car ne nécessite à l'évidence aucune modification, une fois concrétisé dans toute la subtilité prévue par Babbage.

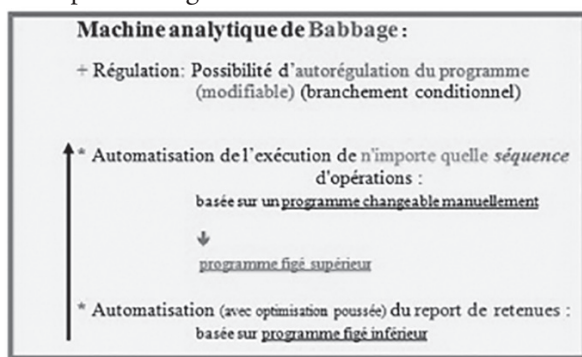


Figure 4 : Structure de mise en œuvre de l'automatisation dans la Machine analytique de Babbage (selon mon analyse)

97. Voir figure 4.

98. Bromley 1987, p. 127. Bromley précise que Babbage lui-même « comprenait clairement de telles hiérarchies de contrôle » (Bromley 1982, p. 198).

Bromley fait la remarque suivante :

Les idées de Babbage au niveau de la programmation par l'utilisateur ne furent pas fort développées. En revanche, ses idées au niveau des microprogrammes d'implémentation des algorithmes utilisés pour les opérations de multiplication, de division et d'addition furent très développées. Les programmes des utilisateurs furent considérés comme 'la même chose à un nouveau niveau' et ils ne se dégagèrent jamais complètement de certaines contraintes restrictives, appropriées seulement aux implémentations du niveau des microprogrammes. Certaines des idées les plus anciennes de Babbage, telles que la séparation des cartes des opérations et des variables ainsi que l'adressage direct de la mémoire qui y est lié (la machine ne peut modifier l'adresse spécifiée par une carte de variables), imposèrent des limitations que Babbage, en l'absence d'une machine opérationnelle lui ayant permis de tester ces idées, ne surmonta jamais. Babbage prépara, au total, relativement peu de programmes de niveau-utilisateurs et beaucoup de ceux-ci semblent être des essais de clarification de difficultés dont il était conscient mais qu'il ne pouvait résoudre. Si nous voulons juger des qualités de Babbage comme programmeur, nous devons prendre en considération la sophistication de ses microprogrammes<sup>99</sup>.

Me basant sur ma suggestion de considération d'un niveau supplémentaire de programmation, je voudrais ajouter que les qualités de programmeur<sup>100</sup> de Babbage peuvent se mesurer aussi à la sophistication qu'il a déployée au niveau de la mise en œuvre des reports de retenues<sup>101</sup> dans sa Machine analytique et dont il était d'ailleurs particulièrement fier<sup>102</sup>.

## Bilans

En guise de bilan à cette étude, nous tenterons d'abord d'expliquer l'échec de la réalisation des différentes machines de Babbage, puis nous analyserons les impacts de sa Machine analytique et enfin nous évoquerons la suite de l'histoire qui a conduit aux ordinateurs.

99. Bromley 1987, p. 127.

100. Programmeur, au sens large, ce qui implique ici la capacité de détermination à l'avance de la *séquence* des opérations complètement élémentaires à faire réaliser par la machine pour obtenir une optimisation du temps des reports de retenues.

101. On peut considérer qu'elle correspond à un «algorithme» (au sens de «séquençement» prévu) particulièrement subtil, surtout dans un contexte où, comme le souligne Bromley (1987, p. 123), l'algèbre booléenne (inventée seulement à la fin des années 1840) n'était pas encore disponible.

102. Bromley 1987, p.123 et Bromley 1990, p. 80.

Babbage est mort alors qu'aucune de ses machines n'a été réalisée. Or il semble bien établi actuellement<sup>103</sup> que ses machines étaient techniquement réalisables à son époque. Une version de la Machine à différences N°2 a d'ailleurs été construite par le *Science Museum* de Londres : le projet a duré six ans et a abouti en 1991<sup>104</sup> à une machine fonctionnant parfaitement. Et concernant la Machine analytique, Bromley sur base de son analyse minutieuse, en particulier de l'implémentation prévue pour les reports de retenus anticipant qu'il considère comme la partir techniquement la plus cruciale et critique de la machine, en arrive à la conclusion suivante :

Des analyses telles que celles-ci me conduisent à croire que la Machine analytique aurait pu être construite avec la technologie dont disposait Babbage, bien que cela eût exigé indubitablement un travail astreignant et onéreux<sup>105</sup>.

Comment peut-on alors expliquer un tel fiasco pour Babbage ? Voici l'explication générale donnée par Doron Swade, l'ingénieur et historien qui fut responsable de la construction de la Machine à différences par le musée londonien :

Babbage a eu la malchance de concevoir sa machine alors que la technologie manufacturière était en transition entre l'artisanat et la production de masse, avant donc que ne soient établies des méthodes pour produire des éléments semblables en grande quantité. Les composants étaient réalisés un à la fois et chacun était légèrement différent des autres. (...) La capacité de réaliser de multiples copies en même temps en introduisant du parallélisme dans le processus de production paraît aller de soi aujourd'hui. Mais dans les années 1820, le problème était qu'il n'y avait pratiquement aucune standardisation dans la manufacture. (...) En l'absence de standardisation, des éléments produits par différentes machines sont tout simplement non interchangeables<sup>106</sup>.

À ce problème d'inexistence de standardisation, s'ajoute, pour le cas de la Machine à différences, des problèmes des relations conflictuelles de Babbage avec le gouvernement anglais à propos du financement et aussi avec son technicien Clement.

---

103. Bromley 1990, p. 81.

104. Deux cents ans exactement donc après la naissance de Babbage. La partie imprimante de la Machine à différences n'a été achevée qu'en 2001.

105. Bromley 1982, p. 204.

106. Swade 2001, p. 45-46.

En ce qui concerne la Machine analytique, il semble bien que Babbage ait fait le choix délibéré de se concentrer sur le challenge intellectuel qu'en constituait la conception et de n'en construire qu'un petit fragment prototype<sup>107</sup>.

Randell ajoute que l'explication de l'échec de Babbage est également imputable au perfectionnisme de Babbage et l'absence de consensus parmi ses contemporains au sujet de l'utilité de ses machines<sup>108</sup>.

Admettons que tous ces éléments aient concouru à ce que Babbage n'ait pu construire aucune de ses machines. On aurait pu s'attendre, néanmoins, à ce que ses travaux aient eu un grand impact sur la suite de l'histoire des machines à calculer. Or il n'en est rien. Nous nous proposons de reprendre ici, par ordre chronologique, différentes affirmations à ce sujet. Tout d'abord voici la conclusion, datée de 1971, de Maurice Wilkes, qui a été le responsable de la construction de l'ordinateur EDSAC<sup>109</sup> à l'Université de Cambridge dès 1947<sup>110</sup> et qui fut l'un des premiers à évaluer le travail de Babbage :

Il est évident que Babbage évoluait dans un monde d'architecture logique et d'architecture système. Il est clair que des problèmes qui ne devaient être discutés dans la littérature que cent ans plus tard lui étaient familiers et qu'il les avait déjà résolus. (...) [Le monde de Babbage était] manifestement semblable à celui dans lequel j'étais plongé il y a 25 ans<sup>111</sup>.

En 1973, Randell, spécialiste de l'origine des calculateurs digitaux confirme :

La plupart des projets des calculateurs des années de guerre furent apparemment menés en ignorant à quel point beaucoup de problèmes rencontrés avaient déjà été pris en compte et souvent résolus par Babbage cent ans plus tôt<sup>112</sup>.

Mais il ajoute :

---

107. Bromley 1990, p. 81.

108. Randell 1982, p. 14.

109. *Electronic Delay Storage Automatic Calculator*.

110. Voir le chapitre 8 de Randell 1982.

111. Cité par Swade 2001, p. 92 et Randell 1982, p. 13.

112. Randell 1982, p. 17.

Cependant, dans certains cas, il est certain que la connaissance de l'œuvre de Babbage influença les pionniers des années 40, en particulier Howard Aiken<sup>113</sup>.

Quant à Bromley, après avoir étudié avec minutie beaucoup de documents<sup>114</sup> laissés par Babbage ainsi que les filiations intellectuelles ayant conduit à l'émergence des calculateurs digitaux pendant la première guerre, il apporte un éclairage nouveau. Il affirme en effet en 1990 :

« Dans le domaine pratique de la réalisation de machines à calculer automatiques, il est même possible que l'influence de Babbage fût contreproductive. Quel intérêt y a-t-il à essayer de faire une machine automatique quand un homme au génie reconnu comme Babbage n'y a pas réussi ? »<sup>115</sup>.

Quoiqu'il en soit, la synthèse suivante peut être trouvée actuellement sur le site web du *Computer History Museum* :

Le mouvement du 19<sup>e</sup> siècle vers une automatisation du calcul se solda par un échec et ce mouvement s'éteignit largement avec Babbage en 1871<sup>116</sup>. Il n'y a pas de ligne continue de développement depuis Babbage jusqu'à aujourd'hui, et beaucoup des principes inclus dans l'œuvre de Babbage furent réinventés par les pionniers de l'ère électronique, largement dans l'ignorance de son travail. Bien que sa contribution demeure légendaire, ce n'est que dans les années 1970 que ses projets furent étudiés en détail et que la dimension de ses résultats se révéla plus clairement.

Venons-en à présent à la suite de l'histoire de l'automatisme. Pour rappel, avec la Machine analytique de Babbage, le programme (de niveau le plus élevé : celui de l'utilisateur) reste toujours sur cartes perforées (qui constituent évidemment une mémoire au sens large) : la mémoire (*store*) (au sens strict) ne peut contenir que des données. L'étape suivante dans l'histoire de l'ingénierie des machines à calculer sera la mise en mémoire (interne ou centrale, par rapport à la machine) non seulement des données mais aussi du programme. Un tel programme est désigné actuellement en anglais par l'expression '*stored program*', ce qui peut se traduire en français par 'programme enregistré'<sup>117</sup>. Cette

113. *Ibid.*

114. En particulier, les documents se trouvant au *Science Museum* de Londres (Bromley 1982, 197).

115. Bromley 1990, p.97.

116. <http://www.computerhistory.org/babbage/history/>

117. Cette expression prête cependant à confusion car, comme expliqué dans l'introduction, tout programme est par définition enregistré.

innovation va *permettre à terme une automatisation considérablement accrue de la machine*. Mais toutes ses potentialités n'ont pas été immédiatement perçues.

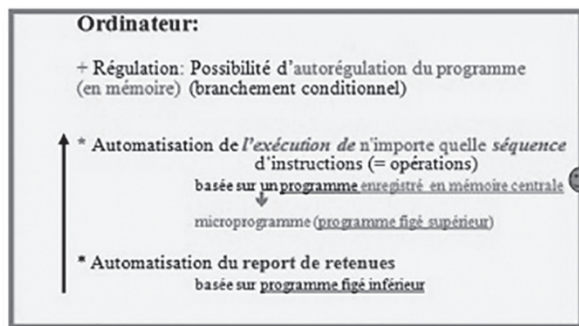


Figure 5 : Structure de mise en œuvre de l'automatisation d'un ordinateur (selon mon analyse)

Le concept de programme enregistré a émergé dans le contexte de la construction de calculateurs électroniques. En effet, l'ENIAC<sup>118</sup>, réalisé en grand secret pendant la seconde guerre mondiale à la *Moore School* de l'Université de Pennsylvanie, s'est avéré être une voie techniquement sans issue. Sa construction, achevée en novembre 1945, a été réalisée par une équipe constituée notamment de John Mauchly et J. Presper Eckert, auxquels s'est joint, à partir de 1945, John von Neumann. L'ENIAC offrait une vitesse de calcul révolutionnaire puisqu'il était électronique mais il avait un inconvénient majeur : il requérait un temps très important pour être programmé. En effet, tout programme devait être « câblé » c'est-à-dire que les circuits électriques pertinents pour le programme en question devaient être réalisés manuellement à l'aide d'un système de fiches et de câbles par des opérateurs. Autrement dit le support du programme était constitué des câblages électriques. La gestion du temps pour cette machine était incohérente. Il fallait trouver une amélioration du support de la programmation. La solution trouvée fut de mettre le programme dans la même mémoire de l'ordinateur que les données. Comme le souligne Randell<sup>119</sup>, cette solution répondait en fait à une triple exigence : celle de pouvoir avoir de longs programmes, celle de permettre des temps d'accès aux instructions (autrement dit de 'lecture') compatibles avec la rapidité d'exécution des opérations programmées et celle de réduire considérablement le temps nécessaire pour changer de programme. Selon la synthèse exhaustive du sujet

118. *Electronic Numerical Integrator and Computer*.

119. Randell B., *The Origins of Computer Programming*, *IEEE Annals of the History of Computing*, vol.16, Issue 4, pp.6-14, 1994, p. 12.

réalisée par Randell<sup>120</sup>, c'est bien l'équipe de la *Moore School* qui fut probablement pionnière dans la compréhension de certains avantages à exploiter de la mise en mémoire du programme. Toujours selon cet auteur<sup>121</sup>, la première version écrite *documentée* traitant du concept de programme enregistré<sup>122</sup> est le *First Draft of a Report on the EDVAC*<sup>123</sup>, daté du 30 juin 1945. Il est signé d'un seul auteur : John von Neumann. Comme le soulignent B.E. Carpenter et R.W. Doran, il est incomplet<sup>124</sup> et n'était pas destiné à être publié<sup>125</sup>. Néanmoins, il va fonder l'architecture d'ordinateur qui sera ultérieurement souvent qualifiée de « von Neumann ». Il faut bien remarquer que cette architecture logique est fondamentalement la même que celle de la Machine analytique de Babbage. On peut en effet retrouver dans cette dernière les cinq éléments cités par von Neumann : la partie arithmétique centrale, la partie contrôle centrale, la mémoire, les entrées et les sorties<sup>126</sup>.

Cependant, selon beaucoup de commentateurs (parmi lesquels, Randell), le concept de « programme enregistré » lui-même tel que défini en 1945 par von Neumann est encore incomplet et ne suffit pas à définir un ordinateur. En effet selon eux, comme l'explique Randell, le concept implique aussi que la machine

soit capable à la fois de construire, de manipuler *et ensuite (surpassant la notion à laquelle était arrivé Babbage un siècle plutôt) d'exécuter ses propres programmes, de façon complètement automatique*<sup>127</sup>. Dans cette dernière perspective, le concept de 'programme enregistré' devient une approximation d'ingénierie de l'automate théorique universel<sup>128</sup> qu'Alan Turing a postulé dans son (maintenant) fameux article de 1936<sup>129</sup> : il s'agit d'une machine universelle<sup>130</sup>, à la fois au sens mathématique vraiment fondamental et au

120. Randell 1982, p. 377.

121. *Ibid.*

122. Non encore nommé comme cela, il est vrai.

123. *Electronic Discrete Variable Automatic Computer*

124. Des détails sont omis.

125. Carpenter B.E. & Doran R.W., The other Turing Machine, *Comp. J.*, vol. 20 n°3, p. 269-279, 1975, p. 269.

126. *Central arithmetic part, Central control part, Memory, Input, Output* (Von Neumann J., *First Draft of a Report on the EDVAC*, 1945. p. i).

127. L'italique est ajouté par l'auteur de la présente contribution.

128. *Universal*.

129. Turing A.M., On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem, *Proc. Lond. Math. Soc.* 42(2), 230-265, 1936.

130. *General-purpose*.

sens très pratique. Donc, étant donné la nécessité pratique de remplacer le ruban infini de la Machine de Turing par une mémoire à accès non séquentiel<sup>131</sup>, il est crucial pour l'ordinateur de pouvoir calculer les adresses utilisées pour accéder à la mémoire, plutôt que de se contenter de recourir uniquement à des adresses pré-calculées (c.-à-d. fixées)<sup>132</sup>.

Le programme enregistré en mémoire se caractérise donc par le fait qu'il peut être l'objet de diverses actions automatiques de la part de l'ordinateur. Cette caractéristique s'est révélée décisive.

## Bibliographie

- ASPRAY W. (Ed.), *Computing before Computers*, 266 p., 1990. Disponible à l'adresse <http://www.ed-thelen.org/comp-hist/CBC.html>
- BABBAGE Ch., *On the Mathematical Powers of the Calculating Engine*, manuscrit non publié daté du 26 décembre 1837 in Randell B. 1982, pp. 19-54.
- , *Passages From the Life of a Philosopher*, London, Longman, Green, Longman & Roberts 1864 (Reprinted 1969 by A. S. Kelley, New York) Partiellement disponible à l'adresse: <http://www.fourmilab.ch/babbage/lpae.html>
- BROMLEY A.G., Charles Babbage's Analytical Engine, 1838, *Annals of the History of Computing*, Volume : 4, Issue : 3, p. 196-217, 1982.
- , The Evolution of Babbage's Calculating Engines, *Annals of the History of Computing*, Volume : 9, Issue : 2, p. 113-136, 1987.
- , Difference and Analytical Engines, in Aspray W. Ed., *Computing before Computers*, p. 59-98, 1990.
- CARPENTER B.E. & DORAN R.W., The other Turing Machine, *Comp.J.*, vol. 20 n°3, p. 269-279, 1975.
- DAUMAS M. (dir.), *Histoire générale des techniques*, t. 3, *L'expansion du machinisme* par M. Dubuisson, J.-B. Ache, M. Audin e. a. ; introduction par M. Daumas ; publiée sous la direction de M. Daumas, Presses universitaires de France (PUF), Paris, 1969.
- , La petite mécanique et les origines de l'automatisme, in Daumas M. (dir.), *Histoire générale des techniques*. t. 3, p. 172-195, 1969.
- DEVAUX P., *Automates et automatismes*, Que sais-je? Presses universitaires de France (PUF), Paris, 127 p., 1942.
- GILLE B., *Les mécaniciens grecs : la naissance de la technologie*, Seuil, Paris, Collection Science ouverte, 236 p., 1980.

131. *Random access store*.

132. Randell 1994, p. 13.

- JACOMY B., *Une histoire des techniques*, Éditions du Seuil, 366 p., 1990.
- LIGONNIÈRE R., *Préhistoire et histoire des ordinateurs*, Robert Laffont, 356 p., 1987.
- MARGUIN J., *Histoire des instruments et machines à calculer*, Hermann éditeurs des sciences et des arts, 207 p., 1994.
- MENABREA L.F., Notions sur la machine analytique de M. Charles Babbage, in *Bibliothèque Universelle de Genève*, Nouvelle série 41, p. 352-376, 1842.  
[http://www.christies.com/LotFinder/lot\\_details.aspx?pos=7&intObjectID=4443500&cid=](http://www.christies.com/LotFinder/lot_details.aspx?pos=7&intObjectID=4443500&cid=)
- , *Sketch of the Analytical Engine, Invented by Charles Babbage, With notes upon the Memoir by the Translator Ada Augusta, Countess of Lovelace*, from the *Bibliothèque Universelle de Genève*, October, 1842, No. 82, 1843. <http://www.fourmilab.ch/babbage/sketch.html#NoteB>
- RANDELL B., *The Origins of Digital Computers*, Third Edition, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 580 p., 1982. Les premières éditions de ce livre datent respectivement de 1973 et 1975.
- Randell B., The Origins of Computer Programming, *IEEE Annals of the History of Computing*, vol.16, Issue 4, pp. 6-14, 1994.
- SABLIÈRE J., *De l'automate à l'automatisation*, Gauthier Villars, Paris, 127 p., 1966.
- SWADE D., *The Difference Engine*, Viking, 342 p., 2001.
- , Automatic Computation: Charles Babbage and Computational Method, *The Rutherford Journal*, Volume 3 (A Special Issue on the History of Computing, edited by B.J. Copeland, C. Posy, O. Shagrir, and P. Bright), 23 p., 2010.  
<http://www.rutherfordjournal.org/article030106.html>
- TURING A.M., On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem, *Proc. Lond. Math. Soc.* 42(2), 230-265, 1936. [http://www.cs.virginia.edu/~robins/Turing\\_Paper\\_1936.pdf](http://www.cs.virginia.edu/~robins/Turing_Paper_1936.pdf)
- VON NEUMANN J., *First Draft of a Report on the EDVAC*, 1945. <http://www.virtualtravlog.net/entries/2003-08-TheFirstDraft.pdf>



# CONFERENCES DE L'ACADEMIE ROYALE DE MEDECINE DE BELGIQUE

Palais des Académies - 1<sup>er</sup> étage  
Rue Ducale 1, 1000 Bruxelles

Les séances débutent à 10h15. Entrée libre

## SAMEDI 5 SEPTEMBRE 2015

*Séance solennelle de remise des Prix (période 2014) venus à échéance en janvier 2015.*

## SAMEDI 26 SEPTEMBRE 2015

M. Erik DUMONT (Image Guided Therapy - Bordeaux)  
*« Applications des ultrasons focalisés en médecine »*

M. Stéphan CLÉMENT de CLÉTY (UCL)  
*« L'enfant gravement malade : du nouveau-né à l'adolescence »*

## SAMEDI 24 OCTOBRE 2015

M. Olivier DEVUYST (UCL)  
*« Des maladies rares à la population générale : le cas de l'uromoduline »*

M. Laurent NGUYEN (ULg)  
*« Migration neuronale dans le cortex cérébral en développement »*

## SAMEDI 28 NOVEMBRE 2015

M. Cedric HERMANS (UCL)  
*« L'hémophilie : drames et succès d'une maladie rare »*

M. Olivier MICHEL (ULB)  
*« Le rôle de l'exposition à l'endotoxine dans l'asthme »*

## SAMEDI 12 DÉCEMBRE 2015

M. Alexander POTAPOV (Moscou)  
*« Basic and applied aspects of traumatic brain injuries »*

M. Armando BASSO (Buenos-Aires)  
*« Multimodality treatment of pituitary adenomas »*

