



Chapitre 5

Matériel

Contenu

Matériel des dispositifs de réseau

Objectif: savoir choisir les composants adaptés à l'application du dispositif de réseau

1. Bus et interconnexions
 - PCI, I²C, ...
2. Interfaces de communication
 - Wireless LAN
 - USB
3. Processeur
 - ARM, x86, MIPS, PowerPC, ...
4. Mémoire
 - SRAM, DRAM, Flash, ...



Architecture de l'ordinateur

- Les dispositifs de réseau bas de gamme ont une architecture similaire à celle des PC

Quatre composants principaux

- Un processeur (CPU)
- La mémoire principale
- Des modules d'entrée/sortie
- Des structures d'interconnexion

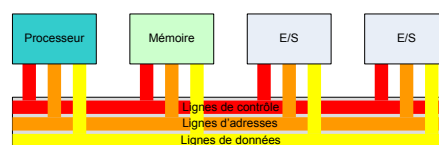


Structures d'interconnexion

- Permettent la communication entre les composants de l'ordinateur
- Souvent organisées comme [un bus](#)

Structure du bus

- **Lignes de données**
 - Permettent de transmettre des mots de plusieurs bits en parallèle
 - Largeur typique: 32 ou 64 bits
- **Lignes d'adresses**
 - Désignent la source ou la destination des données du bus de données
 - Mémoire
 - Composants d'E/S possèdent généralement aussi des adresses
 - La largeur du bus d'adresses détermine la capacité maximale de mémoire
- **Lignes de contrôle**
 - Transmettent l'horloge qui indique la validité des données et des adresses
 - Indiquent l'opération à effectuer



Accès au bus

Méthodes d'arbitrage

- Arbitrage centralisé
 - Un contrôleur de bus alloue le bus aux modules
 - Typiquement réalisé avec deux lignes de contrôle:
 - Requête de bus
 - Accord de bus
 - Le contrôleur peut être intégré dans le processeur ou dans un composant séparé
- Arbitrage distribué
 - Sans contrôleur central
 - Chaque module contient de la logique d'accès

Séquencement

- Les actions sur le bus sont coordonnées par un séquencement synchrone
- Les lignes de contrôle contiennent une ligne d'horloge
- Cycle d'horloge: séquence 1-0
- Les événements commencent au début d'un cycle
- Exemple
 - 1^{er} cycle: le processeur place une adresse mémoire sur les lignes d'adresses
 - 2^{ème} cycle: le processeur émet la commande « READ »
 - 3^{ème} cycle: un module reconnaît son adresse et commence le traitement
 - n^{ème} cycle: le module place les données sur le bus de données



Performances

- Débit de transfert brut: D
 - Dépend de la largeur du bus de données: w
 - Dépend de la fréquence du bus: f
- $$D = \frac{w}{t}$$
- Les performances se dégradent avec le nombre de composants connectés au bus
 - La longueur du bus augmente → délai de propagation
 - Le bus devient un goulet d'étranglement

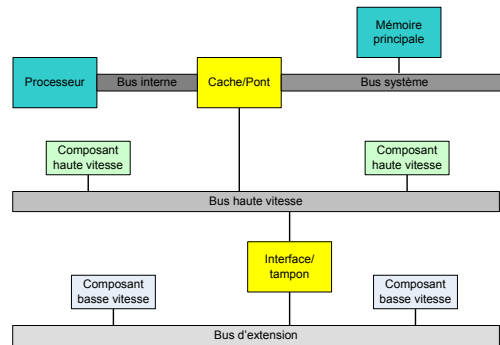


Hiérarchie de bus

- Les systèmes modernes utilisent plusieurs bus
 - Différents types de bus en fonction de la vitesse des composants connectés
 - Des ponts interconnectent les bus

Avantages

- Les accès à la mémoire (DMA) n'interfèrent pas avec l'activité du bus
- Le bus haute vitesse interconnecte peu de dispositifs performants
- Le bus d'extension interconnecte beaucoup de composants à basse vitesse



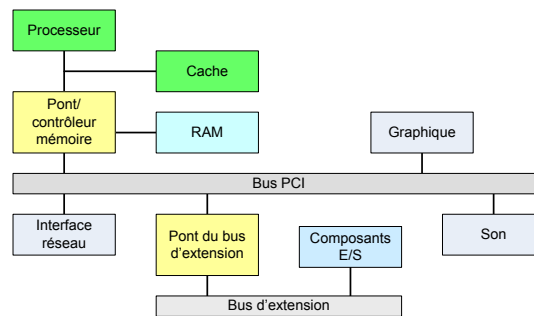
Les bus utilisés en pratique

- Les bus les plus souvent utilisés
 - PCI : *Peripheral Component Interconnect*
 - Variantes de PCI : Mini-PCI, PCI-104, PCIE
 - I²C (Inter Integrated Circuit)
 - IDE (Integrated Drive Electronics)/ATA (Advanced Technology Attachment) et SATA
 - SCSI (Small Computer System Interface)



Le bus PCI

- Très répandu sur les PC, Macs et stations de travail
 - Compatible avec x86, ARM, PowerPC, MIPS, ...
- Très souvent utilisé sur les systèmes embarqués
- Utilisation comme bus système
 - Interconnecte les composants principaux d'un ordinateur



Normes PCI

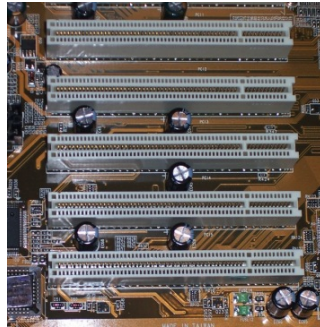
- Différentes normes de PCI existent
 - Les normes PCI et PCI-2.2 à 32 bit étaient pendant longtemps les plus répandues dans les PC
 - PCI-X est souvent utilisée pour les cartes Gigabit-Ethernet
 - Une carte PCI-X fonctionne dans un emplacement PCI

Norme	Largeur du bus	Fréquence maximum	Débit de transfert brut
PCI	32 bit ou 64 bit	33,33 MHz	133 MB/s ou 266 MB/s
PCI-2.2	32 bit ou 64 bit	66,66 MHz	266 MB/s ou 533 MB/s
PCI-X 1.0	32 bit ou 64 bit	133 MHz	533 MB/s ou 1066 MB/s
PCI-X 2.0	16/32/64 bit	266 MHz	jusqu'à 2133 MB/s

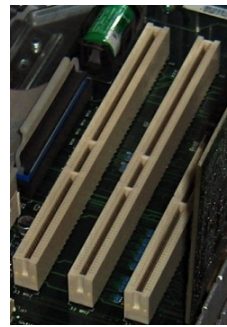


PCI à 32 et 64 bits

- Les emplacement PCI à 32 et à 64 bits ne sont pas compatibles



a) 32 bit



b) 64 bit



Variantes de PCI : Mini-PCI

- Variante de PCI-2.2 pour laptops et systèmes embarqués
- Trois types de connecteurs
 - Type I et II : 100 broches
 - Type III : 124 broches
- Des adaptateurs permettent la conversion entre PCI et Mini-PCI



Variantes de PCI : PC/104, PC/104+, PCI-104

- Formats utilisés pour systèmes embarqués
 - Taille réduite
 - Possibilité d'empiler les cartes
 - Sans carte mère



Variantes

- PC/104 : utilise un bus ISA (Industry Standard Architecture)
- PC/104+ : supporte PCI et ISA
- PCI-104 : uniquement PCI

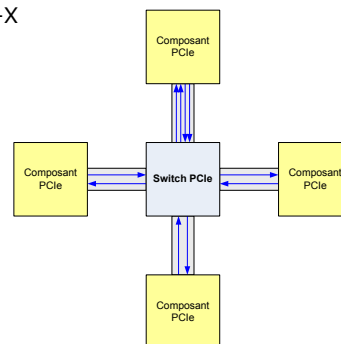


Variantes de PCI : PCI Express (PCIe)

- Nouvelle norme très utilisée dans les PC récents
 - Remplace PCI, PCI-X et AGP
 - Compatible au niveau OS avec PCI et PCI-X

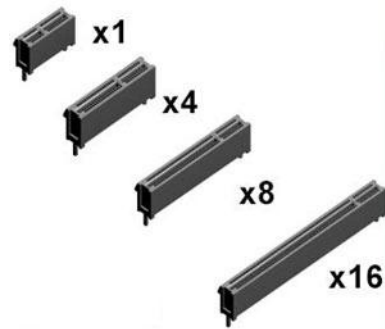
Description technique

- Topologie en étoile !
- Un **switch PCIe** achemine les données entre les composants
- **Protocole de transmission** avec contrôle d'erreurs et acquittements
- Les liens comprennent 1, 2, 4, 8, 16, 32 lignes par direction pour la transmission des bits
 - 1 seule ligne pour la plupart des composants
 - 32 lignes p.ex. pour Gigabit-Ethernet
- Transmission full-duplex, à 250 MB/s par ligne



Emplacements PCI Express

- Différents emplacements, en fonction de la largeur des liens
 - x1, x2, x4, x8, x16, x32
- Il est possible d'insérer une carte dans un emplacement avec plus de lignes

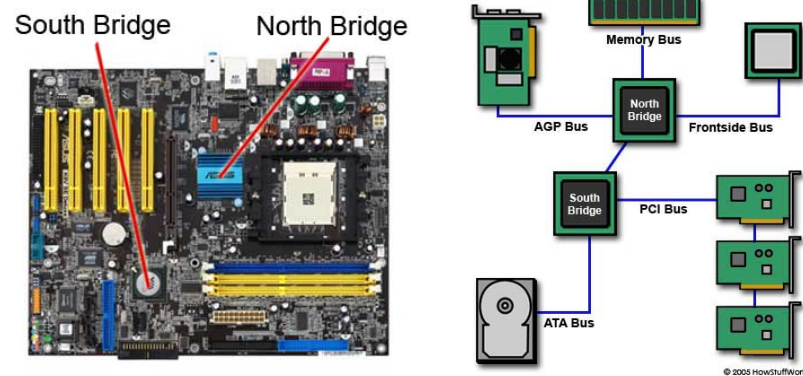


Autres bus

- Bus IDE/ATA et SATA
 - Pour la connexion de disques durs et de lecteurs de disques
 - SATA est la norme la plus récente avec un débit plus élevé
 - Rarement utilisé sur les systèmes embarqués
- SCSI (*Small Computer System Interface*)
 - Bus d'interconnexion interne et externe
 - Utilisé pour les disques durs, scanners, périphériques haut débit
 - Typiquement jusqu'à 7 périphériques sur le bus
 - Différentes normes
 - SCSI, Fast SCSI, Wide SCSI, Ultra SCSI, Ultra Wide SCSI, ...
 - Débits de 5 MB/s à 320 MB/s



Hiérarchie de bus d'un système moderne



Interfaces de communication

- Particulièrement importantes pour les dispositifs de réseau
- Types d'interfaces
 - Interfaces Ethernet
 - Port série
 - Interfaces WiFi
 - Interfaces USB



Les interfaces série les plus importantes

Spécification EIA	Avis UIT similaire	Débit maximum	Portée	Utilisation principale
RS-232	V.24 avec V.28	20 kb/s sur ligne non équilibrée	15 m	Configuration des équipements de réseau
RS-449 avec RS-422-A	V.24 avec V.11	10 Mb/s sur ligne équilibrée	10 m – 1000 m	Lignes louées
RS-449 avec RS-423-A	V.24 avec V.10	100 kb/s sur ligne non équilibrée	10 m – 1000 m	Lignes louées



Caractéristiques générales de RS-232 et V.24/V.28

- Débit maximum : 19,2 kb/s sur 15m
- Débit typique : 115 kb/s sur 1m
- Câbles : lignes non équilibrées
(voie retour commune)
- Normalement le full-duplex est utilisé mais simplex et half-duplex sont possibles
- Le mode asynchrone est presque toujours utilisé mais la jonction permet aussi le mode synchrone



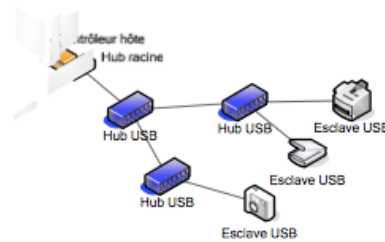
Interface USB

- Interface la plus importante pour la connexion de périphériques externes
- Typiquement utilisé sur les PC et laptops
- Utilisation possible sur les systèmes embarqués
 - Système embarqué comme hôte
 - Connexion d'un disque dur externe, d'une clé d'authentification, ...
 - Système embarqué comme périphérique
 - P.ex. lecteurs MP3, appareils photo, serveur de backup, ...



Configuration d'un réseau USB

- Configuration asymétrique
 - Contrôleur hôte :
 - Maître du bus
 - Intégré dans le PC / laptop
 - Esclaves
 - Périphériques
 - Hubs
- Configuration en arborescence
 - A l'aide de hubs USB
 - Un hub racine est souvent intégré dans le contrôleur hôte
 - Au maximum 5 hubs dans un chemin (du contrôleur hôte aux esclaves)
 - Au maximum 127 esclaves et hubs par contrôleur hôte
- Câbles
 - Longueur max. : 5 m
 - 4 fils
 - Une seule paire torsadée pour la transmission sérielle dans les deux sens
 - Deux fils pour l'alimentation et la masse



Esclaves USB

- « Plug and play »
 - Connexion d'un périphérique sans redémarrer le PC
 - Un esclave s'annonce au contrôleur hôte
 - Un seul **descripteur de dispositif** par esclave
 - **Plusieurs descripteurs d'interface** par esclave
 - Permettent à un périphérique de réaliser plusieurs fonctions
 - » Exemple: Caméra vidéo : interface vidéo et interface audio
- Différents types de dispositifs (*device classes*)
 - Le type de dispositif indique le pilote à utiliser
 - **USB audio device** : cartes son, ...
 - **USB human interface device** : claviers, souris, ...
 - **USB printer device** : imprimantes
 - **USB mass storage device** : cartes et clés mémoire, lecteurs MP3, ...
 - **USB hub**
 - **USB communication device** : modems, cartes réseau, ...
 - **USB Wireless** : dongles Bluetooth, ...



Transfert des données

- Transmission sérielle sur une seule paire torsadée
- Le contrôleur hôte interroge périodiquement les esclaves et les invite à transmettre les données

Quatre types de transferts

- Transfert de contrôle
 - Utilisable pour de courts échanges de données
 - Fiable (sans perte)
- Transfert isochrone
 - Débit garanti, des pertes sont possible
 - Le contrôleur interroge l'esclave avec une fréquence fixe
 - Utilisé p.ex. pour le transfert de la vidéo et de du son
- Transfert de fichiers
 - Pour le transfert de gros volumes de données
 - Le contrôleur demande la transmission s'il n'y a pas d'autre demande prioritaire
- Transfert par interruption
 - L'esclave avertit le contrôleur qu'il a des données à transmettre
 - Utilisé par les souris et les claviers



Normes et débits de transmission

Normes

- USB 1.1
 - Définit les modes « Low speed » et « Full speed »
- USB 2.0
 - Définit en plus le mode « High speed »
 - Un contrôleur/esclave USB 2.0 ne permet pas forcément le mode « High speed »
- USB 3.0
 - Définit le mode « SuperSpeed »
- Débits de transfert brut
 - Low speed : 1,5 Mb/s
 - Full speed : 12 Mb/s
 - High speed : 480 Mb/s
 - SuperSpeed : 4 Gb/s
- Débit réel plus bas
 - Protocole de communication avec CRC, ACK
 - P.ex. 320 Mb/s en high speed ou 3.2 Gb/s en SuperSpeed
- Un hub « high speed » peut supporter les trois modes simultanément sans réduction de débit



Contrôleur hôte

- Nécessite un support matériel : puce HCD (*Host Controller Device*)

Trois types de HCD

- UHCI (*Universal Host Controller Interface*)
 - USB 1.1
 - Réalisation propriétaire d'Intel
 - Utilisé par Intel et VIA
- OHCI (*Open Host Controller Interface*)
 - USB 1.1
 - Réalisation 'ouverte', développé par plusieurs partenaires (Microsoft et autres)
 - Réalise certaines fonctions directement en matériel (pilotes plus simples)
- EHCI (*Enhanced Host Controller Interface*)
 - USB 2.0 (uniquement « high speed »)
 - Une puce OHCI/UHCI doit traiter les modes « low speed » et « full speed »



Autres fonctions USB

- USB « On-the-go » ou OTG (depuis 2002)
 - Permet la communication directe entre deux esclaves, sans contrôleur hôte
 - Exemples
 - Transfert entre un appareil photo numérique et une imprimante
 - Échange de fichiers entre deux lecteurs MP3
- USB sans fils
 - WirelessUSB de Cypress Semiconductor
 - Transmission à 62,5 kb/s à 2,4 GHz
 - Norme propriétaire
 - Utilisable p.ex. pour les souris et les claviers
 - « Certified Wireless USB » (en 2006/2007)
 - Transmission à 480 Mb/s sur 3m
 - Utilise la technologie UWB (Ultra-Wide-Band)



USB sous Linux

Linux comme contrôleur hôte

- Support très complet
 - Pilotes pour UHCI, OHCI, EHCI
 - Pilotes génériques pour les différentes classes de périphériques
 - Audio device, human interface device, printer device, mass storage device, ...
 - Pilotes spécifiques pour beaucoup de périphériques (p.ex. scanners)
- Activer pilotes dans le noyau
- Activer le systèmes de fichiers USB (« USB Device Filesystem ») et le monter sous */proc/bus/usb*

Linux comme dispositif esclave

- Support incomplet
- Quelques pilotes intégrés au noyau (« USB gadgets »)
 - USB mass storage
 - Permet au dispositif de fonctionner comme dispositif de stockage de données
 - USB communication
 - Permet au dispositif de fonctionner comme une carte de réseau externe



Processeurs

- Les microcontrôleurs à 8 ou 16 bits sont omniprésents
 - Une voiture moderne utilise une dizaine de microcontrôleurs
 - Un PC contient plusieurs microcontrôleurs pour contrôler la souris, le clavier, le disque dur, ...
- La mise en réseau des appareils nécessite une pile complète des protocoles de communication
 - Tendence d'utiliser Linux, Windows, BSD même sur les équipements bas de gamme
 - Nécessitent un processeur à 32 ou 64 bits
 - Prix à partir de \$5 (\$1 ???)
 - IXP425 (cartes Avila): \$20



Processeurs des systèmes Linux embarqués

Architecture	Type	Utilisation
x86	CISC	Processeur classique des PC (Intel et AMD).
Motorola 68000	CISC	<ul style="list-style-type: none"> • Premières stations de travail de SUN. • Premiers Apple Macintosh. • Ordinateurs Atari ST, Amiga.
ARM (ARM, StrongARM, XScale)	RISC	Processeur le plus populaire pour <ul style="list-style-type: none"> • les systèmes embarqués, • téléphones portables, • agendas électroniques.
PowerPC	RISC	<ul style="list-style-type: none"> • Ordinateurs Apple (jusqu'à 2005) • Ordinateurs centraux d'IBM • Microsoft Xbox 360, Nintendo GameCube
MIPS	RISC	<ul style="list-style-type: none"> • Très répandus • Large gamme d'applications, allant des smartcards aux stations de travail performantes
Hitachi SuperH	RISC	<ul style="list-style-type: none"> • Processeurs à faible coût et basse consommation • Utilisés p.ex. dans certains PDA (HP Jornada) et des consoles de jeux (Sega Dreamcast)



Choix de l'architecture – OS et pilotes

- En fonction du système d'exploitation

Système d'exploitation	Architectures
Linux	Compatible avec beaucoup d'architectures à 32 ou 64 bits, notamment: x86 , ARM , PowerPC , MIPS , SuperH et 68000
Windows CE / Windows Mobile	Compatible avec les processeurs 32/64 bits : x86 , ARM , PowerPC , MIPS et SuperH
Windows XP Embedded	Uniquement pour processeurs x86
BSD (NetBSD)	Compatible avec la plupart des processeurs à 32 bits
VxWorks	x86 , ARM , PowerPC , MIPS , SuperH et 68000

- La [disponibilité des pilotes des périphériques](#) est un critère très important lors du choix de l'architecture
 - Beaucoup de constructeurs de périphérique fournissent uniquement des pilotes sous forme d'exécutable (pour une architecture spécifique)



Choix de l'architecture – autres critères

- [Disponibilité de plateformes matérielles](#)
 - Le développement logiciel et le développement matériel sont souvent séparés
 - La disponibilité d'une plateforme matérielle avec les interfaces/fonctionnalités requises est un critère très important
- [Consommation d'énergie](#)
 - Pour les systèmes mobiles
 - Critère « Performance par Watt »
- [Coût du système complet](#)
 - La puce contient typiquement aussi plusieurs contrôleurs d'E/S
 - « System-on-Chip » (SoC): intègrent les composants nécessaires dans un seul circuit intégré
- [Ordre des octets](#)
 - Les protocoles de réseau utilisent le format 'big-endian'
 - La conversion entre 'big-endian' et 'little-endian' est à éviter



Architecture x86

- Caractéristiques
 - Processeurs à 32 bits
 - Format 'little-endian'
 - Architecture CISC
- Fabricants
 - Intel : 80386, 80486, Pentium, ...
 - AMD : Athlon
 - VIA, NEC, Transmeta, ...
- Utilisation
 - PC et laptops
 - Rarement dans les systèmes embarqués
- Avantages
 - Compatible avec tous les OS
 - Disponibilité des pilotes
 - Bonnes performances pour la manipulation des nombres entiers (tri de données, exécution de langages interprétés, ...)
- Inconvénients
 - Prix élevé
 - Consommation d'énergie élevée
 - Format 'little-endian' sur les dispositifs de réseaux



Architecture ARM

- Caractéristiques
 - Processeurs à 32 bits
 - Format 'big-endian' ou 'little-endian'
 - Architecture RISC
 - Souvent sans unité de calcul en virgule flottante
- Modèles
 - Les plus populaires : ARM5, ARM7
 - Pour systèmes performants: ARM9
 - Intel: XScale
 - Basé sur ARM5 et StrongARM
- Avantages
 - Basse consommation d'énergie
 - Bonnes performances
 - Les puces intègrent souvent d'autres composants (E/S) du système
- Support Linux
 - Mûr et stable
 - Intégré dans le noyau officiel
 - Bonne disponibilité de pilotes et d'applications (Java, ...)
- Utilisation
 - 75% des ventes des processeurs 32 bit
 - Très populaires sur les systèmes portables (PDA, téléphones mobiles)
 - Set-Top Box Multimédia
 - Routeurs d'accès bas de gamme



Architecture PowerPC

- Caractéristiques
 - Processeurs à 32 ou 64 bits
 - Format 'big-endian' ou 'little-endian'
 - Architecture RISC
 - Développée par IBM, Apple, Motorola/Freescale
- Modèles
 - Pour PC
 - 750 (PowerPC G3),
 - 7400 (PowerPC G4)
 - 970 (PowerPC G5, 64 bit)
 - **Dispositifs de réseaux**
 - Modèles 40x et 440 d'IBM et d'AMCC
 - **Équipements de réseaux haute performance**
 - MPC 8xx et 8xxx de Motorola
 - Contrôle industriel / automobiles
 - MPC 5xx et 5xxx de Motorola
- Avantages
 - Excellente performance de calcul en virgule flottante
 - Les puces intègrent souvent d'autres composants (E/S) du système
- Support Linux
 - Bon support au niveau du noyau et des pilotes
- Utilisation
 - Super-ordinateurs très haute performance
 - Consoles de jeux (Xbox 360, PlayStation 3, Nintendo Revolution)
 - Contrôle industriel (voitures)
 - Dispositifs de réseaux
 - Quelques routeurs d'accès Cisco
 - Cartes d'extension Cisco



Architecture MIPS

- Caractéristiques
 - Processeurs à 32 ou 64 bits
 - Principalement 'big-endian'
 - Architecture RISC
- Modèles
 - Séries R4000 (1991) et R4600 (1994)
 - Anciennes stations de travail
 - **Quelques routeurs Cisco**
 - **Équipements de réseaux basse performance**
 - Série R5000/RM7000 (1996)
 - Imprimantes
 - **Plusieurs de routeurs Cisco**
 - Équipements de réseaux
 - R10000/R12000/R14000/R16000 (après 1996)
 - Stations de travail
- Avantages
 - Basse consommation d'énergie
 - Bonnes performances
 - Disponibilité de beaucoup d'outils de développement
- Support Linux
 - Noyau disponible pour certaines séries
 - Support relativement limité
 - Pas de machine virtuelle Java
- Utilisation
 - Domaine d'application très large
 - Système à ultra basse consommation
 - Smartcards
 - Consoles de jeux Playstation 1 et 2
 - **Plusieurs routeurs Cisco**



Architecture Hitachi SuperH (SH)

- Caractéristiques
 - Processeurs à 32 ou 64 bits
 - Architecture RISC
- Modèles
 - Séries SH-1 et SH-2
 - Processeurs basse performance
 - Utilisés pour le contrôle de périphériques
 - Non pas supportés par Linux
 - Séries SH-3 et SH-4
 - Utilisé p.ex. dans quelques PDA
 - Relativement récents
 - Populaires dans les systèmes embarqués
 - Série SH-5
 - Processeurs à 64 bits
 - Pas encore supporté par Linux
- Avantages
 - Basse consommation d'énergie
 - Coût faible
- Support Linux
 - Limité au noyau
 - Quelques distributions commencent à supporter cette architecture
 - Pas de machine virtuelle Java



Architecture Motorola 68000 (m68k)

- Caractéristiques
 - Processeurs à 32 bits
 - Architecture CISC
- Modèles
 - 68020, 68030, 68040 et 68060
 - Supportés par Linux
 - Variantes
 - Dragonball (premiers Palm)
 - ColdFire
- Avantages
 - Faible coût du processeur
 - Disponibilité de beaucoup d'outils de développement
- Support Linux
 - Support pour quelques modèles mais non pas tous
 - Debian a été porté sur m68k
- Utilisation
 - Processeur très populaire dans les années 90
 - Amiga, Atari, Apple Macintosh
 - Maintenant largement supplanté par ARM, MIPS, SH



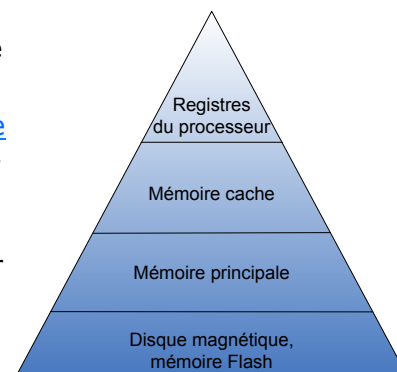
Architecture Freescale ColdFire

- Caractéristiques
 - Processeur très récent
 - Architecture RISC
 - Même jeux d'instructions que m68k
- Modèles
 - Certains modèles spécialement conçus pour les dispositifs de réseaux
 - Intègrent p.ex. des fonctions de cryptage
 - Populaires pour firewall, passerelles VPN, Set-Top Box multimédia
- Avantages
 - Spécialement conçu pour les systèmes embarqués
 - Intègre beaucoup de contrôleurs d'E/S (USB, mémoire, PCI, ...)
 - Basse consommation d'énergie
- Support Linux
 - Pas encore supporté
- Utilisation
 - Dispositifs de réseaux
 - Systèmes embarqués



Mémoire

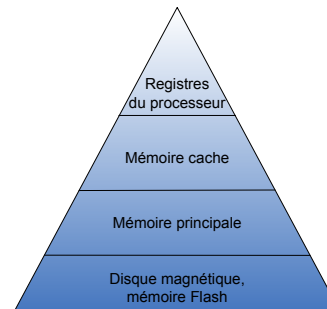
- Difficulté principale
 - Les ordinateurs et les systèmes embarqués doivent être rapides mais peu coûteux
 - La mémoire rapide est très chère
- Solution : Hierarchie de mémoire
 - Peu de mémoire très rapide pour les données utilisées immédiatement
 - Beaucoup de mémoire lente pour le stockage des données



Hiérarchie de mémoire – Systèmes embarqués

Types de mémoire

1. Registres du processeur
 - Directement intégrés dans la puce du processeur
2. Mémoire cache
 - Contient les données sur lesquelles le processeur travaille
 - Directement intégrée dans la puce du processeur
3. Mémoire principale (RAM ou ROM)
 - Accessible via le bus, sans avoir recours à un contrôleur d'E/S
4. Mémoire non volatile
 - Principalement de la mémoire flash



Caractéristiques des différents niveaux

- Temps d'accès aux données
- Capacité de stockage
- Prix par octet



Mémoire cache

- Tampon entre le processeur et la mémoire principale
 - Travaille à la même vitesse que le processeur
 - Le processeur peut accéder aux données en un seul cycle d'horloge
 - Gestion de la mémoire cache est directement intégrée dans la logique du processeur
 - N'est pas visible du système d'exploitation

Réalisation

- Souvent à deux niveaux
 - Cache L1 : plus rapide mais petit
 - Cache L2 : plus lent mais contient plus de données (1-2 Mo)
- Utilisation de la mémoire **SRAM** (mémoire vive statique)
 - Très rapide, temps d'accès de quelques nanosecondes
 - Consommation d'énergie élevée
 - Chère



Mémoire principale

- Accessible par le processeur sans passer par un contrôleur d'E/S
- Typiquement de la mémoire RAM
 - Sur les systèmes embarqués aussi de la mémoire ROM
- Capacités typiques (système embarqués)
 - 2 Mo – 64 Mo
- Utilise de la mémoire DRAM (mémoire vive dynamique)
 - Le contenu doit être rafraîchi périodiquement (quelque ms)
 - Plus lente que la SRAM, mais moins chère



Mémoire DRAM

- Principalement SDRAM (DRAM synchrone) et ses variantes DDR, DDR2 et DDR3-SDRAM
 - Répond à un requête après un délai fixe et connu
 - Bus mémoire
 - Travaille typiquement à une fréquence de 100 – 400 MHz
 - Largeur : 64 bits

SDRAM normale

- Fréquence bus 100 MHz ou 133 MHz
- Débit de transfert de 800 Mo à 1'066 Mo
- Temps d'accès
 - Env. 40 ns pour la première cellule
 - Env. 6 – 12 ns pour la suite d'un transfert



Mémoire DDR-SDRAM et DDR2-SDRAM

- **DDR-SDRAM**
 - « *Double Data Rate SDRAM* »
 - Double le débit par rapport à SDRAM, avec la même fréquence du bus
 - Souvent utilisée dans les PC et les systèmes embarqués modernes
- **DDR2-SDRAM**
 - Double le débit par rapport à DDR-SDRAM avec la même fréquence du bus

Types

Nom	Fréquence du bus mémoire	Débit de transfert
PC1600	100 MHz	1600 MB/s
PC2100	133 MHz	2100 MB/s
PC2700	166 MHz	2700 MB/s
PC3200	200 MHz	3200 MB/s

Types

Nom	Fréquence du bus mémoire	Débit de transfert
PC2-3200 (DDR2-400)	200 MHz	3200 MB/s
PC2-4200 (DDR2-533)	266 MHz	4200 MB/s
PC2-5300 (DDR2-667)	333 MHz	5300 MB/s
PC2-6400 (DDR2-800)	400 MHz	6400 MB/s



Mémoire RDRAM

- « Rambus DRAM »
- Était prévue comme successeur à SDRAM
 - Rarement utilisée
- Bus mémoire
 - Largeur : 16 bits
 - Fréquence : 800 MHz
 - Débit de transfert : 1600 Mo/s
 - Temps d'accès long (45 ns)
- Prochaine génération : XDR DRAM
 - Débits de transferts jusqu'à 16 Go/s
 - Utilisée p.ex. dans la Playstation 3



Mémoire non volatile

- Les systèmes embarqués utilisent principalement de la mémoire flash et non pas des disques magnétiques

Critère	Mémoire Flash	Disque dur
Capacité	8 MB - X GB ? TB	1 GB - 50 X GB 4 TB
Prix par GB	\$10 \$3 X 0 \$1	\$1 \$0 X 1 \$0.10
Temps d'accès (lecture, accès aléatoire)	< 50 µs (NAND) < 100 ns (NOR)	10ms
Débit de transfert (lecture)	10 - 100 Mo/s	50 - 500 Mo/s
Durée de vie	lecture : infinie écriture : 10 ⁴ - 10 ⁶ cycles	quelques années
Consommation d'énergie	< 100 mW (lecture, écriture) minime au repos	2W - 5W (lecture, écriture) 1W au repos
Poids	10g	100g - 1kg
Taille	faible	grand
Résistance aux chocs	très grande	faible



Mémoire flash

- Mémoire à semiconducteurs non volatile et réinscriptible
- Deux types : NOR et NAND

Caractéristique	Mémoire flash NOR	Mémoire flash NAND
Temps lecture, accès aléatoire	rapide < 100 ns	lent < 50 µs
Temps lecture, accès séquentiel	< 30 ns/byte (> 30 Mo/s)	< 100 ns/byte (> 10 Mo/s)
Temps écriture	lent > 5 µs/byte (< 0,3 Mo/s)	rapide > 500 ns/byte (> 2 Mo/s)
Durée de vie	10'000 - 100'000 cycles d'écriture	1'000'000 cycles d'écriture
Avantages	•Accès aléatoire à la mémoire •Lecture rapide •Peu d'erreurs bit	•Écriture rapide •Meilleure densité (octets/cm ²) •Meilleure durée de vie
Inconvénients	•Écriture lente •Courte durée de vie	•Lecture lente •Erreurs de bits fréquentes
Applications	•Systèmes embarqués : chargeur d'amorçage, OS, paramètres de configuration	•Cartes CompactFlash, SD, MMC •Lecteurs MP3, clés mémoire USB



Interfaces

- **CFI (*Common Flash Interface*)**
 - Interface la plus souvent utilisée dans les systèmes embarqués
 - Basée sur de la mémoire NOR
 - Supportée par le noyau Linux

- **DOC (*DiskOnChip*)**
 - Populaire dans les systèmes x86
 - Utilise de la mémoire NAND
 - Supportée par le noyau Linux

- **CompactFlash**
 - Populaire pour les appareils photo numériques et les PDA
 - Utilise une interface similaire à IDE/ATA
 - Peut être utilisée comme un disque dur
 - Maintenant basée sur de la mémoire NAND

