

NUMÉRIQUE ET SCIENCES DU RÉEL

DE NOS JOURS, NOMBRE DE PERSONNES POSSÈDENT UN ORDINATEUR, que ce soit* une station de travail — isolée ou en réseau, autrement dit et hors accès Internet, souvent synonyme de « à la maison » ou « au travail » —, un ordinateur portable, une tablette, un *smartphone*, un téléviseur voire une domotique connectés. Tous ces objets ont été créés sur le même modèle et strictement la même architecture conceptuelle.

* Rappelons toutefois que certains n'ont toujours pas le bénéfice ou la maîtrise, même élémentaire, de tels outils : « fracture numérique » oblige, souvent équivalente de sociale.

Il est clair que cette présentation générale mérite d'être soutenue par d'autres apports comme, entre autres, les origines du calcul automatisé ou l'évolution de la technologie des transistors.

Pour certains, l'ordinateur reste encore « une boîte noire » mystérieuse — parfois au sens propre comme figuré — qui, lorsque tout fonctionne correctement, ne saurait souffrir d'une investigation plus poussée. Néanmoins, disposer de quelques éléments d'information, tant des points de vue matériels que logiciels, s'avère bénéfique; ne serait-ce que pour choisir en toute connaissance de cause son équipement, vis-à-vis de commerciaux en conseils, parfois, pour le moins orientés.

1 Entrailles d'un ordinateur

Sans chercher à entrer dans le détail du fonctionnement d'un ordinateur, il semble cependant utile de pouvoir observer ses différentes composantes et d'en décrire les fonctionnalités qui lui sont associées.

1.1 Démontage et descriptif d'un ordinateur

Dans la perspective de démythifier le sujet, il est d'abord proposé le démontage d'un ordinateur conventionnel — type PC, pour *Personal Computer* en anglais — afin de montrer les organes qui le compose (cf. vidéo 1.1). Il est donc question d'explorer les divers éléments génériques d'un ordinateur, depuis les aspects extérieurs connus de tous, jusqu'aux plus intimes, qui en assurent son — supposé — bon fonctionnement.

1.1.1 Périphériques

Un ordinateur traditionnel répond à un canon préétabli de configuration, qui comprend *a minima* une plus ou moins grosse boîte que

SOMMAIRE

1 Entrailles d'un ordinateur

- 1.1 Démontage et descriptif 11
 - 1.1.1 Périphériques ■ 1.1.2 Unité centrale
- 1.2 Montage et fonctionnalités 15
 - 1.2.1 Projet RASPBERRY PI ■ 1.2.2 Architecture de VON NEUMANN

2 Système d'exploitation

- 2.1 OS : trois idées-forces 23
 - 2.1.1 Gestion mémoire ■ 2.1.2 Gestion processeur ■ 2.1.3 Appels système
- 2.2 À quoi sert un OS ? 26

3 Interface humain-machine

- 3.1 Interactivité 29
 - 3.1.1 Bref historique ■ 3.1.2 Concept d'utilisabilité ■ 3.1.3 Procédure de conception ■ 3.1.4 IHM et technologies ■ 3.1.5 Avenir de l'IHM
- 3.2 50 ans d'IHM : retour vers le futur 34

4 Loi, économie et éthique

- 4.1 Numérique : loi et vie privée 47
 - 4.1.1 Données ■ 4.1.2 Contrôle et exploitation ■ 4.1.3 Automatisation ■ 4.1.4 Éducation et transparence
- 4.2 Ville numérique et vie privée 51
- 4.3 Comprendre les logiciels libres 53
 - 4.3.1 Fondements et principes ■ 4.3.2 Modèle économique
- 4.4 Paradigme du logiciel libre 64

5 Que faire de ces ressources ? Quiz

À PROPOS DE L'INTERVENANT

Erwan KERRIEN est chercheur en imagerie médicale dans l'équipe INRIA MAGRIT. Ses travaux visent à enrichir l'environnement du chirurgien pendant l'opération : techniques de vision par ordinateur, réalité augmentée et simulation guidée par l'image. Chargé de mission en médiation scientifique au centre INRIA NANCY-GRAND EST, il anime de nombreuses initiatives. Il est un des concepteurs et auteurs du MOOC ICN.

18. Périphériques externes : sous-entendu externes à l'unité centrale.



VIDÉO 1.1 — Éléments d'un ordinateur.

19. Les écrans « tactiles » des équipements proposés depuis quelques années sur les téléphones mobiles, tablettes et autres ordinateurs portables sont aussi des périphériques d'entrée et de sortie : leur interface — dite IHM pour Interface Homme-Machine — permet dans un même temps, de lancer des instructions et d'en récupérer les résultats.

20. Dans le cas de la vidéo Vidéo 1.1, ce type d'unité centrale est communément appelée une « tour ». Il existe désormais sur le marché une large variété de formats d'unité centrale : depuis les mini-PC de bureau — et *barebones* à compléter —, jusqu'aux stations audionumériques des studios d'enregistrement ou bien serveurs de 19 pouces prévus pour être compartimentés « en cascade » — *rackable* en anglais.

21. *Universal Serial Bus*, conçu par COMPAQ et MICROSOFT et diffusé à partir de 1996. Les normes ont évoluées des versions 1 à 3 de nos jours, dont la différence essentielle pour l'utilisateur est le débit de transfert des données. Source : Wikipedia [W](#).

22. *Personal System/2*, dont le nom provient des PC IBM de troisième génération introduits en 1987. Source : Wikipedia [W](#).

23. *Digital Visual Interface*, développé par la société *Digital Display Working Group* en 1999. Source : Wikipedia [W](#).

24. Le format HDMI — *High Definition Multimedia Interface* — est établi par un large consortium de compagnies en 2002. Il est devenu un standard de transfert de données vidéo en haute définition très répandu aujourd'hui. Source : Wikipedia [W](#).

25. On parle aussi aujourd'hui de « *réalité augmentée* » (voir § 3.1.4).

l'on appelle *unité centrale*, accompagnée d'un *écran* — également dénommé *moniteur* en lien avec l'industrie audiovisuelle ou comme anglicisme direct —, d'un *clavier*, d'une *souris* et, par exemple, d'une *clef* ou d'un *disque dur* de stockage nomade. Tous ces derniers éléments sont dénommés des *périphériques*¹⁸ *externes*.

Les *périphériques* peuvent être disposés *en entrée*, comme le clavier, la souris, une caméra ou un *scanner* et permettre d'alimenter l'ordinateur en instructions et tâches à accomplir. Ils peuvent également être placés *en sortie*, à l'instar d'un moniteur ou d'une imprimante et restituer le travail effectué par la machine.

D'autres *périphériques* s'avèrent être à la fois¹⁹ en entrée et en sortie, par exemple un disque dur externe où il est aussi bien possible d'y lire des informations en entrée et d'en inscrire en sortie.

L'ensemble constitué par les *périphériques* externes est ainsi branché à l'unité centrale²⁰ — généralement à l'arrière —, sur des prises que l'on appelle des *ports*. En retournant l'ordinateur, on voit tous les branchements envisageables d'une unité centrale. Ceux-ci sont essentiellement assurés par des ports physiques avec, pour chacun d'entre eux, un type particulier de connectique.

On distingue ainsi des ports *USB*²¹ pour notamment les *périphériques* dits de *stockage de masse* comme les disques durs externes et autres clefs, mais également pour la souris, une caméra, etc.

Bien que ce format soit maintenant devenu obsolète, on peut aussi trouver sur des machines plus anciennes un ou plusieurs port(s) *PS/2*²² pour y brancher un clavier ou une souris.

Bien entendu, on dispose également de ports « vidéo » sur lesquels sont connectés les écrans, soit aux formats *VGA* ou *DVI*²³ — là encore en désuétude —, soit au format *HDMI*²⁴ pour les moniteurs les plus récents en haute définition, voire en très haute définition (4K).

On peut enfin avoir des ports *FireWire* — format plutôt abandonné au profit de l'*USB*, notamment depuis la version 3 —, mais surtout un port particulier, l'*Ethernet*, qui montre qu'Internet peut aussi être considéré comme un *périphérique* externe à l'ordinateur de par sa connexion à distance à d'autres équipements.

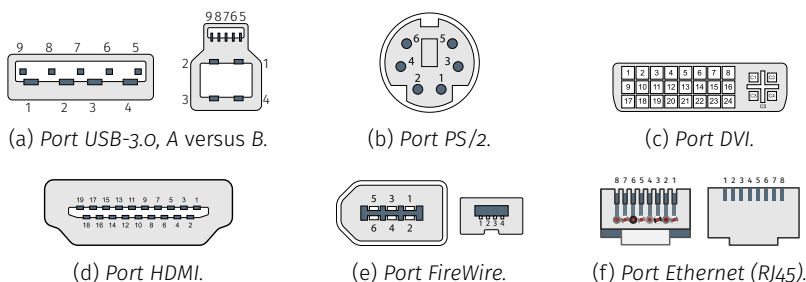


FIGURE 1.1 — Différents ports et connectiques associées d'un ordinateur.

Pour être complet, il faut encore mentionner que la plupart des ordinateurs possèdent des entrées/sorties audio au format mini-jack, respectivement pour un micro et un casque ou système d'enceintes. De ce point de vue, tout comme pour la vidéo, les composants dédiés au traitement de données audiovisuelles sont désormais très souvent intégrés à l'unité centrale (voir § 1.1.2 et figure 1.2 à suivre).

Bien que les technologies aient considérablement évolué pour intégrer ces fonctionnalités en configuration standard (carte mère et processeur), cela répond cependant à des besoins courants d'utilisation.

Pour des exploitations avancées ou professionnelles — simulation numérique et prototypage²⁵ virtuel, jeux, infographie, musique assistée

par ordinateur (MAO), etc. —, il est nécessaire de compléter un équipement de base par des cartes graphique et/ou audio adéquates, destinées spécifiquement à ces types de données, qui s'avèrent²⁶ gourmandes en termes de calculs à effectuer par le processeur.

26. Il s'agit ainsi de déporter la charge de calcul d'opérations connues, donc anticipées, sur des éléments réservés à cet effet, audio comme vidéo.

1.1.2 Unité centrale

L'exploration de l'intérieur d'une unité centrale amène à constater beaucoup de choses. Pour commencer par sa relation avec l'environnement extérieur, il faut déjà noter la présence d'un bloc d'alimentation électrique. De cette alimentation sortent un ensemble de fils et de câbles de différentes couleurs qui servent à apporter l'électricité aux multiples composants internes de l'ordinateur.

En établissant le lien entre les divers ports et les éléments internes d'une unité centrale, on remarque que l'écran est branché sur la *carte graphique*, elle-même enfichée sur une grande plaque appelée la *carte mère*. Quant à eux, les clavier, souris et disques durs principaux — dits « maîtres » — sont directement connectés sur cette même *carte mère*.

Il est enfin à noter que les barrettes de mémoire dites « vives » et les cartes d'extension de tout ordre sont de même intégrées à la *carte mère* via leurs ports respectifs : DIMM versus PCI.

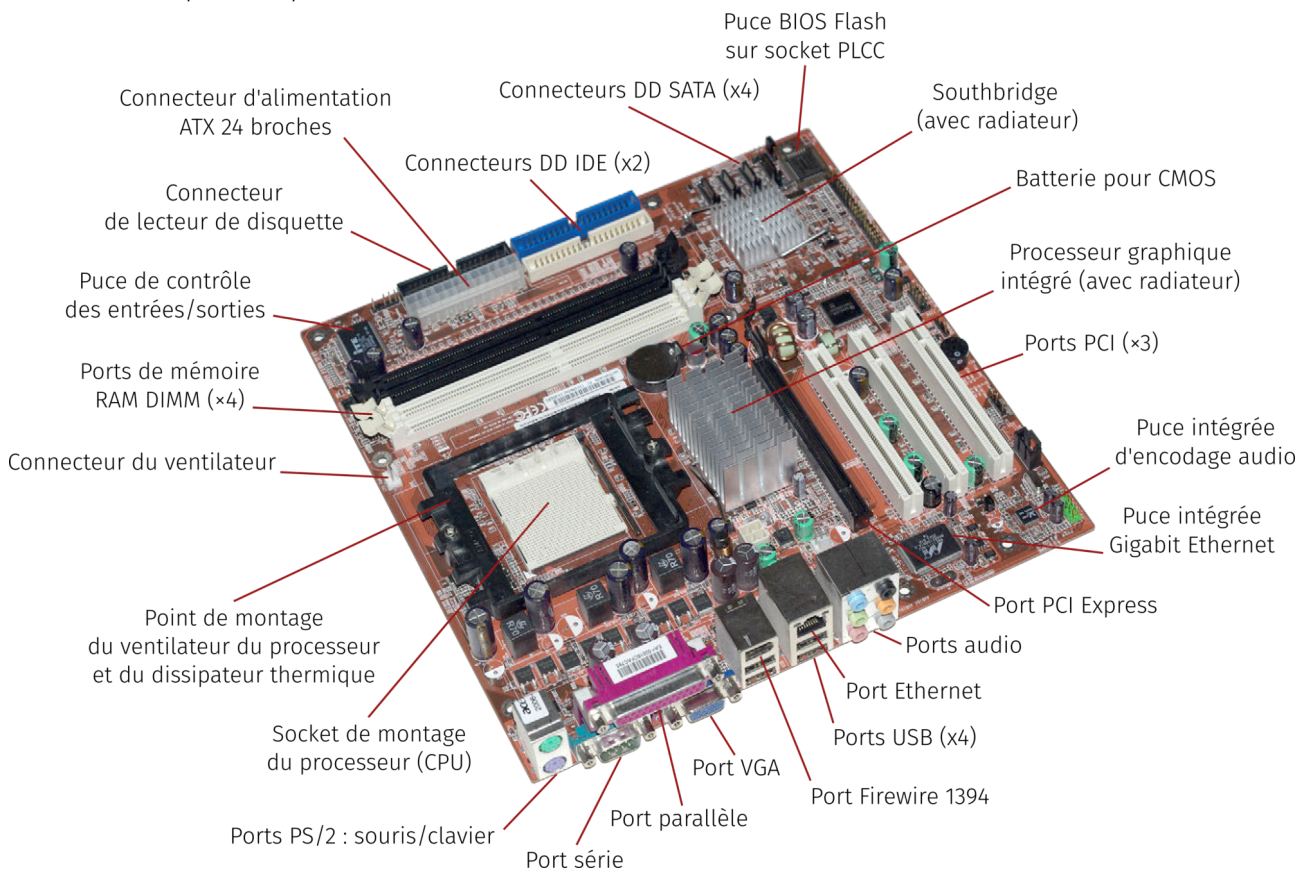



FIGURE 1.2 — Carte mère (assez ancienne, ≈ 2005) et ports des périphériques de l'unité centrale.

Sur certains ordinateurs devenus aujourd'hui obsolètes, mais toujours en service, on observe la présence d'autres composants — à considérer comme *périphériques internes* —, à savoir des lecteurs-graveurs de support numérique²⁷ CD/DVD. En remontant le temps, d'autres matériels antérieurs étaient présents, tels les lecteurs de disquettes...

En effet, la baisse spectaculaire du coût de la mémoire de stockage de masse (disques durs et clefs USB) constatée depuis la fin des années 2000 a modifié en profondeur les comportements et les modes

27. Les lecteurs/graveurs de type CD/DVD, considérés comme indispensables pour des raisons de puissance de calcul à la fin des années 1990-début 2000, sont désormais définitivement hors-jeu. Si besoin est, on peut s'en procurer à prix modique comme périphérique extérieur en connectique USB. Quant au lecteur de disquette, ils sont avantageusement remplacés par les clefs USB de toutes tailles de stockage.

28. Mise en exergue des mémoires plus rapides des technologies semi-conducteurs — SSD pour *Solid-State Drive* — au regard des mémoires à support magnétique des disques durs conventionnels.

29. *Peripheral Component Interconnect*, un bus initialement dû à INTEL dans les années 1990 qui n'a cessé d'évoluer ensuite. On peut citer un de ses dérivés assez largement utilisé, le *PCI-Express* qui a l'ambition de remplacer le PCI, mais également le bus graphique AGP — *Accelerated Graphics Port*. Source : Wikipedia .

30. Il s'agit de mémoire à accès très rapide que le processeur utilise comme tampon pour disposer des données en cours de traitement, en entrée comme en sortie.



HDMI
HIGH-DEFINITION MULTIMEDIA INTERFACE

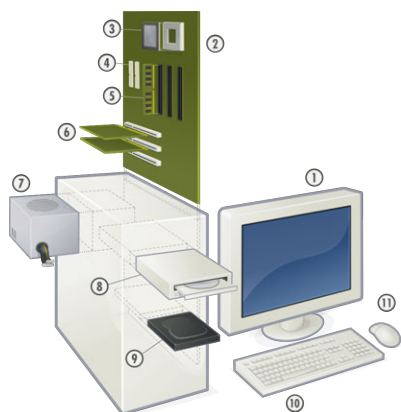


FIGURE 1.3 — Éclaté d'un PC du milieu des années 2000 : ① écran, ② carte mère, ③ processeur, ④ connecteurs ATA, ⑤ mémoire vive, ⑥ carte d'extension, ⑦ alimentation, ⑧ lecteur CD, ⑨ disque dur, ⑩ clavier, ⑪ souris.

d'usage : qui de sa collection intégrale de photographies de vacances, voire de son système d'exploitation nomade.

Les offres du marché s'affranchissent donc désormais de proposer de telles fonctionnalités pour mettre en avant : puissances de calcul, performances du processeur, capacité et rapidité des périphériques de stockage²⁸ ou qualité de gestion graphique.

Par l'intermédiaire de câbles et de nappes — bus d'interconnexions en parallèle pour des raisons de performance —, on constate au global que tous les composants internes d'un ordinateur sont dûment connectés à la *carte mère* *via* des ports spécifiques, mais cette fois internes : dispositifs dédiés tels que cartes d'extension graphique, audio et autres (ports *PCI*²⁹), ou bien barrettes de *mémoire vive*³⁰ — RAM pour *Ramdom Access Memory* en anglais.

Notamment par effet Joule, les divers composants sollicités d'un ordinateur produisent beaucoup de chaleur. Pour assurer leur bon fonctionnement, des systèmes de refroidissement sont introduits au sein de l'unité centrale.

Plusieurs solutions techniques existent, dont une des plus simples à mettre en œuvre est la ventilation de l'air ambiant, qu'il s'agisse de l'unité centrale elle-même, du *processeur* ou bien d'autres composants comme la carte graphique (voir *figure 1.2*). Les ventilateurs sont source de bruit, ainsi il est parfois fait appel à des conceptions avec des radiateurs en aluminium — bon diffuseur de chaleur —, en particulier dans les mini-PC : gain en bruit mais également en encombrement.

À l'observation d'une *carte mère* vierge, débarrassée de tous les éléments venant s'y greffer (cf. *vidéo 1.1* et *figure 1.2*), on s'aperçoit que le point focal essentiel ou le cœur d'un ordinateur est le *processeur*. Tous les composants autour de celui-ci lui sont reliés par des bus optimisés selon les différentes délégations de tâches à accomplir : calculs purs, mémoire vive et zones tampons intermédiaires vis-à-vis des périphériques, fonctions graphiques, etc.

De par son architecture, le *processeur* comporte lui-même plusieurs parties complémentaires avec une *unité arithmétique et logique* (UAL) chargée en tant que telle des calculs, mais aussi de zones de mémoires extrêmement rapides dites des « caches » qui permettent de stocker les instructions en cours et les résultats intermédiaires. Là encore, le transfert des données se fait en parallèle pour des raisons de performances accrues.

Pour effectuer un récapitulatif en opérant un zoom arrière, le *processeur* constitue ainsi l'unité fondamentale et centrale de calcul : il est en lien avec tous les autres éléments de l'ordinateur *via* la *carte mère*. Sur cette dernière, toutes les fonctionnalités essentielles sont proposées au moyen de bus spécifiques : accès directs à la *mémoire vive* — barrettes DIMM —, au(x) disque(s) dur(s) — formats IDE ou SATA —, aux cartes d'extension comme la carte graphique — connecteur PCI, AGP, voire PCI Express —, lecteur-graveur de DVD et l'ensemble des ports de périphériques externes par leurs contrôleurs respectifs.

GLOSSAIRE CONTEXTUEL

CARTE MÈRE — Circuit imprimé qui rassemble un ensemble diversifié de connecteurs et de ports (connectique dédiée de certaines fonctionnalités) permettant d'y agréger les différents composants de l'ordinateur (processeur, cartes mémoire, carte graphique, disques durs et tout autre périphérique) et d'assurer leur liaison à travers des circuits imprimés dont le comporte-

ment est piloté par le BIOS, programme contenu dans la mémoire « morte » (ROM — *Read-Only Memory*) et lancé au démarrage pour notamment détecter et configurer tous les éléments connectés.

PÉRIPHÉRIQUE — Dispositif électronique connecté à un ordinateur, plus précisément sur un des ports dédiés de la carte mère.

PORT — Prise/connecteur permettant de brancher un périphérique à un ordinateur. Les ports sont placés sur la carte mère qui assure la liaison avec les autres périphériques et le processeur.

PROCESSEUR — Processeur ou CPU, pour *Central Processing Unit*. Dispositif électronique de calcul chargé d'exécuter les différentes instructions d'un programme. Ce faisant, les données numériques sont traitées, manipulées et échangées avec les autres composants de l'ordinateur — mémoire vive (RAM — *Random Access Memory*), disques durs et autres périphériques — via la carte mère. Quand le processeur est construit sur un unique circuit intégré, on parle de microprocesseur.

MÉMOIRE VIVE — La RAM, acronyme de *Random Access Memory* en anglais — littéralement « mémoire à accès aléatoire » nommée en français « mémoire vive » —, est un circuit imprimé sur une carte qui permet de stocker les données et les instructions employées dans un programme informatique. Contrairement à la mémoire dite « morte » en français — ROM, *Read-Only Memory*, littéralement « mémoire uniquement en lecture » —, le contenu de la mémoire vive peut être modifié et offre donc un espace temporaire de stockage dynamique pour le processeur.

1.2 Montage et fonctionnalités d'un ordinateur

Un ordinateur marque des signes de faiblesse, il est souffreteux, il rame et charger la moindre page Web prend plus de temps que la lire ? Seule solution : le remplacer... Certes, mais l'écran est encore valable, le clavier est comme neuf et la souris toujours aussi vélocité.

En étant fortuné, aucune question à se poser, on se rue *illico* chez son fournisseur de prédilection pour acquérir le dernier cri en la matière. En cas contraire où, au-delà des impôts, les factures s'accumulent, où la perspective est d'équiper son association préférée qui, par définition, n'a pas un rond... Existe-t-il une solution ?

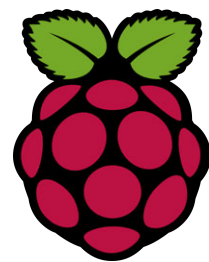
La question ne saurait se poser aussi directement s'il n'était pas envisageable d'y répondre par l'affirmative. En effet, pour environ 50 €, il est désormais possible depuis quelques années, avec un peu d'huile de coude et en consultant quelques documentations adéquates, de monter par soi-même un ordinateur fonctionnel, n'ayant de plus, rien à envier à une machine de cinq à dix ans révolus. En termes d'application, cela peut être une manière simple et peu onéreuse de maintenir un parc d'ordinateurs dans une salle informatique.

Cette solution remarquable fait appel au projet « RASPBERRY PI ». Initialement motivé par des objectifs pédagogiques et de transmission des savoirs, le succès du projet dépasse ces ambitions premières tant par ses qualités intrinsèques que par la variété des applications possibles : bureautique, domotique, mini-serveur, etc. L'engouement est tel que des revues lui sont partiellement ou entièrement consacrées.

Ayant la préséance, on peut aussi citer le projet « ARDUINO » qui propose au moyen d'une carte électronique modulable, toutes sortes d'expérimentation en électronique numérique. Cependant, toutes choses étant comparables, le RASPBERRY PI s'avère un ordinateur complet dans

À PROPOS DE L'INTERVENANT

Yves PAPEGAY est chargé de recherche dans l'équipe HÉPHAÏSTOIS INRIA SOPHIA-ANTIPOLIS. Il s'intéresse aux robots à câbles et à la robotique d'assistance. Il est spécialiste des outils de modélisation et de simulation, de calcul symbolique et d'analyse par intervalles.



ses fonctionnalités, bousculant un peu le petit monde de l'électronique numérique en créant tout un nouvel écosystème.

1.2.1 Projet RASPBERRY PI

Le RASPBERRY PI est une idée un peu folle d'un concepteur anglais de jeux vidéo, DAVID BRABEN, qui a eu l'ambition de fabriquer un petit ordinateur pour une cinquantaine d'euros (voir³¹ vidéo 1.2).

En partenariat avec le laboratoire d'informatique de l'Université de Cambridge et Broadcom, une fondation a été créée en 2009 pour promouvoir l'informatique auprès des jeunes publics et plus largement auprès des personnes n'ayant pas les moyens de se procurer un ordinateur, mais pouvant récupérer de vieux matériels : téléviseur, clavier, etc. L'enjeu a ainsi été de concevoir et de faire fabriquer une carte mère et son processeur, disposant de toutes les fonctionnalités d'un ordinateur moderne, comme cœur essentiel d'une machine (cf. § 1.1.2). C'est chose faite depuis février 2012.

Le dimensionnement du RASPBERRY PI est délibérément réduit à sa plus simple expression, voulu pour correspondre au format d'une carte bancaire de crédit. Il s'agit d'une carte mère sur laquelle toutes les fonctionnalités d'un ordinateur conventionnel sont présentes, notamment les différents ports de communication, à savoir (en se fondant sur une description du modèle 3 B) :

- ▶ processeur ARM Cortex A53 Quad-Core 1.2 GHz;
- ▶ mémoire vive 1 Go;
- ▶ un port HDMI, voire un port RCA sur les plus anciennes cartes, pour y brancher un téléviseur ou un écran;
- ▶ des ports USB 2 — quatre sur les cartes récentes — pour clavier, souris et autres extensions — selon les cas prévoir toutefois des extensions auto-alimentées pour ne pas perturber le bon fonctionnement du RASPBERRY PI;
- ▶ un port audio au format mini-jack pour un casque;
- ▶ un port Ethernet et des puces Bluetooth 4.1 et WiFi 802.11n pour les communications;
- ▶ un connecteur d'alimentation micro-USB.



VIDÉO 1.2 — Ordinateur Raspberry Pi.

31. *Errata* — La vidéo contient deux petites erreurs qui sont rectifiées ici :

- ▶ le port vidéo est un port vidéo RCA et non un port S-Vidéo comme annoncé, utile pour se servir d'un « vieux » téléviseur.
- ▶ l'alimentation des divers modèles 1, 2, 3 (modèle 4 prévu pour 2020) est en principe 5 V et non pas en 3 V comme décrit.

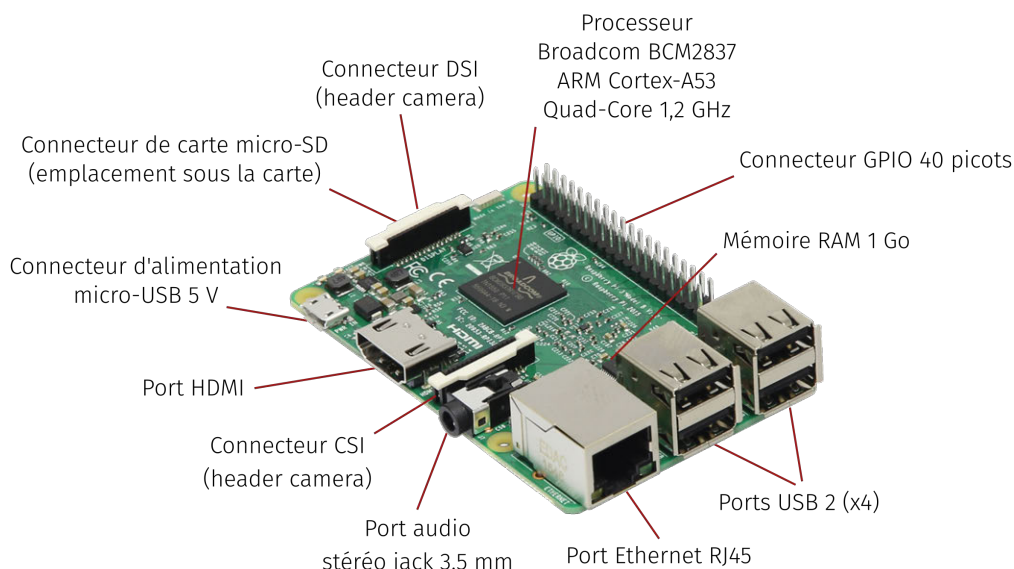


FIGURE 1.4 — Descriptif du nano-ordinateur RASPBERRY PI modèle 3 B.

En l'état, ce dispositif ne contient pas tous les composants pour pouvoir être opérationnel. Outre un écran, un clavier et une souris avec leurs câbles associés, il manque en effet une alimentation extérieure et une carte mémoire dite *flash* — au format dit « *micro-SD* » pour faire

office régalien de « disque dur » : bien entendu, il est nécessaire de pouvoir enregistrer les données personnelles quelque part.

Enfin, pour les RASPBERRY PI les plus anciens, on peut également prévoir un *dongle* USB pour le WiFi; les plus récents disposent de puces Bluetooth 4.1/4.2 et WiFi n/ac.

Avant de pouvoir faire fonctionner cet ensemble, il faut encore au préalable installer un OS/système d'exploitation (cf. **W**) sur la carte micro-SD. Toujours pour des raisons de coût, de dimensionnement et de modularité, le système dûment conseillé est LINUX. La distribution « historique » du RASPBERRY PI, intitulée RASPBIAN, s'est ainsi établie sur une base GNU/LINUX en version DEBIAN afin rester dans l'esprit d'ouverture pédagogique du projet initial, incluant en particulier des outils de programmation comme SCRATCH et PYTHON.

Compte-tenu du succès du projet, de multiples autres possibilités de systèmes d'exploitation libres sont envisageables selon la destination que l'on veut donner à sa machine : serveur réseau ou multimédia, bureautique, domotique, etc. L'essentiel est de choisir un système dont, en particulier l'interface graphique, ne soit pas trop gourmande pour ne pas « plomber » le RASPBERRY PI. Par exemple, une distribution généraliste comme UBUNTU MATE a été portée pour cette plateforme.

Passée sous silence jusqu'à présent, une dernière chose est à mentionner avec le RASPBERRY PI et qui s'avère non disponible avec un ordinateur conventionnel : le connecteur GPIO — *General Purpose for Input/Output* (cf. figure 1.4). Il s'agit d'une interface qui offre la possibilité de communiquer avec d'autres systèmes électroniques et permet au RASPBERRY PI d'être utilisé en tant que contrôleur pour, par exemple, piloter un robot, un système de capteurs ou un système embarqué.

GLOSSAIRE CONTEXTUEL

CONNECTEUR — Élément qui assure une connexion physique pour établir une liaison électrique ou une transmission de données entre deux entités matérielles distinctes. En informatique, ce terme est également employé pour désigner un port — même si le connecteur caractérise aussi la fiche mâle de la connectique qui lui est associée.

GPIO — GPIO, acronyme de *General Purpose Input/Output*, est un port d'entrée-sortie qui permet à une carte électronique — carte à micro-contrôleur ou carte-mère — de communiquer avec un périphérique quelconque. Ce type de port est programmable, permettant de s'adapter à une vaste diversité de périphériques, sous condition d'écrire un pilote adéquat.

DEBIAN — DEBIAN est le nom d'une distribution non commerciale qui repose *exclusivement* sur des logiciels libres. Elle est développée et maintenue par l'association DEBIAN, dont une particularité est qu'elle suit un mode de gouvernance communautaire. La version DEBIAN pour RASPBERRY PI peut se télécharger sur le site de la fondation Raspberry, soit *via* un installateur (NOOBS), soit *via* une image de la distribution (RASPBIAN). Plus largement, la qualité et la stabilité reconnues de DEBIAN ont engendré de nombreuses distributions populaires la prenant comme fondement, par exemple UBUNTU ou LINUX MINT.

SYSTÈME D'EXPLOITATION — Un « système d'exploitation » — *Operating system* en anglais —, est un ensemble de programmes qui gèrent l'utilisation des ressources matérielles d'un ordinateur : stockage des mémoires à accès rapide et de masse des disques

durs, ordonnancement des calculs du processeur, communication avec les périphériques ou administration du réseau. Le système accepte ou refuse ces demandes, puis réserve les ressources en question pour éviter que leur utilisation n'interfère avec d'autres requêtes provenant d'autres logiciels.

NOTE DE LA RÉDACTION

Texte rédigé par Sacha KRAKOVIAK et publié sur *Interstices* — revue en ligne de culture scientifique du numérique — le 18 novembre 2011.

1.2.2 Architecture de VON NEUMANN

Depuis plus de soixante ans, l'architecture des ordinateurs est conforme à un schéma qui a peu évolué depuis son origine : le modèle dit de « VON NEUMANN ». La naissance de ce modèle, sa diffusion et ses premières mises en œuvre sont un moment-clé de l'histoire de l'informatique et des calculateurs.

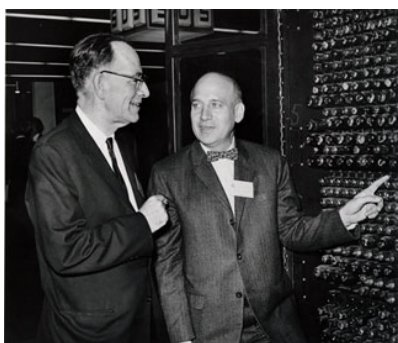
Le tableau de ce qu'en 1945 on n'appelait pas encore l'informatique présente un paysage contrasté. D'un côté, la notion de calcul effectif a trouvé un cadre rigoureux grâce aux avancées d'une discipline nouvelle née dans les années 1930, la méta-mathématique. Le lambda-calcul du mathématicien Alonzo CHURCH et la machine universelle (abstraite) d'Alan TURING, schémas dont TURING a montré l'équivalence, sont proposés en 1936 comme base de définition de l'algorithme, pièce maîtresse du processus calculatoire. D'un autre côté, plusieurs tentatives indépendantes visent à construire des machines électroniques ou électro-mécaniques capables d'exécuter des calculs complexes à grande vitesse. Les précurseurs en sont John ATANASOFF en 1938 aux États-Unis et Konrad ZUSE en 1941 en Allemagne.

Ces deux courants, celui des mathématiciens et logiciens d'une part et, celui des ingénieurs d'autre part, sont issus de deux mondes séparés et s'ignorent mutuellement. Les travaux de TURING ont sans doute eu une influence sur la conception en 1943-44 du calculateur COLOSSUS à Bletchley Park en Angleterre, mais il s'agit d'une machine spécialisée dont le seul objectif, qui sera d'ailleurs atteint, est le décryptage du code secret de la machine LORENZ, successeur de l'ENIGMA, utilisée par l'armée allemande.

La guerre aura d'autres effets : les autorités allemandes ne soutiendront que modestement les travaux pionniers de ZUSE, alors que le département américain de la Défense financera un projet ambitieux lancé en 1943 à l'Université de Pennsylvanie par John Adam Presper ECKERT et John William MAUCHLY. Cet effort aboutira à la construction d'un grand calculateur électronique, l'ENIAC, qui ne sera néanmoins pleinement opérationnel qu'en 1946. À cette même époque (1944), l'informaticien Howard AIKEN mène un autre grand projet à Harvard avec la collaboration d'IBM, mais la technique choisie est fondée sur l'électromécanique. Bien plus fiable que les tubes électroniques, cette voie ne sera toutefois pas poursuivie, mais l'expérience acquise sera exploitée plus tard par IBM dans la conception de ses premiers ordinateurs.

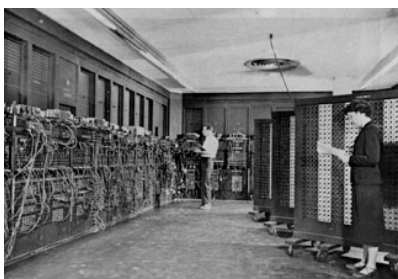
L'ENIAC — *Electronic Numerical Integrator and Computer* — fut le premier calculateur entièrement électronique possédant les mêmes capacités qu'une machine de TURING, aux limites physiques près. Il avait des dimensions imposantes : plus de 20 m de long, 2 m 50 de haut pour une masse de 30 tonnes. Comportant 18 000 tubes électroniques, il consommait 150 kilowatts.

Les données étaient lues sur cartes perforées, mais le programme était représenté sur un support externe, sous la forme d'un panneau de connexion analogue à celui d'un standard téléphonique. Pour programmer une application (initialement, le calcul de tables de tir pour l'artillerie), il fallait faire un plan des connexions nécessaires, puis procéder au câblage physique, un travail long, fastidieux et sujet aux erreurs.



Crédit : Computer History Museum

À gauche, John William MAUCHLY (1907-1980) et à droite, John Adam Presper ECKERT (1919-1995).



Crédit : U.S. Army

ENIAC, à gauche; panneau de connexion.

La détection et la correction des fautes étaient également laborieuses. Avec la fiabilité réduite des tubes électroniques, ce mode de programmation constituait le grand point faible du projet. Bien conscients de cette faiblesse, ses concepteurs ont commencé dès 1944 à réfléchir à l'étape suivante, avant même la mise en service de l'ENIAC.

En 1944, John VON NEUMANN est introduit dans le projet ENIAC par Herman GOLDSTINE, qui assurait la liaison scientifique du projet avec le département de la Défense. VON NEUMANN était un esprit universel, dont les contributions allaient des mathématiques à la logique, la physique et l'économie. Il avait rencontré Alan TURING et connaissait ses travaux. Il participait alors au projet Manhattan et l'Histoire dit que GOLDSTINE lui parla du projet ENIAC lors d'une rencontre fortuite sur un quai de gare. Quoi qu'il en soit, VON NEUMANN accepta un poste de consultant dans ce projet et prit une part active aux travaux menés par ECKERT et MAUCHLY sur la conception de l'EDVAC — *Electronic Discrete Variable Automatic Computer* —, le successeur de l'ENIAC. En juin 1945, une première version, incomplète, d'un rapport sur la conception de l'EDVAC fut diffusée par GOLDSTINE, sous la signature du seul VON NEUMANN qui l'avait rédigé comme document de travail. ECKERT et MAUCHLY en furent, à juste titre, profondément choqués ; par ailleurs, ils entrèrent en conflit avec l'Université de Pennsylvanie pour des questions de brevet et ces deux circonstances provoquèrent leur départ du projet en mars 1946 pour fonder leur entreprise, ECKERT-MAUCHLY COMPUTER CORPORATION. VON NEUMANN lui-même quitta le projet à la même époque pour Princeton, où il travailla avec Julian BIGELOW sur le calculateur de l'IAS — Institut d'études avancées.

A. ARCHITECTURE NOVATRICE

Le *First Draft of a Report on EDVAC* est un document de cent-une pages qui décrit, d'une part un schéma d'architecture de calculateur, organisé en trois éléments (unité arithmétique, unité de commande et mémoire contenant programme et données) et, d'autre part, des principes de réalisation pour ces éléments, notamment les opérations arithmétiques. Si ce dernier aspect dépend partiellement de la technologie connue à l'époque et a donc nécessairement vieilli, le modèle d'architecture, qui marque une transition profonde avec les pratiques antérieures, reste d'une étonnante actualité. Ce modèle, auquel reste attaché le nom de VON NEUMANN, est exposé par le schéma en figure 1.5.

La première innovation est la séparation nette entre l'unité de commande, qui organise le flot de séquençage des instructions et l'unité arithmétique, chargée de l'exécution proprement dite de ces instructions. La seconde innovation, la plus fondamentale, est l'idée du programme enregistré : les instructions, au lieu d'être codées sur un support externe (ruban, cartes, tableau de connexions), sont enregistrées dans la mémoire selon un codage conventionnel. Un compteur ordinal contient l'adresse de l'instruction en cours d'exécution ; il est automatiquement incrémenté après exécution de l'instruction et explicitement modifié par les instructions de branchement.

Un emplacement de mémoire contient indifféremment des instructions et des données. Une conséquence majeure (dont toute la portée n'avait probablement pas été perçue à l'époque) est qu'un programme peut être traité comme une donnée par d'autres programmes. Cette idée, présente en germe dans la machine de TURING, trouve ici sa véritable concrétisation.

B. DIFFUSION ET MISE EN ŒUVRE DU MODÈLE

Le rapport EDVAC circula largement et eut une influence notable sur bon nombre de travaux ultérieurs. En juillet et août 1946, le départ-



Crédit : Union postale universelle

Timbre à l'effigie de VON NEUMANN (1903-1957) émis à titre posthume par son pays natal, la Hongrie.

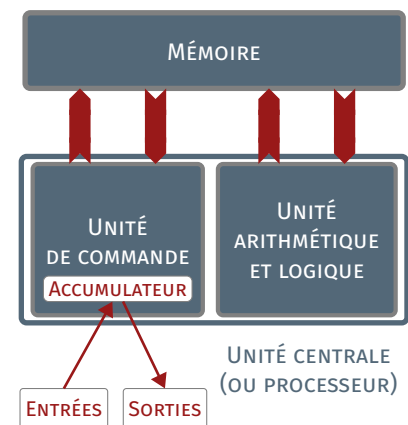


FIGURE 1.5 — Modèle original d'architecture des ordinateurs de VON NEUMANN.



Crédit : U.S. Army

EDVAC installé dans le bâtiment 328 du Ballistics Research Laboratory.

tement de la Défense finança une école d'été pour diffuser les connaissances acquises dans les différents projets de calculateurs. Organisées par la *Moore School* de l'Université de Pennsylvanie, qui abritait le projet ENIAC, ces *Moore School Lectures* furent un instrument de réflexion sur les concepts et techniques de base des calculateurs et surtout de diffusion des travaux menés dans les projets ENIAC et EDVAC. ECKERT et MAUCHLY, ainsi que GOLDSTINE, furent les principaux intervenants, mais de nombreux autres conférenciers furent invités, dont HOWARD AIKEN et George STIBITZ, qui avaient construit des prototypes de calculateurs. Le seul conférencier non-américain était Douglas HARTREE, de l'Université de Manchester. Les auditeurs, au nombre d'une quarantaine, avaient tous été préalablement sélectionnés et invités.

Le projet EDVAC lui-même se trouva fortement perturbé par les départs d'ECKERT et de MAUCHLY, qui suivirent plusieurs de leurs ingénieurs et ne fut achevé qu'en 1951. Son architecture était fondée sur le modèle présenté dans les *Moore School Lectures*, qui avait évolué par rapport au document originel. Entre temps, c'est en Europe que le modèle de VON NEUMANN trouva ses premières réalisations.

MACHINES DE MANCHESTER — En 1946, Frederic WILLIAMS, alors ingénieur au *Telecommunications Research Establishment* (TRE) en Angleterre — le siège de l'invention du radar —, travaillait sur une mémoire utilisant l'écran d'un tube cathodique pour le stockage de bits. Il commença une collaboration avec Thomas KILBURN, de l'Université de Manchester, et obtint un poste dans cette université. L'avantage de la mémoire à tube sur la ligne à retard (technologie dominante à l'époque) était de permettre un accès aléatoire plutôt que séquentiel.

En 1947, WILLIAMS et KILBURN décidèrent d'expérimenter leur mémoire connue sous le nom de « tube WILLIAMS » sur un mini-projet de calculateur qu'ils baptisèrent *Baby*. La taille de la mémoire était de 2048 bits. En juin 1948, le premier programme tourna sur le *Baby*; il avait été inséré bit par bit sur l'écran cathodique.

WILLIAMS, KILBURN et leur équipe, que TURING rejoignit en 1948 mais sans y jouer de rôle majeur, construisirent ensuite le calculateur *Manchester Mark-1*. La mémoire à tube était complétée par une mémoire secondaire à tambour magnétique, ce qui était une innovation majeure. *Mark-1* fonctionnait mi-1949. La compagnie *Ferranti* qui était dès cette époque associée au projet, exploita le projet *Mark-1* pour servir de base à son premier produit commercial.

EDSAC DE CAMBRIDGE — Maurice WILKES, qui dirigeait le *Mathematical Laboratory* de l'Université de Cambridge et avait travaillé au TRE sur le radar, perçut très vite les possibilités ouvertes par le rapport EDVAC. Il assista aux *Moore School Lectures* en 1946 et lança dès son retour le projet d'un calculateur à programme enregistré appelé EDSAC — *Electronic Delay Storage Automatic Calculator*. Comme l'indique son nom, la mémoire utilisait des lignes à retard. Le premier programme fonctionna en mai 1949. On considère généralement l'EDSAC comme le premier calculateur à programme enregistré. Bien qu'un programme enregistré ait fonctionné auparavant sur le *Manchester Baby*, ce dernier n'était pas un calculateur complet mais essentiellement un outil de validation du tube WILLIAMS. Quoi qu'il en soit, Manchester et Cambridge ont été des pionniers en la matière.

L'EDSAC comportait 1024 emplacements de mémoire de 18 bits et représentait les nombres entiers en complément à 2 — mode de codage le plus courant à l'heure actuelle. Il n'avait pas à proprement parler de système d'exploitation, mais des « ordres initiaux » câblés, qui remplissaient les fonctions d'un chargeur. Une invention déterminante,



Source : Wikipedia W

Tube de WILLIAMS-KILBURN d'un IBM 701 au Computer History Museum, Mountain View, Californie.



Crédit : Computer Laboratory, University of Cambridge

Maurice WILKES (1913-2010) face à la mémoire de l'EDSAC.

due à David WHEELER, fut celle des *sous-programmes*. La bibliothèque de sous-programmes — une centaine — était stockée sous forme de bandes de ruban perforé. Pour utiliser un sous-programme, on devait le copier physiquement sur le ruban contenant le programme utilisateur. La fonction d'éditeur de liens était donc réalisée à la main par des moyens mécaniques!

Le guide du programmeur³² de l'EDSAC, qui décrit notamment l'utilisation des sous-programmes, fut alors le premier ouvrage consacré à la programmation. WILKES inventa aussi en 1951 la micro-programmation, exploitée seulement dix ans plus tard dans la famille des IBM/360.

AUTRES PROJETS — Au début de 1946, Alan TURING lança au *National Physical Laboratory* (NPL) un projet de calculateur à programme enregistré, l'*Automatic Computing Engine* (ACE). TURING ne pouvait pas faire état de l'expérience du COLOSSUS, protégé par le secret militaire. Cette circonstance, ajoutée à des problèmes d'organisation, retarda l'avancement des travaux et TURING quitta le NPL en 1948 pour Manchester. Le projet n'aboutit qu'en 1950.

Le projet IAS fut lancé à Princeton par VON NEUMANN en 1946. Son principal ingénieur était BIGELOW. La machine commença à fonctionner à l'été 1951 et devint opérationnelle un an plus tard. Elle possédait 1 024 emplacements de mémoire de 40 bits, réalisés par des tubes WILLIAMS.

C. PREMIÈRES MACHINES COMMERCIALES

La compagnie FERRANTI, qui fabriquait des équipements électriques et électroniques, collaborait depuis 1948 avec l'équipe de Manchester. Son premier produit, le FERRANTI Mark-1 était directement inspiré du Manchester Mark-1. Sorti en février 1951, ce fut le premier calculateur diffusé commercialement.

La compagnie ECKERT-MAUCHLY (EMCC — Eckert-Mauchly Computer Corporation) a continué le travail commencé lors de la conception de l'EDVAC, en préparant un EDVAC-2, qui fut rebaptisé ensuite UNIVAC. En attendant l'aboutissement de ce projet de grande ampleur, EMCC construisit le calculateur BINAC pour la société NORTHROP en 1949. Confrontée à des difficultés financières, EMCC fut rachetée en 1950 par REMINGTON RAND (fabricant d'armes et de machines à écrire) et devint la division UNIVAC de REMINGTON RAND. Le premier UNIVAC-1 fut livré en juin 1951. La société UNIVAC resta longtemps une référence pour les ordinateurs de grande puissance.

Comparativement, le premier ordinateur d'IBM, le 701 (qui utilisait les tubes WILLIAMS), fut annoncé mi-1952.

D. QU'EN EST-IL AUJOURD'HUI ?

Plus de soixante ans après son invention, le modèle d'architecture de VON NEUMANN régit toujours l'architecture des ordinateurs. Par rapport au schéma initial, on peut noter deux évolutions essentielles :

- les entrées-sorties, initialement commandées par l'unité centrale, sont depuis le début des années 1960 sous le contrôle de processeurs autonomes (canaux d'entrée-sortie et mécanismes assimilés). Associée à la multiprogrammation (partage de la mémoire entre plusieurs programmes), cette organisation a notamment permis le développement des systèmes en temps partagé;
- les ordinateurs disposent maintenant de processeurs multiples, qu'il s'agisse d'unités séparées ou de « cœurs » multiples à l'intérieur d'une même puce. Cette organisation permet d'atteindre une puissance de calcul élevée sans accroître la vitesse des processeurs individuels, limitée par les capacités d'évacuation de la chaleur dans des circuits de plus en plus denses.

32. M. V. WILKES, D. J. WHEELER, S. GILL, *The preparation of programs for an electronic digital computer*. Addison-Wesley, 1951.



Source : Wikipedia W

Console de l'UNIVAC-1.

Ces deux évolutions ont pour conséquence de mettre la mémoire, plutôt que l'unité centrale, au centre de l'ordinateur et d'augmenter ainsi le degré de parallélisme dans le traitement et la circulation de l'information. En revanche, elles ne remettent pas en cause les principes de base que sont la séparation entre traitement et commande, ainsi que la notion de programme enregistré.

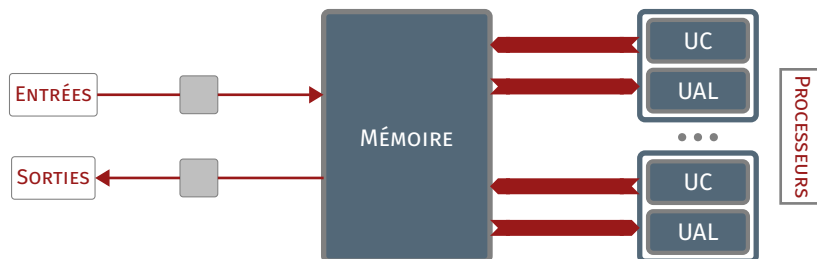


FIGURE 1.6 — Modèle actuel de VON NEUMANN.

L'accès des processeurs à la mémoire se fait à travers un bus (non représenté sur la figure 1.6), voie d'échange assurant un transfert rapide de l'information. Mais au cours du temps, pour des raisons technologiques, le débit du bus a crû moins vite que le débit d'accès à la mémoire et surtout que la vitesse des processeurs. D'où un phénomène d'attente — le « goulot de VON NEUMANN » — qui réduit les performances. Des palliatifs sont associés à l'usage généralisé de caches à plusieurs niveaux (mémoire d'accès rapide, voisine du processeur qui retiennent les données courantes) et au développement de machines à mémoire distribuée, mais se posent alors des problèmes de cohérence pour les données en copies multiples.

Quel modèle de machine après VON NEUMANN ? La question, posée depuis longtemps, n'a pas de réponse claire aujourd'hui (voir le document « Calculer différemment », Interstices, 2011).

POUR ALLER PLUS LOIN...

AUTOUR DU RASPBERRY PI

- ▶ Manuel d'utilisation du RASPBERRY PI — format PDF, *Adventures in Rasperry Pi & Rasperry Pi User Guide* —, à destination des adolescents pour découvrir les possibilités du RASPBERRY PI ;
- ▶ *RASPBERRY PI : la petite histoire d'une grande idée*, Binaire, 28 décembre 2015 ;
- ▶ *Comment installer un RASPBERRY PI, ce nano-ordinateur à moins de 50 euros*, avec une présentation vidéo de RASPBERRY PI par Alan McCULLAGH, décembre 2016.

ARCHITECTURES AVANCÉES POUR PLUS DE PUISSANCE DE CALCUL

- ▶ *Le futur de l'ordinateur ? L'ordinateur quantique*, Philippe Jorrand, Interstices, 2005 ;
- ▶ *Architecture et performance : les super-ordinateurs*, Charlotte Truchet, binaire, 08 avril 2016 ;
- ▶ *Les machines d'aujourd'hui et de demain*, Albert Cohen, CanalU, collection Inria Science Info Lycée Profs ; 86 mn. montrant les liens entre science informatique et architecture des ordinateurs ;
- ▶ *Microcontrôleur : Comment ça marche ?* — SILIS Electronique, 25 février 2016 : 5 mn 34 s — Tout objet numérique n'a pas un processeur, une carte graphique, un disque dur... Alors pourquoi dit-on que tous ces objets fonctionnent sur le même schéma ? Parce qu'ils intègrent un *microcontrôleur* qui suit la