CHAPITRE I : INTRODUCTION AUX SYSTEMES D'EXPLOITATION

1 Système informatique = le matériel + le logiciel

L'objectif d'un système informatique est d'automatiser le traitement de l'information.

Un système informatique est constitué de deux entités : le matériel et le logiciel.

Côté matériel, un ordinateur est composé de : L'Unité Centrale (UC) pour les traitements, la Mémoire Centrale (MC) pour le stockage, et les Périphériques d'E/S: disque dur, clavier, souris, flash disque, carte réseau... accessibles via des pilotes de périphériques.

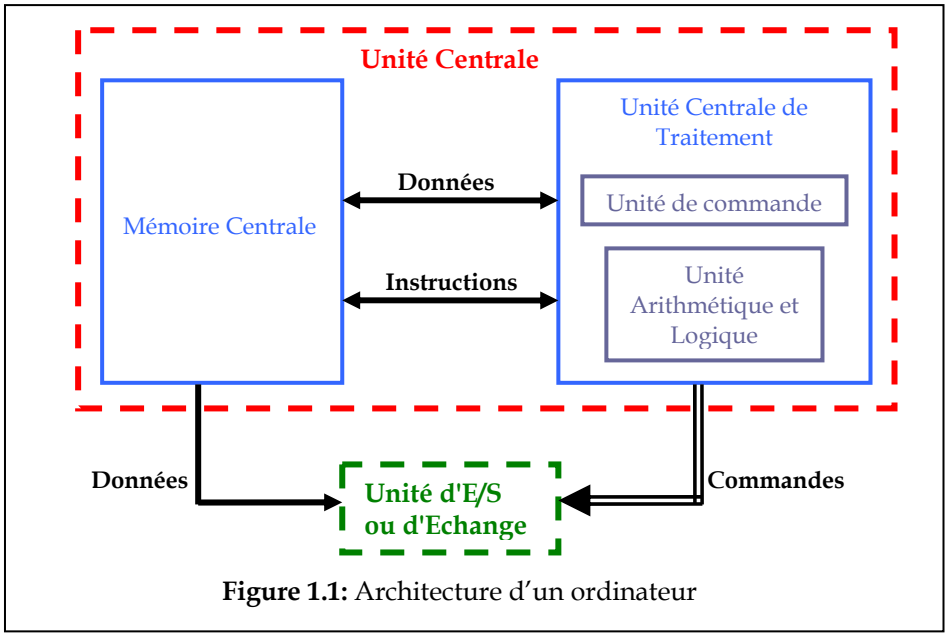


Figure 1.1: Architecture d'un ordinateur

Côté logiciel, un système informatique est composé de deux niveaux bien distincts : les Programmes d'application (achetés ou développés) et les logiciels de base. Dans les logiciels de base, on trouve le **système d'exploitation** (**S.E.**) et les utilitaires.

L'objectif du logiciel est d'offrir aux utilisateurs des fonctionnalités adaptées à leurs besoins. Le principe est de masquer les caractéristiques physiques du matériel.

2 Organisation d'un Système informatique

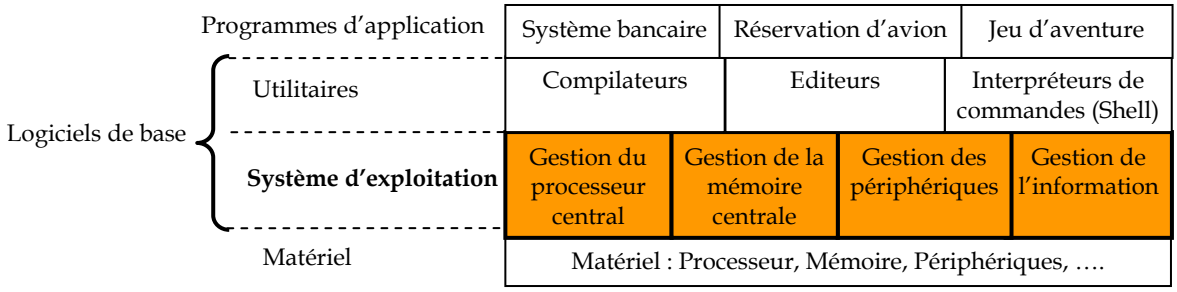


Figure 1.2 : Organisation d'un système informatique

3 Qu'est-ce qu'un Système d'Exploitation ?

Le système d'exploitation (**Operating System**, **O.S.**) est l'intermédiaire entre un ordinateur (ou en général un appareil muni d'un processeur) et les applications qui utilisent cet ordinateur ou cet appareil. Son rôle peut être vu sous deux aspects complémentaires :

1. **Machine étendue ou encore machine virtuelle (Virtual Machine)**

   Son rôle est de masquer des éléments fastidieux liés au matériel, comme les interruptions, les horloges, la gestion de la mémoire, la gestion des périphériques (déplacement du bras du lecteur de disque) ...etc. Cela consiste à fournir des outils adaptés aux besoins des utilisateurs indépendamment des caractéristiques physiques.

2. **Gestionnaire de ressources**

   Le système d'exploitation permet l'ordonnancement et le contrôle de l'allocation des processeurs, des mémoires et des périphériques d'E/S entre les différents programmes qui y font appel, avec pour objectifs : **efficacité** (utilisation maximale des ressources), **équité** (pas de programme en attente indéfinie), **cohérence** (entre des accès consécutifs), et **protection** (contre des accès interdits).

   Ce rôle de gestionnaire de ressources est crucial pour les systèmes d'exploitation manipulant plusieurs tâches en même temps (**multi-tâches** (**Multitasking**)).

On peut trouver un S.E. sur les ordinateurs, les téléphones portables, les assistants personnels, les cartes à puce, …etc.

4 Fonctions d'un système d'exploitation général

Les rôles du système d'exploitation sont divers :

- **Gestion du processeur** : allocation du processeur aux différents programmes.
- **Gestion des objets externes** : principalement les fichiers.
- **Gestion des entrées-sorties** : accès aux périphériques, via les pilotes.
- **Gestion de la mémoire** : segmentation et pagination.
- **Gestion de la concurrence** : synchronisation pour l'accès à des ressources partagées.
- **Gestion de la protection** : respect des droits d'accès aux ressources.
- **Gestion des accès au réseau** : échange de données entre des machines distantes.

5 Historique

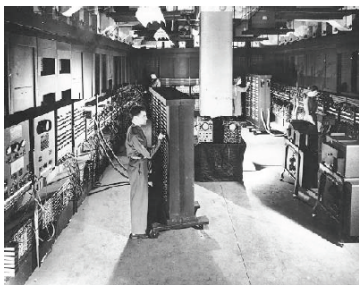
Les systèmes d'exploitation ont été historiquement liés à l'architecture des ordinateurs sur lesquels ils étaient implantés. Nous décrirons les générations successives des ordinateurs et observons à quoi ressemblait leur système d'exploitation.

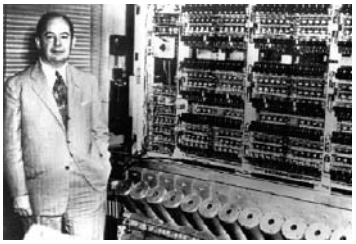
5.1 Porte ouverte ou exploitation self-service (1945-1955)

Les machines de la première génération (Figure 1.3), appelées **Machines à Tubes**, étaient dépourvues de tout logiciel.

Ces machines étaient énormes, remplissaient les salles avec des centaines de tubes à vide (**Vacuum Tubes**), coûteuses, très peu fiables et beaucoup moins rapides car le temps de cycle se mesurait en secondes. Les programmes étaient écrits directement en langage machine : ils étaient chargés en mémoire, exécutés et mis au point à partir d'un **pupitre de**

commande. Au début de 1950, la procédure s'est améliorée grâce à l'introduction de **cartes perforées**.


ENIAC


Von Neumann

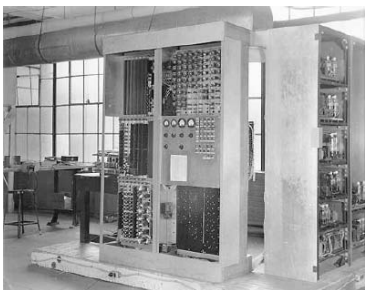

EDVAC

Figure 1.3 : Exemples de machines à tubes

Afin d'utiliser la machine, la procédure consistait à allouer des **tranches de temps** directement aux usagers, qui se réservent toutes les ressources de la machine à tour de rôle pendant leur durée de temps. Les périphériques d'entrée/sortie en ce temps étaient respectivement le lecteur de cartes perforées et l'imprimante. Un pupitre de commande était utilisé pour manipuler la machine et ses périphériques.

Chaque utilisateur, assurant le rôle d'**opérateur**, devait lancer un ensemble d'opérations qui sont :

- Placer les cartes du programme dans le lecteur de cartes.
- Initialiser un programme de lecteur des cartes.
- Lancer la compilation du programme utilisateur.
- Placer les cartes données s'il y en a, dans le lecteur de cartes.
- Initialiser l'exécution du programme compilé.
- Détecter les erreurs au pupitre et imprimer les résultats.

Inconvénients

- Temps perdu dans l'attente pour lancer l'exécution d'un programme.
- Vitesse d'exécution de la machine limitée par la rapidité de l'opérateur qui appuie sur les boutons et alimente les périphériques.
- Pas de différences entre : concepteurs ; constructeurs ; programmeurs ; utilisateurs ; mainteneurs.

5.2 Traitement par lots (Batch Processing, 1955-1965)

Ce sont des systèmes réalisant le séquencement des jobs ou travaux selon l'ordre des cartes de contrôle à l'aide d'un **moniteur d'enchaînement**. L'objectif était de réduire les pertes de temps occasionnées par l'oisiveté du processeur entre l'exécution de deux jobs ou programmes (durant cette période, il y a eu apparition des machines à **transistor** avec unités de **bandes magnétiques**, donc évolution des ordinateurs).

L'idée directrice était de collecter un ensemble de travaux puis de les transférer sur une bande magnétique en utilisant un ordinateur auxiliaire (**Ex.** IBM 1401). Cette bande sera remontée par la suite sur le lecteur de bandes de l'ordinateur principal (**Ex.** IBM 7094) afin d'exécuter les travaux transcrits en utilisant un programme spécial (l'ancêtre des S.E. d'aujourd'hui. **Ex.** FMS : *Fortran Monitor System*, IBSYS). Les résultats seront récupérés sur

une autre bande pour qu'ils soient imprimés par un ordinateur auxiliaire. Cette situation est illustrée à la Figure 1.4.

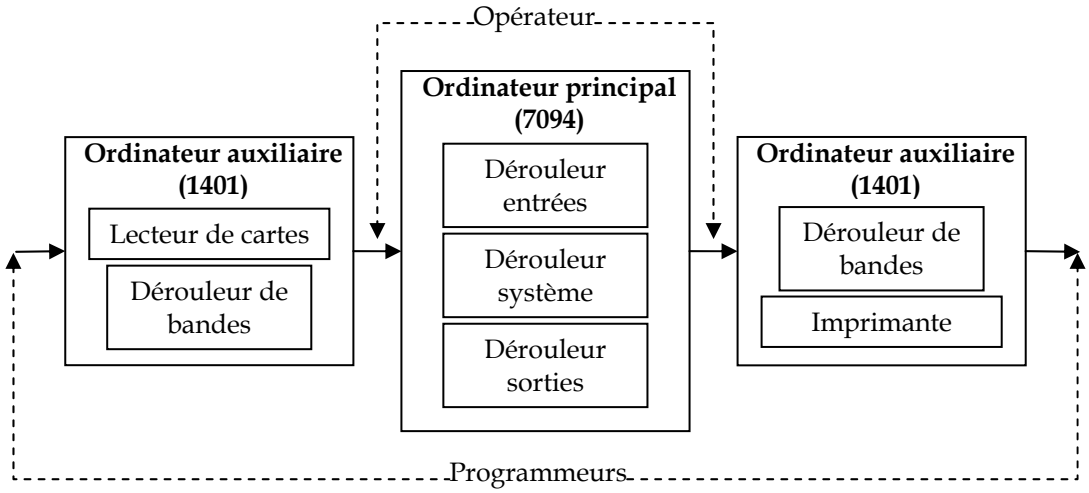


Figure 1.4 : Un système de traitement par lots

Quand le moniteur rencontre une carte de contrôle indiquant l'exécution d'un programme, il charge le programme et lui donne le contrôle. Une fois terminé, le programme redonne le contrôle au moniteur d'enchaînement. Celui-ci continue avec la prochaine carte de contrôle, ainsi de suite jusqu'à la terminaison de tous les jobs. La structure d'un travail soumis est montrée sur la Figure 1.5 :

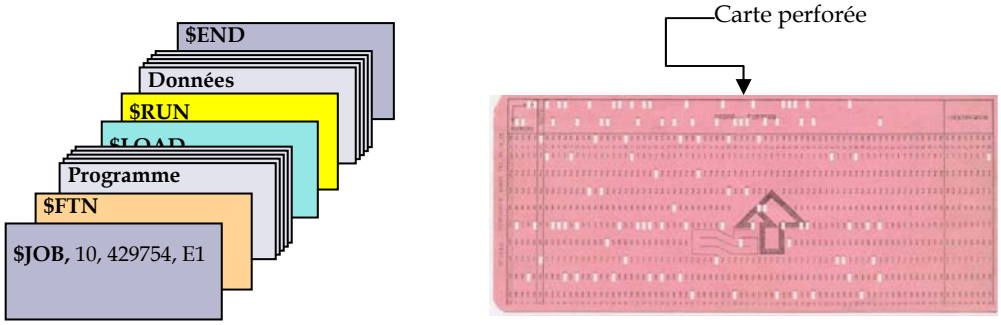


Figure 1.5 : Structure d'un travail FMS typique

Inconvénients

- Perte de temps due à l'occupation du processeur durant les opérations d'E/S. (En effet, le processeur restait trop inactif, car la vitesse des périphériques mécaniques était plus lente que celle des dispositifs électroniques).
- Les tâches inachevées sont abandonnées.

5.3 Multiprogrammation (Multiprogramming, 1965-1970)

L'introduction des **circuits intégrés** dans la construction des machines a permis d'offrir un meilleur rapport coût/performance. L'introduction de la technologie des **disques** a permis au système d'exploitation de conserver tous les travaux sur un disque, plutôt que dans un lecteur de cartes (Arrivée des unités disques à stockage important et introduction de **canaux d'E/S**).

L'idée était alors, pour pallier aux inconvénients du traitement par lots, de maintenir en mémoire plusieurs travaux ou jobs prêts à s'exécuter, et partager efficacement les ressources de la machine entre ces jobs.

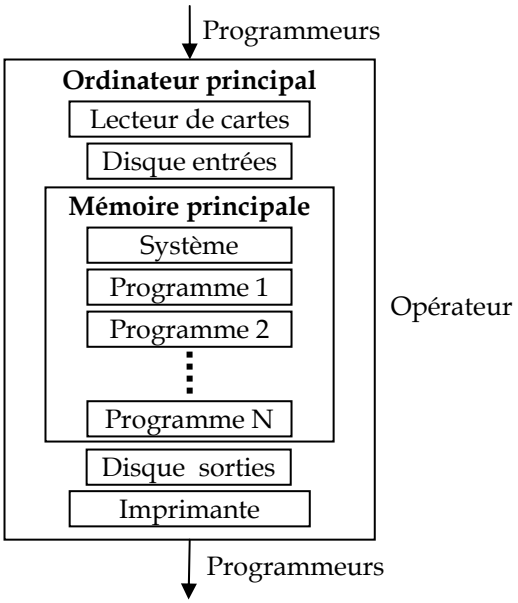
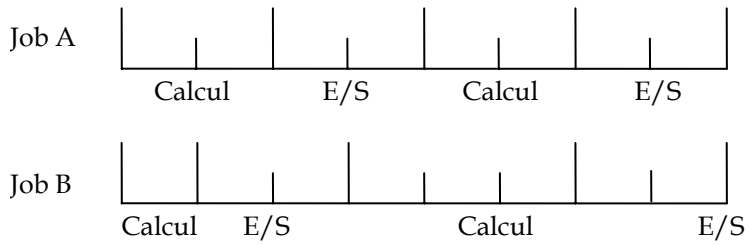


Figure 1.6 : Un système de multiprogrammation

En effet, le processeur est alloué à un job, et dès que celui-ci effectue une demande d'E/S, le processeur est alloué à un autre job, éliminant ainsi les temps d'attente de l'unité de traitement chargé des E/S, appelé canal d'E/S.

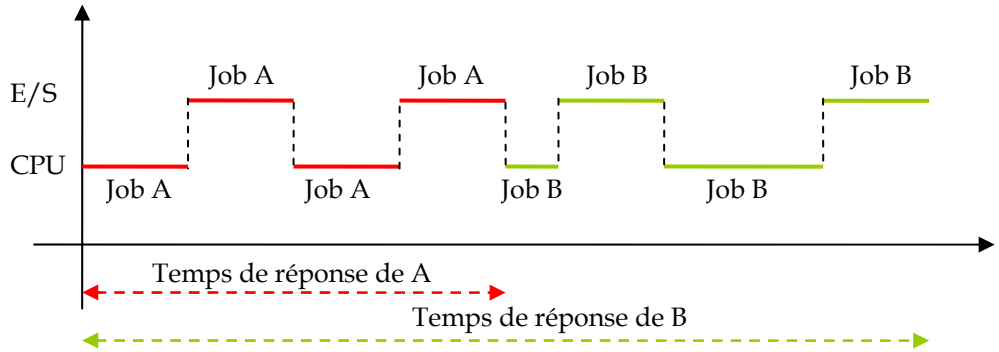
Exemple

Soient les deux programmes A et B suivants :

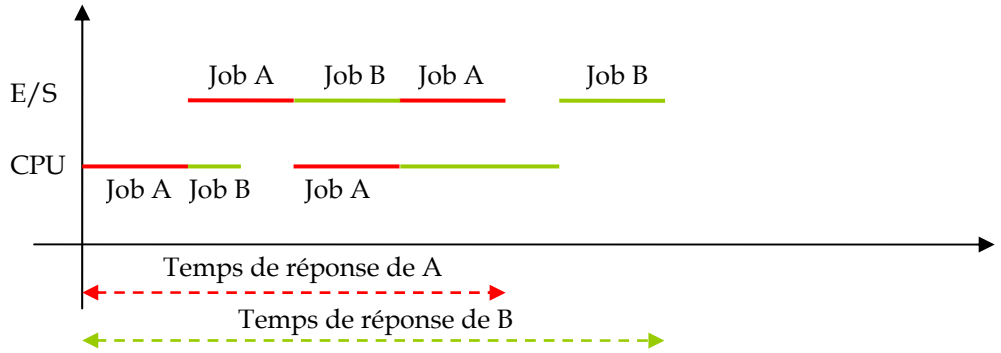


On suppose qu'on a un seul périphérique d'E/S.

– **Système mono-programmé**



– **Système multiprogrammé**



Comparaison de la Monoprogrammation et de la Multiprogrammation

Monoprogrammation	Multiprogrammation
– Mauvaise utilisation des ressources (processeur, mémoire, E/S, …etc.). – Temps de réponse imposé par les jobs très longs. – S.E. simple ; seule contrainte : protéger la partie résidente du système des utilisateurs.	– Possibilité de mieux équilibrer la charge des ressources. – Mieux utiliser la mémoire (minimiser l'espace libre). – Possibilité d'améliorer le temps de réponse pour les travaux courts. – Protéger les programmes utilisateurs des actions des autres utilisateurs, et protéger aussi la partie résidente des usagers.

5.4 Temps partagé (Time Sharing, 1970-)

C'est une variante du mode multiprogrammé où le temps CPU est distribué en petites tranches appelées **quantum de temps**.

L'objectif est d'offrir aux usagers une interaction directe avec la machine par l'intermédiaire de terminaux de conversation, et de leur allouer le processeur successivement durant un quantum de temps, chaque utilisateur aura l'impression de disposer de la machine à lui tout seul. Il peut aussi contrôler le job qu'il a soumis directement à partir du terminal (corriger les erreurs, recompiler, resoumettre le job, …).

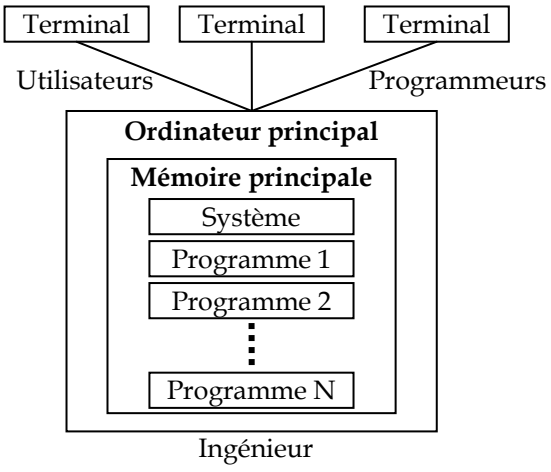


Figure 1.7 : Un système à temps partagé

Parmi les premiers systèmes à temps partagé, nous citons : **CTSS** (**C**ompatible **T**ime **S**haring **S**ystem), **MULTICS** (**MULT**iplexed **I**nformation and **C**omputing **S**ervice), **UNIX**, **MINIX**, **LINUX**. En fait, la plupart des systèmes d'aujourd'hui sont en temps partagé.

6 Taxonomie des Systèmes d'Exploitation

6.1 Systèmes des Ordinateurs Personnels

Comme le coût du matériel a baissé, il est devenu possible d'avoir un système informatique dédié à un seul utilisateur. Ces types de systèmes informatiques sont appelés ordinateurs personnels ou **PC** (**Personal Computer**) ou micro-ordinateurs. Les objectifs de ces systèmes (qui n'étaient ni multiutilisateurs, ni multitâches) sont concentrés sur la commodité de l'utilisateur et la rapidité de réaction, la convivialité et l'**interactivité** avec l'utilisateur, plutôt que de rendre maximale l'utilisation de l'unité centrale et ses périphériques.

Un système informatique interactif (ou assisté) permet la communication directe entre l'utilisateur et le système : l'utilisateur donne des instructions ou commandes au S.E., par clavier ou souris, et attend des résultats immédiats.

6.2 Systèmes Parallèles (Parallel Systems)

Les systèmes parallèles, appelés aussi systèmes **fortement couplés** (**Tightly Coupled**), possèdent plus d'un processeur en étroite communication, qui partagent le bus de l'ordinateur, l'horloge et parfois la mémoire et les périphériques.

L'avantage de tels systèmes est d'augmenter la **capacité de traitement**, où plusieurs processeurs collaborent pour réaliser une tâche et aussi la **fiabilité** : dans le cas où un des processeurs tombe en panne, le système global ne s'arrête pas, mais ralentit seulement ses travaux.

Les systèmes multiprocesseurs les plus courants utilisent maintenant la fonctionnalité de **multitraitement symétrique** (**SMP**, **S**ymmetric **M**ulti**P**rocessing), où chaque processeur exécute une copie du S.E. et ces copies communiquent entre elles lorsque nécessaire.

6.3 Systèmes Distribués et Réseaux

Un développement intéressant a débuté vers le milieu des années 1980 : la croissance des réseaux d'ordinateurs personnels fonctionnant sous des **systèmes d'exploitation réseaux** ou des **systèmes d'exploitation distribués**.

- Les **systèmes réseaux** (**Network Operating Systems**), permettant l'accès des utilisateurs à des services communs, trop coûteux pour être individuels : stockage de grandes quantités d'informations, impression des documents, processeurs de grandes puissances, …etc. Ces services sont gérés par des systèmes appelés serveurs, auxquels s'adressent les utilisateurs clients qui disposent chacun de leurs machines individuelles. Un ordinateur qui exécute un système d'exploitation réseau agit indépendamment de tous les autres ordinateurs présents sur le réseau, bien qu'il ait connaissance du réseau et soit capable de communiquer avec d'autres ordinateurs connectés.
- Les **systèmes distribués** (**Distributed Systems**) qui consistent en plusieurs ordinateurs pourvus de leur système d'exploitation et reliés entre eux par des canaux de communication. On parle de systèmes répartis ou **faiblement couplés** (**Loosely Coupled**). Les S.E. de ces ordinateurs coopèrent et collaborent pour exécuter une

application distribuée. Ces systèmes communiquent de manière suffisamment proche pour donner l'illusion qu'il n'y a qu'un S.E. unique qui contrôle le réseau.

6.4 Systèmes Temps Réels

Ce type de système est un S.E. spécialisé, dédié à des applications spécifiques, en particulier des systèmes de contrôle, pourvus de capteurs. Ceux-ci captent de l'information qu'ils fournissent à l'ordinateur, puis celui-ci analyse ces informations, réalise les contrôles désirés et donne les résultats pour d'éventuelles interventions.

Un tel système est utilisé lorsqu'il y a des exigences de temps de réponse pour le fonctionnement d'un processeur. Un système d'exploitation temps réel possède des contraintes de temps fixes et bien définies. Le traitement doit être effectué dans les contraintes définies, sinon le système tombe en panne.

Exemple

- Contrôle d'un réacteur nucléaire : dans le cas de chauffage du réacteur, des procédures doivent être prises avant qu'il n'atteigne une température élevée.
- Chaîne industrielle robotisée.
- Systèmes d'imagerie médicale,…etc.

6.5 Systèmes Embarqués (Embedded Systems)

Un système embarqué est un système prévu pour fonctionner sur : des appareils autonomes (ex. électroménager, robot, automobile), ou des appareils de petite taille (ex. PDA, téléphone, carte à puce).

Ces systèmes sont caractérisés par une autonomie réduite, un besoin de gestion avancée de l'énergie, et une capacité de fonctionner avec des ressources limitées.

Parmi ces systèmes, on trouve **Palm OS** et **Windows CE** pour PDA, **Java Card** pour cartes à puce, et **TinyOS** pour les réseaux de capteurs (**Sensor networks**), …etc.

6.6 Systèmes Multi-cœurs (Multicore Systems)

Un ordinateur **multi-cœurs** (**Chip Multi-Processor**), combine deux ou plusieurs processeurs, appelés **cœurs** (C**ores**), sur une seule puce de silicone, appelée **die** (**Die**).

L'apparition des architectures multi-cœurs nécessite de repenser la conception des systèmes d'exploitation afin de pouvoir en tirer profit du parallélisme offert par ces architectures. Le défi de conception d'un système d'exploitation pour une architecture multi-cœurs est de permettre une exploitation simple, sure, et efficace des processeurs multi-cœurs.

Même si les systèmes d'exploitation actuels ne supportent pas totalement les architectures multi-cœurs, des améliorations ont été apportées à leur gestion de ressources (notamment la gestion de l'ordonnancement et la gestion des caches) pour prendre en compte ces architectures.

7 Exemple de systèmes d'exploitation : UNIX

7.1 Historique

L'histoire du système d'exploitation Unix commence en **1969** aux **laboratoires AT&T** de Bell, et ceci avec le développement d'une version simplifiée du système **MULTICS** par **Ken Thompson**. **Brian Kernighan** appela cette version **UNICS** (**UN**iplexed **I**nformation and **C**omputer **S**ervice) qui devint ensuite **UNIX** et qui était entièrement écrite en **assembleur**.

Le système Unix a connu un véritable succès, lorsqu'il fut réécrit en **langage C** en **1973** par **Dennis Ritchie** et Thompson. Le langage de programmation C a d'ailleurs été conçu initialement par D. Ritchie en 1971 pour la refonte d'Unix et son portage sur de nombreuses architectures matérielles.

En **1975**, le système **Unix (V6)** est distribué aux universités et aux centres de recherches. La principale université qui va travailler sur Unix est l'**université de Berkeley**, qui va produire ses propres versions appelées **BSD** (**Berkeley Software Distribution**). A Berkeley, les efforts portent sur l'intégration des protocoles réseaux TCP/IP, la gestion de la mémoire avec l'introduction de la pagination, la modification de certains paramètres du système (taille des blocs, nombre des signaux...) et l'ajout d'outils (l'éditeur **vi**, un interpréteur de commandes **csh**...).

En **1979**, les Bell Labs sortent leur version appelée **UNIX V7**, avec en particulier, l'ajout de nouveaux utilitaires et un effort en matière de portabilité. Cette version est la première à être diffusée dans le monde industriel. On peut dire qu'elle est à l'origine du développement du marché Unix.

Les nombreuses modifications et améliorations apportées au système UNIX, par AT&T et Berkeley ont abouti aux versions **System V Release 4** d'AT&T et **4.4BSD** de Berkeley.

Le support de l'**environnement graphique** est apparu avec le système **XWindow** du **MIT** en **1984**.

La fin des années 80 est marquée par une croissance sans précédent du nombre de systèmes Unix dans le domaine des systèmes d'exploitation. Les principales versions actuelles sont System VR4, GNU/Linux, SUN Solaris, FreeBSD, IBM AIX, Microsoft Xenix…etc. Pour qu'un système d'exploitation puisse être un Unix, il faut qu'il respecte la norme **POSIX** (**Portable Operating System Interface**). Tout logiciel écrit en respectant la norme Posix devrait fonctionner sur tous les systèmes Unix conformes à cette norme.

Une version gratuite d'Unix porte le nom de **Linux** (code source disponible). Elle a été créée par **Linus Torvalds** en **1991**. Par la suite, un grand nombre de programmeurs ont contribué à son développement accéléré. Conçu d'abord pour tourner sur des machines avec le processeur 80x86, Linux a migré à plusieurs autres plate-formes.


Ken Thompson


Brian Kernighan


Dennis Ritchie


Linus Torvalds

Figure 1.8 : Les Pionniers d'UNIX/LINUX

Une vision simplifiée de l'évolution subie par Unix est montrée sur la figure ci-dessous (Figure 1.9) :

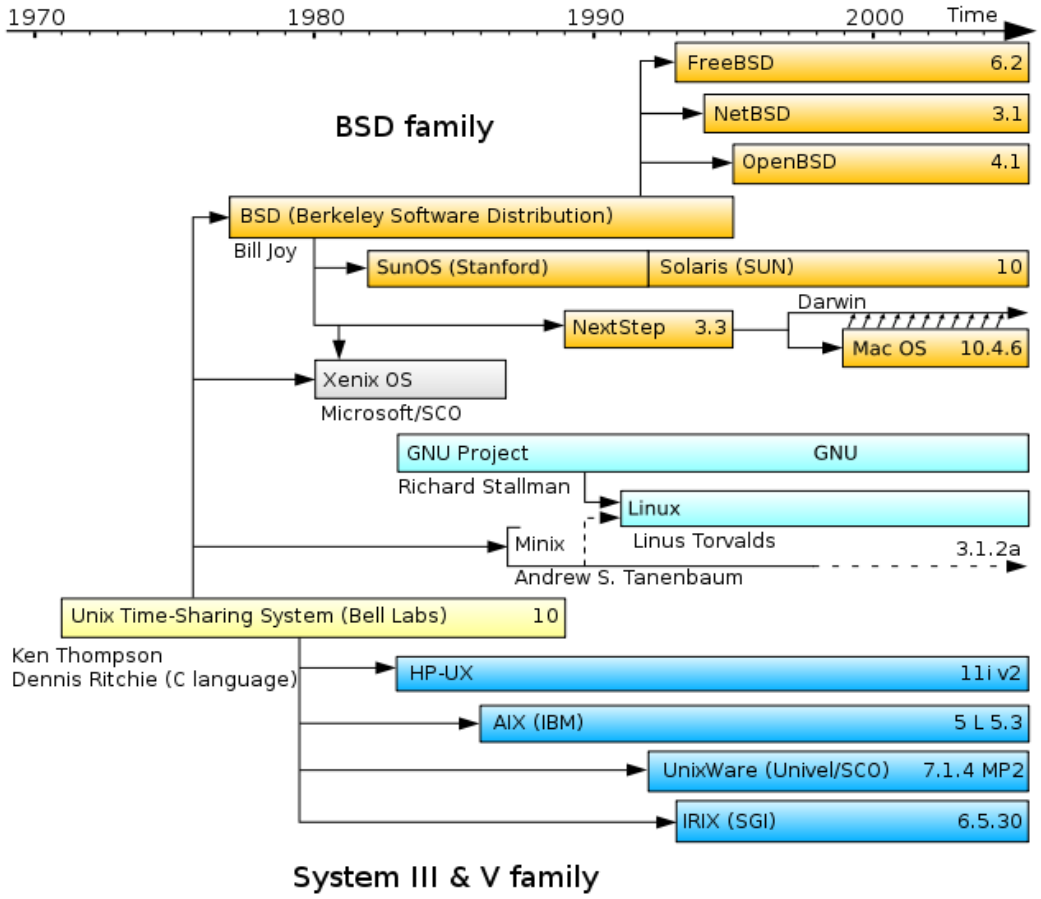


Figure 1.9 : Evolution du système Unix

7.2 Architecture Générale d'UNIX

UNIX a été conçu autour d'une architecture en **couche** qui repose sur différents niveaux bien distincts (Voir Figure 1.10) ; à savoir :

- Le noyau
- Un interpréteur de commandes (le shell)
- Des bibliothèques
- Un nombre important d'utilitaires.

A. Le noyau

Le noyau (**Kernel**) est la partie centrale d'Unix. Il est **résident** ; il se charge en mémoire au démarrage. Il s'occupe de gérer les tâches de base du système :

- L'initialisation du système,
- La gestion des processus,
- La gestion des systèmes de fichiers,
- La gestion de la mémoire et du processeur,
- Etc.

Les programmes en **espace utilisateur** (**user-space**) appellent les services du noyau via des **appels systèmes** (**System Calls**). En effet, les appels systèmes font entrer l'exécution en **mode noyau**. Dans ce mode, le processus est assuré de garder le processeur jusqu'au retour au **mode utilisateur** lorsque l'appel système est terminé.

B. Bibliothèques

L'interface entre le noyau Unix et les applications est définit par une bibliothèque (**Ex.** **`libc.a`** pour le langage C). Elle contient les modules permettant d'utiliser les primitives du noyau mais aussi des fonctions plus évoluées combinant plusieurs primitives. D'autres bibliothèques sont utilisées pour des services spécialisés (fonctions graphiques,...).

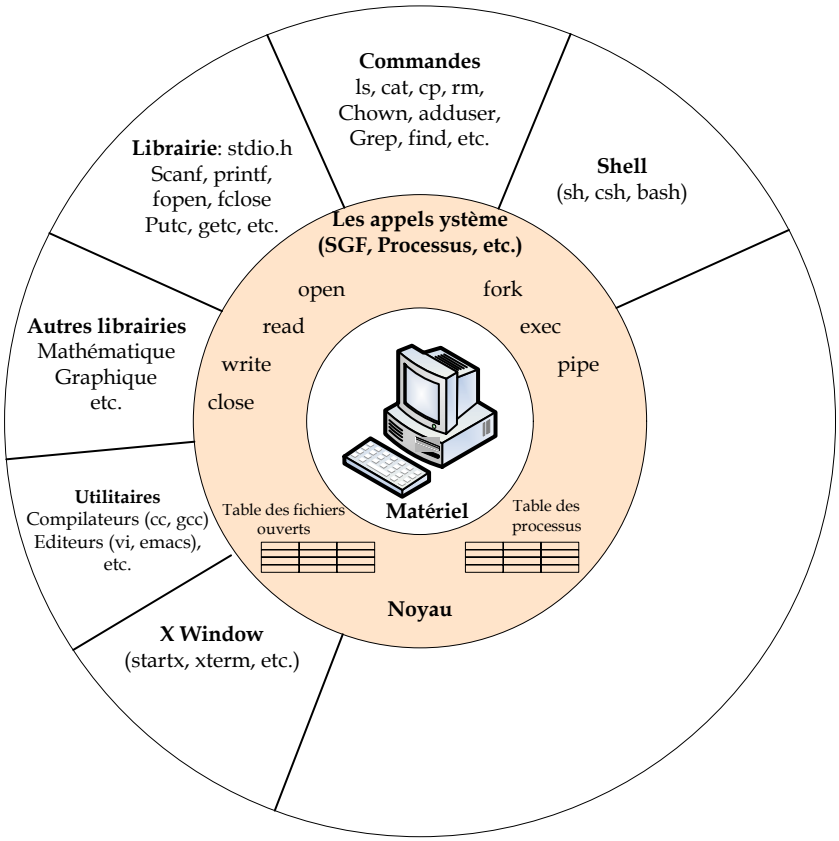


Figure 1.10 : Structure du système UNIX

C. Le Shell

Le shell désigne l'interface utilisateur sous UNIX. C'est un programme qui permet à l'utilisateur de dialoguer avec le noyau. Il joue un double rôle celui d'**interpréteur de commandes** et celui de **langage de programmation**. Il existe plusieurs shells différents mais les plus répondus sont:

- **Bourne Shell** : la commande **`sh`** est utilisée pour lancer ce shell.
- **C-Shell** : la commande **`csh`** est utilisée pour lancer ce shell.
- **Korn-Shell** : la commande **`ksh`** permet de lancer ce shell.
- **Bash** (**B**ourne **A**gain **Sh**ell) : est un interpréteur (Shell) compatible **`sh`** qui exécute les commandes lues depuis l'entrée standard, ou depuis un fichier. C'est le shell par défaut sous Gnu/Linux. La commande **`bash`** est utilisée pour lancer ce shell.

D. Utilitaires

UNIX est livré avec un grand nombre de programmes utilitaires, parmi lesquels :

- Compilateurs : cc, gcc
- Gestionnaire d'applications : make
- Editeurs de texte : vi, emacs

7.3 Caractéristiques

Les principales caractéristiques, auxquelles est dû le succès d'UNIX, sont :

- **Portabilité** : Une des premières caractéristiques d'Unix est son écriture (à hauteur de 95%) en langage C, permettant ainsi une portabilité sur la plupart des architectures en allant des micro-ordinateurs jusqu'aux supercalculateurs.
- **Open-Source** : Le code source d'UNIX est disponible aux utilisateurs, ce qu'il leurs permet de personnaliser le système d'exploitation en rajoutant de nouvelles caractéristiques et fonctionnalités.
- **Multi-utilisateurs** et **Multitâches** : Plusieurs utilisateurs peuvent accéder simultanément au système, et chaque utilisateur peut effectuer une ou plusieurs tâches en même temps.
- **Temps partagé** : c'est-à-dire que les ressources du processeur et du système sont réparties entre les utilisateurs.
- **Interface utilisateur interactive (shell)** : elle est constituée d'un programme séparé du noyau permettant à l'utilisateur de choisir son environnement de travail. Elle intègre un langage de commandes très sophistiqué (scripts).
- **Système de fichiers hiérarchique** : plusieurs systèmes de fichiers peuvent être rattachés au système de fichiers principal ; chaque système de fichiers possède ses propres répertoires.
- **Entrées-Sorties intégrées au système de fichiers** : les périphériques sont représentés par des fichiers, ce qui rend le système indépendant du matériel et en assure la portabilité ; l'accès aux périphériques est donc identique à l'accès aux fichiers ordinaires.
- **Gestion de la mémoire virtuelle** : un mécanisme d'échange entre la mémoire centrale (MC) et le disque dur permet de pallier un manque de MC et optimise le système.

8 Fonctionnement d'un Système Informatique Moderne

Un système informatique moderne à usage général est constitué d'une mémoire, U.C., et d'un certain nombre de périphériques connectés par un bus commun fournissant l'accès à la mémoire, et régis par des cartes électroniques appelés contrôleurs.

Pour qu'un ordinateur commence à fonctionner (quand il est mis sous tension ou réinitialisé), il doit avoir un programme initial à exécuter. Ce programme initial, appelé **programme d'amorçage**, est simple : il initialise tous les aspects du système, depuis les registres de l'U.C. jusqu'aux contrôleurs de périphériques et contenu de la mémoire. Le programme d'amorçage doit savoir après comment charger le S.E. et comment commencer à l'exécuter.

Pour atteindre cet objectif, le programme d'amorçage cherche le noyau du S.E. à une adresse spécifiée (en général, au 1er secteur de l'unité disque, appelé secteur d'amorçage), puis, le charge en mémoire. Le S.E. démarre alors l'exécution du premier processus d'initialisation et attend qu'un événement se produise.

9 Interactions Utilisateur/Système

Pour un utilisateur, le système d'exploitation apparaît comme un ensemble de procédures, trop complexes pour qu'il les écrive lui-même. Les bibliothèques des **appels système** sont alors des procédures mises à la disposition des programmeurs. Ainsi un programme C/C++ peut utiliser des appels système d'Unix/Linux comme open(), write() et read() pour effectuer des Entrées/Sorties de bas niveau.

L'**interpréteur de commandes** constitue une interface utilisateur/système. Il est disponible dans tous les systèmes. Il est lancé dès la connexion au système et invite l'utilisateur à introduire une commande. L'interpréteur de commandes récupère puis exécute la commande par combinaison d'appels système et d'outils (compilateurs, éditeurs de lien, etc.). Il affiche les résultats ou les erreurs, puis se met en attente de la commande suivante. Par exemple, la commande de l'interpréteur (shell) d'Unix suivante permet d'afficher à l'écran le contenu du fichier appelé essai : **`cat essai.txt`**

L'introduction du graphisme dans les interfaces utilisateur a révolutionné le monde de l'informatique. L'interface graphique a été rendue populaire par le **Macintosh** de **Apple**. Elle est maintenant proposée pour la plupart des machines.

CHAPITRE II : MECANISMES DE BASE D'EXECUTION DES PROGRAMMES

1 Machine de VON-NEUMANN

1.1 Définition

Une machine de **Von-Neumann** est un calculateur électronique **à base de mémoire** dont les composants sont :

- Mémoire Centrale (MC).
- Processeur ou Unité Centrale (UC) ; pour effectuer les calculs et exécuter les instructions.
- Unités périphériques ou d'Entrée/Sortie (E/S).

1.2 Unité Centrale de Traitement (CPU, Central Process Unit)

Appelée aussi "**Processeur Central**" (PC), elle est composée de :

- L'Unité de Commande (UC).
- L'Unité Arithmétique et Logique (UAL).
- Les Registres (Données, Adresses, Contrôle, Instruction).
- Bus Interne.

Le processeur exécute des instructions ou actions d'un programme. C'est le cerveau de l'ordinateur. Une **action** fait passer, en un temps fini, le processeur et son environnement d'un **état initial** à un **état final**. Les actions sont constituées de suites d'instructions **élémentaires**.

1. Registres du processeur central

Les registres sont une sorte de mémoire interne à la CPU, à accès très rapide qui permettent de stocker des résultats temporaires ou des informations de contrôle. Le nombre et le type des registres implantés dans une unité centrale font partie de son architecture et ont une influence importante sur la programmation et les performances de la machine. Le processeur central dispose d'un certain nombre de registres physiques :

- **Le Compteur Ordinal (CO, Program Counter (PC), Instruction Pointer (IP)) :** Il contient l'adresse de la prochaine instruction à exécuter.
- **Le Registre d'Instruction (RI, Instruction Register (IR)) :** Il contient l'instruction en cours d'exécution.
- **Les Registres Généraux (General-purpose Registers):** Ils permettent de faire le calcul, la sauvegarde temporaire de résultats, …etc. Il s'agit de :
  - **Registres Accumulateurs** (**Accumulator Registers**) qui servent aux opérations arithmétiques.
  - **Registres d'Index** (**Index Registers**) qui sont utilisés pour l'**adressage indexé**. Dans ce cas, l'adresse effective d'un opérande est obtenue en ajoutant le contenu du registre d'index à l'adresse contenue dans l'instruction. Ce type d'adressage et de registre est très utile pour la manipulation des tableaux.

- **Registre de Base** (**Base Register**) qui permet le calcul des adresses effectives. Un registre de base contient une adresse de référence, par exemple l'adresse physique correspondant à l'adresse virtuelle 0. L'adresse physique est obtenue en ajoutant au champ adresse de l'instruction le contenu du registre de base.
- **Registres Banalisés** qui sont des registres généraux pouvant servir à diverses opérations telles que stockage des résultats intermédiaires, sauvegarde des informations fréquemment utilisées, …etc. Ils permettent de limiter les accès à la mémoire, ce qui accélère l'exécution d'un programme.

– **Le Registre Pile (Stack Pointer, SP) :** Il pointe vers la tête de la pile du processeur. Cette pile est une pile particulière (appelée **pile système**) est réservée à l'usage de l'unité centrale, en particulier pour sauvegarder les registres et l'adresse de retour en cas d'interruption ou lors de l'appel d'une procédure. Le pointeur de pile est accessible au programmeur, ce qui est souvent source d'erreur.

– **Le Registre Mot d'Etat (PSW, Program Status Word) :** Il contient plusieurs types d'informations ; à savoir :

1. Les valeurs courantes des **codes conditions** (**Flags**) qui sont des bits utilisés dans les opérations arithmétiques et comparaisons des opérandes.
2. Le **mode d'exécution**. Pour des raisons de protection, l'exécution des instructions et l'accès aux ressources se fait suivant des modes d'exécution. Ceci est nécessaire pour pouvoir réserver aux seuls programmes du S.E. l'exécution de certaines instructions. Deux modes d'exécution existent généralement :
   - Mode **privilégié** ou **maître** (ou **superviseur**). Il permet :
     - L'exécution de tout type d'instruction. Les instructions réservées au mode maître sont dites **privilégiées** (Ex. instructions d'E/S, protection, …etc.).
     - L'accès illimité aux données.
   - Mode **non privilégié** ou **esclave** (ou **usager**). Il permet :
     - Exécution d'un répertoire limité des instructions. C'est un sous ensemble du répertoire correspondant au mode maître.
     - Accès limité aux données d'usager.
3. masque d'interruptions (seront détaillés dans la suite).

2. Cycle d'exécution du processeur

Un programme séquentiel est composé d'une suite d'instructions. L'exécution du programme fait évoluer l'état de la machine d'un état à un autre. Cette évolution est **discrète** : l'état n'est observable qu'en des instants particuliers appelés "**points observables**", qui correspondent en général aux débuts et fins d'instructions.

Le processeur central exécute continuellement le cycle suivant :

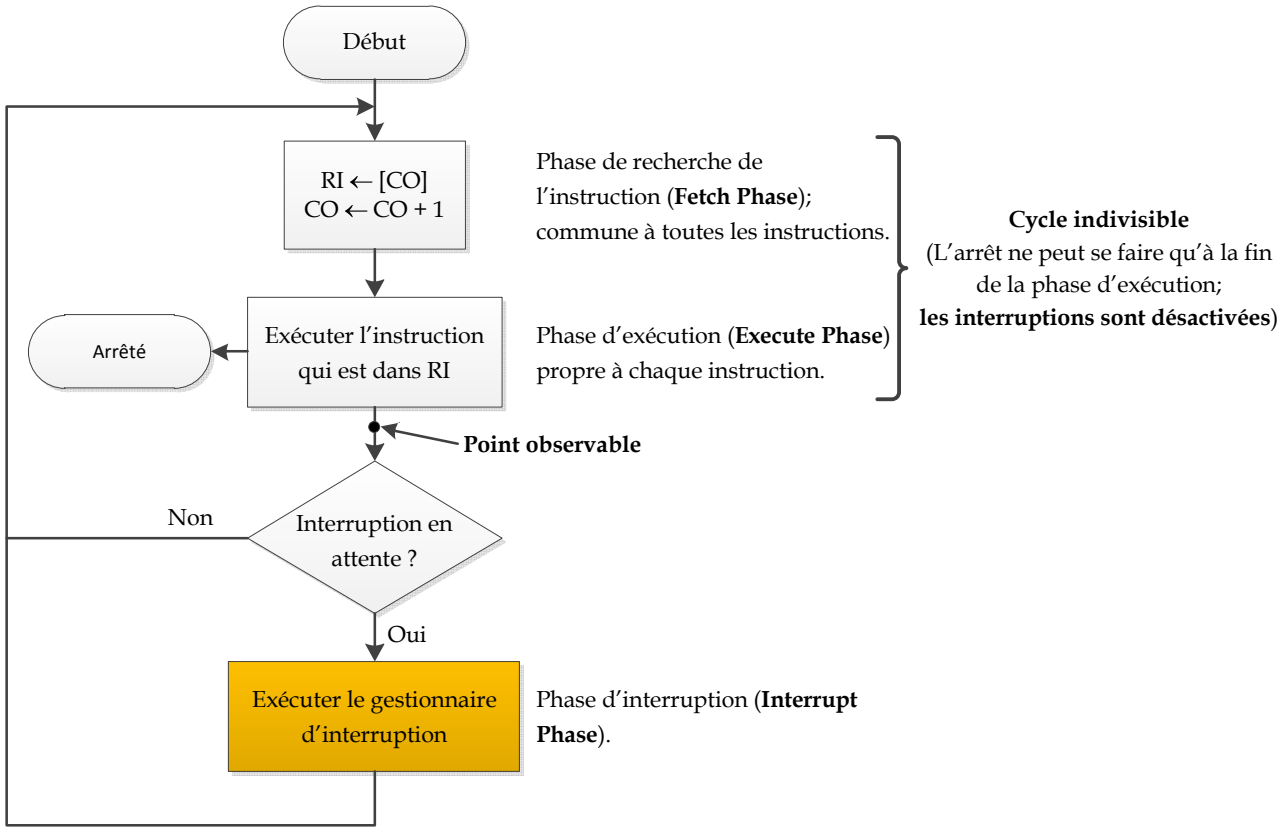


Figure 2.1 : Cycle d'exécution du processeur

Remarque

Le cycle de processeur est **indivisible** et ne peut être interrompu qu'à la fin de la phase **Execute** (i.e. on exécute au moins une instruction élémentaire d'un programme pour pouvoir interrompre).

3. Etat du processeur (Processor State Information)

Il est décrit par le **contenu** des **registres** du processeur. Le contenu des registres concerne le processus en cours d'exécution. Quand un processus est interrompu, l'information contenue dans les registres du processeur doit être sauvegardée afin qu'elle puisse être restaurée quand le processus interrompu reprend son exécution.

Remarque

L'état d'un processeur n'est observable qu'entre deux cycles du processeur.

2 Cheminement d'un Programme dans un Système

Le passage d'un programme de la forme externe à la forme interne se fait en plusieurs étapes. Un programme est généralement écrit dans un langage évolué (Pascal, C, VB, Java, etc.). Pour faire exécuter un programme par une machine, on passe généralement par les étapes suivantes (Voir Figure 2.2) :

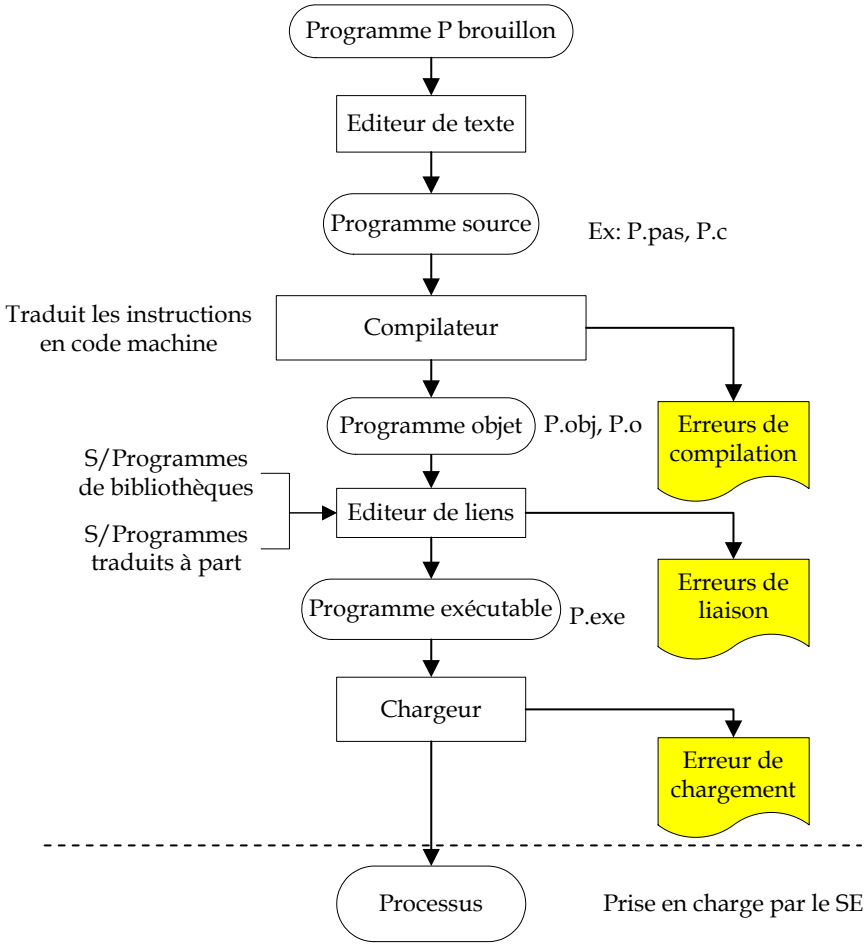


Figure 2.2 : Cheminement d'un programme dans un système

2.1 Editeur de texte (Text Editor)

C'est un logiciel interactif qui permet de saisir du texte à partir d'un clavier, et de l'enregistrer dans un fichier.

Exemple : Bloc-Notes, vi, vim, emacs, …etc.

2.2 Compilateur (Compiler)

Un compilateur est un programme qui traduit des programmes écrits dans des langages évolués (Pascal, C, Ada, Java, …etc.) en programmes binaires ou en langage machine, appelés aussi **objets**.

Le **langage machine** est un ensemble de codes binaires directement décodables et exécutables par la machine.

2.3 Editeur de liens (Linker)

Un programme source peut être constitué :

1. des instructions,
2. des données localement définies,
3. des données externes, et

4. des procédures ou sous-programmes externes (bibliothèques de fonctions).

Avant d'exécuter le programme objet, il est nécessaire de rassembler les parties non locales et les procédures externes avec le programme.

L'éditeur de liens est donc un logiciel permettant de combiner plusieurs programmes objets en un seul programme.

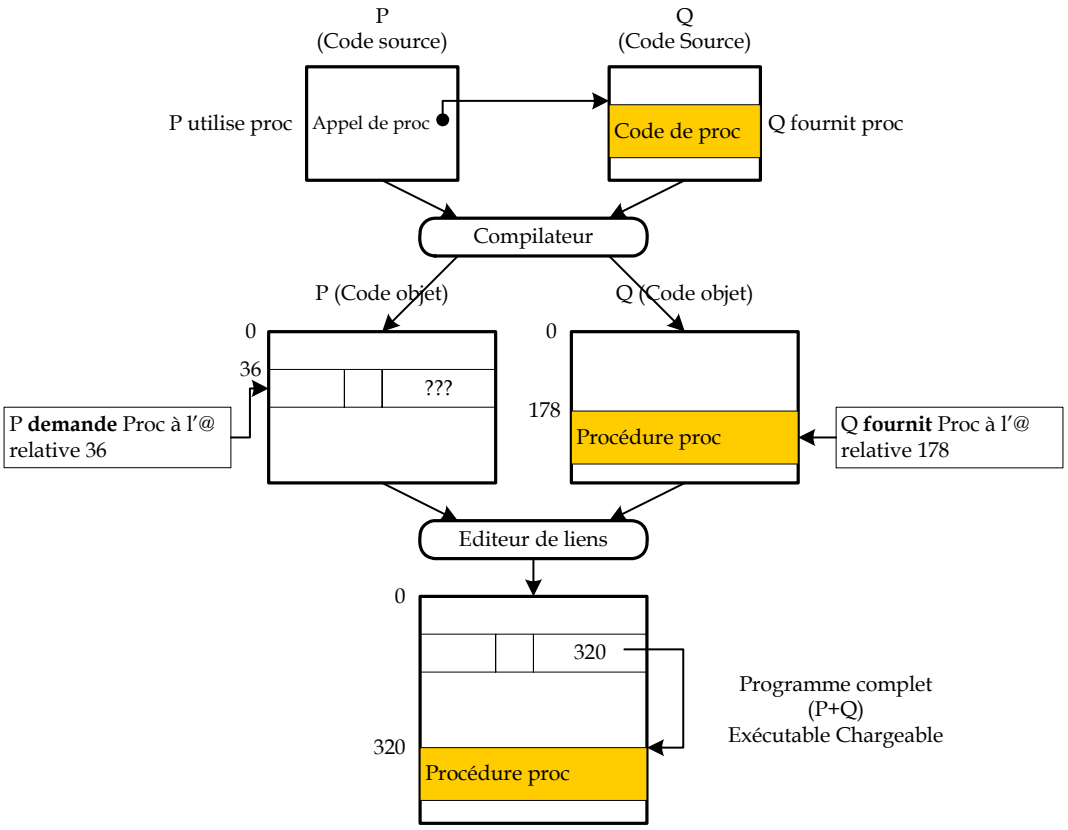


Figure 2.3 : Principe d'édition de liens

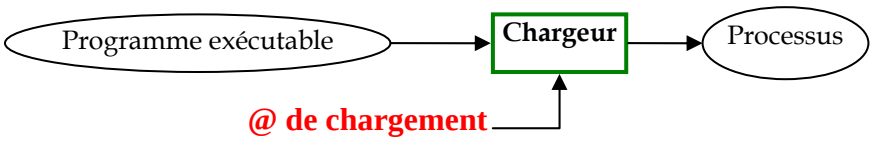
Pour pouvoir développer de gros programmes, on structure ceux-ci en modules que l'on traduit indépendamment. Ainsi, un programme peut être constitué de plusieurs fichiers dont l'un est le programme principal. Ce dernier fait appel aux sous-programmes, ce qui donne lieu à des références extérieures.

Lors de la compilation, le compilateur ne peut pas remplacer les références extérieures par les adresses correspondantes puisqu'il ne les connaît pas. Le programme objet généré contient donc le code machine des instructions et la liste des références extérieures, ainsi que la liste des adresses potentiellement référençables depuis l'extérieur du module. Après la compilation, chaque sous-programme commence à **l'adresse logique 0**.

L'éditeur de liens ordonne les sous-programmes et le programme appelant, modifie les adresses de chacun d'eux et produit un programme final dont l'origine est à l'adresse 0.

2.4 Le chargeur (Loader)

Après l'édition de liens, le programme exécutable doit se trouver en MC pour être exécuté. Le chargeur est un programme qui installe ou charge un exécutable en MC à partir d'une adresse déterminée par le S.E.



3 Concepts de Processus et de Multiprogrammation

3.1 Définition

Un **processus** (**Process**) est un **programme en cours d'exécution.** Tout processus possède des **caractéristiques** propres (**Ex.** un numéro d'identification), des **ressources** qu'il utilise (comme des fichiers ouverts) et se trouve à tout moment dans un **état** (en exécution ou en attente …).

Un processus est constitué d' :

- Un **code exécutable** du programme en exécution.
- Un **contexte** qui est une image décrivant l'environnement du processus.

3.2 Contexte d'un processus

Le contexte d'un processus est l'ensemble des données qui permettent de reprendre l'exécution d'un processus qui a été interrompu. Il est formé des contenus de :

- Compteur Ordinal (CO)
- Mot d'état PSW
- Registres généraux
- Pile

Le CO et le PSW représentent le **petit contexte**, et les registres généraux et la pile représentent le **grand contexte**.

3.3 Image mémoire d'un processus

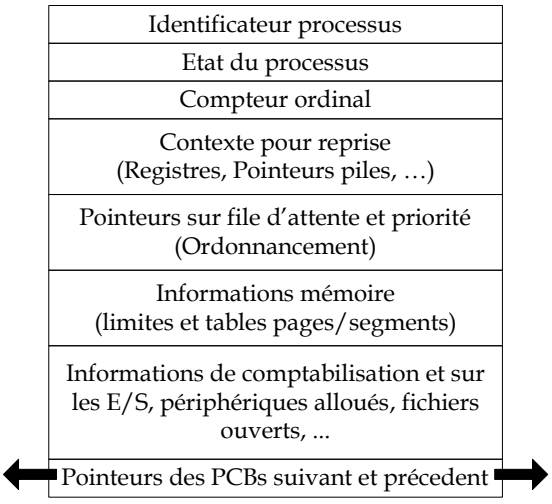
L'espace mémoire alloué à un processus, dit **image mémoire** (**Memory Map**) du processus, est divisé en un ensemble de parties :

1. **Code (Text) ;** qui correspond au code des instructions du programme à exécuter. L'accès à cette zone se fait en **lecture seulement** (**Read-Only**).
2. **Données (Data) ;** qui contient l'ensemble des constantes et variables déclarées**.**
3. **Pile (Stack) ;** qui permet de stocker
   - Les valeurs des registres,
   - Variables locales et paramètres de fonctions,
   - Adresse de retour de fonctions.
4. **Tas (Heap) ;** une zone à partir de laquelle l'espace peut être alloué dynamiquement **en cours d'exécution (Runtime)**, en utilisant par exemple les fonctions **new** et **malloc**.

3.4 Descripteur de Processus (PCB)

Chaque processus est représenté dans le SE par un **bloc de contrôle de processus** (**Process Control Bloc, PCB**). Le contenu du PCB (Figure 2.4) varie d'un système à un autre suivant sa complexité. Il peut contenir :

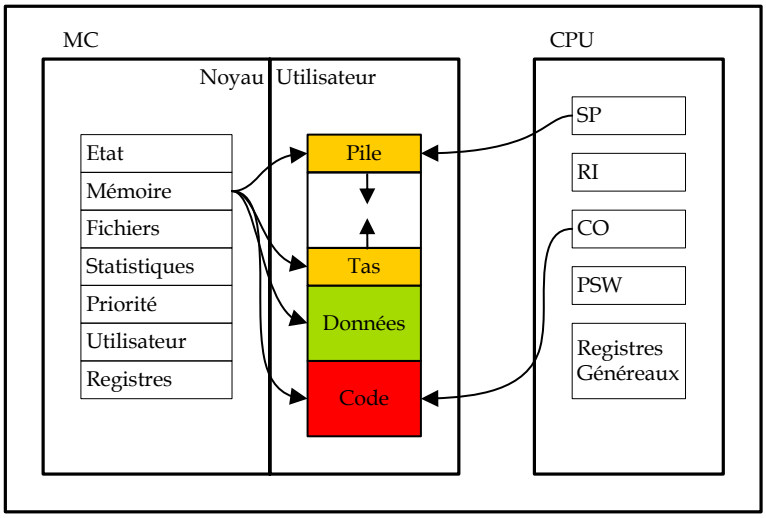
1. **Identité du processus** ; chaque processus possède deux noms pour son identification :
   - Un **nom externe** sous forme de chaîne de caractères fourni par l'usager (c'est le nom du fichier exécutable).
   - Un **nom interne** sous forme d'un entier fourni par le système. Toute référence au processus à l'intérieur du système se fait par le nom interne pour des raisons de facilité de manipulation.
2. **Etat du processus** ; l'état peut être nouveau, prêt, en exécution, en attente, arrêté, …etc.
3. **Contexte du processus** ; compteur ordinal, mot d'état, registres ;
4. **Informations sur le scheduling de l'UC ;** ces informations comprennent la priorité du processus, des pointeurs sur les files d'attente de scheduling, …etc.
5. **Informations sur la gestion mémoire** ; ces informations peuvent inclure les valeurs des registres base et limite, les tables de pages ou les tables de segments.
6. **Information sur l'état des E/S** ; l'information englobe la liste de périphériques d'E/S alloués à ce processus, une liste de fichiers ouverts, …etc.
7. **Informations de Comptabilisation ;** ces informations concernent l'utilisation des ressources par le processus pour facturation du travail effectué par la machine (chaque chose a un coût).



Figue 2.4 : Bloc de contrôle de processus (PCB)

Le système d'exploitation maintient dans une table appelée «**table des processus**» les informations sur tous les processus créés (une entrée par processus : Bloc de Contrôle de Processus PCB). Cette table permet au SE de localiser et gérer tous les processus.

Donc, un processus en cours d'exécution peut être schématisé comme suit (Figure 2.5) :



Figue 2.5 : Schéma général d'un processus en cours exécution

3.5 Etat d'un processus

Un processus prend un certain nombre d'états durant son exécution, déterminant sa situation dans le système vis-à-vis de ses ressources. Les trois principaux états d'un processus sont (Voir Figure 2.6) :

- **Prêt (Ready)** : le processus attend la libération du processeur pour s'exécuter.
- **Actif (Running)** : le processus est en exécution.
- **Bloqué (Waiting)** : le processus attend une ressource physique ou logique autre que le processeur pour s'exécuter (mémoire, fin d'E/S, …etc.).

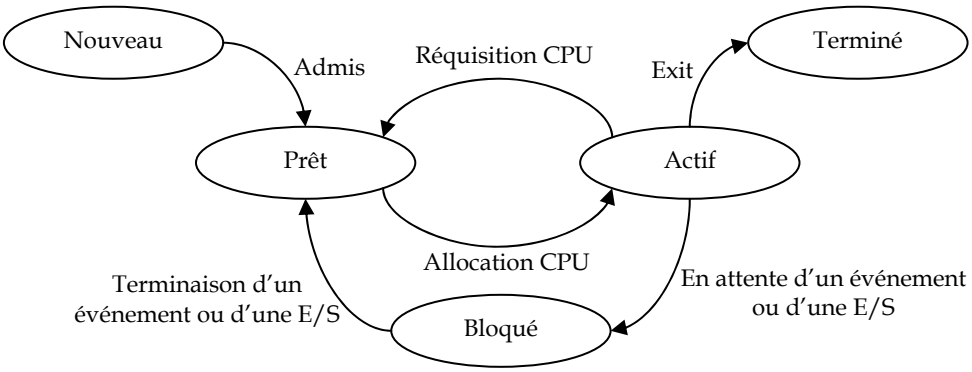


Figure 2.6 : Diagramme de transition des états d'un processus

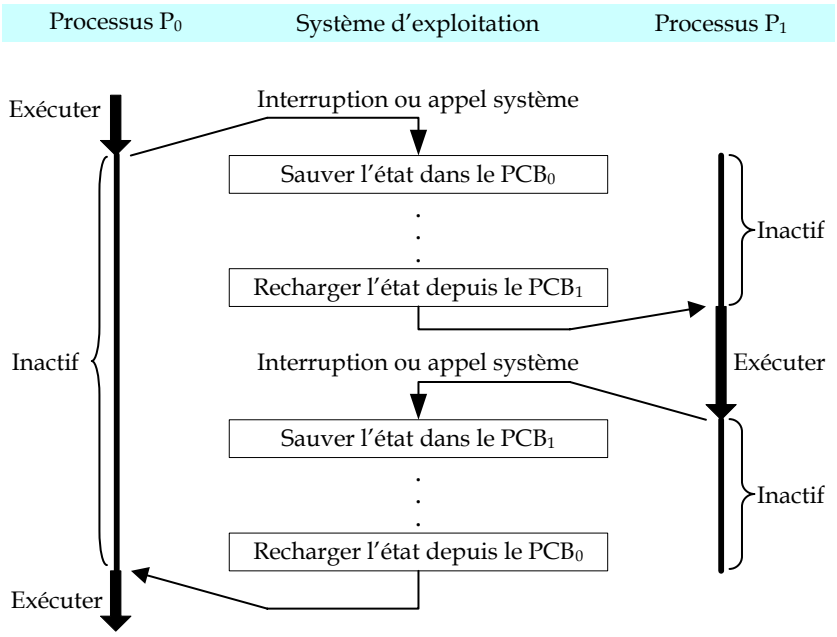
3.6 Multiprogrammation

Dans un système multiprogrammé, le processeur assure l'exécution de plusieurs processus en parallèle (pseudo-parallélisme).

Le passage dans l'exécution d'un processus à un autre nécessite une opération de sauvegarde du contexte du processus arrêté, et le chargement de celui du nouveau processus. Ceci s'appelle la **commutation du contexte** (**Context Switch**).

A. Mécanisme de commutation de contexte

La commutation de contexte consiste à changer les contenus des registres du processeur central par les informations de contexte du nouveau processus à exécuter.



La commutation du contexte se fait en deux phases (Voir Figure 2.8) :

- La **première phase** consiste à commuter le petit contexte (CO, PSW) par une instruction **indivisible**.
- La **deuxième phase** consiste quant à elle à commuter le grand contexte par celui du nouveau processus.

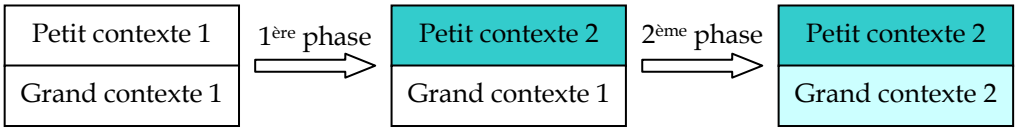


Figure 2.8 : Les phases d'une commutation de contexte

Remarque

La commutation du contexte est déclenchée suivant l'état d'un indicateur qui est consulté par le processeur à chaque point observable.

3.7 Processus sous UNIX

A. Identification d'un processus

Un processus est identifié de manière unique par un numéro (**pid: P**rocess **ID**entifier).

- La commande **ps** (voir **man ps**) donne la liste des processus en cours d'exécution avec leurs propriétés (identifiant du processus, identifiant du processus père, taille, priorité, propriétaire, état, etc.)
- La fonction **getpid()** indique le numéro du processus qui l'exécute

```
#include <sys/types.h>
#include <unistd.h>
```

```
pid_t getpid(void);
```

B. Création d'un processus

Un processus est créé par une instruction spéciale **fork**. Le processus créé (le **fils**) est un **clone** (**copie conforme**) du processus créateur (le **père**).

```
#include <sys/types.h>
#include <unistd.h>
pid_t fork(void);
```

Le père (**Parent**) et le fils (**Child**) ne se distinguent que par le résultat retourné par fork. Pour le père, cette fonction renvoie le **numéro du fils** (ou **-1** si création impossible) et pour le fils, elle renvoie **0**.

```
pid_t pid=fork();
switch(pid){
     case -1: /* Erreur de création */
              ...
     case 0: /* Programme du fils */
             ...
     default: /* Programme du père */
              ...
}
```

C. Hiérarchie des processus

Sous UNIX, les processus forment une hiérarchie (père-fils) (Figure 2.9).

La commande UNIX **ps -aeH** permet d'afficher la hiérarchie complète des processus, y compris le processus **init**.

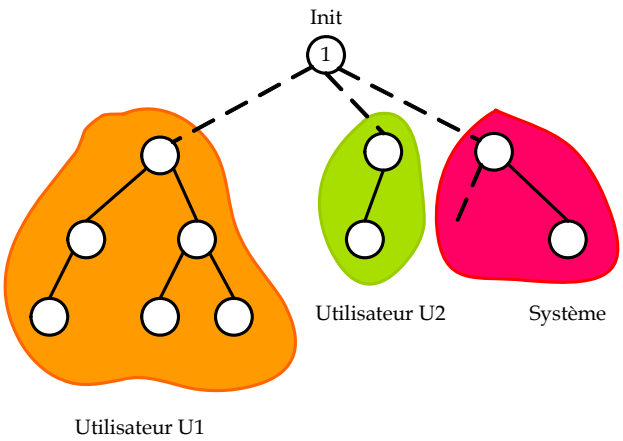


Figure 2.9 : Hierarchie des processus

D. Terminaison d'un processus

- Dans des conditions normales, un processus peut se terminer de deux façons:
  - Soit la fonction **main** du programme se termine,
  - Soit le programme appelle la fonction **exit**.

```
#include <stdlib.h>
void exit (int status);
```

- Comme il peut être explicitement éliminé par un autre processus, avec l'envoi d'un signal du type **kill**. Ceci peut se faire de deux façons :
  - Soit à partir d'un programme, en utilisant la fonction **kill()**.

```
#include <sys/types.h>
#include <signal.h>
int kill (pid_t pid, int sig);
```

kill() envoie le signal numéro **sig** à un processus identifié par son **pid**. En cas d'erreur elle retourne **-1**, et **0** autrement.

```
pid_t pid=fork();
switch(pid){
     case -1: /* Erreur de création */
              ...
     case 0: /* Programme du fils */
             ...
     default: /* Programme du père */
              ...
              /*Envoi d'un signal de terminaison au fils*/
              kill(pid, SIGTERM);
}
```

  - Soit à partir du shell, en invoquant la commande kill.

```
$ kill pid
```

La commande **kill** envoie par défaut un signal **SIGTERM**, ou de terminaison au processus d'identité **pid**.

E. Code de sortie d'un processus

Chaque processus a un code de sortie (**Exit Code**) : un nombre que le processus renvoie à son parent. Le code de sortie est l'argument passé à la fonction **exit** ou la valeur retournée depuis **main**.

Par convention, le code de sortie est utilisé pour indiquer si le programme s'est exécuté correctement :

- Un code de sortie à **zéro** indique une **exécution correcte**,
- Un code **différent de zéro** indique qu'une **erreur** est survenue.

```
pid_t pid=fork();
switch(pid){
     case -1: /* Erreur de création */
              ...
              exit(1);
     case 0: /* Programme du fils */
```

```
            ...
            exit(0);
      default: /* Programme du père */
             ...
}
```

F. Synchronisation père-fils

Lorsqu'un processus fils se termine, il devient un processus **zombie**. Un processus zombie ne peut plus s'exécuter, mais consomme encore des ressources (son entrée dans la table des processus n'est pas enlevée). Il restera dans cet état jusqu'à ce que son processus père ait récupéré son code de sortie. Les appels systèmes **wait** et **waitpid** permettent au processus père de récupérer ce code. A ce moment le processus termine et disparaît complètement du système.

– L'appel système **wait()**

```
#include <sys/types.h>
#include <sys/wait.h>
pid_t wait (int* status);
```

L'appel système wait suspend l'exécution du processus appelant jusqu'à ce qu'un de ses fils se termine. Si un fils est déjà terminé, **wait** renvoie le PID du fils immédiatement sans bloquer. Il retourne l'identifiant du processus fils et son état de terminaison dans **status** (si **status** est différent de **NULL**). Si par contre le processus appelant ne possède **aucun fils**, **wait** retourne **-1**.

```
pid_t pid=fork();
switch(pid){
      case -1: /* Erreur de création */
             ...
      case 0: /* Programme du fils */
             printf("processus fils %d\n", getpid());
             exit(10);
      default: /* Programme du père */
             printf("processus père %d\n", getpid()) ;
             pid_t id = wait (&status);
             printf("fin processus fils %d\n", id);
             exit(0);
}
```

– L'appel système **waitpid()**

```
#include <sys/types.h>
#include <sys/wait.h>
pid_t waitpid (pid_t pid , int* status , int options);
```

L'appel système **waitpid()** permet à un processus père d'attendre un fils particulier d'identité **pid**, de façon **bloquante** (**options=0**) ou **non bloquante** (**options=WNOHANG**).

Si l'appel réussit, il renvoie l'identifiant du processus fils et son état de terminaison dans **status** (si **status** n'est pas NULL). En cas d'erreur **-1** est renvoyé. Si l'option WNOHANG est utilisée et aucun fils n'a changé d'état, la valeur de retour est **0**.

```
pid_t id;
pid_t pid=fork();
switch(pid){
   case -1: /* Erreur de création */
              ...
   case 0: /* Programme du fils */
              ...;
              exit(10);
   default: /* Programme du père */
           ...
           While((id=waitpid(pid,&status,WNOHANG))==0)
             printf("processus fils non encore terminé\n");
           printf("fin processus fils %d\n", id) ;
            ...
}
```

L'appel **waitpid(-1, &status, 0)** est équivalent à l'appel **wait(&status)**

– **Code de sortie retourné** par wait() et waitpid()

Pour extraire le code de retour du processus fils de **status**, il faut d'abord tester que le processus c'est terminé normalement. Pour cela, on utilise la macro **WIFEXITED(status)**, qui renvoie **vrai** si le processus fils c'est terminé normalement. Ensuite pour obtenir son code de retour, on utilise la macro **WEXITSTATUS(status)**.

```
pid_t id;
pid_t pid=fork();
switch(pid){
 case -1: /* Erreur de création */
             ...
 case 0: /* Programme du fils */
             ...;
             exit(10);
 default: /* Programme du père */
     ...
     while((id=waitpid(pid,&status,WNOHANG))==0)
        printf("processus fils non encore terminé\n");
     if(WIFEXITED(status))
     printf("fils %d terminé par exit(%d)\n",id,WEXITSTATUS(status));
     ...
}
```

4 Les Systèmes d'Interruption

4.1 Problématique

Dans un ordinateur, ils coexistent deux types de programmes :

- Les **programmes usagers** qui font un calcul utile.
- Les **programmes du S.E.** qui font un travail de **superviseur** de tous les événements qui arrivent à la machine.

Ces deux types de programmes se partagent les ressources communes de la machine et plus particulièrement le processeur.

Lorsqu'un programme est en cours d'exécution, plusieurs événements peuvent arriver :

a. Les événements synchrones qui sont liés à l'exécution du programme en cours, comme :

1. Division par zéro.
2. Exécution d'une instruction inexistante ou interdite.
3. Tentative d'accès à une zone protégée.
4. Appel à une fonction du S.E.

b. Les événements asynchrones qui ne sont pas liés à l'exécution du programme en cours :

1. Fin d'opération d'E/S.
2. Signal d'horloge.

La supervision de ces deux types d'événements se fait par des contrôles continus sur l'arrivée de ceux-ci.

Question

Par quel mécanisme peut-on réduire le temps de supervision du S.E. ?

Solution

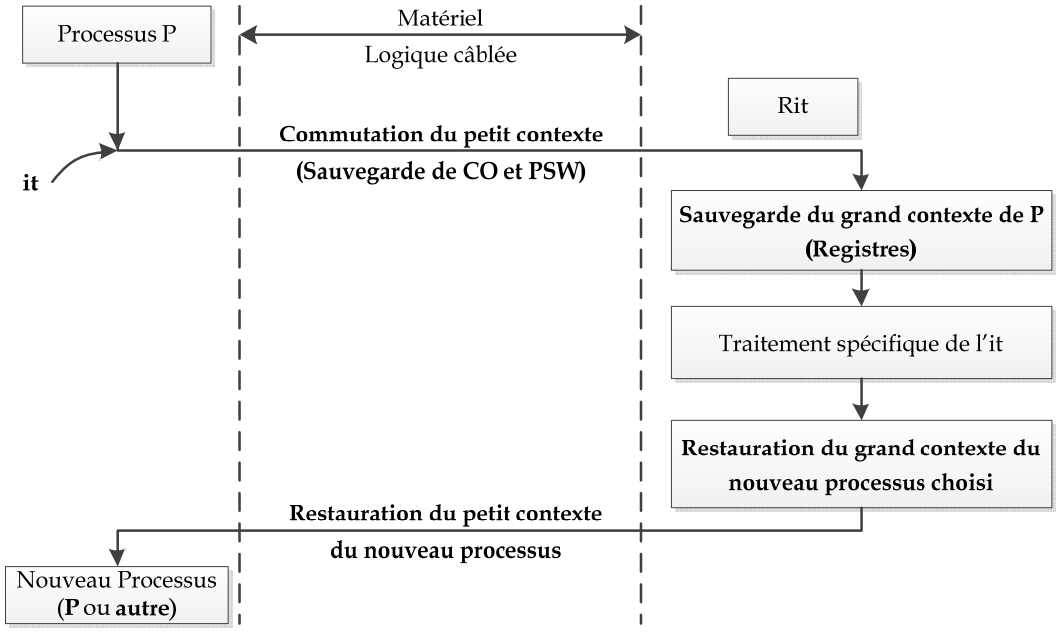
Au lieu que ça soit le processeur qui contrôle continuellement l'état d'une ressource, c'est plutôt à la ressource d'informer le processeur central sur son état au moment significatif. C'est le **principe des interruptions** de programmes.

4.2 Définition (Interruption)

Une **interruption** est une réponse à un événement qui interrompt l'exécution du programme en cours à un **point observable** (interruptible) du processeur central. Physiquement, l'interruption se traduit par un signal envoyé au processeur. Elle permet de forcer le processeur à **suspendre** l'exécution du programme en cours, et à déclencher l'exécution d'un programme prédéfini, spécifique à l'événement, appelé **routine d'interruption** (Rit).

4.3 Mécanismes de gestion des interruptions

A. Organigramme général



Remarque

Le programme repris après le traitement de l'interruption peut être le programme interrompu ou autre.

B. Conditions d'arrivée d'une interruption

Une interruption ne peut arriver au processeur que dans les conditions suivantes :

1. Le système d'interruption est **actif**.
2. L'UC est à un point observable (interruptible).
3. L'interruption est **armée**.
4. L'interruption est **démasquée**.
5. L'interruption est plus **prioritaire** que le programme en cours.

– **Système d'interruption actif**

Dans certains cas, le processeur a besoin d'interdire toute interruption possible. Pour cela, il dispose d'un **mécanisme d'activation/désactivation globale des interruptions**.

Dans ces conditions, aucune interruption ne peut interrompre l'UC, et toute interruption est retardée à la prochaine activation du système d'interruption.

– **L'interruption est armée**

Une interruption désarmée ne peut interrompre l'UC. Ceci se passe comme si la cause de l'interruption était supprimée. Toute demande d'interruption faite durant son désarmement est perdue.

On utilise ce procédé quand on désire qu'un élément ne doive plus interrompre.

– **L'interruption est démasquée**

Parfois, il est utile de protéger, contre certaines interruptions, l'exécution de certaines instructions (par exemple, les programmes d'interruption eux-mêmes). Une interruption masquée ne peut alors interrompre l'UC, mais toute demande d'interruption faite durant le masquage est retardée (mémorisée) pour être traitée à la levée du masquage.

Les informations concernant l'état masqué des interruptions figurent dans le mot d'état du processeur.

On utilise le procédé de masquage pour définir des règles de priorité entre différentes causes d'interruption. Ainsi, les interruptions de même niveau de priorité ou d'un niveau plus bas peuvent être masquées, alors qu'une interruption de priorité supérieure est en cours d'exécution.

Remarque

Le masquage porte sur un niveau ou une cause d'interruption, contrairement à l'activation qui porte sur l'ensemble du système d'interruption.

C. Types d'interruption

Les interruptions sont classées en deux grandes classes :

- Les interruptions **externes** ou **matérielles**.
- Les interruptions **internes** ou **logicielles**.

1. Interruptions externes

Ce sont les interruptions causées par des organes externes au processeur central, comme les horloges de temps, les périphériques d'E/S, …etc.

Ces interruptions **asynchrones** (c'est-à-dire, peuvent arriver à tout moment indépendamment de l'exécution du programme en cours) sont dues à :

- Périphérique prêt.
- Erreur durant l'E/S.
- Fin d'E/S.
- Ecoulement d'un délai de garde (horloge).
- Réinitialisation du système.
- …etc.

2. Interruptions internes

Ce sont des interruptions causées par l'exécution du programme. Ces interruptions sont synchrones et se divisent en deux sous-classes :

- Les **déroutements** (**trap** ou **exception**) qui sont dus à des erreurs lors de l'exécution d'un programme et en empêchent la poursuite de son exécution. Ces erreurs peuvent avoir diverses causes :
  - Tentative d'exécution d'une opération interdite ou invalide.
  - Violation d'accès à une zone mémoire protégée ou inexistante.
  - Division par zéro.
  - Débordement arithmétique.
  - …etc.

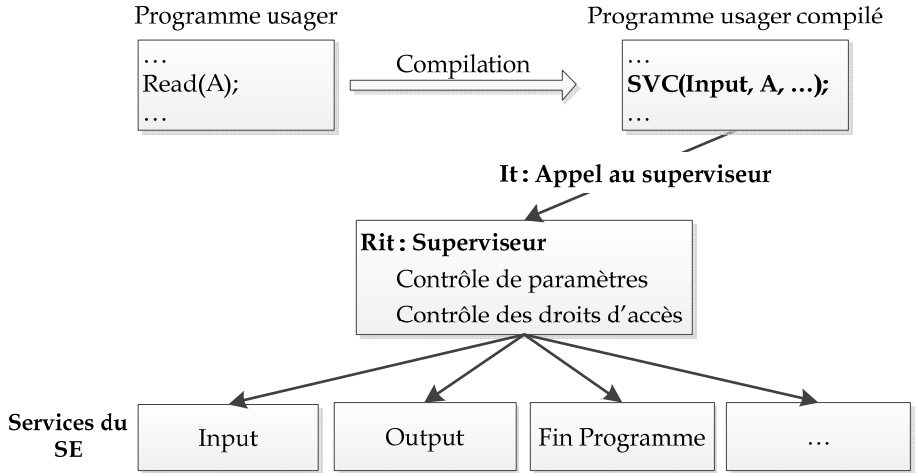
  Remarque

  Un déroutement ne peut être masqué ou retardé, mais il peut être supprimé (comme pour les déroutements liés aux opérations arithmétiques).

- Les **appels au superviseur** (**SuperVisor Call**, **SVC**) qui est une instruction permettant, à partir d'un programme utilisateur d'accéder à un service du S.E. (**Ex.** demande d'E/S, allocation dynamique de la mémoire, fin de programme, accès à un fichier, …etc.).

  Cette façon de procéder permet au système de :

  - Se protéger des usagers.
  - Vérifier les droits d'accès au service demandé.



L'appel au superviseur est en fait un appel de procédure système avec un passage de paramètres. Le service demandé par l'utilisateur sera choisi au moyen d'un paramètre supplémentaire désignant la cause de l'appel.

Toutefois, l'appel au superviseur d'un usager est traité comme interruption pour permettre une commutation du contexte usager par le contexte superviseur, car l'utilisation d'un service de superviseur nécessite un changement d'état (droits d'accès, mode d'exécution, priorité, …etc.).

Remarque

La distinction entre interruption, déroutement et appel au superviseur se base sur la fonction, mais le mécanisme est commun.

D. Requêtes simultanées d'interruption

Durant un cycle processeur, plusieurs demandes d'interruption peuvent arriver simultanément.

Le traitement des requêtes simultanées se fait suivant un certain ordre de priorité établi entre les niveaux d'interruption. La priorité peut être fixe ou modifiable.

E. Requêtes imbriquées

Pour des raisons de temps critiques, certaines demandes d'interruption doivent être prises en compte, même quand le processeur est en train de traiter une interruption, on parle alors d'interruptions imbriquées.

Du point de vue fonctionnement, l'interruption d'une interruption est traitée comme une interruption classique de programme. En réalité, le processeur ignore même qu'il s'agit d'interruptions imbriquées.

5 Les signaux sous UNIX

5.1 Définition

Un signal est une **interruption logicielle** asynchrone d'un processus. Le signal peut être envoyé par un **processus** ou par le **noyau**.

5.2 Identification des signaux

Les signaux sont identifiés par un **numéro entier** et un **nom symbolique** décrit dans **signal.h**. Il est important d'utiliser les noms symboliques des signaux, les valeurs entières associées étant dépendantes de l'implémentation.

La liste des signaux peut être obtenue à l'aide de la commande **kill –l**. Le tableau ci-après présente quelques principaux signaux :

Nom du signal	**Evénement associé**
SIGTERM	Terminaison d'un processus.
SIGINT	(interrupt) signal d'interruption émis à tous les processus associés à un terminal lorsque le caractère (**Ctrl – c**) est tapé.
SIGKILL	Terminaison d'un processus (non déroutable)
SIGQUIT	Signal d'interruption émis à tous les processus associés à un terminal lorsque le caractère (**Ctrl –**) est tapé.
SIGTSTP	Arrêt temporaire d'un processus (**Ctrl – z**).
SIGSTOP	Suspension du processus (non déroutable).
SIGCONT	Signal de continuation d'un processus stoppé
SIGCHLD	Terminaison d'un processus fils
SIGABRT	Terminaison anormale provoquée par l'exécution de la fonction **abort**.
SIGALRM	Expiration d'un timer (fonction **alarm**)
SIGUSR1	Signal utilisateur 1 (disponible pour les applications)
SIGUSR2	Signal utilisateur 2 (disponible pour les applications)
SIGSEGV	Violation des protections mémoire (**Segmentation Fault**)
SIGFPE	Erreur arithmétique (**Ex.** division par zéro). (**Floating-Point Arithmetic Error**)
SIGILL	Détection d'une instruction illégale. (**ILLegal**)
SIGTRAP	Emis après chaque instruction en cas d'exécution en mode trace, par un débogueur.
SIGPIPE	Ecriture dans un tube sans lecteur.

5.3 Origines d'un signal

Les signaux Unix ont des origines diverses, ils peuvent être :

- transmis par le **noyau** (division par zéro, overflow, instruction interdite, …etc.),
- envoyés depuis le **clavier** par l'utilisateur (touches **Ctrl – z** , **Ctrl – c**, …etc.),
- émis par la **commande kill** depuis le shell,

  Exemples

  ```
  $ kill –KILL 2400
  ```

  La commande ci-dessus envoie le signal SIGKILL au processus d'identité 2400.

  ```
  $ kill -9 2400
  ```

  La commande ci-dessus est identique à la commande précédente, à la différence que le signal est identifié par son numéro au lieu que ça soit par son nom symbolique.

- ou émis par la **primitive kill** dans un programme C/C++.

```
#include <sys/types.h>
#include <signal.h>
int kill (pid_t pid, int sig);
```

La primitive **kill** permet d'émettre le signal **sig** (désigné par son nom symbolique ou son numéro) à :

- processus d'identité **pid**, si **pid > 0,**
- tous les processus du même groupe que le processus appelant, si **pid = 0**,
- tous les processus du groupe dont le **gid** est la **valeur absolue de pid**, si **pid < −1,**

à condition que les processus émetteur et destinataire(s) soient du **même propriétaire**, ou que le **premier** soit le **super-utilisateur** (root).

Cette primitive renvoie **0** en cas de succès et **-1** sinon.

5.4 Réponse à un signal

Il existe trois manières de répondre à un signal :

- **Exécution de l'action par défaut** pour le signal. Cinq traitements par défaut sont possibles:
  - **exit** : provoque la terminaison du processus (**Ex.** SIGINT, SIGKILL, SIGALRM)
  - **core** : sauvegarde l'état de la mémoire et termine le processus (**Ex.** SIGFPE, SIGBUS, SIGSEGV)
  - **stop** : suspend l'exécution du processus (**Ex.** SIGSTOP)
  - **ignore** : le signal est ignoré (**Ex.** SIGCHLD)
  - **continue** : le processus suspendu reprend son exécution ou le signal est ignoré (**Ex.** SIGCONT)
- **Ignorance** du signal. On peut ignorer un certain nombre de signaux (sauf par exemple SIGKILL, SIGSTOP) ;
- **Interception** puis **invocation** d'une fonction en réaction à l'événement. Le signal peut être rattrapé par le processus destinataire, ce qui provoque un **déroutement** et le lancement d'une routine spécifique de traitement (**handler**). Après le traitement, le processus reprend où il a été interrompu.

  Un signal peut être dérouté soit à travers les appels systèmes **signal()** et **sigaction()** à partir d'un programme C/C++ ou en utilisant la commande **trap** à partir du shell.

  - **L'appel système signal()**

    ```
    #include <signal.h>
    void (* signal(int signum, void (* handler)(int))) (int);
    ```

    L'appel système **signal()** permet d'installer **handler** comme fonction de traitement lors de la réception du signal **signum**. Cette fonction ne pourra prendre qu'un argument de type entier : le **numéro du signal** qui l'aura appelée. La fonction renvoie **SIG_ERR** en cas d'échec.

    Exemple

La fonction de déroutement (handler) permet d'afficher le numéro et le nom symbolique du signal dérouté. S'il s'agit du signal SIGINT, on arrête le programme.

La fonction **strsignal** permet de renvoyer le nom symbolique du signal numéro **sig**.

```
#include <string.h>
char *strsignal (int sig)
```

```
#include <stdio.h>
#include <signal.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
//fonction de déroutement
void handler (int sig) {
   printf("Bien reçu %d %s\n", sig, strsignal(sig));
   if (sig == SIGINT) {
         printf ("Fin volontaire\n");
         exit (1);
   }
}
void main () {
   signal (SIGINT, handler); //Ctrl-c : signal 2
   signal (SIGQUIT, handler); //Ctrl-\ : signal 3
   signal (SIGTSTP, handler); //Ctrl-z : signal 20
   //SIGKILL est non déroutable
   if (signal (SIGKILL, handler) == SIG_ERR) perror("SIGKILL");

   for (;;);
}
```

Remarque

La fonction de traitement peut être remplacée par une des constantes suivantes :

- **SIG_IGN**, qui indique que le signal doit être ignoré.

```
/*Rendre Ctrl-C (SIGINT) inopérant*/
/*l'arrêt de ce programme doit se faire avec kill -9 pid*/
#include <signal.h>
void main () {
   signal (SIGINT, SIG_IGN);
   for (;;);
}
```

- **SIG_DFL**, qui indique de rétablir l'action par défaut pour le signal.

- **L'appel système sigaction()**

  La primitive sigaction() associe un signal à un contexte de déroutement, représenté par une structure **sigaction**.

```
struct sigaction{
   void (*sa_handler)(); /*SIG_DFL ou SIG_IGN ou ptr sur handler*/
   sigset_t sa_mask; /*signaux supplémentaires à bloquer*/
   int sa_flags; /*indicateurs optionnels*/
}
```

  Le champ **sa_handler** est le **seul obligatoire** ; c'est un pointeur sur la fonction qui servira de handler.

```
#include <signal.h>
int sigaction (int signum, const struct sigaction* act,
struct sigaction* oldact)
```

  Exemple

```
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <signal.h>
#include <stdlib.h>
void handler (int sig) {
   printf ("Bien reçu %d %s\n", sig, strsignal(sig));
   if (sig == SIGINT) {
         printf ("Fin volontaire\n");
         exit (1);
   }
}
void main () {
   struct sigaction act;
   act.sa_handler = handler;
   sigaction (SIGINT, &act, NULL); //Ctrl-c : signal 2
   sigaction (SIGQUIT, &act, NULL); //Ctrl-\ : signal 3
   sigaction (SIGTSTP, &act, NULL); //Ctrl-z : signal 20
   //SIGKILL est non déroutable
   if (sigaction(SIGKILL, &act, NULL) == -1) perror ("SIGKILL");

   for (;;);
}
```

- **La commande trap**

  La commande trap permet d'associer un traitement à un ou plusieurs signaux directement à partir du shell.

```
$ trap 'liste de commandes' sig1 sig2 ...
```

Exemple

La commande :

```
$ trap 'rm /tmp/* ; exit' 2 3
```

a pour effet d'exécuter la commande **rm /tmp/* ; exit** à la réception des signaux SIGINT ou SIGQUIT.

Pour désactiver un ou plusieurs signaux, il suffit de transmettre la chaîne vide comme argument de la commande trap.

Exemple

La commande :

```
$ trap '' 2 3 15
```

permet de masquer les signaux SIGINT, SIGQUIT et SIGTERM.

Pour rétablir l'action par défaut pour un ou plusieurs signaux, il suffit de transmettre les numéros de ces signaux comme seul argument de la commande trap.

Exemple

La commande :

```
$ trap 2 3 15
```

permet de rétablir les actions par défaut associée aux signaux SIGINT, SIGQUIT et SIGTERM.

BIBLIOGRAPHIE

- W. STALLINGS, "*Operating Systems: Internals and Design Principles*", 7th Edition, Prentice Hall, Pearson Education, 2011.
- N. SALMI, "*Principes des Systèmes d'Exploitation*", Pages Bleues, les Manuels de l'Etudiant, 2007.
- B. LAMIROY, L. NAJMAN, H. TALBOT, "*Systèmes d'exploitation*", Collection Synthex, Pearson Education, 2006.
- A. BELKHIR, "*Système d'Exploitation, Mécanismes de Base*", OPU, 2005.
- A. Silberschatz, P.B. Galvin, G. Gagne, "*Operating System Concepts*", 7th Edition, John Wiley & Sons Editions, 2005, 921 p.
- A. TANENBAUM, "*Systèmes d'Exploitation : Systèmes Centralisés – Systèmes Distribués*", 3ème édition, Editons DUNOD, Prentice Hall, 2001.
- A. Silberschatz, P. B. Galvin, "*Principes des Systèmes d'Exploitation*", traduit par M. Gatumel, 4ème édition, Editions Addison-Wesly France, SA, 1994.
- M. GRIFFITHS, M. VAYSSADE, "*Architecture des Systèmes d'Exploitation*", Edition Hermès, 1990.
- S. KRAKOWIAK, "*Principes des Systèmes d'Exploitation des Ordinateurs*", Editions DUNOD, 1987.
- A. TANENBAUM, "*Architecture de l'Ordinateur*", Editions Pearson Education, 2006.
- J. M. LERY, "*Linux*", Collection Synthex, Pearson Education, 2006.
- J. Delacroix, "*LINUX, Programmation Système et Réseau, Cours et Exercices Corrigés*", Editions DUNOD, 2003.
- M. J. BACH, "*Conception du système UNIX*", Editions Masson, 1989.