Introduction à Linux embarqué

Thomas Petazzoni
Free Electrons
http://free-electrons.com/

Intervenant

- Thomas Petazzoni
  - Ingénieur en informatique diplomé de l'UTBM (2000 – 2005)
  - Passionné de système
  - Ingénieur Linux embarqué chez Free Electrons (développement et formation)
  - Utilisateur de Logiciels Libres depuis 1998
  - Fortement impliqué dans le monde du Logiciel Libre

Embarqué ?

Un système embarqué peut être défini comme un système électronique et informatique autonome, qui est dédié à une tâche bien précise. Ses ressources disponibles sont généralement limitées. Cette limitation est généralement d'ordre spatial (taille limitée) et énergétique (consommation restreinte).

Wikipédia, http://fr.wikipedia.org/wiki/Système_embarqué

Embarqué ?

- Une définition assez générale
  - Recouvre des systèmes de types très différents
  - Frontière floue avec les systèmes « classiques »
- Produits de grande consommation
  - Routeurs personnels, lecteurs de DVD, appareils photos numériques, GPS, camescopes, téléphones, micro-onde, four
- Produits industriels
  - Commande de robot, alarmes, systèmes de surveillance, contrôle de machines, voiture, avion, satellite

Embarqué ?

Linux embarqué

- Le monde du Logiciel Libre offre toute une palette d'outils pour le développement de systèmes embarqués
- Avantages
  - Réutilisation de composants existants pour le système de base, permet de se focaliser sur sa valeur ajoutée
  - Composants de bonne qualité, pour certains
  - Contrôle complet sur les composants, modifications sans contraintes
  - Support de la communauté: tutoriels, listes
  - Faible coût, et notamment pas de royalties par unité vendue
  - Potentiellement moins de problèmes juridiques
  - Accès plus facile aux logiciels et outils

Linux Embarqué

- Parts de marchés actuelles des OS embarqués
  - OS propriétaire: 39%
  - Linux embarqué gratuit: 29%
  - Linux embarqué avec support commercial: 11%
  - OS maison: 7%
  - Pas d'OS: 11%
- Pour les projets futurs
  - Linux embarqué gratuit: 71%
  - Linux embarqué avec support commercial: 16%
  - OS propriétaire: 12%
  - OS maison: 1%
- Source: Venture Development Corp, octobre 2007

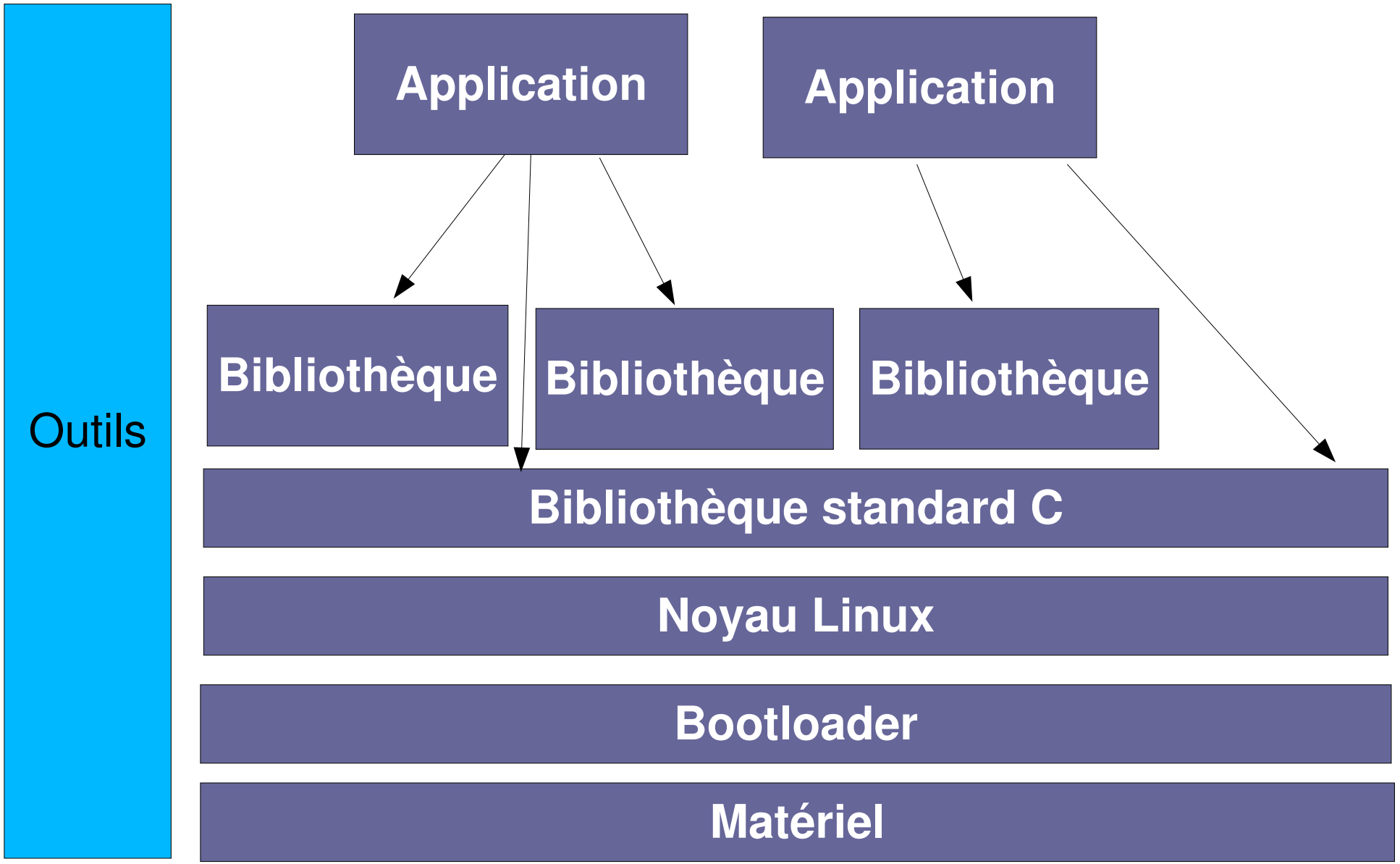
Linux Embarqué

- GPS: Tomtom et Garmin
- Routeurs personnels: Linksys
- PDA: Zaurus, Nokia N8x0
- Téléviseurs, camescopes, lecteurs de DVDs, etc: Sony
- Téléphone: Motorola, OpenMoko
- Machines industrielles: éoliennes, contrôle grues, etc.
- Et plein d'autres usages que l'on imagine même pas...

Ça fonctionne avec Linux, mais à quoi ça sert ?

À traire les vaches !

Architecture de base



Matériel pour l'embarqué

- Le matériel des systèmes embarqués est souvent différent de celui d'un système classique
  - Architecture processeur différente. Souvent ARM, MIPS ou PowerPC. x86 est aussi utilisé.
  - Stockage sur mémoire Flash, de type NOR ou NAND, de capacité souvent relativement réduite (quelques Mo à quelques centaines de Mo)
  - Capacité mémoire réduite (quelques Mo à quelques dizaines de Mo)
  - Intégration dans le CPU de nombreux périphériques
  - De nombreux bus d'interconnexion peu courants sur le desktop: I2C, SPI, SSP, CAN, etc.
- Cartes de développement à partir d'une centaine d'Euros
  - Souvent utilisées comme base pour le design final de la carte qui sera utilisée

Exemples

- **Picotux 100**
  - ARM7 55 Mhz, Netsilicon NS7520
  - 2 Mo de Flash
  - 8 Mo de RAM
  - Ethernet
  - 5 GPIO
  - Série

- **OpenMoko**
  - ARM 920T 400 Mhz, Samsung 2442B
  - 2 Mo de Flash NOR
  - 128 Mo de RAM
  - 256 Mo de Flash NAND
  - Touchscreen 640x480, Bluetooth, GSM, série, GPS, son, deux boutons, Wifi, USB, etc.

Émulation

- Qemu permet l'émulation de nombreuses architectures CPU
  - X86, bien sûr, mais aussi PowerPC, ARM, MIPS, SPARC, etc.
  - Commande: `qemu-system-ARCH`
- Émulation complète: processeur, mémoire et périphériques
- Pour chaque architecture, plusieurs plateformes sont proposées
  - Pour ARM: Integrator, Versatile, PDA Sharp, Nokia N8x0, Gumstix, etc.
  - `qemu-system-arm -M ?`
- Web: http://bellard.org/qemu/

Besoins minimaux

- Un processeur supporté par le compilateur gcc et le noyau Linux
  - Processeur 32 bit
  - Les processeurs sans MMU sont également supportés, au travers du projet uClinux
- Quelques mega-octets de RAM, à partir de 4 Mo, 8 Mo sont nécessaires pour pouvoir faire vraiment quelque chose.
- Quelques mega-octets de stockage, à partir de 2 Mo, 4 Mo pour faire vraiment quelque chose.
- Linux n'est donc pas fait pour les petits micro-contrôleurs qui ne possèdent que quelques dizaines ou centaines de Ko de Flash et de RAM
  - Sur le métal, pas d'OS
  - Systèmes réduits, type FreeRTOS

Chaîne de cross-compilation

- L'outil indispensable pour le développement embarqué sur des architectures non-x86.
- Contient des outils
  - S'exécutant sur une machine hôte (la machine du développeur, généralement x86)
  - Générant/manipulant du code pour machine cible (généralement non x86)
- « Outils binaires »
  - Binutils
  - Ld, as, nm, readelf, objdump, etc.
- Bibliothèque standard C
  - glibc, uClibc ou eglibc
- Compilateur C/C++
  - gcc
- Bibliothèques mathématiques
  - gmp, mpfr
- Débogueur
  - gdb

Chaîne de cross-compilation

- À la main
  - Implique de configurer et compiler tous les éléments dans le bon ordre
  - Les architectures non-x86 ne sont pas toujours parfaitement fonctionnelles dans une version stable de binutils ou gcc, besoin d'appliquer des patches
- Pré-compilées
  - Solution la plus simple
  - Code Sourcery est un fournisseur réputé, sous contrat avec ARM et MIPS
- Génération avec des scripts
  - Crosstool-ng, http://ymorin.is-a-geek.org/dokuwiki/projects/crosstool
  - Buildroot, http://buildroot.uclibc.org

Bootloader

- Sur PC : LILO ou Grub
  - Le BIOS fait une bonne partie du travail et met à disposition du bootloader des routines pour le chargement de données depuis le disque
- Sur les architectures embarquées, pas de BIOS
  - Le bootloader doit tout faire, y compris l'initialisation du contrôleur mémoire
  - Lors de la mise sous tension, le CPU commence l'exécution à une adresse fixée
  - Le design matériel fait en sorte qu'une partie de la Flash soit mappée à cette adresse
  - Le point d'entrée du bootloader est stocké à cette adresse dans la Flash: il prend le contrôle du matériel dès sa mise sous tension

Bootloader: U-Boot

- Il existe de nombreux bootloaders pour les architectures non-x86, certains plus ou moins spécifiques à certaines architectures ou plateformes
- Le bootloader libre le plus utilisé est **Das U-Boot**
- Il supporte un grand nombre d'architectures, est aisément configurable et modifiable
- Fonctionnalités de base
  - Téléchargement du noyau et du système de fichiers par le réseau (protocole TFTP)
  - Protection, effacement et écriture sur la Flash
  - Exécution du noyau
  - Outils de diagnostics: lecture/écriture mémoire, test de périphériques, etc.
- http://www.denx.de/wiki/U-Boot

Noyau Linux

- Composant essentiel d'un système embarqué
- Les éléments de base du système: gestion des processus, de la mémoire, systèmes de fichiers, protocoles réseau, etc.
- Contient les pilotes pour la plupart des périphériques, ainsi que les piles de protocoles (USB, Bluetooth, Wifi, I2C, SPI, CAN, etc.)
  - En général, seuls les pilotes en lien avec le matériel sont à développer
- Le noyau distingue trois niveaux pour le support du matériel embarqué
  - L'architecture: ARM, MIPS, PowerPC
  - Le processeur: Samsung SC2442 par ex.
  - La machine: OpenMoko Freerunner
- http://kernel.org

Noyau Linux

- Le noyau représente souvent une partie significative du travail (support du CPU et de tous les périphériques)
  - Le vendeur de la carte de développement fourni généralement un noyau déjà adapté
  - Si le design est inspiré d'une carte de développement, les modifications seront en général relativement simples
  - Sinon, mettre les mains dans le camboui (le source est disponible!)
- Le noyau est hautement configurable
  - Des milliers d'options disponibles
  - Un fichier de configuration est fourni pour chaque machine, il est personnalisable

À propos du noyau Linux

- Linux Device Drivers, Jonathan Corbet, Alessandro Rubini, Greg KH, chez O'Reilly
  - La référence pour le développement de pilotes
  - http://lwn.net/Kernel/LDD3/
- Essential Linux Device Drivers, Sreekrishnan Venkateswaran
  - Couvre un certain nombre de pilotes non couverts par LDD
- Linux Kernel Development, Robert Love
  - Couvre le fonctionnement interne du noyau: gestion mémoire, processus, ordonnancement, systèmes de fichiers, etc.

Bibliothèque standard C

- La bibliothèque de base qui s'intercale entre d'un coté toutes les autres bibliothèques et applications et d'un autre coté le noyau
- Elle fait partie de la chaîne de cross-compilation
- Trois solutions
  - GNU Libc, la version standard utilisée sur tous les systèmes desktop/serveur. Fonctionnalités complètes, mais grosse.
  - uClibc, une ré-écriture complète d'une libc plus simple, optimisée pour la taille et configurable en fonctionnalités
  - eglibc, une reprise de la GNU Libc ajoutant plus de flexibilité au niveau de la configuration
- Avec la libc sur un système embarqué, on a déjà une API de programmation riche pour des applications non-graphiques

Busybox

- Besoin d'un ensemble d'outils de base pour la cible
- cp, ls, mv, mkdir, rm, tar, mknod, wget, grep, sed et tous les autres
- Une solution: utiliser les outils GNU classiques
  - fileutils, coreutils, tar, wget, etc.
  - Inconvénient: beaucoup d'outils, pas conçus pour l'embarqué
- Une meilleure solution: Busybox
  - Tous les outils dans un seul programme binaire
  - Des outils aux fonctionnalités réduites... et à taille réduite
  - Extrêmement configurable
  - Des liens symboliques pour les utiliser comme d'habitude
  - http://www.busybox.net
  - Utilisé dans de très nombreux de produits du marché

Bibliothèques graphiques

- Des solutions graphiques de bas niveau
  - Le framebuffer géré par le noyau Linux
  - DirectFB, qui offre une interface de programmation plus abordable
  - X.org Kdrive, un serveur X simplifié
  - Nano-X
- Les solutions graphiques de plus haut niveau
  - Qt, peut fonctionner directement sur le framebuffer du noyau ou d'un serveur X
  - Gtk, peut fonctionner au-dessus de DirectFB ou d'un serveur X
  - WxEmbedded, au-dessus de X, DirectFB ou Nano-X

Bibliothèques et outils

- En théorie, toutes les bibliothèques et tous les outils libres peuvent être cross-compilés et utilisés sur une plateforme embarquée
  - Une fois le système en place, c'est juste du Linux !
  - Permet de disposer de nombreuses fonctionnalités rapidement
- En pratique, la cross-compilation n'est pas toujours aisée, car pas prévue par les développeurs originaux
  - Bien qu'étant horribles, les autotools bien utilisés sont la meilleure voie vers un logiciel cross-compilation-aware
- Des outils plus spécifiquement destinés aux plateformes limitées
  - dropbear à la place d'OpenSSH comme client et serveur SSH
  - Nombreux serveurs HTTP réduits à la place d'Apache
  - Éditeurs de texte

Exemple de système embarqué

- Cadre photo numérique
- Matériel
  - ARM SoC (avec DSP, audio, contrôleur LCD, contrôleur MMC/SD, contrôleur NAND)
  - Un LCD 800x600
  - Des boutons
  - Un slot MMC
  - Flash NAND
  - Haut-parleurs
- Objectif: utiliser le LCD pour afficher des images stockées sur une carte SD (avec effets de transitions 3D et rotation/redimensionnement des images), et jouer des fichiers MP3

Example de système embarqué

- Composants logiciels utilisés
  - *U-Boot* pour le bootloader
  - Noyau *Linux*, et bibliothèque C, évidemment !
  - *udev* / *HAL* / *D-Bus* pour la notification d'insertion de carte SD et la communication inter-processus
  - *libjpeg* pour la manipulation des images JPEG et jpegtran pour la rotation / redimensionnement
  - *libmad* pour la lecture de fichiers MP3
  - *libid3* pour la lecture des tags ID3
  - *vincent*, une implémentation OpenGL ES 1.1, au dessus du framebuffer
  - *freetype* pour le rendu du texte
- Développement de l'application qui utilise ces différents éléments pour offrir les fonctionnalités souhaitées

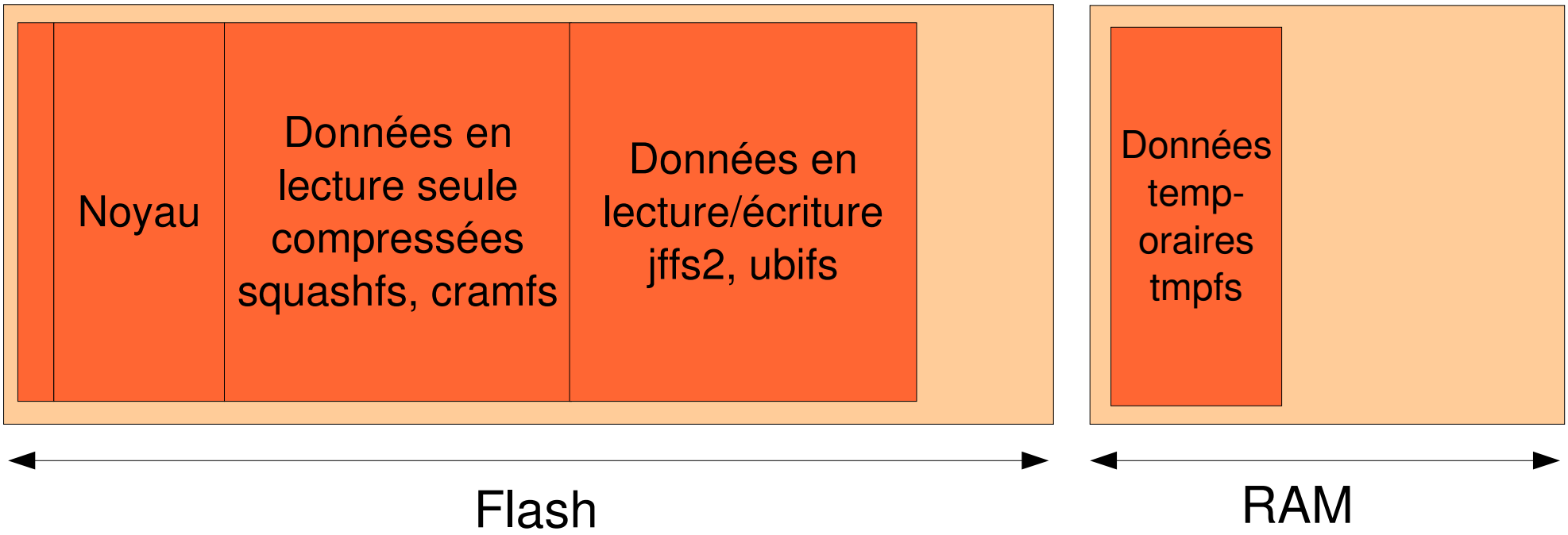
Outils de construction

- Plusieurs approches pour la construction d'un système embarqué
  - À la main
    - Pénible, peu reproductible, difficulté de trouver les bonnes options, d'appliquer les bons patches, etc.
  - Par des outils de construction
    - Buildroot
    - OpenEmbedded
    - PTXdist
  - Par des distributions
    - Gentoo Embedded
    - Debian Embedded

Stockage

- Les Flash des systèmes embarqués sont généralement des flash brutes
- Aucun matériel ne s'occupe du « wear leveling », c'est à dire la répartition des écritures
- Ces flash sont considérées par le noyau comme des MTD, Memory Technology Devices
- Des systèmes de fichiers spécifiques doivent être utilisés
- Aujourd'hui: JFFS2, UBIFS
- Demain: LogFS, AXFS
- Autres systèmes de fichiers pour l'embarqué: squashfs et cramfs, pour les parties en lecture seule, tmpfs pour les données temporaires

Stockage



Temps réel

- Une contrainte dans certains systèmes embarqués est la prédictabilité du temps de réponse
  - Capture de données ou réaction suite à un évènement qui doivent avoir lieu dans un temps borné
- Nécessite un système dit « temps réel »
- Le temps réel n'a **rien à voir** avec la performance
  - Les bornes temporelles à garantir peuvent être larges, mais doivent être garanties
  - Un système temps réel est parfois globalement plus lent qu'un système à temps partagé classique

Temps réel et Linux

- Linux n'est pas conçu à l'origine comme un système temps réel, mais comme un système à temps partagé
  - Objectif: maximiser l'utilisation des ressources pour maximiser le rendement global des applications
- Deux approches pour apporter le temps réel au noyau
  - Une approche dans le noyau. Objectif: réduire au fur et à mesure les zones pendant lesquelles le noyau ne réagit pas à un évènement extérieur.
    - Linux-rt, patch maintenu par Ingo Molnar et Thomas Gleixner
  - Une approche de co-noyau, où un mini-noyau temps réel se charge de traiter les évènements importants, en garantissant des temps de réponse. Linux tourne en tâche de fond.
    - RTAI, Xenomai

Déboguage

- Pour les parties bas-niveau, bootloader et noyau, utilisation du JTAG
  - Bus qui permet de contrôler directement le processeur
  - Besoin d'une sonde qui se connecte à la carte
  - Coté machine de développement, s'utilise en général au travers de gdb (cross-compilé)
- Pour les applications utilisateur
  - Utilisation de gdbserver sur la machine cible
  - Et d'un gdb cross-compilé sur la machine de développement, qui contrôle l'exécution de l'application à distance grâce à gdbserver

En savoir plus

- Supports de formation de Free-Electrons, disponible sous licence libre
  - Intégration de système Linux embarqué
  - Développement de code noyau
- Livre « Building Embedded Linux Systems », O'Reilly, 2008
- Livre « Embedded Linux Primer », Prentice Hall, 2006
- Site Linux Devices, http://www.linuxdevices.com
- Conférences ELC et ELCE, vidéos mises à disposition par Free-Electrons
- Assez peu de littérature en français
  - Articles dans Linux Magazine
  - Livre « Linux Embarqué » par Pierre Ficheux, un peu obsolète car publié en 2002