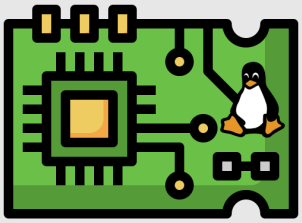


Formation développement de systèmes Linux embarqué

Durée de la formation

7 demi-journées – 28 h

Langue

Transparents	Anglais
Présentation	Français
	Anglais
	Portugais
	Italien

Formateur

Un des ingénieurs suivants

- Alexandre Belloni
- Alexis Lothoré
- Antonin Godard
- Grégory Clement
- Jérémie Dautheribes
- João Marcos Costa
- Luca Ceresoli
- Maxime Chevallier
- Mathieu Dubois-Briand
- Miquèl Raynal
- Richard Genoud
- Romain Gantois
- Thomas Petazzoni

Contact

training@bootlin.com
+33 4 84 25 80 96

bootlin
bootlin.com

Formation en ligne

Public visé

Ingénieurs développant des systèmes embarqués reposant sur Linux et des composants open-source.

Objectifs opérationnels

- Être capable d'appréhender l'architecture générale d'un système Linux embarqué.
- Être capable de sélectionner, construire, mettre en oeuvre et utiliser une chaîne de compilation croisée.
- Être capable de comprendre la séquence d'un démarrage d'un système Linux embarqué et de mettre en oeuvre et d'utiliser le chargeur de démarrage U-Boot.
- Être capable de sélectionner une version du noyau Linux, de configurer, de compiler et d'installer le noyau Linux sur un système embarqué.
- Être capable de créer à partir de zéro un système de fichiers racine Linux, en comprenant les différents éléments qui le composent : répertoires, applications, bibliothèques, fichiers de configuration.
- Être capable de choisir et de mettre en oeuvre les principaux systèmes de fichiers Linux pour périphérique de stockage en mode bloc et flash, et de connaître leurs principales caractéristiques.
- Être capable d'interagir avec les périphériques matériels, de configurer le noyau avec les pilotes de périphériques nécessaires et d'étendre le *Device Tree*
- Être capable de sélectionner, de cross-compiler et d'intégrer des composants logiciels open-source (bibliothèques, applications) dans un système Linux embarqué, et de traiter la mise en conformité avec les licences open-source.
- Être capable de mettre en oeuvre un système de build Linux embarqué, pour construire un système complet pour une plateforme embarquée.
- Être capable de développer et débugger des applications sur un système Linux embarqué.

Prérequis

- **Connaissance et pratique des commandes UNIX ou GNU/Linux** : les participants doivent être à l'aise avec l'utilisation de la ligne de commande Linux. Les participants manquant d'expérience sur ce sujet doivent se former par eux-mêmes, par exemple en utilisant nos supports de formation.
- **Niveau minimal requis en anglais : B1**, d'après le *Common European Framework of References for Languages*, pour nos sessions animées en anglais. Voir la grille CEFR pour une auto-évaluation.

Méthodes pédagogiques

- Présentations animées par le formateur, par visioconférence. Les participants peuvent poser des questions à tout instant.
- Démonstrations pratiques réalisées par le formateur, basés sur les travaux pratiques de la formation, par vidéo-conférence. Les participants peuvent poser des questions à tout instant. Optionnellement, les participants qui ont accès aux accessoires matériels de la formation peuvent reproduire par eux-même les travaux pratiques.
- Messagerie instantanée pour questions entre les sessions (réponse sous 24h, hors week-end et jours fériés)
- Version électronique des supports de présentation, des instructions et des données de travaux pratiques. Les supports sont librement disponibles ici.

Modalités d'évaluation

Seuls les participants qui auront assisté à l'intégralité des journées de formation, et qui auront obtenu plus de 50% de réponses correctes à l'évaluation finale recevront une attestation individuelle de formation de la part de Bootlin.

Handicap

Les participants en situation de handicap qui ont des besoins spécifiques sont invités à nous contacter à l'adresse *training@bootlin.com* afin de discuter des adaptations nécessaires à la formation.

Équipement nécessaire

Équipement obligatoire :

- Ordinateur avec le système d'exploitation de votre choix, équipé du navigateur Google Chrome ou Chromium pour la conférence vidéo.
- Une webcam et un micro (de préférence un casque avec micro)
- Une connexion à Internet à haut débit

Optionnellement, si les participants souhaitant pouvoir reproduire par eux-mêmes les travaux pratiques, ils doivent acheter séparément la carte de développement et les accessoires associés, et devront diposer d'un PC avec une installation native d'Ubuntu Linux 24.04.

Plateforme matérielle pour les travaux pratiques

Plateforme STM32MP1

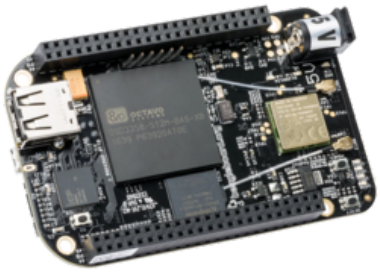
Une de ces cartes de STMicroelectronics : **STM32MP157A-DK1**, **STM32MP157D-DK1**, **STM32MP157C-DK2** ou **STM32MP157F-DK2**

- Processeur STM32MP157, double Cortex-A7, de STMicroelectronics
- Alimentée par USB
- 512 Mo DDR3L RAM
- Port Gigabit Ethernet port
- 4 ports hôte USB 2.0
- 1 port USB-C OTG
- 1 connecteur Micro SD
- Debugger ST-LINK/V2-1 sur la carte
- Connecteurs compatibles Arduino Uno v3
- Codec audio
- Divers : boutons, LEDs
- Écran LCD tactile (uniquement sur cartes DK2)

BeagleBone Black

Carte **BeagleBone Black** ou **BeagleBone Black Wireless**

- Un processeur ARM AM335x de Texas Instruments (à base de Cortex-A8), avec accélération 3D, etc.
- 512 Mo de RAM
- 2 ou 4 Go de stockage eMMC
- USB hôte et device
- Sortie HDMI
- Connecteurs à 2 x 46 broches, pour accéder aux UARTs, aux bus SPI, aux bus I2C, et à d'autres entrées/sorties du processeur.
- Ethernet ou WiFi



BeaglePlay

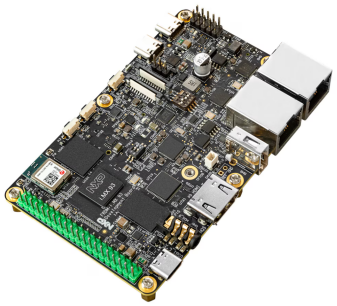
Carte **BeaglePlay**

- SoC Texas Instruments AM625x (CPU 4xARM Cortex-A53)
- SoC avec accélération 3D, MCU intégré et de nombreux autres périphériques.
- 2 GB de RAM
- 16 Go de stockage eMMC
- USB hôte et device, microSD, HDMI
- WiFi 2.4 and 5 GHz, Bluetooth et aussi Ethernet
- 1 Header MicroBus (SPI, I2C, UART, ...), connecteurs OLDI et CSI.

NXP i.MX93 FRDM

Carte de développement **NXP FRDM-IMX93**

- Processeur NXP i.MX93 (Dual Cortex-A55 + Cortex-M33)
- 2 GB LPDDR4X, 32 GB eMMC
- Double Ethernet Gigabit
- USB 2.0 Type-C + USB Type-A
- Interface CAN
- Slot microSD, EEPROM
- Wi-Fi 6 + Bluetooth 5.4 + 802.15.4 (MAYA-W276)
- Sortie HDMI (via LVDS), MIPI DSI et CSI
- Audio jack (MQS), buttons and LEDs
- debug via SWD et UART



Programme de la formation

Demi-journée 1

Cours	Introduction à Linux embarqué	▪ Introduction au Logiciel Libre ▪ Atouts du Logiciel Libre pour les systèmes embarqués ▪ Exemples de systèmes embarqués fonctionnant sous Linux ▪ Besoins en CPU, RAM et stockage ▪ Choix d'une plateforme matérielle ▪ Architecture du système : composants principaux ▪ Différentes tâches pour développer un système embarqué
Cours	Chaîne de compilation croisée et bibliothèque standard C	▪ Les composants d'une chaîne de compilation croisée. ▪ Choisir une bibliothèque standard C. ▪ Le contenu de la bibliothèque standard C. ▪ Les chaînes de compilation croisée prêtes à l'emploi. ▪ La construction automatisée d'une chaîne de compilation croisée.
Démo	Chaîne de compilation croisée	▪ Configuration de Crosstool-NG ▪ Exécution pour construire une chaîne de compilation croisée personnalisée reposant sur la uClibc. ▪ Exploration du contenu d'une chaîne de compilation croisée
Cours	Processus de démarrage, firmware, chargeurs de démarrage	▪ Processus de démarrage des systèmes embarqués, focus sur les architectures *x86* et *ARM* ▪ Processus de démarrage et chargeurs de démarrage sur plateformes *x86* (legacy et UEFI) ▪ Processus de démarrage sur plateformes *ARM* : code en ROM, chargeurs de démarrage, *ARM Trusted Firmware* ▪ Focus sur U-Boot : configuration, installation et utilisation ▪ Commandes U-Boot, environnement U-Boot, scripts U-Boot, mécanisme *distro boot command* de U-Boot

Demi-journée 2

Démo	U-Boot	▪ Mise en place de la communication série avec la carte. ▪ Configuration, compilation et installation d'U-Boot sur la plateforme embarquée. ▪ Seulement sur STM32MP1 : Configuration, compilation et installation de Trusted Firmware-A sur la plateforme embarquée. ▪ Familiarisation avec l'environnement et les commandes d'U-Boot. ▪ Mise en place de la communication TFTP avec la carte. Utilisation des commandes TFTP d'U-Boot.
Cours	Noyau Linux	▪ Rôle et architecture générale du noyau Linux. ▪ Séparation entre noyau et espace utilisateur, interfaces entre l'espace utilisateur et le noyau ▪ Comprendre les différentes versions du noyau Linux : choix entre versions proposées par les fabricants et la version *upstream*, versions *Long Term Support* ▪ Récupérer les sources du noyau Linux
Démo	Récupération des sources du noyau Linux	▪ Clonage du dépôt git officiel de Linux ▪ Accès aux versions stables

Cours	Configuration, compilation et démarrage du Noyau Linux	▪ Configuration du noyau Linux : configuration pré-définies, interfaces de configuration ▪ Concept de *Device Tree* ▪ Cross-compilation du noyau Linux ▪ Rôle des fichiers résultants de la compilation du noyau Linux ▪ Installation et démarrage du noyau Linux ▪ La ligne de commande du noyau Linux
Démo	Compilation croisée du noyau et démarrage sur la carte	▪ Configuration du noyau Linux et compilation croisée pour la plate-forme embarquée. ▪ Téléchargement du noyau en utilisant le client TFTP d'U-Boot. ▪ Démarrage du noyau depuis la RAM. ▪ Automatisation du démarrage du noyau avec des scripts U-Boot.

Demi-journée 3

Cours	Système de fichier racine	▪ Les systèmes de fichiers dans Linux. ▪ Rôle et organisation du système de fichiers racine. ▪ Localisation de ce système de fichiers : sur espace de stockage, en mémoire, sur le réseau. ▪ Les fichiers device, les systèmes de fichiers virtuels. ▪ Contenu type d'un système de fichiers racine.
Cours	BusyBox	▪ Présentation de BusyBox. Intérêt pour les systèmes embarqués. ▪ Configuration, compilation et installation.
Démo	Construction d'un minuscule système Linux embarqué avec BusyBox	▪ Construction à partir de zéro d'un système de fichiers racine contenant un système Linux embarqué ▪ Mise en place d'un noyau permettant de démarrer le système depuis un répertoire mis à disposition par la station de développement au travers de NFS. ▪ Passage de paramètres au noyau pour le démarrage avec NFS. ▪ Création complète du système de fichiers à partir de zéro : installation de BusyBox, création des fichiers spéciaux pour les périphériques. ▪ Initialisation du système en utilisant le programme init de BusyBox. ▪ Utilisation du serveur HTTP de BusyBox. ▪ Contrôle de la cible à partir d'un navigateur Web sur la station de développement. ▪ Mise en place des bibliothèques partagées sur la cible et développement d'une application d'exemple.

Demi-journée 4

Cours	Accès aux périphériques matériels	▪ Comment accéder au matériel sur les principaux bus : USB, SPI, I2C, PCI ▪ Utilisation de pilotes de périphériques dans le noyau ou accès depuis l'espace utilisateur ▪ La syntaxe du *Device Tree*, et comment l'utilisation pour décrire des périphériques additionnels et le multiplexage des signaux. ▪ Trouver des pilotes de périphériques dans le noyau Linux pour des périphériques matériels. ▪ Utilisation de modules noyau ▪ Accès au matériel par `/dev` ou `/sys` ▪ Interfaces en espace utilisateur pour les périphériques les plus courants : stockage, réseau, GPIO, LEDs, audio, affichage, video

Démo	Accès aux périphériques matériels	▪ Exploration du contenu de `/dev` et `/sys`, et des périphériques disponibles sur la plateforme embarquée. ▪ Utilisation de GPIOs et de LEDs. ▪ Modification du Device Tree pour controler le multiplexage de broches et déclarer un joystick connecté sur I2C. ▪ Ajout du support pour une carte son USB en utilisant des modules noyau. ▪ Prise en charge du joystick I2C par la compilation et l'installation d'un module noyau externe.
Cours	Système de fichiers bloc	▪ Accéder et partitionner des périphériques bloc. ▪ Systèmes de fichiers pour périphériques bloc. ▪ Utilité des systèmes de fichiers journalisés. ▪ Systèmes de fichiers en lecture seule. ▪ Systèmes de fichiers en RAM. ▪ Création de chacun de ces systèmes de fichiers. ▪ Suggestions pour les systèmes embarqués.
Démo	Système de fichiers bloc	▪ Créer des partitions sur le stockage bloc. ▪ Démarrage d'un système avec un assemblage de plusieurs systèmes de fichiers : SquashFS pour le système de fichier racine, ext4 pour les données du système et tmpfs pour les fichiers temporaires.

Demi-journée 5

Cours	Système de fichiers pour flash	▪ Le sous-système Memory Technology Devices du noyau Linux. ▪ Les systèmes de fichiers pour le stockage MTD : JFFS2, YAFFS2, UBIFS. ▪ Options de configuration du noyau. ▪ Partitions MTD. ▪ Étude en détail de UBI et UBIFS : préparation, flashage et mise en oeuvre d'images UBI. *Note : la plateforme embarquée utilisée pour les labs ne comportant pas de mémoire flash NAND en accès direct, cette partie du cours ne sera pas illustrée avec un TP correspondant.*
Cours	Cross-compilation de bibliothèques et d'applications espace utilisateur	▪ Configuration, compilation croisée et installation d'applications et de bibliothèques ▪ Concept de *build system*, et aperçu de quelques *build systems* courants utilisés dans les projets open-source : *Makefile*, *autotools*, *CMake*, *meson* ▪ Aperçu des problématiques courantes rencontrées lors de la compilation croisée
Démo	Compilation croisée de bibliothèques et d'applications	▪ Compilation croisée manuelle de plusieurs bibliothèques et applications open-source pour une plateforme embarquée. ▪ Apprentissage des principales techniques et des problèmes principaux. ▪ Cela inclut la compilation du composant *alsa-utils*, et l'utilisation de son programme `speaker-test` pour vérifier que l'audio fonctionne sur la cible.

Demi-journée 6

Cours	Outils de construction de systèmes	▪ Les différentes approches pour construire un système Linux embarqué : *build systems* et distributions binaires ▪ Principe d'un *build system*, aperçu de Yocto Project/OpenEmbedded et de Buildroot ▪ Principe d'une *distribution binaire* et outils associés, focus sur Debian et Ubuntu ▪ Piles logicielles standards : Tizen, AGL, Android

Démo	Construction d'un système avec Buildroot	▪ Utilisation de Buildroot pour construire de façon automatisée le même système de base que dans le TP précédent, en y rajoutant un serveur pour jouer des bandes sonores (*MPD*) ainsi qu'un client pour piloter ce serveur (*mpc*). ▪ Contrôle de la lecture audio, directement depuis la cible, puis depuis un client MPD sur le PC de développement. ▪ Analyse des dépendences entre les différents composants du système.
Cours	Licences open-source et mise en conformité	▪ Présentation des principales licenses open-source : GPL, LGPL, MIT, BSD, Apache, etc. ▪ Concept de *copyleft* dans les licences open-source ▪ Différence entre (L)GPL version 2 et 3 ▪ Mise en conformité avec les licences open-source : bonnes pratiques
Cours	Aperçu des stack logicielles open-source majeures pour Linux embarqué	▪ `systemd` comme système *init* ▪ Gestion du matériel avec *udev* ▪ Communication inter-processus avec *D-Bus* ▪ La stack logicielle pour le graphique : DRM/KMS, X.org, Wayland, Qt, Gtk, OpenGL ▪ La stack logicielle pour le multimédia : Video4Linux, GStreamer, Pulseaudio, Pipewire

Demi-journée 7

Démo	Intégration de stack logicielles additionnelles	▪ Intégration de *systemd* comme système d'init ▪ Utilisation de *udev* pour le chargement automatique de modules
Cours	Développement et déboguage d'application	▪ Langages de programmations et bibliothèques disponibles. ▪ *Build system* pour votre application, un aperçu de *CMake* et *Meson* ▪ Le débogueur *gdb* : déboguage d'applications à distance avec gdb et gdbserver, analyse post-mortem d'une application. ▪ Analyse de performance, outils de *tracing* et *profiling*, analyseurs mémoire : `strace`, `ltrace`, `perf`, `valgrind`
Démo	Développement et déboguage d'application	▪ Création d'une application qui utilise un joystick connecté sur I2C pour contrôler un player audio. ▪ Mise en place d'un IDE pour le développement et le déboguage d'une application. ▪ Utilisation de *strace*, *ltrace*, *gdbserver* et *perf* pour déboguer/investiguer des applications problématiques sur la plateforme embarquée.
Cours	Ressources utiles	▪ Livres sur Linux embarqué et la programmation système ▪ Ressources sur Internet ▪ Conférences internationales