

Linux et les logiciels libres pour l'embarqué

Matthieu Herrb



LAAS-CNRS



Université
de Toulouse

Envol 2014

<http://homepages.laas.fr/matthieu/talks/envol14-13e.pdf>



Ce document est sous licence :

Creative Commons Paternité - Partage à l'Identique 3.0 non transposé.

Le texte complet de cette licence est disponible à l'adresse :

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>

Ce document ré-utilise des éléments de :

- ▶ la présentation de Pierre Ficheux « état de l'art des systèmes embarqués » aux JDEV 2013.
- ▶ les supports de cours de Free Electron « Embedded Linux » et « Yocto Project and OpenEmbedded development »

Matthieu Herrb

Ingénieur de Recherche au LAAS du CNRS à Toulouse

Responsable de la plateforme robotique

Chargé de la sécurité des systèmes d'information

Activités dans le logiciel libre en dehors de la robotique :

- ▶ [OpenBSD](#)
- ▶ [X.Org](#)
- ▶ [Tetaneutral.net](#)

`matthieu.herrb@laas.fr`

Introduction aux systèmes embarqués

Le logiciel libre dans l'embarqué

Outils de développement pour l'embarqué

Introduction aux systèmes embarqués

Le logiciel libre dans l'embarqué

Outils de développement pour l'embarqué

- ▶ Association matériel + logiciel
- ▶ Tout ce qui n'est pas perçu comme un ordinateur
 - ▶ équipements industriels ou scientifiques
 - ▶ biens de consommation
- ▶ Ciblé : limité aux fonctions pour lesquelles il a été créé
- ▶ Fiable et sécurisé : autonomie, processus sensible
- ▶ Longue durée de vie
- ▶ Optimisé (processeurs moins puissants, contraintes temps-réel)
- ▶ Pas toujours un OS

Le temps intervient dans la correction (validité) du programme :

- ▶ réagir en un temps adapté aux événements externes,
- ▶ fonctionnement en continu sans réduire le débit du flot d'informations traité,
- ▶ temps de calculs connus et modélisables.
- ▶ **Latence** maîtrisée.

Outils :

- ▶ horloges matérielles, interruptions, etc.
- ▶ style de programmation adaptés : multi-tâches, événements,
- ▶ approche synchrone ([Lustre](#), [Esterel](#),...)
- ▶ langages spécifiques ([SDL](#), [MISRA C](#) etc.)
- ▶ outils de modélisation : [AADL](#), logique temporelle, réseaux de Petri,....

Logiciel embarqué = temps réel ?

- ▶ Les applications embarquées historiques étaient TR
- ▶ Les systèmes d'exploitation embarqués propriétaires sont TR (VxWorks, ...) → RTOS
- ▶ L'apparition des OS libres dans l'industrie et dans l'embarqué modifie la donne !
 - ▶ Linux est utilisable dans l'industrie
 - ▶ Linux n'est pas TR
 - ▶ Linux peut être modifié pour être TR (PREEMPT-RT, Xenomai)
 - ▶ Il existe des systèmes TR légers et libres (RTEMS, FreeRTOS,...)

Deux problématiques / domaines d'expertise distincts :

- ▶ sécurité informatique (ISO 27000 & co):

- ▶ Disponibilité
- ▶ Intégrité
- ▶ Confidentialité
- ▶ Auditabilité

Attaquant → Bug → Intrusion

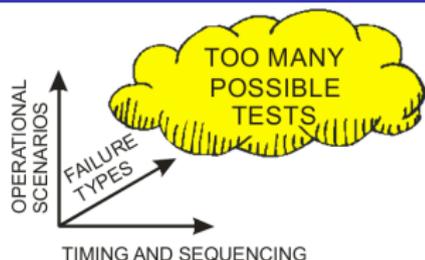
- ▶ sûreté de fonctionnement :

- ▶ absence de conséquence pour l'utilisateur et l'environnement

Faute → Erreur → Défaillance

- ▶ La certification concerne
 - ▶ Tests fonctionnels et couverture de code
 - ▶ Bonnes Pratiques
 - ▶ Traçabilité
 - ▶ Documentation
- ▶ Exemples de normes pour la sûreté
 - ▶ DO-178C : aéronautique
 - ▶ 5 niveaux de criticité allant de « catastrophic » à « no effect »
 - ▶ ISO 26262 : automobile
 - ▶ ASIL Automotive System Integrity Level de S4 à S0
 - ▶ IEC 61508 : sûreté de fonctionnement en général
 - ▶ SIL (System Integrity Level) de 4 à 1
 - ▶ IEC 60601 : médical

Systèmes embarqués critiques : tests ?



- ▶ Les tests sont utiles et importants
- ▶ Mais il est impossible de tout tester au niveau système
 - ▶ Trop de combinaisons de conditions opérationnelles, de séquences d'événements
 - ▶ Trop de types de défaillances, en partie intermittentes

Pour trouver une défaillance dont la probabilité d'occurrence est de $10^{-8}/h$ il faut plus de 10^8h de tests.

⇒ Impossible de prouver la sécurité par les tests seuls.

Processeurs :

- ▶ micro-contrôleurs divers : monde industriel, hobbyistes (AVR / Arduino)
- ▶ ARM :
 - ▶ Cortex M (sans MMU), systèmes industriels,
 - ▶ Cortex A (MMU), Exynos, i.MX, Allwinner,... : téléphones, tablettes, internet des objets,
- ▶ MIPS : équipements réseau, imprimantes,...
- ▶ SPARC : spatial (Leon)
- ▶ x86...

Bus dédiés :

- ▶ CAN : bus temps réel (contrôle de process, automobile,...)
- ▶ I2C, SPI, OneWire : liaisons séries simples avec E/S bas débit

Introduction aux systèmes embarqués

Le logiciel libre dans l'embarqué

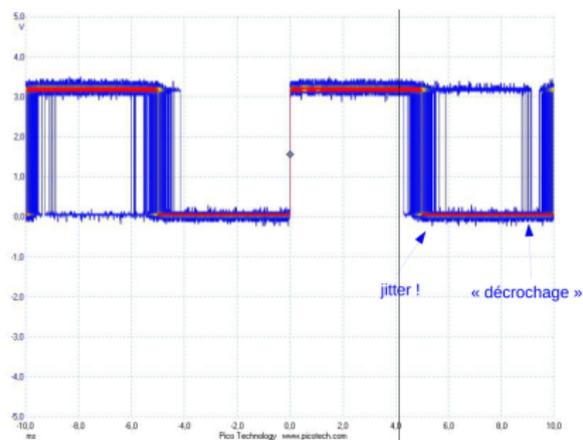
Outils de développement pour l'embarqué

- ▶ Le logiciel libre a pris une part importante des systèmes embarqués
 - ▶ Outils (GNU toolchain)
 - ▶ OS (Linux, RTEMS,...)
 - ▶ Ateliers de développement (Eclipse,...)
- ▶ La plupart des éditeurs commerciaux fournissent également (ou uniquement) des composants basés sur du logiciel libre.
- ▶ Problématique des licences...

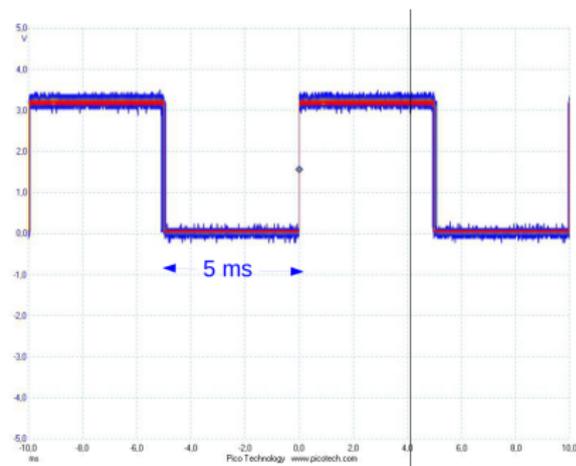


- ▶ Réservé aux systèmes *complexes*
 - ▶ 32 bits minimum
 - ▶ Gestion complex de la mémoire (MMU, pagination,...)
 - ▶ Empreinte mémoire importante : 2 Mo pour μ CLinux, 4 Mo pour Linux
 - ▶ Consommation mémoire vive : 16 Mo minimum
- ▶ Nécessite des extensions (PREEMPT-RT ou Xenomai) pour temps-réel
- ▶ Incompatible avec les systèmes critiques
- ▶ Souvent utilisé pour les outils, simulateurs et dans des architectures « mixtes »
- ▶ Nombreux nouveaux domaines de l'embarqué (multimédia, réseau,...) où il convient parfaitement.

Sur un système chargé :



Noyau standard



Avec co-noyau Xenomai

- ▶ Xenomai est un sous-système temps-réel de Linux
 - ▶ Programmation de tâches en espace utilisateur,
 - ▶ API d'application et de pilotes temps-réel (RTDM) dédiés.
- ▶ intégré au noyau Linux → « Real-time sub-system »
- ▶ support de nombreuses architectures
- ▶ dispose de « Skins » permettant d'émuler des API temps-réel (POSIX, VxWorks, VRTX,...)
- ▶ Plus complexe à mettre en œuvre que PREEMPT-RT mais performances 5 à 10 fois supérieures
- ▶ licence GPL (cœur, LGPL (interfaces, espace utilisateur))

- ▶ RTEMS = **R**ea**T**ime **E**xecutive for **M**ultiprocessor **S**ystems
- ▶ initialement « Missile Systems » puis « Military Systems »
- ▶ Exécutif temps-réel embarqué diffusé sous licence libre (GPL avec exception)
- ▶ Pas exactement un système d'exploitation car mono-application (mais *multi-thread*)
- ▶ Programmation C, C++, Ada
- ▶ Plus de 100 BSP disponibles pour 20 architectures
- ▶ API RTEMS « classique » ou POSIX
- ▶ Utilisé par Airbus/EADS, ESA, NASA, NAVY,...

- ▶ Système d'exploitation « libre » basé sur un noyau Linux modifié par Google
- ▶ Basé sur [Dalvik](#), une machine virtuelle Java optimisée pour l'embarqué
- ▶ Graphique accéléré basé sur [OpenGL ES](#)
- ▶ Support multimédia (audio/video)
- ▶ Environnement de développement intégré basé sur Eclipse (Émulateur, déboguer) → [ADT](#)

Utilisable pour des projets :

- ▶ avec IHM
- ▶ sans TR dur

Introduction aux systèmes embarqués

Le logiciel libre dans l'embarqué

Outils de développement pour l'embarqué

Définition :

- ▶ Machine hôte : qui exécute les outils de développement
- ▶ Machine cible : qui exécute le système et/ou les applications embarquées

Outils nécessaires :

- ▶ compilateur, éditeur de liens,
- ▶ débogueur, simulateur
- ▶ EDI/IDE (Eclipse)
- ▶ sondes JTAG
- ▶ outils de fabrication de paquets et d'images disques bootables
- ▶ gestion de version

Architecture type

PC de développement

IDE
Compilateurs
Débogueur
...

Système embarqué

Application

Application

Serveur debug

Bibliothèque

Outils

Bibliothèque

Bibliothèque

Bibliothèque

Bibliothèque C

Noyau Linux

Boot Loader



C'est un outil qui :

- ▶ crée la distribution à partir des sources des composants adaptés en appliquant des « patches »
 - ▶ Il ne s'agit pas de *distribution* mais d'outil de *création de distribution*
- ▶ ne fournit pas les sources mais les *règles de production* et prend en compte les dépendances
- ▶ peut produire la chaîne de compilation croisée (gcc)
- ▶ produit les différents éléments de la distribution
 - ▶ image du bootloader
 - ▶ noyau Linux
 - ▶ image du système de fichiers

▶ Yocto / OpenEmbedded

- ▶ Moteur écrit en python
- ▶ Très puissant mais très lourd
- ▶ Basé sur des « recettes » (outil `bitbake`)



▶ Buildroot

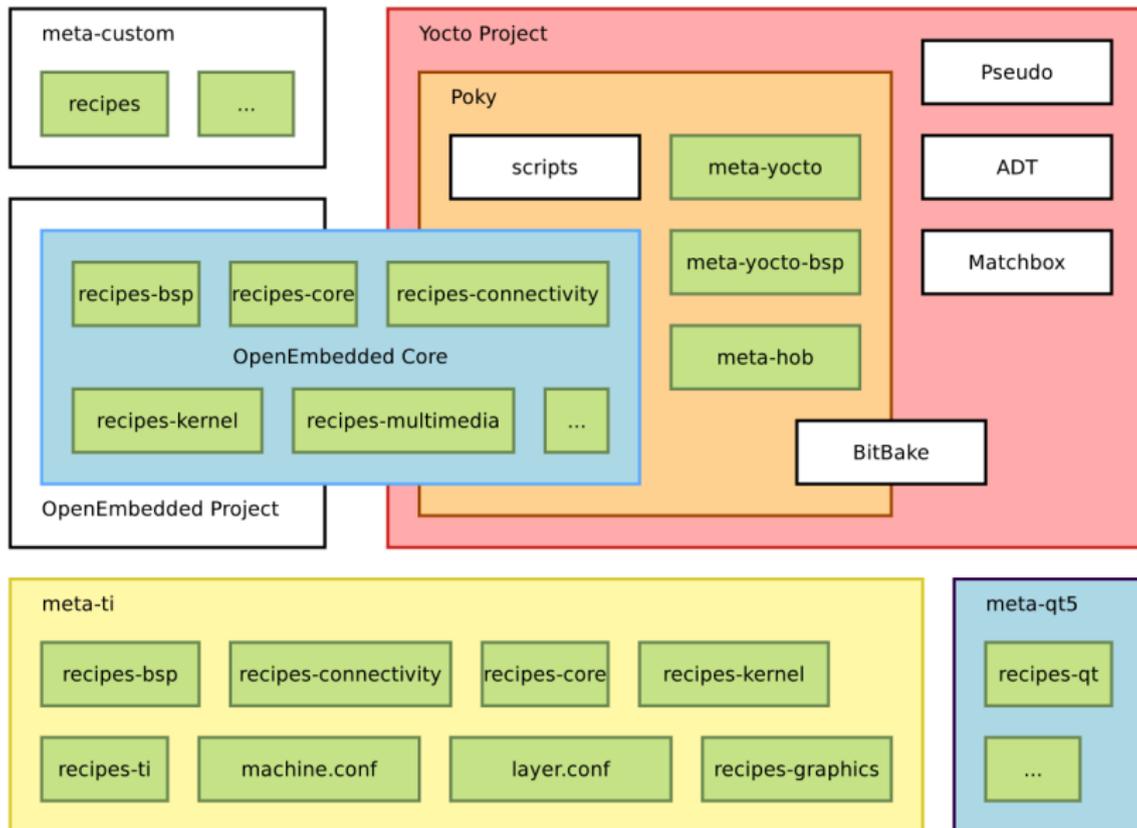
- ▶ Basé sur la commande `make`
- ▶ Moins riche que OE, mais plus simple et plus rapide
- ▶ Bien Maintenu



▶ OpenWRT

- ▶ dérivé de BuildRoot
- ▶ orienté vers les IAD (Internet Access Device)





- ▶ Émulateur de matériel développé par Fabrice Bellard, diffusé sous GPLv2
- ▶ Exécuté dans l'espace utilisateur de Linux
- ▶ Permet d'émuler diverses architectures : x86, PowerPC, ARM, etc.
- ▶ Émulation de carte complète → outil de développement, mise au point, test automatique.
 - ▶ outil de certification DO-178 ([Couverture](#))
- ▶ Large communauté. <http://wiki.qemu.org/>

Systemes critiques :

- ▶ **OCARINA** (TPT) : « compilateur » AADL (Architecture Analysis and Design language)
- ▶ **SynDEx** (INRIA) : Synchronized Distributed Executive, générateur de code « synchrone »
- ▶ **POK** (TPT) : RTOS ARINC 653
- ▶ **TOPCASED** (Airbus) : Toolkit in OPen source for Critical Applications & SystEms Development
- ▶ Initiative **Open-DO** Adacore

Robotique :

- ▶ Ecosystème **ROS** de la **Open Source Robotics Foundation**
- ▶ **Orocos** Open Robot Control Software
- ▶ **Bride** Plugin eclipse pour développement ROS et Orocos

- ▶ L'embarqué est un marché en croissance
- ▶ Augmentation significative de l'activité « embarqué » chez les SSII et les éditeurs
- ▶ Les marchés traditionnels restent leaders
 - ▶ aéronautique/spatial/défence (62%)
 - ▶ automobile (47%)
- ▶ Augmentation de l'utilisation du logiciel libre (outils)
 - ▶ Éditeurs (65 %)
 - ▶ SSII (42%)
- ▶ Source : étude Syntec 2012

Questions ?

- ▶ Portail Linux embarqué : eLinux.org
- ▶ Linux Embarqué, Pierre Ficheux, éditions Eyrolles, 2012.
- ▶ Logiciel Libre et sûreté de fonctionnement, sous la direction de Philippe David et Hélène Waeselynck, éditions Hermes Science, 2003 ([pdf](#)).
- ▶ Better Embedded System Software, Philipp Koopman, Drumnadrochit Education LLC, 2010.
- ▶ A case study of Toyota unintended acceleration and software study, Philip Koopman, Carnegie Mellon University, 2014.
- ▶ Supports de Formation de Free Electrons.