

Stockage et systèmes de fichiers

Guillaume Salagnac

Insa de Lyon – Informatique

Systèmes de fichiers : pour quoi faire ?

Persistence

- conserver les données même quand la machine est éteinte
- dissocier les données du processus qui les a créées
- ▶ stockage en dehors de la mémoire principale
- ▶ notion de **fichier non structuré** = une séquence d'octets

Organisation

- identifier chaque fichier par un **nom** intelligible
- grouper des noms ensemble pour **ranger** les fichiers
- ▶ notion de **répertoire** (= **dossier**)
- ▶ hiérarchie **arborescente** de répertoires et sous-répertoires

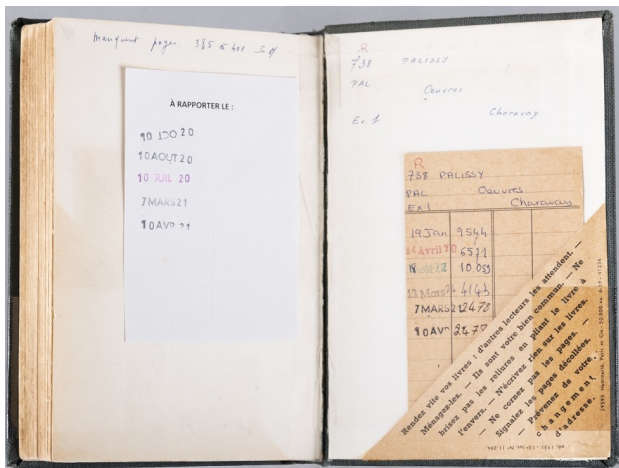
Abstraction

- masquer les détails technologiques : **disque**, flash, réseau
- ▶ architecture logicielle en **couches**

Bonus : protection, performance, robustesse

2/35

Parenthèse historique : une fiche



3/35

Parenthèse historique : un fichier



4/35

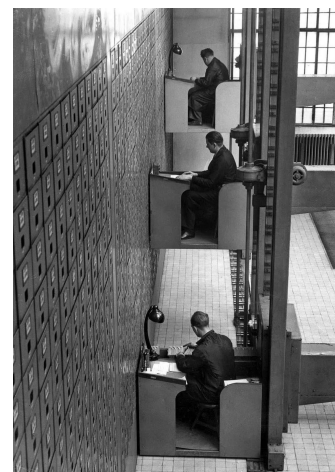
Parenthèse historique : un (gros) fichier



5/35

Parenthèse historique : un (très très gros) fichier

1937



<https://rarehistoricalphotos.com/vertical-files-prague-czech-republic>

6/35

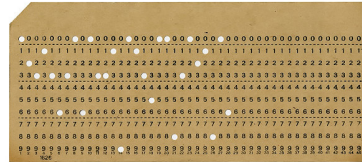
Parenthèse historique : les cartes perforées



une carte ≈ 80 o (80×10 bits) ; photo 1955 ≈ 5 Mio (60k cartes)

7/35

Vocabulaire : vous avez dit «fichier» ?



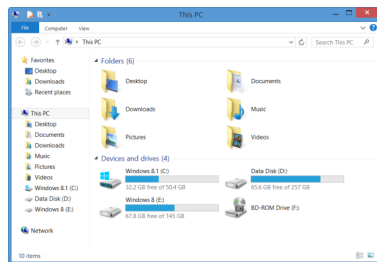
- VF fichier = VO *file*

8/35

Vocabulaire : vous avez dit «dossier» ?



≈ 1960



≈ 1995

- VF répertoire (dossier) = VO *directory* (*folder*)

9/35

Systèmes de fichiers : pourquoi c'est difficile

Non-volatilité : chaque écriture sur le disque est définitive



VS



- comment résister aux pannes et aux plantages ?

Latence : un accès disque $\approx$ cent mille accès mémoire !

DRAM ≈ 50 ns Flash ≈ 50 μ s disque ≈ 5 ms

Taille : 100 $\times$, 1000 $\times$ plus vaste que mémoire

- comment offrir une performance acceptable ?

10/35

Plan

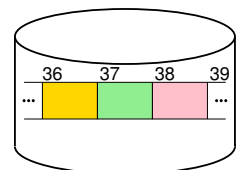
1. Introduction : historique, définitions, vocabulaire
2. Interface utilisateur : fichiers, répertoires, volumes
3. Implémentation et interface vers le matériel

11/35

Positionnement



brouillon.txt
l o r e m i p s u m . . .



- fichier : conteneur nommé pour une séquence d'octets
 - application interprète «librement» le contenu binaire
 - convention : suffixe du nom (.mp3, .jpg...) = **format** des données
- disque : tableau de **secteurs** numérotés
 - taille typique : un secteur = 512B ou 4kB
 - unité de transfert atomique entre disque et RAM = 1 secteur

Rôle du système de fichiers (en VO File system = FS)

Lors de chaque accès à un fichier, le FS doit traduire une paire **nom+position** vers une «adresse disque» **n° secteur-offset**

12/35

Interface utilisateur : appels système

```
ssize_t read(int fd, void *buf, size_t count);
```

- Lire *count* octets dans le fichier *fd* et les écrire en mémoire à l'adresse *buf* (donc de *buf* jusqu'à *buf+count-1*)

```
ssize_t write(int fd, const void *buf, size_t count);
```

- Lire en mémoire les *count* octets commençant à l'adresse *buf*, et les écrire dans le fichier *fd*

Remarque : pas besoin de préciser systématiquement le nom du fichier accédé (ni l'offset dans le fichier)

- le numéro *fd* est un **file descriptor** attribué par le noyau
 - `int open(char *pathname, int flags)` rend un *fd*
- notion de **position courante** dans chaque fichier ouvert
 - `off_t lseek(int fd, off_t offset, int whence);`
- liste des fichiers ouverts (et positions) dans le PCB

13/35

Opérations disponibles sur un fichier

- créer un nouveau fichier : `creat()`
- supprimer un fichier : `unlink()`
- ouvrir : `open()`
- fermer : `close()`
- lire *n* octets depuis la position courante : `read()`
- écrire *n* octets à la position courante : `write()`
- se repositionner dans le fichier : `lseek()`
- ajouter *n* octets en fin de fichier : `append()`
- lire les méta-données : `stat()`
- changer les méta-données : `chmod()`, `utime()`
- renommer un fichier : `rename()`
- ...

Attention, piège : renommer $\neq$ déplacer ! (cf plus tard)

14/35

Organisation des fichiers en dossiers

Objectif : pouvoir retrouver un fichier à partir de son nom

Solutions historiques :

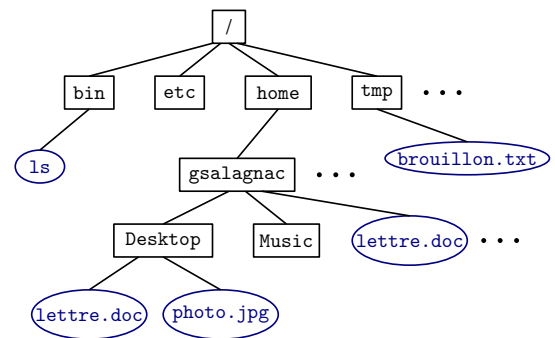
- un seul répertoire contenant tous les fichiers ?
- structure fixe à 2, 3, N niveaux ?
- inconfortable à utiliser, et inefficace à l'exécution

Approche moderne : structure de nommage récursive

- chaque dossier peut contenir **fichiers et sous-dossiers**
- le système de fichiers forme un **arbre**
- implem : un répertoire = un fichier spécial
 - appels système ad hoc : `opendir()`, `readdir()`...
 - contient la liste de ses sous-dossiers et fichiers
 - avec nom $\mapsto$ métadonnées (taille, emplacement physique...)

15/35

Arborescence de fichiers Unix



Exemple de **chemin absolu** :
`/home/gsalagnac/Desktop/photo.jpg`

16/35

Arborescence Unix : noms spéciaux

Noms spéciaux du système de fichiers

- **racine** du système de fichiers `/`
- répertoire **courant** `.`
- répertoire **parent** `..`

Mécanisme similaire dans le **shell**

- mon répertoire personnel `~`
- joker `*.txt` pour dire «tous les noms qui finissent par `.txt`»

Commandes shell

- `cd truc` pour «aller» dans le répertoire *truc*
 - exemples `cd /` `cd /home/gsalagnac/Desktop` `cd ..`
- `ls` pour lister le contenu du répertoire courant

17/35

Répertoire courant et chemins relatifs

Chaque processus a un **Current Working Directory**

- appel système `chdir()` pour changer de CWD
- `cd truc` demande au shell de faire un `chdir("truc")`
- implem : un attribut CWD dans le PCB

Résolution des noms **par le noyau**

- chemin commençant par un `/` ► **chemin absolu**
 - interprété en partant de la racine
 - par exemple `/usr/bin/gcc`
- chemin commençant par autre chose ► **chemin relatif**
 - interprété en partant du CWD
 - par exemple `Photos` qu'on peut écrire aussi `./Photos`
 - par exemple `../../Documents/lettre.doc`
- attention : à ne pas confondre avec les raccourcis de syntaxe implémentés dans le shell (`~`, jokers...)

18/35

Notion de «montage»

- plusieurs supports : disques, DVD, clé USB, réseau...
- une arborescence sur chaque support : notion de **volume logique**

vs

- une seule arborescence de fichiers dans le système
- une seule racine / dans le système

Problème : comment accéder à tous ces fichiers à la fois ?

Solution : **inclure** les différents volumes dans une unique vue

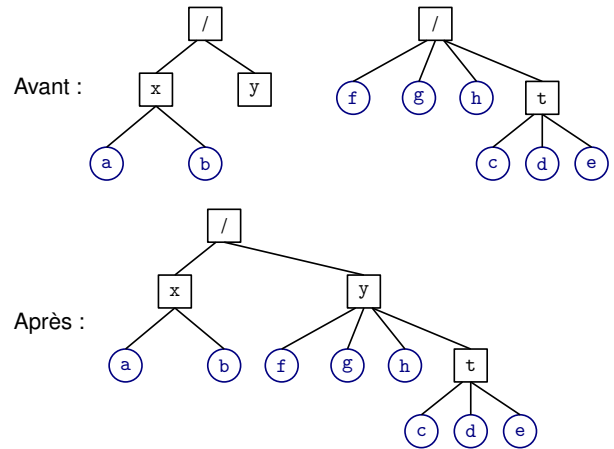
Définition : montage d'un volume logique

Monter un volume dans un dossier = masquer le contenu de ce dossier et le remplacer par l'arborescence du volume

- Unix : tout répertoire peut servir de **point de montage**
- Windows : 26 points de montage possibles A: B: ... Z:

19/35

Montage : illustration



20/35

Montage : remarques

Unix

- commandes `mount` et `umount`
- exemple : `mount -l` pour lister les montages

Démontage

- aussi appelé «retirer le périphérique en toute sécurité»
- demande au noyau de
 - finir toutes les écritures en cours
 - refuser tous les nouveaux accès
 - ensuite, dissocier le sous-arbre de son point de montage
- on peut ensuite débrancher la clé, éjecter le CD...

Remarque : déplacer ≠ renommer ?

- sur un même volume ► simple modification de répertoires
- entre deux volumes ► il faut copier les données !

21/35

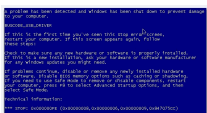
Plan

1. Introduction : historique, définitions, vocabulaire
2. Interface utilisateur : fichiers, répertoires, volumes
3. Implémentation et interface vers le matériel

22/35

Systèmes de fichiers : pourquoi c'est difficile

Non-volatilité : chaque écriture sur le disque est définitive



VS



► comment résister aux pannes et aux plantages ?

Latence : un accès disque ≈ cent mille accès mémoire !

DRAM ≈ 50ns Flash ≈ 50μs disque ≈ 5ms

Taille : 100×, 1000× plus vaste que mémoire

► comment offrir une performance acceptable ?

23/35

Profils d'accès

Accès séquentiel

- contenu du fichier traité au fur et à mesure
- scénario le plus courant
- exemples : lecture de film, sauvegarde d'un document

Accès arbitraire (VO *Random Access*) :

- contenu du fichier traité dans le désordre
- exemples : bases de données, swap de mémoire virtuelle

Remarques :

- lire un certain secteur ≈ 5ms
- lire un certain secteur et les n suivants ≈ $5ms + n \times \epsilon$

24/35

Formulation du problème

Objectifs du système de fichiers

- pouvoir retrouver un fichier à partir de son nom
- accéder efficacement aux données (séquentiel et arbitraire)
- gérer l'espace libre : allocation et désallocation des secteurs

Hypothèses

- granularité d'accès par les applications : 1 octet
- granularité de stockage et de transfert : 1 secteur
- méta-données uniquement stockées sur le disque

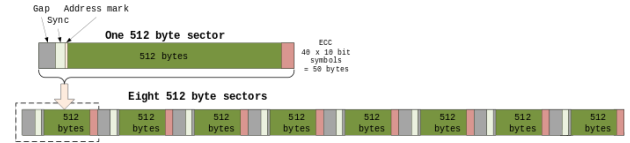
Observations empiriques

- grande majorité de petits fichiers ($\leq 10\text{kB}$)
- mais : espace surtout occupé par les gros fichiers (qq MB)
- et parfois quelques très très gros fichiers ($\geq 10\text{GB}$)

25/35

Notion de «formatage»

Secteur = unité de lecture ou écriture atomique

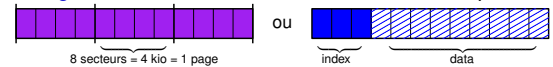


Partitionnement = découpage du disque en volumes

- un volume = un même *File System*
- fichiers (NTFS, FAT, ext4) vs swap vs DBFS vs ...

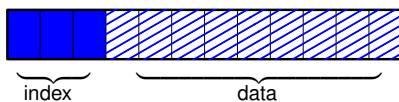


Formatage d'un volume = écriture d'un FS «vide», par ex :



26/35

Contenu de l'index



Index du volume = zone dédiée aux **métadonnées**

- de configuration : taille du volume, taille d'un bloc (cluster)
 - 1 cluster = 2^n secteurs
- générales : carte des blocs libres vs occupés
- pour chaque fichier : taille, permissions, emplacement phy...

pas une table des matières !

- rien sur l'arborescence : les **noms** sont dans les répertoires

27/35

Approche 1 : allocation contiguë

Idée : un fichier = une suite de blocs consécutifs

- métadonnées par fichier : taille + n° du 1^{er} bloc



Avantages

- implem simple, accès séquentiel et arbitraire efficaces

Inconvénients

- obligation de connaître la taille du fichier à l'avance
- suppression ► fragmentation (externe)

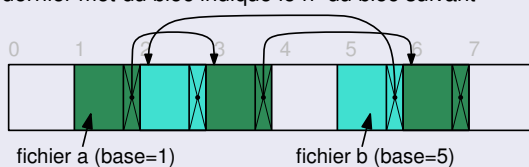
- parfait pour supports en lecture seule : CD, DVD

28/35

Approche 2 : liste chaînée

Idée : un fichier = une liste chaînée de blocs

- dernier mot du bloc indique le n° du bloc suivant



Avantages

- taille dynamique, pas de fragmentation, accès séquentiel

Inconvénients

- accès arbitraire inefficace
- surcoût de stockage des pointeurs
- fragile en cas de bug / crash

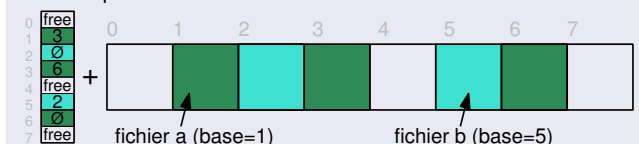
29/35

Approche 2.5 : File Allocation Table

MS-DOS 1977

Idée : séparer le chaînage et le contenu des fichiers

- index = FAT = tableau avec 1 case par bloc de données
- chaque case = n° du bloc suivant



Avantages

- FAT mise en cache en RAM ► accès arbitraire OK
- meilleure robustesse
 - redondance : plusieurs exemplaires sur le disque
 - données vs méta-données

Inconvénients

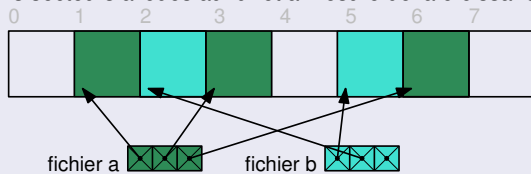
- consommation mémoire

30/35

Approche 3 : fichiers indexés

Idée : associer à chaque fichier un tableau de n°s de blocs

- **inode** = «index-node»
- alloué (dans l'index) lors de la création du fichier
- vs secteurs alloués au fur et à mesure de la croissance



Avantages

- accès séquentiel et arbitraire efficaces

Inconvénients

- chaque inode doit être contigu : problème de **fragmentation** !

Index =

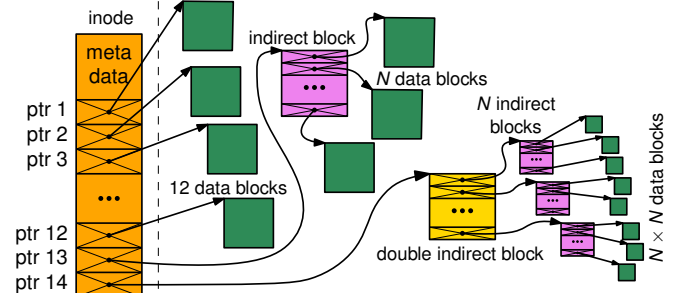
31/35

Approche 4 : indexation multi-niveaux

BSD Unix 1984

Idée : organiser l'index lui-même comme un arbre

- une seule taille d'inode : métadonnées + 14 pointeurs
- 12 premiers pointeurs ► 12 premiers **blocs de données**
- 13^e pointeur ► un **tableau de N pointeurs (indirect block)**
- 14^e pointeur ► un **tableau de N pointeurs vers des indirect blocks**



32/35

Indexation multi-niveaux Unix : remarques



Avantages

- implem simple, accès efficace aux petits fichiers
- taille max des fichiers bornée, mais grande
 - ext4fs : 15^e pointeur vers un *triple indirect block*
- bonus : allocation contigue possible

Inconvénients

- nombre d'accès au pire cas pour une lecture ?
- pire surcoût en espace ?

33/35

Plan

1. Introduction : historique, définitions, vocabulaire
2. Interface utilisateur : fichiers, répertoires, volumes
3. Implémentation et interface vers le matériel

34/35

Systèmes de fichiers : à retenir

Rôles du système de fichiers

- persistance, organisation, gestion du stockage, protection...
- interface : appels système `open()`, `read()`, `write()`...

Notions clés

- fichier = **séquence d'octets**, identifié par un nom
- dossier = **contient des fichiers** et d'autres dossiers
- volume = arborescence occupant **tout un support**

Implémentation

- dossier = **fichier spécial** contenant des noms
- fichier = éparpillé sur plusieurs **secteurs** du disque
- **inode** = index des secteurs composant le fichier

35/35