

Table des matières

1 Mémoire et multi-programmation	1
1.1 Motivation	1
1.2 Rappel : fonctionnement de la mémoire	2
2 Adresses logiques et physiques	3
2.1 Le chargement des processus en mémoire	3
2.2 Adresses logiques	3
2.3 Protection mémoire	4
2.4 Memory Management Unit	4
3 Gestion d'un espace mémoire linéaire	4
3.1 Exemple	5
3.2 Problème : la fragmentation	5
3.3 Solutions curatives	5
3.4 Solutions préventives	6
3.5 Buddy system (blocs compagnons)	6
3.6 Partitions de taille fixe	6
4 Va-et-vient sur disque	6
5 La mémoire segmentée	7
5.1 Segments	7
5.2 Espace d'adressage	7
5.3 La réalisation	8
5.4 Tables locale/globale des segments	8
5.5 Espace mémoire paginé	9
5.6 Un circuit MMU : le MC68851	10
6 Mémoire virtuelle paginée	11
6.1 Principe	11
6.2 MMU pour la mémoire virtuelle paginée	11
6.3 Les algorithmes de remplacement de page	12
6.4 Remplacement à tour de rôle	12
6.5 Algorithme LRU : least recently used	13
6.6 NRU, remplacement d'une page non récemment utilisée	13
6.7 Algorithme de la seconde chance	14
6.8 Algorithme du vieillissement	14
6.9 Réservation d'espace d'échange	14
6.10 Intérêt du swap ?	14
7 Mémoire virtuelle segmentée-paginée	15

Ce document est copiable et distribuable librement et gratuitement à la condition expresse que son contenu ne soit modifié en aucune façon, et en particulier que le nom de son auteur et de son institution d'origine continuent à y figurer.

1 Mémoire et multi-programmation

1.1 Motivation

Rappelons que, dès les débuts de l'informatique, il y avait une motivation d'ordre économique : tirer le meilleur profit d'un matériel qui, à l'époque, était extrêmement coûteux.



(début années 60 : le calculateur Burroughs B5000)

On s'est aperçu rapidement que le goulet d'étranglement (*bottleneck*) du système informatique (processeur, mémoire, périphériques)



une unité de traitement ...

n'était pas la partie la vitesse de calcul du processeur, mais la lenteur relative des périphérique : la partie la plus coûteuse (le processeur) passait son temps à attendre la fin des entrées-sorties.



des périphériques ...

D'où l'idée de partager le temps de calcul entre plusieurs programmes

ce qui permet de mieux rentabiliser les équipements (meilleurs taux d'occupation).

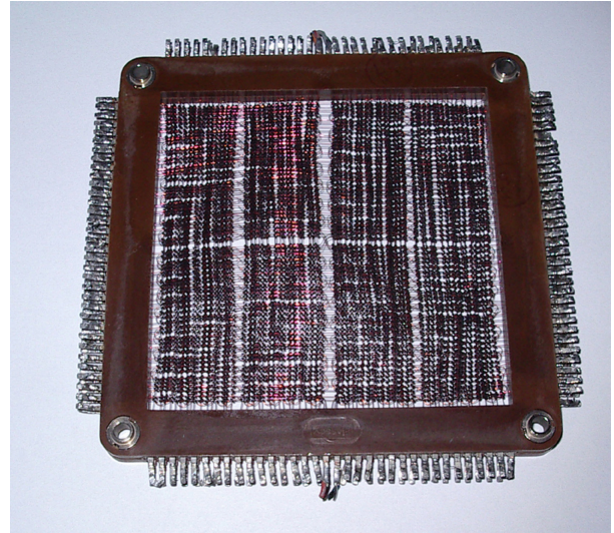
Dans ce chapitre nous allons voir les techniques qui ont été mises en place au cours du temps pour permettre la présence de plusieurs processus en mémoire.

L'aboutissement en est ce qu'on appelle la **mémoire virtuelle**, qui est de nos jours, en général, une combinaison de techniques de *segmentation*, de *pagination* et de va-et-vient sur disque. à la demande.

Repères historiques : le principe de la mémoire virtuelle a été exposé en 1962 dans un article de James Kilburn (Manchester) décrivant l'ordinateur Atlas. Dans les années 1970, cette technique était utilisée dans tous les ordinateurs¹.

1.2 Rappel : fonctionnement de la mémoire

Différentes technologies ont été utilisées pour réaliser les mémoires des ordinateurs : bascules bistables à base de tubes (triodes), mémoires à tores de ferrite, à transistors, circuits intégrés etc.



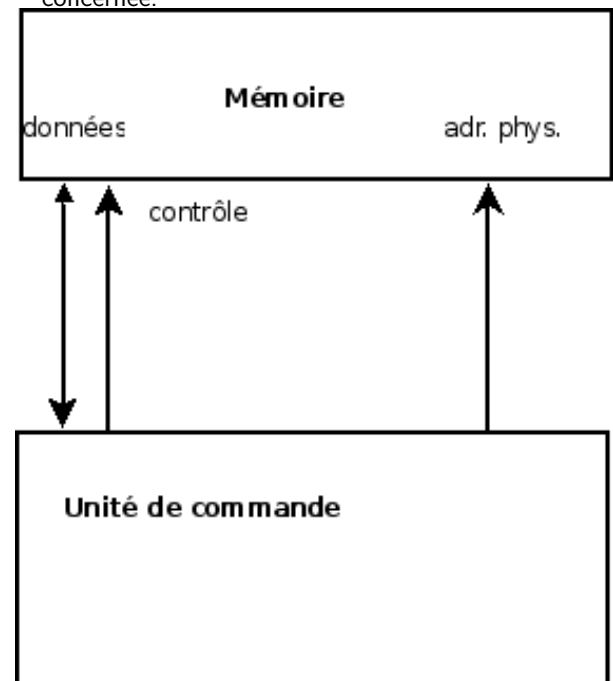
mémoire à tores de ferrite) ...

Indépendamment des technologies, la mémoire est un organe qui a pour fonction de stocker et restituer des "mots binaires" repérés par une adresse.

Les mots sont de taille fixe, par exemple l'ATLAS avait une mémoire de 16384 mots de 48 bits. Les micro-processeurs des années 75 étaient souvent des machines à octets (mot = 8 bits), de nos jours ce sont des mots de 32 ou 64 bits.

La mémoire communique avec le reste de l'ordinateur par 3 bus (groupes de fils)

- le **bus de contrôle** (il faudrait dire bus de commande), qui indique à la mémoire l'opération que l'on veut effectuer ;
- le **bus de données**, bidirectionnel, qui sert à émettre et recevoir les mots ;
- le **bus d'adresses**, qui indique à la mémoire l'adresse concernée.



La mémoire et ses trois bus

1. à l'exception de cas particuliers, comme les machines embarquées et certains supercalculateurs

Opérations :

- **lecture** : pour consulter le contenu de la mémoire à l'adresse A, le processeur place le nombre A sur le bus d'adresses, et envoie le signal de contrôle "lecture". Après un petit délai de réponse, le contenu du mot d'adresse A est présenté par la mémoire sur le bus de données.
- **écriture** : pour envoyer un mot M à l'adresse A, le processeur place A sur le bus d'adresses, M sur le bus de données et active l'ordre d'écriture.

2 Adresses logiques et physiques

2.1 Le chargement des processus en mémoire

Pour lancer un programme, un système d'exploitation multi-tâche doit

- réserver de la place en mémoire
- y placer une copie de l'exécutable,
- ajouter une entrée dans la table des processus, et la marquer comme prête.

Un même programme pourra donc être chargé à des endroits différents, selon les programmes qui ont déjà été chargés.

Un nouveau problème se pose : un programme est composé d'instructions élémentaires. Voici un exemple de programme écrit en *langage d'assemblage* pour un processeur imaginaire.² Exemple de programme :

```
load zero
store somme
load un
boucle:
store i
cmp n
bgt fin ; sauter à fin si >
add somme
store somme
load i
b boucle ; aller à boucle
fin:
halt
n word 42
i word 0
somme word 0
zero word 0
un word 1
```

Les instructions font référence à des adresses. En supposant que chaque instruction tienne sur un mot, et que ce programme soit chargé à l'adresse 100, l'instruction de saut "b boucle" fait référence à l'adresse 103.

Si le codage de "b boucle" contient explicitement la constante 103, ce programme ne fonctionnera pas correc-

tement si il est chargé à une autre adresse physique que 100.

Exercice 1. Faites tourner ce programme en fixant n à 4. Que fait-il, en général ?

Deux solutions ont été proposées pour ce problème

1. au moment du chargement d'un programme, modifier les mots qui contiennent des adresses pour tenir compte de début de la zone attribuée au processus.
2. différencier deux notions d'adresses :
 - l'*adresse logique* : le début de la boucle est le cinquième mot du programme (adresse logique 4, puisque la numérotation commence à 0)
 - l'*adresse physique* : ce mot se trouve dans la "case" 105 de mémoire.

La première technique est faisable sans modification du processeur, mais elle nécessite de garder une liste, à l'assemblage, des emplacements qui contiennent des adresses, pour que le chargeur puisse les modifier au chargement.

La seconde technique ne nécessite qu'une légère modification du processeur, que nous allons détailler ci-dessous.

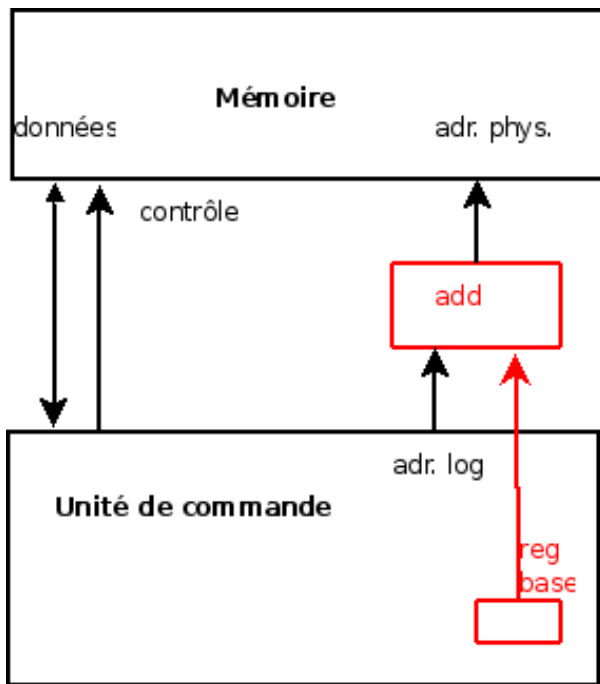
2.2 Adresses logiques

Avec les adresses logiques, tous les programmes sont compilés comme si ils devaient être chargés à partir de l'adresse 0 de la mémoire. Tout se passe comme si chaque programme utilisateur s'exécutait dans une mémoire qui lui appartient.

En réalité, les adresses logiques qu'il utilise sont traduites en adresses physiques par un circuit MMU (*memory management unit*) avant d'être transmises à la mémoire : l'adresse logique est ajoutée au contenu d'un **registre de base** contenant l'adresse de début de la zone mémoire allouée au processus.

Cette modification ne nécessite qu'un registre et un additonneur.

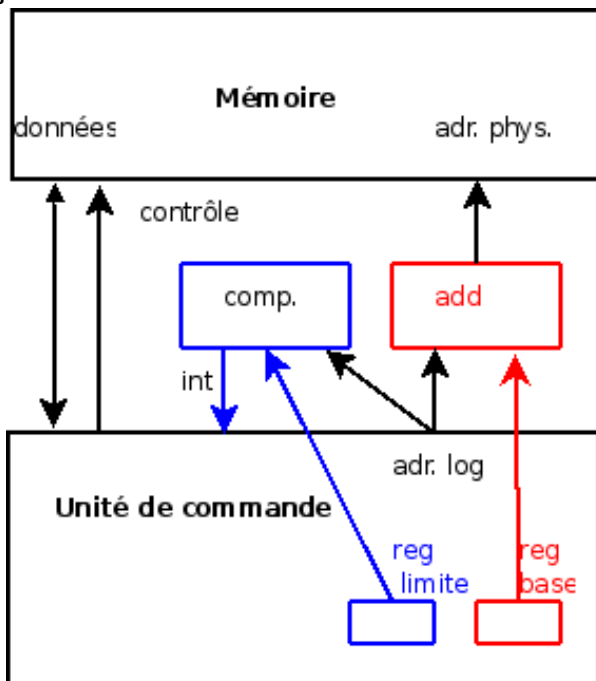
2. **Description sommaire** : processeur très simple à un accumulateur. Les instructions contiennent l'adresse de l'opérande : pour charger/additionner/etc. une constante (zero, un...) on utilise une variable contenant cette valeur. La comparaison *cmp* positionne des *indicateurs* (inférieur, supérieur, égal) qui sont utilisés par les instructions de branchement conditionnels (exemple : *bgt* = aller à une adresse si plus grand - *greater than*). L'instruction *b* est un branchement sans condition ; la directive *word* sert à réserver un mot, avec une valeur initiale.



avec registre de base

2.3 Protection mémoire

Quelques circuits supplémentaires fournissent une protection de la mémoire : un **comparateur**³ vérifie que l'adresse logique émise par le processeur est inférieure au contenu d'un **registre limite**.



avec registre limite

Ceci garantit que le programme utilisateur reste confiné dans son espace mémoire.

2.4 Memory Management Unit

À ce qui précède il convient d'ajouter qu'en mode privilégié le processeur a normalement accès à toute la mémoire, avec des instructions privilégiées qui lui permettent d'accéder explicitement à des données de l'espace utilisateur.

Par exemple, un appel système permet à un programme utilisateur de demander l'écriture d'une chaîne de caractères, en précisant dans un registre l'adresse de début du tableau de caractères. Cet appel système donne la main au système d'exploitation, qui doit interpréter le contenu de ce registre comme une adresse dans l'espace utilisateur, et non dans le sien.

On peut donc voir la MMU comme un circuit ayant

– **comme entrées :**

- une adresse logique AL
- le contenu du registre de base RB,
- le contenu du registre limite RL
- un bit EU précisant l'espace d'adressage utilisé (= 1 si utilisateur, ou instruction spéciale d'accès à l'espace utilisateur en mode privilégié)

– **comme sorties :**

- une adresse physique AP
- un signal INT d'interruption si une violation mémoire s'est produite

– **les équations logiques :**

$$AP = \text{si EU} \\ \text{alors } AL + RB \\ \text{sinon } AL \\ INT = EU \text{ et } (AL \geq RL)$$

3 Gestion d'un espace mémoire linéaire

Dans ce qui précède, chaque processus dispose d'un "espace d'adressage linéaire" (ou plat) : l'ensemble des adresses logiques est une séquence de nombres, sans trous ; et il lui correspond un "bloc" d'adresses contigües en mémoire physique.

Dans un contexte de multi-programmation, il va falloir gérer l'allocation et la libération de ces blocs en mémoire, au fur et à mesure que les programmes sont chargés et déchargés de la mémoire.

Pour simplifier l'explication, on se limite ici à un bloc par processus, mais sur de nombreuses machines, le processeur comporte plusieurs paires de registres base+limite, et les adresses logiques se réfèrent à l'un ou l'autre des "segments" : segment de code, segment de données, segment de

3. c'est un soustracteur où on ne regarde que le signe du résultat

4. Ceci permet à la fois d'étendre les capacités d'adressage en mode utilisateur (une adresse sur 16 bits donne théoriquement accès à 64K mots dans un espace : avec 4 segments c'est 256K), et aussi de partager des segments entre plusieurs processus. Par exemple, sur un système en temps partagé, on n'aura en mémoire qu'un seul exemplaire du segment de code pour l'éditeur de textes, utilisé par des dizaines de personnes simultanément.

pile, etc.⁴ La problématique sera la même : où charger les segments quand on en a besoin ?

3.1 Exemple

Supposons que nous disposions d'une mémoire centrale de 64K mots (confortable pour les années 60)

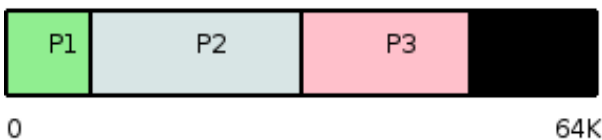
Espace mémoire



Espace mémoire de 64K mots

et que nous souhaitons y charger 3 programmes de tailles respectives 10 K, 30 K et 15K. Une idée assez naturelle est de réserver un espace mémoire consécutif pour chaque programme, et de placer les programmes les uns à la suite des autres.

Espace mémoire



Placement consécutif

Cette stratégie d'**allocation contigüe** paraît simple, mais elle pose un problème. A priori, on ne sait pas dans quel ordre les processus vont se terminer. Si c'est P1 qui se termine le premier, la mémoire libre sera de 19K, mais il sera impossible de placer un processus de 19K, puisque nous aurons deux blocs libres de 10K (anciennement occupé par P1) et 9K, qui ne sont pas consécutifs.

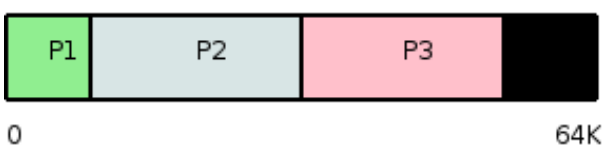
Il faudra donc

- prendre des mesures si il se produit (déplacer les processus ?)
- essayer d'éviter que ce problème ne se produise, du moins trop souvent,
- ou alors remettre en cause l'idée de l'allocation contigüe.

3.2 Problème : la fragmentation

Le scénario ci-dessous montre l'évolution de l'usage de la mémoire pendant qu'apparaissent et disparaissent des processus de tailles diverses :

Espace mémoire



(0) 3 processus sont présents, P2 se termine ...

Espace mémoire



(1) allocation de P4 ...

Espace mémoire



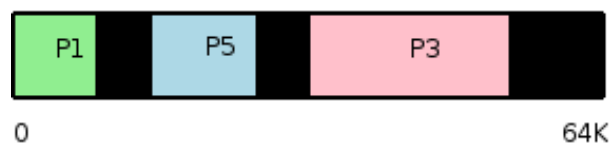
(2) allocation de P5 ...

Espace mémoire



(3) libération de P4 ...

Espace mémoire



(4) l'espace libre est fragmenté

L'allocation et la libération de blocs de tailles diverses provoque une **fragmentation** de l'espace mémoire disponible. Cette fragmentation peut rendre impossible le chargement en mémoire d'un processus alors que l'espace libre total est en théorie suffisant.

3.3 Solutions curatives

Quand cette situation se produit, on peut envisager de décaler les blocs alloués pour les ramener en début de mémoire, et ainsi regrouper toutes les zones libres en une seule. C'est possible si le processeur distingue adresses logiques et adresses physiques ; le code des programmes est alors "relogeable" (*relocatable*) : il suffit de le recopier ailleurs et de changer le contenu du registre de base.

L'inconvénient de cette opération de "ménage" est qu'elle oblige à interrompre les processus concernés pendant ce temps, provoquant des à-coups désagréables dans un contexte d'utilisation interactive.

Exercice 2. Supposons qu'un ordinateur de 2Mo effectue un compactage toutes les secondes. Si il faut $0.5\mu s$ pour copier un octet, et si la taille moyenne des zones libres est égale à 0.4 fois celle des zones allouées, quelle fraction du temps du processeur est consacrée au compactage ?

3.4 Solutions préventives

L'exemple ci-dessus illustre la stratégie d'allocation dite "first-fit" : les zones libres sont triées par ordre d'adresses, et on choisit la première zone qui soit assez grande. Une partie de cette zone, correspondant à la demande, est allouée, et le reste est replacé dans la liste des zones libres.

L'algorithme du *meilleur ajustement* (*best fit*) consiste à retenir la plus petite zone qui soit assez grande. Son intention est d'éviter de fractionner les grands blocs. Cependant les simulations montrent qu'il fait perdre davantage de place que le "best fit" : en effet il a tendance à créer de multiples petites zones libres, trop petites pour être utilisables.

Inversement, l'algorithme du *plus grand résidu* (*worst fit*) choisit systématiquement le plus grand bloc libre. En pratique, ça ne donne pas non plus de bons résultats.

Exercice 3. Allocation contigüe La mémoire d'un système contient des zones libres de 10K, 4K, 20K, 18K, 7K, 9K, 12 K et 15K mots (dans l'ordre des adresses).

- Quelles zones l'algorithme *first fit* choisit-il pour des demandes successives d'allocation de (a) 10K, (b) 12K, (c) 9K.
- Même question pour les deux autres algorithmes.

3.5 Buddy system (blocs compagnons)

Une autre approche : on évite de gérer des blocs de tailles trop différentes. Pour cela on arrondit les demandes d'allocation mémoire à la puissance de 2 supérieure (au dessus d'une valeur minimale raisonnable, par exemple 1K octet).

Pour chaque taille, on maintient une liste de blocs : L_{10} (blocs de $2^{10} = 1024$ octets), L_{11} (2048 octets), etc. qui commencent tous à une adresse qui est un multiple de leur taille. Par exemple les blocs de L_{11} peuvent commencer à l'adresse 0, 2K, 4K, 6K, etc.

Pour allouer un espace de 3000 octets, la demande est arrondie à la puissance de 2 supérieure, soit $2^{12} = 4096$.

On prend donc un bloc libre dans la liste L_{12} des blocs libres de 4096 octets (si il n'y en a pas, on prendra dans la liste du dessus L_{13} , etc.) commençant par exemple à l'adresse $12288 = 3 \times 2^{12}$.

L'excédent par rapport à la demande est de $4096 - 3000 = 1096$: on peut en retirer un bloc de 1024 octets qui est remis dans L_{10} . Le bloc réellement alloué est de $4096 - 1024 = 3072$ octets.

Pour restituer ce bloc de 3072 octets, il est fragmenté en un bloc de taille 2048 (2^{11}) commençant à l'adresse $12288 = 3 \times 2^{12} = 6 \times 2^{11}$ qui est remis dans L_{12} , et un bloc de 1024 2^{10} commençant en $12288 + 2048 = 3 \times 2^{12} + 2^{11} = 14 \times 2^{10}$ destiné à L_{10} .

Or ce dernier bloc est la moitié d'un bloc deux fois plus gros. Si l'autre moitié (son bloc compagnon) - qui commence en 15×2^{10} - est libre, on peut les fusionner en un bloc libre de 2^{11} qui ira dans L_{11} .

Lors de la restitution, le bloc de 640 est à nouveau fragmenté en B_1 (512) et B_2 (128). On consulte la liste L_7 pour voir si le *bloc compagnon* B'_2 de B_2 y figure pas (B_2 est la moitié d'un bloc de 256 octets, dont le compagnon est précisément l'autre moitié). Si il y est, on en profite pour fusionner les deux compagnons pour faire un bloc libre de 256, dont on cherche le compagnon dans L_8 , etc.

En pratique, ce système donne de bons résultats.

3.6 Partitions de taille fixe

Une autre approche est l'utilisation de partitions de taille fixe.

Au démarrage, l'administrateur fixe un partage de la mémoire en partitions. Dans une partition ne tournera qu'un programme qui lui sera affecté soit explicitement, soit automatiquement (la plus petite partition assez grande).

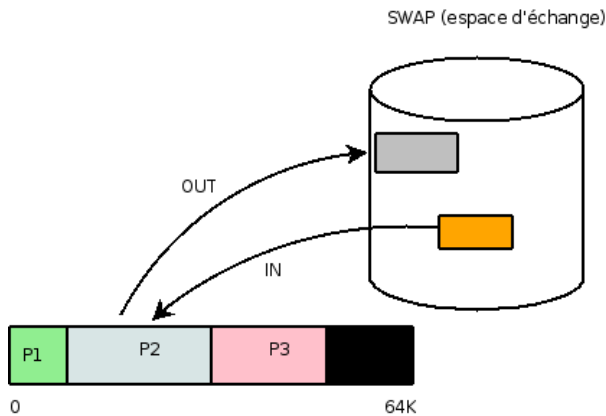
Le compactage est évité au prix d'une certaine perte de place.

Au début des années 80 le département de maths-info de Bordeaux 1 possédait un mini-ordinateur LSI 11-23 (Plessey), clone du PDP 11-23 de DEC, qui fonctionnait sous TSX-Plus. Avec ses 256 Ko de mémoire, il permettait à 5 ou 6 utilisateurs de travailler en temps partagé depuis des terminaux alphanumériques ou graphiques (Tektronix 4014 à écran phosphore, très utilisé par les maths-applis, ou 4027 en couleur) reliées par des lignes série. Au démarrage, l'administrateur pouvait fixer la taille de la partition mémoire allouée à chaque poste de travail.

4 Va-et-vient sur disque

Dans un contexte d'utilisation en temps partagé conversationnel, on s'aperçoit vite que l'utilisateur humain est de loin le périphérique le plus lent du système. Il lui arrive de lancer un programme (qui prend de la place en mémoire) et de partir prendre un café (ou partir en week-end) alors que le programme attend une réponse.

Dans ces conditions, on peut avoir l'idée de "mettre de côté" son programme en faisant une copie sur disque de l'espace mémoire qu'il utilise, espace qui sera bien bien plus utile si on le prête à des programmes qui tournent vraiment.



Echanges mémoire ↔ disque

Quand l'utilisateur reviendra et se décidera à appuyer sur une touche, le système ramènera le programme en mémoire, et poursuivra son exécution.

Dans la mesure où un accès disque ne prend que quelques centièmes de seconde, le va-et-vient (swapping) du programme entre la mémoire vive et le disque est imperceptible pour l'utilisateur interactif.

Économiquement, il faut aussi considérer le ratio des prix entre mémoire centrale et disque : pour fixer les idées, début avril 2012, 1 Go de mémoire vive coûte environ 20 euros, et un disque de 1 To environ 100 euros, soit un rapport de 200.⁵

Le *swapping* est donc une manière économique d'étendre la capacité mémoire d'une machine, pour y faire tourner davantage de programmes "simultanément".

5 La mémoire segmentée

Nous avons déjà vu l'idée de différencier adresses logiques et physiques dans le cas d'un adressage "plat" (linéaire) : à chaque processus correspond un "bloc" (ou segment) d'adresses contiguës de la mémoire physique qui sont vues, par chaque processus utilisateur comme un espace logique commençant à l'adresse 0.

L'astuce était d'employer un *registre de base* qui indique l'emplacement physique du premier mot de cette zone ; l'adresse physique d'un mot s'obtient en ajoutant l'adresse logique au contenu de ce registre. Par exemple, si le registre de base contient 1734, le mot d'adresse logique 55 est situé à l'emplacement $1734 + 55 = 1789$ de la mémoire physique.

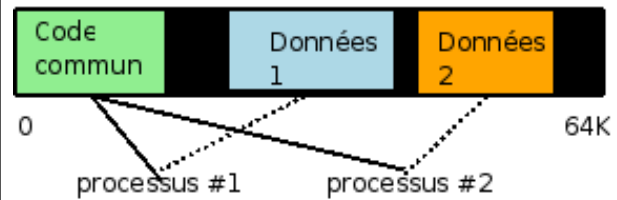
5.1 Segments

Le besoin est vite apparu de permettre au processeur d'accéder à plusieurs segments. Par exemple, dans un usage interactif, il se peut que plusieurs utilisateurs fassent tourner le même programme. Dans ce cas, il serait dommage de charger autant d'exemplaires du code exécutable que d'utilisateurs ; il est plus judicieux de considérer que l'espace mémoire d'un programme se compose de deux segments :

5. Ce rapport a évidemment beaucoup fluctué dans l'histoire de l'informatique, mais il est clair qu'il revient moins cher de "loger" les processus inactifs sur disque qu'en mémoire vive. Et le gain était d'autant plus clair à une époque où les sommes en jeu n'étaient pas des dizaines d'euros, mais des dizaines de milliers de dollars.

- le segment de code contenant les instructions (qui peut être partagé),
- et le segment de données où se trouvent les variables propres à chaque instance du programme.

Espace mémoire



Deux processus exécutent le même code

Plus généralement, les programmes présents en mémoire, même si ils sont différents, font souvent appel à des bibliothèques (*libraries*), par exemple les fonctions mathématiques. Chaque bibliothèque peut être chargée en mémoire comme un segment de code qui sera éventuellement partagé.

Ce besoin est apparu très rapidement : la première machine commerciale à utiliser la segmentation est le B5000 de Burroughs, sorti en 1961.

5.2 Espace d'adressage

On s'éloigne donc de l'adressage plat, où les adresses logiques d'un processus sont dans un intervalle $[0..n]$. Dans une mémoire segmentée, les adresses sont maintenant formées d'un couple (s,p) avec

- un numéro de segment s
- une position p dans le segment (on parle d'*offset*, ou de déplacement)

Le numéro de segment est toujours placé dans les bits de poids forts de l'adresse.

Exemple, le PDP 10 utilisait des adresses de 18 bits comportant

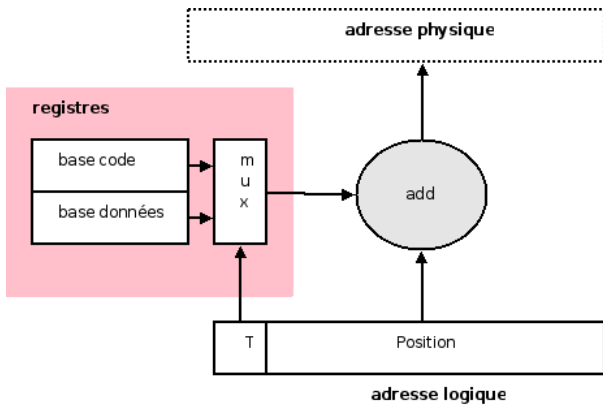
- un bit pour le numéro de segment
- 17 bits pour la position dans le segment

ce qui veut dire que l'espace mémoire logique se décomposait en 2 segments, et que le processeur comportait deux registres de base (et deux registres limite).

numéro de bit	17	16	15	...	1	0
	s	p	p	..	p	p

d'au plus $2^{17} = 128\text{K}$ mots chacun. Les adresses du "segment bas" commencent à 0 à 128K-1, celles du "segment haut" à partir de 128K. L'espace d'adressage n'est plus linéaire : si le processus a un segment bas de 4K et un segment haut de 8K, les adresses logiques valides sont dans deux plages séparées : de 0 à 4K-1 et de 128K à 136K-1.

Selon la valeur du bit 17, on sélectionne l'un ou l'autre des registres de base



un multiplexeur sélectionne le registre de base à utiliser

Exercice 4. Soit une machine dont les adresses, sur 24 bits, comportent 4 bits pour le numéro de segment.

1. combien y a-t-il de segments logiques ?
2. quelle est la taille maximum d'un segment ?
3. quelle est la taille de l'espace d'adressage logique ?
4. quelle est l'adresse logique correspondant à l'octet 2 du segment 5 ?
5. donnez le numéro de segment et l'offset de l'adresse logique 0x600042.

5.3 La réalisation

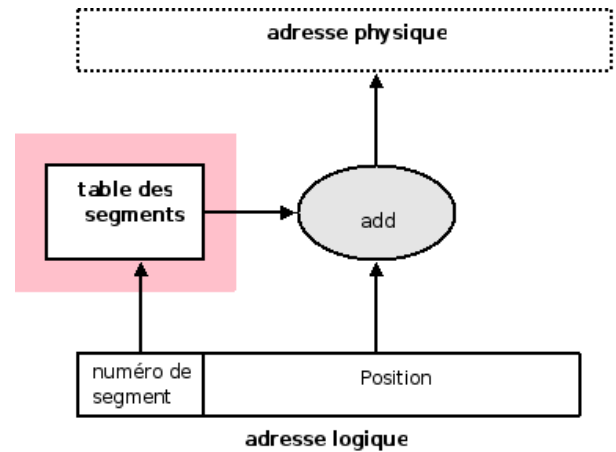
Prenons le cas d'une machine dont les adresses sur 20 bits, (notées AL[19:0]) comportent 2 bits pour le numéro de segment AL[19:18] et 18 bits AL[17:0] pour le déplacement.

Cette machine a donc une table de segments composée de 4 registres de base RB[i] et autant de registres limites RL[i].

L'adresse logique se calcule donc en additionnant

- le contenu du registre correspondant au numéro de segment
- le déplacement contenu en partie basse de l'adresse

$$AL = RB[AL[19:18]] + AL[17:0]$$



utilisation d'une table des segments

et une violation de protection mémoire est détectée si le déplacement atteint ou excède la limite du segment.

$$INT = \begin{cases} 1 & \text{si } AL[17:0] \geq RL[AL[19:18]] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La taille des registres limite est logiquement, sur cet exemple, de 18 bits, puisqu'ils servent à vérifier un déplacement qui est lui-même exprimé sur 18 bits. Par contre on se sait rien sur la taille des registres de base. En effet, si l'espace adressable par un processus est limitée à $2^{20} = 1M$ mots à travers 4 segments de 256K mots, la mémoire physique peut être plus grande pour accueillir plusieurs processus. Par exemple, on peut avoir des adresses physiques sur 24 bits, ce qui donne une capacité de 16M mots pour la mémoire physique.

Exercice 5. Le processeur 8086 utilisait 4 registres de base CS, SS, DS et ES^a, des déplacements sur 16 bits, et des adresses physiques sur 20 bits. Les segments commençaient à des adresses multiples de 16, les registres de base contenaient les 16 bits de poids fort qui étaient virtuellement complétées par 4 zéros binaires.

1. quelle est la capacité maximum de la mémoire physique ?
2. quelle est la taille de l'espace d'adressage d'un programme à un moment donné?^b
3. si CS contient 0x5432, quelle est l'adresse physique correspondant à l'adresse 0x0123 du segment de code ?

^a. segments de code, de pile, de données et supplémentaire
^b. les programmes pouvant modifier leurs registres de base, ils ont accès à tout

5.4 Tables locale/globale des segments

En réalité c'est un petit peu plus compliqué. Si un programme a été compilé pour utiliser 3 segments - par exemple 0 = le code, 1 = les données et 2 = la bibliothèque

mathématique -, la numérotation utilisée pour les segments est **locale** au processus : la bibliothèque mathématique peut être le segment 2 de ce processus, et le segment 4 d'un autre.

Par contre, les informations sur les segments (position en mémoire, taille, attributs de protection,...) sont **globales** à tout le système.

On utilise donc deux tables

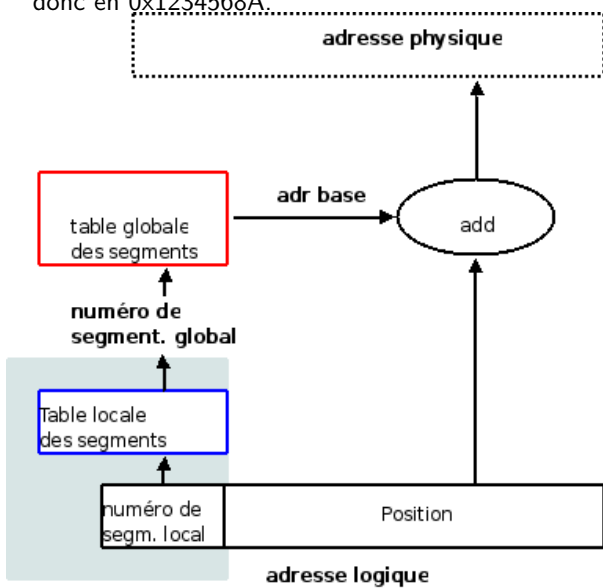
- la **table globale des segments** (TGS), qui garde trace de tous les segments chargés en mémoire
- une **table locale des segments** (TLS) pour le processus en cours, dans laquelle se fait la correspondance entre le numéro de segment utilisé dans les adresses logiques, et le numéro global de segment

La traduction d'une adresse logique (s,d) passe donc par

- la consultation de $TLS[s]$ pour trouver le numéro g de segment global correspondant à s. Par exemple on trouvera que le segment local 2 est le segment global numéro 17.

- la consultation de la $TGS[g]$ pour récupérer l'adresse de base et la taille du segment. Par exemple le segment global 17 commence en $0x12345678$.

- l'addition de l'adresse de base au déplacement pour obtenir l'adresse physique. L'adresse 12 du segment 2 est donc en $0x1234568A$.



Génération d'adresses, TLS + TGS

La table globale des segments contient des **descripteurs**, qui indiquent pour chaque segment

- la position du segment en mémoire
- sa longueur
- les droits d'accès (lecture, écriture, exécution)

En effet il est assez simple, au niveau du processeur d'émettre des signaux qui indiquent son état (recherche d'une instruction, exécution, ...) La MMU peut donc vérifier que le processeur n'essaie pas d'exécuter des instructions dans un segment qui est censé ne contenir que des données, ce qui correspond à une lecture en mémoire pendant la phase d'exécution sur un segment non-exécutable.

C'est très utile notamment pour lutter contre les attaques par "débordement de buffer". Dans une telle attaque, un utilisateur malveillant envoie des données d'une taille supérieure à celle de la variable tampon destinée à les recevoir⁶. En effet, cette variable tampon se trouve sur la pile d'exécution, où se trouve également l'adresse à laquelle la fonction devra retourner.

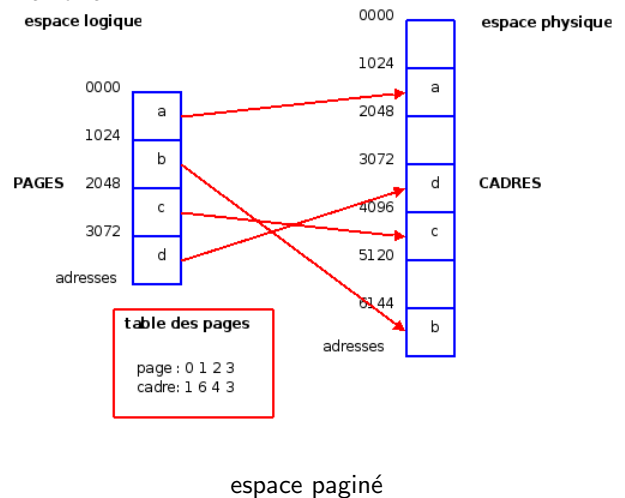
En choisissant soigneusement les données envoyées, le pirate s'arrange pour charger du code en mémoire, et remplacer l'adresse de retour de la fonction pour qu'elle désigne ce code. Quand la fonction fera son "return", c'est le "code malicieux" qui sera exécuté.

Voir article "dépassement de tampon" sur Wikipédia.

5.5 Espace mémoire paginé

Revenons au problème qui se posait pour la gestion de la mémoire, inhérent au fait de gérer des segments de tailles diverses, qui apparaissent et disparaissent au cours de l'évolution du système, en laissant des trous inexploitable.

Une solution a été trouvée, là encore très tôt dans l'histoire de l'informatique : considérer chaque segment non comme un espace linéaire, mais comme une suite de *pages*, qui ne sont pas forcément placées séquentiellement en mémoire.



espace paginé

À la différence des segments, les pages sont de même taille, qui est une puissance de 2 (valeurs courantes = 1, 2, 4, 16K), et elles sont alignées sur un multiple de la taille de page. En supposant des pages de 4K, la page 0 est en 0, la page 1 en 4K, la page 2 en 8K, etc.

Considérons par exemple une machine dont les adresses logiques sont sur 16 bits (espace d'adressage de 64 K mots), avec des pages de 4K mots. La position d'un mot dans une page sera donc un nombre compris entre 0 et 4K-1, qui sera exprimé sur 12 bits (puisque $2^{12} = 4K$).

Une adresse logique se composera donc

- de $16 - 12 = 4$ bits pour le numéro de page, qui sera compris entre 0 et $15 = 2^4 - 1$;
- de 12 bits pour le déplacement dans la page.

6. Il y a là une faute du programmeur qui n'a pas contrôlé la taille des données reçues avant de les placer dans le tampon

Bits d'une adresse

Numéro de page	Position dans la page
----------------	-----------------------

format d'adresse logique

On a vu que la mémoire physique peut être de taille différente, par exemple 256K mots, et comporte donc $\frac{256K}{4K} = 64$ cadres de page⁷

Exercice 6.

- quelle est la taille d'une adresse physique ?
- combien de bits dans un numéro de cadre de page ?

La **table des pages** indique où se trouvent les cadres de page en mémoire

page	0	1	2	3	4	5	6	7
cadre	6	7	23	1	42	17	18	62

Quand un processus s'exécute, sa table des pages est chargée dans les registres de page de la MMU, qui effectue la traduction.

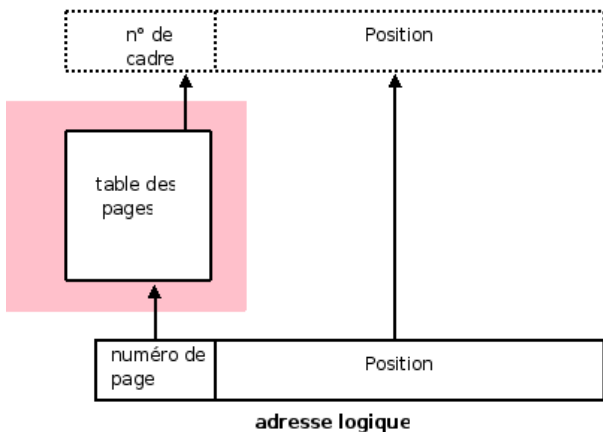
L'adresse physique est formée en concaténant

- le contenu du registre correspondant au numéro de page (en poids forts de l'adresse logique)
- la position dans la page (bits de poids faibles de l'adresse logique)

$$AP[17:12] = RP[AP[15:12]]$$

$$AP[11: 0] = AL[11:0]$$

adresse physique



génération d'adresse

Exercice 7. Déterminer les adresses physiques correspondant aux adresses logiques 0x00F0, 0x32AB, 0x1030.

5.6 Un circuit MMU : le MC68851

Le MC68851, un des premiers circuits MMU pour microprocesseurs, était destiné à compléter le microprocesseur 68020 qui équipait notamment les MacIntosh II et LC, les Amiga 1200 et la console CD32, les stations graphiques IRIS et Sun-3.

Vous pouvez trouver sa "datasheet" sur internet : <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/4166/MOTOROLA/MC68851.html>

Voici quelques-unes de ses fonctionnalités

- Full 32-bit logical to physical address
- Wide selection of page size from 256 Bytes to 32 KBytes
- fully associative, 64-entry, on chip address translation cache
- automatic update of the on-chip translation cache from external translation tables
- multiple tasks supported simultaneously

que nous allons examiner, et qui permettront de mieux comprendre comment fonctionne un vrai circuit MMU.

Adresses logiques et physiques sur 32 bits : la MMU s'intercale entre le processeur et la mémoire. Les bus d'adresses peuvent en principe être de taille différentes, ici ce sont les mêmes. A quoi cela sert-il ?

- il faut d'abord penser qu'en 1984 (année de sortie du 68020), les machines auxquelles ce processeur était destiné disposaient au mieux de quelques méga-octets de mémoire.
- cependant, rien n'empêche un programmeur d'utiliser la plage d'adresses logiques à sa guise. Sur un système paginé on peut simuler la segmentation en utilisant par exemple les 8 bits de poids forts comme numéros de segments. Cela n'impliquera pas que le segment 0xFF commence physiquement à l'adresse 0xFF000000, ni que la machine dispose de 4 G (2^{32}) octets de mémoire réelle.
- une des rôles de la MMU est donc de "mapper" les adresses logiques utilisées (espace logique qui comporte beaucoup de trous) sur la plage d'adresses physiques qui est bien plus petite.

Taille de pages de 256 à 32 K octets : selon le type d'utilisation on pourra avoir intérêt à avoir des petites pages ou des grandes pages, et le circuit était configurable pour correspondre aux besoins.

- pendant l'allocation mémoire, la taille demandée est arrondi au multiple suivant de la taille des pages. Par exemple, pour 20K octets on utilisera 80 pages de 256 octets, ou 1 page de 32K. Dans ce dernier cas, on gaspille 12 Ko.

7. on parle de pages pour l'espace logique, et de cadres de pages pour l'espace physique

En moyenne, le gaspillage est d'une demi-page.

Exercice 8. Un des arguments contre la pagination (opposée à la mémoire partitionnée) était que ça faisait perdre une place non négligeable en mémoire. C'est à relativiser selon la taille de la mémoire, des programmes, etc. Comparez les pourcentages de perte dans ces situations :

- une machine des années 60, avec 64Ko de mémoire (pages de 4Ko) qui fait tourner des programmes de quelques kilo-octets
- un PC actuel (pages de 4K à 2M) utilisé comme serveur
- un PC domestique

et tirez une conclusion, dans chaque contexte d'utilisation.

Support simultané de tâches multiples : lors d'un changement de contexte, le processeur indique à la MMU un numéro de tâche sur 3 bits. Les adresses logiques qui suivront seront alors interprétées par rapport à l'espace logique de cette tâche.

Table associative à 64 entrées pour la génération d'adresses, mise à jour automatiquement depuis des tables en mémoire :

- la MMU ne contient pas toute la table des pages, mais seulement 64 éléments qui contiennent chacun un numéro de page logique (combiné au numéro de tâche) et le numéro de la page physique. Le reste de la table réside dans la mémoire physique.
- lorsque le système d'exploitation effectue un changement de tâche, il indique à la MMU l'adresse de la "racine" de la table des pages de la tâche. La MMU garde une racine pour chaque tâche.
- lors d'une traduction d'adresse, le numéro de page logique (combiné avec le numéro de tâche) est comparé aux 64 numéros de pages logiques présents dans le "cache" de la MMU.⁸

Si le numéro de page logique est absent du cache, la MMU va chercher le numéro de page dans la table en mémoire, pour remplacer le contenu du registre utilisé le moins récemment.

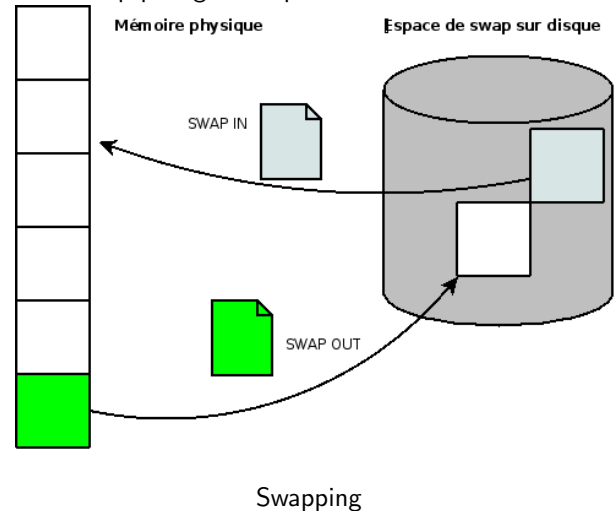
6 Mémoire virtuelle paginée

6.1 Principe

La pagination permet d'apporter une grosse amélioration de la technique de va-et-vient sur disque exposée plus haut. En effet, pour relancer un programme qui a été "swappé" sur le disque, il suffit de recharger depuis le disque la page qu'il

était en train d'exécuter, et non l'intégralité de son espace mémoire.

L'espace d'échange sur disque, qui est lui-même structuré en "pages" de même taille. L'ensemble, mémoire vive + espace d'échange, constitue une mémoire virtuelle qui peut être beaucoup plus grande que la seule mémoire vive.



On constate par ailleurs que, pendant l'exécution d'un programme, celui-ci ne fait référence qu'à quelques pages à la fois. Il est assez probable qu'après avoir exécuté l'instruction N, il passe à l'instruction N+1, où à une autre instruction proche : en pratique la plupart des boucles et de sauts ne vont pas très loin, le plus souvent la destination est dans la même page.

Automatiquement, les pages qui ont été transférées sur disque y restent tant qu'on n'en a pas besoin, et libèrent autant de place pour les pages les plus "actives" des processus, on fera donc une économie de place, qui permettra d'avoir davantage de processus "présents" (processus prêts, avec leur page active déjà présente en mémoire vive). D'où de meilleures performances qui si on chargeait en totalité l'espace mémoire d'un processus.

6.2 MMU pour la mémoire virtuelle paginée

Une page peut être présente en mémoire ou non, et si elle ne l'est pas, elle peut être sur le disque. La table des pages indique donc le numéro de cadre de page, et le numéro de bloc dans l'espace disque réservé au swap.

La table des pages pour la mémoire paginée comporte donc ces informations

page logique	0	1	2
cadre (physique)	17	-	3
sur disque	42	13	44	...

La MMU contiendra, comme précédemment, une table de registres pour la correspondance entre numéro de page et numéro de cadre, et des indicateurs de présence pour les pages. Une interruption de "défaut de page"⁹ sera émise si un accès est tenté à une page absente.

Exemple :

8. C'est une comparaison **simultanée** grâce à 64 circuits comparateurs qui travaillent en parallèle, un par registre. C'est ce qu'on appelle une mémoire associative

9. qui signifie que la page fait défaut (elle manque), et non pas qu'elle est défectueuse

```

DEFAULT_DE_PAGE = non PRESENT[ AP[15:12]
]
AP[17:12] = RP[ AP[15:12] ]
AP[11: 0] = AL[11:0]

```

L'interruption provoquera l'intervention du système d'exploitation qui

1. consultera la table des pages pour trouver l'emplacement, sur disque, de la page manquante
2. trouvera un cadre de page libre en mémoire.
3. procédera au chargement de la page en mémoire
4. mettra à jour la table des pages
5. relancera le processus interrompu

Pour trouver un cadre de page, il faudra souvent (dès que la mémoire réelle sera pleine) faire de la place en transférant sur disque une page présente. La manoeuvre de remplacement comportera donc deux accès disque, l'un pour sauver sur disque la page qui est en mémoire, l'autre pour lire sur disque la page à ramener en mémoire.

Deux accès disques représentent dans le meilleur des cas quelques centièmes de seconde, ce qui est très long à l'échelle de l'ordinateur. On cherchera donc à minimiser le nombre de défauts de page.

6.3 Les algorithmes de remplacement de page

Dans le cadre de ce mécanisme très général il reste à définir la méthode pour choisir (second point) le cadre de page dans lequel la page manquante va être amenée en mémoire. C'est l'objet des **algorithmes de remplacement de page**.

En réalité ce sont plus des heuristiques que des algorithmes : un bon algorithme devrait trouver une solution optimale, or c'est impossible dans l'absolu : à un moment donné on décide de remplacer telle page plutôt qu'une autre, c'est seulement dans le futur, selon la suite des événements, que cette décision apparaîtra judicieuse ou non.

Or le futur est, en grande partie, imprévisible. On utilisera donc des **heuristiques**, méthodes dont l'objectif est d'obtenir des résultats acceptables dans la plupart des cas.

6.4 Remplacement à tour de rôle

Le premier algorithme, appelé aussi FIFO (first-in first out, premier entré premier sorti) consiste à utiliser à tour de rôle chacun des cadres de pages. C'est une méthode simpliste, qui ne donne pas de bons résultats (nous verrons pourquoi), que nous exposons surtout pour introduire quelques idées.

L'exécution d'un programme provoque de nombreux accès successifs à la mémoire. Ces adresses correspondent à des pages, dont nous retiendrons les numéros, qui constituent la *séquence de références de pages*. Par exemple un processus fera accès aux pages 22,33,22,17,44,18,22,12,33,22,...

10. ce qui est très éloigné des ordres de grandeurs réels : un mini-ordinateur typique des années 80, avec quelques mega-octets de mémoire, a des centaines ou des milliers de cadres de page.

11. probablement en essayant de démontrer que c'était vrai

Pour simplifier l'explication, prenons un mémoire physique de 4 cadres de pages seulement.¹⁰

Un tableau nous servira à montrer quelle page occupe quel cadre, au fur et à mesure du déroulement de la séquence d'accès :

Après quelques étapes, le tableau est ainsi rempli

temps page	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
cadre 1	22	22	22	22	22	18	18			
cadre 2	-	33	33	33	33	33	22			
cadre 3	-	-	-	17	17	17	17			
cadre 4	-	-	-	-	44	44	44			

- au début tous les cadres de pages sont vides
- aux temps 1,2,4 et 5 les cadres de pages sont chargés successivement avec les pages demandés (les défauts de page sont encadrés).
- remarquez qu'au temps 3 la page demandée est déjà présente, il n'y a donc pas d'accès au disque.
- à t=6 tous les cadres de pages sont occupés. L'algorithme choisit de charger la page manquante dans le cadre 1.
- même problème ensuite : on passe au cadre 2

Exercice 9.

- Complétez le tableau.
- Combien de défauts de page ?

Exercice 10. On appelle **oracle** un algorithme (hypothétique) qui serait capable de prendre les meilleures décisions en tenant compte de l'avenir. Que ferait un oracle dans ce cas ?

Anomalie de Belady . Il est raisonnable de penser que plus on dispose de mémoire, moins on aura de défauts de page.

Dans les années 60 on pensait que c'était une règle générale, mais en 1969 Laszlo Belady a trouvé un contre-exemple¹¹ :

Exercice 11. Soit la séquence de références 1 2 3 4 1 2 5 1 2 3 4 5

- calculez le nombre de défauts de page obtenus avec l'algorithme FIFO pour 3 cadres de pages
- même question pour 4 cadres de pages

C'est un exemple de "scénario pathologique" qui montre qu'une affirmation généralement acceptée ("il vaut mieux être riche et en bonne santé que pauvre et malade") n'est pas vraie dans *tous* les cas. Cependant l'existence de contre-exemples n'empêche pas l'affirmation d'être vraie presque tout le temps.

Note. On a longtemps estimé que les séquences pathologiques produisaient au maximum deux fois plus de défauts de page. Deux chercheurs ont montré en 2010 (<http://arxiv.org/abs/1003.1336>) que le ratio des nombres de défauts de page n'est pas borné.

6.5 Algorithme LRU : least recently used

L'algorithme FIFO ci dessus ne donne pas de bons résultats en pratique, parce qu'il ne tient pas compte d'une propriété importante du comportement des programmes, la **localité**.

Principe de localité : pendant le déroulement d'un vrai programme, il est très probable qu'après avoir exécuté une instruction, la suivante soit très proche, presque certainement dans la même page. Et qu'après avoir accédé à un élément de tableau, on passe au suivant.

Cette propriété de localité fait que si un programme a besoin d'accéder à une page, c'est très probablement une des pages qu'il a utilisées il y a peu de temps.

On met à profit ce principe, en conservant les pages qui ont été utilisées le plus récemment. L'algorithme qui en découle consiste donc à choisir le cadre qui contient **la page accédée le moins récemment**, d'où son nom (LRU = least recently used).

Le tableau ci-dessous montre le déroulement de l'algorithme LRU.

temps page	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
cadre 1	22	33	22	17	44	18	22	12	33	22
cadre 2	-	22	22	22	22	22	22	18	18	
cadre 3	-	-	-	17	17	17	17	17		
cadre 4	-	-	-	-	44	44	44			

- Les caractères gras marquent les accès.
- à t=6, on choisit le cadre 2 pour lequel le dernier accès a eu lieu à t=2, contre 3,4 et 5 pour les autres.

Exercice 12.

- Complétez le tableau.
- Combien y a t'il de défauts de page ?

Réalisation matérielle Pour pouvoir appliquer cet algorithme il faut ajouter un peu de matériel dans la MMU : pour chaque page un *estampille*, registre qui contiendra la date de dernier accès (*horodatage*). Cette estampille sera mise à jour à chaque accès en y copiant la valeur d'un compteur qui s'incrémente sous le contrôle d'une horloge.

Le système d'exploitation interrogera la MMU pour relever les compteurs quand un défaut de page se produira.

Exercice 13. En théorie ce compteur, mis à zero au démarrage, devrait être incrémenté à chaque instruction. De quelle taille devrait-il être pour une machine qui exécute 1 million d'instructions par seconde, et qui fonctionne sans arrêt pendant une année ?

En pratique, les transistors coûtent cher sur une MMU, et on se contentera d'une précision moindre, en ne stockant que les bits de poids fort du compteur. Nous verrons plus loin l'algorithme NRU (not recently used), ou on se contente d'un bit pour différencier les pages récemment accédées de celles qui ne le sont pas.

Scénarios pathologiques : en général les algorithmes basés sur la localité marchent bien en pratique, parce que c'est un comportement qu'on observe sur les vrais programmes. Cependant il est tout à fait possible de construire des contre-exemples.

Exercice 14. Soit l'affirmation "le LRU fait moins de défauts de page que que FIFO". Considérons un système avec 3 cadres de pages. La séquence de références de pages commence par 11, 22, 33. Si on la prolonge par 11 et 44, l'algorithme FIFO placera la page 44 dans le cadre 1, et LRU dans le cadre 2.

- A partir de là, les situations ayant divergé, continuez la séquence avec des numéros bien choisis pour que la stratégie LRU conduise à plus de défauts de page que FIFO.
- Votre conclusion ?

Attention : l'existence de contre-exemples ne prouve pas que LRU n'est pas meilleur que FIFO, seulement qu'il y a des cas pathologiques où ça se passe moins bien que ce qu'on pensait. Or ces cas, précisément, sont construits en ignorant le principe de localité, et en raisonnant sur un nombre totalement irréaliste de cadres de pages¹² On est donc loin de la "réalité statistique".

6.6 NRU, remplacement d'une page non récemment utilisée

Deux bits sont associés à chaque page : R indique si la page a été *référéncée* (en lecture ou en écriture), M qu'elle a été modifiée. Ces deux bits sont positionnés à chaque référence mémoire.

Périodiquement, le système remet les bits R des pages à 0. Si le bit R d'une page est à 1, on peut donc en conclure que la page a été référencée récemment.

On obtient donc 4 catégories de pages :

1. pages non référencées, non modifiées (R=0, M=0),
2. pages non référencées, modifiées (R=0, M=1),
3. pages référencées, non modifiées (R=1, M=0),
4. pages référencées et modifiées (R=1, M=1).

12. Un petit programme pour PC occupe quelques mégas octets, soit des milliers de pages. La probabilité d'apparition d'un scénario pathologique est assez faible.

L'algorithme NRU (*not recently used*) choisit au hasard une des pages de la première catégorie non vide.

En pratique cet algorithme est facile à implémenter, relativement efficace, et ses performances sont généralement suffisantes.

6.7 Algorithme de la seconde chance

Variante de l'algorithme FIFO, en utilisant le bit R. Lors d'un défaut de page, l'algorithme teste le bit R de la page la plus ancienne. Si il est à 1, la page est remise en fin de liste avec son bit R mis à 0 (comme si elle venait d'être chargée), et l'algorithme regarde la page suivante, jusqu'à trouver une page ayant le bit R à 0, qui sera retirée.

En pratique on utilise une liste circulaire. Exercice : justifier son autre appellation : *algorithme de l'horloge*.

6.8 Algorithme du vieillissement

On utilise le bit de référence R, et un registre à décalage vers la droite de n bits pour chaque page. À intervalles réguliers, le bit R est transféré dans le registre à décalage, puis remis à 0.

Le registre à décalage permet donc de savoir si des références ont été faites lors des n dernières périodes de temps. Par approximation grossière, un grand nombre dans le registre (beaucoup de bits 1 à gauche) indique qu'une page a été récemment beaucoup utilisée.

6.9 Réserve d'espace d'échange

On peut se poser la question : où vont les pages évacuées ? Leur a-t-on préalablement réservé un espace sur le disque, ou non ?

La réponse dépend de la philosophie adoptée pour la mémoire virtuelle. L'ancienne école considérait que les processus "habitaient" dans l'espace disque réservé pour le swapping, et qu'ils ne faisaient que passer provisoirement dans la mémoire vive, considérée comme un *cache* du disque dur. Dès son lancement, un processus se voyait donc réserver une place dans l'espace de swap, qui devait être au moins aussi grand que la mémoire vive.

On peut aussi considérer que l'espace de swap est une extension de la mémoire. Un processus est chargé en mémoire sans se préoccuper de réserver de l'espace sur disque. Il pourrait donc théoriquement arriver qu'on ne puisse pas évacuer une page de la mémoire vers le disque, si le swap est plein.

La taille du swap Lorsqu'ils installent une nouvelle machine, les administrateurs débutants se posent inévitablement cette question : quelle taille donner à l'espace d'échange (swap) ?

À cette question il existe une seule réponse techniquement exacte : il faut donner un espace suffisant pour qu'à tout moment, tous les processus rentrent. Malheureusement, on ne peut pas deviner comment la machine sera utilisée dans l'avenir, et on doit donc se baser sur des observations (comment la

machine actuelle est elle utilisée ? Quels programmes ? Combien d'utilisateurs ? etc.) pour faire des prévisions.

Mais comme le disait le regretté Pierre Dac, *la prévision est un art difficile surtout en ce qui concerne l'avenir*. Les administrateurs s'en tiennent donc souvent à une estimation grossière (*rule of thumb*) qui consiste à prendre un swap deux fois plus grand que la mémoire réelle. **Cette règle n'a aucune justification technique**. Par contre elle est extrêmement utile : elle évite de perdre du temps à des supputations oiseuses sur l'usage futur de la machine. Si le swap s'avère trop petit à l'usage, il sera toujours possible de l'agrandir ultérieurement (quitte à acheter un disque supplémentaire). Si il est trop grand, quelques centaines de mégaoctets seront gaspillés, ce qui n'est pas un drame. De nos jours, l'espace disque ne coûte pas très cher.

Dans des temps plus anciens (années 70-80), le matériel était beaucoup plus cher, et les acheteurs étaient beaucoup plus attentifs à la constitution de configurations équilibrées, savant dosage entre un processeur d'une puissance suffisante, d'une mémoire assez spacieuse, et de disques assez gros, le tout devant tenir dans un budget limité.

Le raisonnement était le suivant : choisir une mémoire assez grande pour avoir un taux de pagination quasi nul sous une charge normale. Ceci implique déjà d'avoir un swap plus grand que la mémoire (voir plus haut). En doublant cette taille, on permet théoriquement de lancer deux fois plus de processus, en charge de pointe, mais le taux d'échange disque/mémoire sera beaucoup plus élevé, au point de paralyser la machine (*thrashing*, facile à reconnaître au bruit du disque qui glougloute constamment) si tous les processus prêts sont en défaut de page, et le taux d'occupation du processeur baisse énormément (une fois atteint le sommet de 100 %, il ne peut que baisser) : c'est le disque qui devient le goulet d'étranglement. Si on en arrive là fréquemment, c'est qu'on a mal estimé la charge : il vaut mieux se contenter d'un processeur moins puissant et utiliser la différence de prix pour gonfler la mémoire.

6.10 Intérêt du swap ?

De nos jours, le prix de la mémoire est tellement faible qu'on pourrait envisager, dans beaucoup de situations, de se passer de swap.

Mais sur un ordinateur personnel, l'espace de swap peut aussi servir à sauver le contenu de la mémoire quand l'appareil est mis en veille, ce qui permettra de redémarrer l'appareil beaucoup plus vite que passer par la longue procédure de boot.

Une autre utilisation des mécanismes du swap (table de pages) est de pouvoir traiter des fichiers comme si c'étaient des tableaux en mémoire. Voir manuel de la fonction `mmap()`. La table des pages est alors modifiée pour qu'une partie de l'espace logique du processus corresponde à des blocs situés, non dans l'espace d'échange, mais dans un fichier.

Dans la même veine, des processus peuvent demander à partager de la mémoire commune (appel `shmget()`) : leurs tables de pages désignent alors des blocs communs.

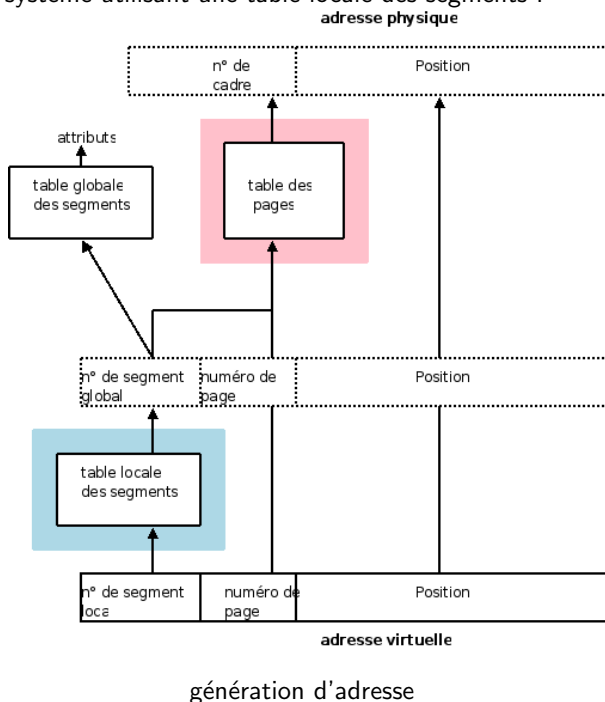
7 Mémoire virtuelle segmentée-paginée

La mémoire virtuelle segmentée-paginée est une combinaison des techniques précédentes :

- l'espace logique d'un processus est composé de segments
- chaque segment est découpé en pages
- les pages peuvent être présentes en mémoire, ou dans l'espace d'échange sur disque.

Elle est utilisée couramment depuis le GE-645 (1968) et l'IBM 360/67 (1969)

La figure ci-dessous montre la génération d'adresse d'un tel système utilisant une table locale des segments :



Exercice 15. Sur le schéma ci-dessus l'adresse virtuelle (en hexadécimal) 0x2A0073CB correspond au segment 42 ; le système a des pages de 4K mots.

- quelle est la taille maximum d'un segment ?
- Combien a-t-il de pages ?

Soit l'adresse réelle 0xA20F3CB

- que dire sur la taille de la mémoire réelle ?
- quel est le numéro de cadre de page ?
- imaginez le contenu des différentes tables pour que l'adresse physique soit le résultat de la génération d'adresse à partir de l'adresse logique ci-dessus.

Le GE-645 de General Electric est l'ordinateur sur lequel a été développé le système Multics (Lire le manuel : http://www.bitsavers.org/pdf/ge/GE-645/GE-645_SystemMan_Jan68.pdf).

- les adresses absolues sur 24 bits, permettant d'utiliser jusqu'à 16 millions de mots. La documentation précise « *Memories of this size are not available for initial GE-645 systems. The 16-million-word addressing*

capability exists to facilitate future growth of the system. » (p. 10)

- les adresses logiques sont sur 34 bits (le GE-645 est une machine mots de 36 bits) :
 - 18 bits pour le numéro de segment
 - 6 pour le numéro de page
 - 10 pour le déplacement dans la page

Exercice 16.

- Quelle est la taille maximale d'une page ? D'un segment ?
- la taille de l'espace logique d'un processus ?

Exercice 17. La page Wikipedia consacré à l'IBM 360-67 précise

Dynamic Address Translation (DAT) with support for 24 or 32-bit virtual addresses using segment and page tables (up to 16 segments each containing up to 256 4096 byte pages)

Interprétez cette phrase.



IBM 360/67 (1969)

Exercice 18. Les processeurs ARM équipent la grande majorité des smartphones et autres téléphones portables.

- Trouvez un modèle de processeur qui soit équipé d'une MMU, et sa documentation sur Internet.
- Quelle est la taille des adresses physiques ? Des adresses logiques ?
- Quelles tailles de pages sont disponibles ?
- Expliquez un des schémas décrivant la génération d'adresses.

Attention, la terminologie change selon les constructeurs. Etablir la correspondance avec les termes du cours.