

Rapport CSEL

Kirill Goundiaev & Tanguy Dietrich

11 avril 2023

Environnement Linux embarqué et programmation noyau Linux

Préambule

Ce travail repose sur la théorie et les instructions données lors du cours CSEL faisant partie du cursus MES de la HES-SO. Ces informations sont disponible sur le [site du cours](#). Une base de code est également donnée sur le [git du cours](#).

Introduction

Le but de ce travail est de mettre en place un environnement de travail pour une cible embarquée, la compréhension de différentes zones de mémoire, développement de module pour le kernel linux, ainsi que d'application.

1. Environnement Linux embarqué

Mise en place de la machine hôte

Pour mener à bien ce travail, nous avons besoin d'une machine hôte sous Linux, Windows ou OSx et des logiciels suivants: [Docker Desktop](#), [Git](#), [Visual Studio Code](#), [Balena Etcher](#)

Nous commençons par forker le repos principal, puis le pull sur notre machine. Nous ouvrons le repos dans VSCode et acceptons de le réouvrir dans un Container (Reopen in COntainer). Si VSCode ne nous propose pas cette option, il faut verifer que le module 'Dev Containers' soit bien installé.

Une fois ouvert dans un Container, nous executons le scripte `get-buildroot.sh` dans le terminal de VSCode. Cet scripte nous permet de télécharger buildroot et faire la configuration nécessaire pour ce projet. [Buildroot](#) est un outil qui nous permettra de générer une distribution Linux pour notre cible à partir de zéro. Cette outil se compose :

1. D'une chaine de compilation croisée nous permettant de compiler pour notre cible dont l'architecture est différente de notre hôte.
2. Image du noyau (Kernel) Linux, code souce (niveau Kernel) de l'OS que nous déployerons sur la cible
3. RootFS, le système fichier racine est le répertoire principal contenant des répertoires, logiciels de base du système et des logiciel d'applications.
4. Bootloader, dans notre cas U-Boot qui est le premier programme à être exécuté au lancement du système. Il se chargera d'effectuer certaines verification, puis de démarrer le système principal sous Linux.

Compilation et lancement de la cible

Le noyau et le rootfs peuvent être configurés dans buildroot avec les commandes:

```
cd /buildroot
make menuconfig
```

Enfin, la compilation se fait avec les commandes:

```
cd /buildroot
make
```

Une fois que la compilation est faite, nous pouvons enlever l'ancien rootfs s'il est présent et extraire le nouveau:

```
rm -Rf /rootfs/*
tar xf /buildroot/output/images/rootfs.tar -C /rootfs
```

Note

Nous pouvons aussi utiliser les scripts `/usr/local/bin/delete-rootfs.sh` et `/usr/local/bin/extract-rootfs.sh` présents dans l'image Docker.

Maintenant que nous disposons de nos images, nous devons les extraire du container vers notre machine hôte afin de graver une carte SD. Pour ce faire, nous pouvons utiliser la commande:

```
rsync -rlt --progress --delete /buildroot/output/images/ /
workspace/buildroot-images

# ou le script :
/usr/local/bin/sync-images.sh
```

En utilisant Balena Etcher, nous flashons notre carte SD avec l'image `buildroot-images/sdcard.img`.

En insérant la carte SD dans la cible et la démarant, nous pouvons observer la séquence de lancement de U-Boot avec une communication série (cable série USB). Enfin, nous pourrions nous connecter une fois le boot terminé avec le login `root` *sans mot de passe*

```
OK
[ 12.508521] bcmfmac: bcmf_sdio_htclk: HT Avail timeout (1000000): clkctl 0x50
Starting iptables: OK
Starting network: ip: RTNETLINK answers: File exists
Failed to bring up eth0.
FAIL
[ 15.750351] random: crng init done
Starting sshd: [ 16.220958] NET: Registered PF_INET6 protocol family
[ 16.227906] Segment Routing with IPv6
[ 16.231772] In-situ OAM (IOAM) with IPv6
OK
Welcome to FriendlyARM Nanopi NEO Plus2
csl login: root
#
# ls /
bin  etc  lib64  media  opt  root  sbin  tmp  var
dev  lib  linuxrc  mnt  proc  run  sys  usr  workspace
#
```

Configuration pour la communication réseau

Notre cible a été configurée avec l'adresse 192.168.0.14. Il nous est proposé de configurer notre machine hôte avec l'adresse 192.168.0.4, afin de pouvoir communiquer avec cette dernière à travers le réseau.

> Notes >- IP : 192.168.0.4 >- Mask : 255.255.255.0 > >- sous Windows: > - Mask : 24 > - Permettre les connexions entrantes dans le firewall pour le réseau 192.168.0.0/24

Une fois ces manipulations faites, nous pouvons tester la connexion avec un ping, puis se connecter par ssh à la cible:

```
ssh root@192.168.0.14
```

TODO modiyf : l'ip doit être changer dans le script pour l'U-Boot ainsi que dans l'overlay pour le linux

Note / supposition à verifier

L'adresse IP de la cible est défini au moment du boot, puis au démarrage de Linux. Elle est écrite en dur, mais nous pouvons la modifier.

Les fichiers `/workspace/boot-scripts/boot_cifs.cmd` et `/workspace/config/board/friendlyarm/nanopi-neo-plus2/rootfs_overlay/etc/network/interfaces` contiennent les informations dont nous avons besoin.

Il suffira de recréer une image (sans recompiler le kernel) et de la déployer.

La commande `uname -a` nous permet de voir le système d'exploitation de la cible.

Mise en place de l'espace de travail (workspace) sous CIFS/SMB

Cette étape nous permettra de partager notre répertoire de travail avec la cible. Ce que donnera un access directe depuis la cible et nous évitera les transferts de fichiers.

Pour effectuer l'attachement du workspace nous devons disposer du dossier `/workspace` sur la cible.

```
mkdir -p /workspace
# -p, --parents
#       no error if existing,\
#       make parent directories as needed
```

Pour attacher et détacher le dossier manuellement:

```
mount -t cifs -o vers=1.0,username=root,password=toor,port=1445,
      noserverino //192.168.0.4/workspace /workspace
umount /workspace
```

Il est possible d'automatiser le processus en éditant le fichier `/etc/fstab` en ajoutant la ligne:

```
//192.168.0.4/workspace /workspace cifs vers=1.0,username=root,
password=toor,port=1445,noserverino
```

Ensuite il est possible d'utiliser la commande `mount -a` pour effectuer tout les montage qui ont été paramétré. Sinon le montage se fera automatiquement au démarrage de la cible.

Génération d'applications sur la machine de développement hôte

L'exemple de Makefile ci-dessous donne les paths utile pour la compilation croisée.

```
# Makefile toolchain part
TOOLCHAIN_PATH=/buildroot/output/host/usr/bin/
TOOLCHAIN=$(TOOLCHAIN_PATH)aarch64-linux-

# Makefile common part
CC=$(TOOLCHAIN)gcc
LD=$(TOOLCHAIN)gcc
AR=$(TOOLCHAIN)ar
CFLAGS+=-Wall -Wextra -g -c -mcpu=cortex-a53 -O0 -MD -std=gnu11
```

Debugging de l'application sur la cible (VS-Code)

Pour plus d'[infos](#)

Mise en place de l'environnement pour le développement du noyau sous CIFS/SMB

Executer la [marche a suivre](#)

Questions

1. Comment faut-il procéder pour générer l'U-Boot ?

On peut se déplacer dans le dossier `/buildroot` et exécuter la commande `make` pour compiler complètement le buildroot qui contient également U-Boot. `make` utilise la fichier `.config` dans lequel se trouvent toutes les informations nécessaires à la compilation.

2. Comment peut-on ajouter et générer un package supplémentaire dans le Buildroot ?

Dans le dossier `/buildroot` nous effectuons la commande `make menuconfig` qui ouvre une fenêtre de paramétrage de buildroot. Puis, dans **Target packages** nous pouvons donc y ajouter des packages supplémentaires. Pour la génération, il suffira de refaire un `make`.

3. Comment doit-on procéder pour modifier la configuration du noyau Linux ?

De nouveau dans `/buildroot` avec la commande `make menuconfig`, nous sélectionnons les paramètres dans **Kernel**.

4. Comment faut-il faire pour générer son propre rootfs ?

Les paramètres de rootfs peuvent également être modifiés dans `make menuconfig` de `/buildroot` sous la rubrique **Filesystem images**. Puis, il faudra faire une compilation, après quoi effacer l'ancien rootfs et y extraire le nouveau :

```
rm -Rf /rootfs/*
tar xf /buildroot/output/images/rootfs.tar -C /rootfs
```

5. Comment faudrait-il procéder pour utiliser la carte eMMC en lieu et place de la carte SD ?

Il nous faudrait transférer tout ce qui se trouve sur la carte SD dans la carte eMMC, à savoir l'U-Boot, le Kernel Linux, ainsi que les différents systèmes de fichiers. Il nous faudra créer une partition par entité à mettre sur la carte eMMC.

Il faudra peut-être préciser au *sunxi-spl*, le booteur initial de NanoPi, l'emplacement d'U-Boot.

6. Dans le support de cours, on trouve différentes configurations de l'environnement de développement. Quelle serait la configuration optimale pour le développement uniquement d'applications en espace utilisateur ?

Pour le développement d'application en espace utilisateur, nous aurons besoin d'une flexibilité au niveau de l'usrfs, car c'est à cet endroit que sera déployé l'application. De ce fait, nous pouvons déployer dès le début l'U-Boot, le kernel, ainsi que le rootfs sur la carte SD ou eMMC, afin de ne plus interagir physiquement avec notre cible. Puis, nous attacherons l'usrfs se trouvant sur la machine hôte en utilisant CIFS/SMB, ce qui nous permettrait de faire la compilation sur la machine hôte directement dans l'usrfs et de tester avec la cible en accédant au même usrfs.

Todo ce qui a été appris

Todo remarque et chose à retenir

feedback personnel

2. Programmation Noyau

2.1 Modules noyaux

Exercice 1

Le premier exercice nous propose de concevoir et générer un module noyau `out of tree`. C'est donc un module qui est à l'extérieur de l'arborescence du noyau. Cela nous permet de générer le module indépendamment du kernel, mais il ne pourra pas être lié statiquement à ce dernier. En s'inspirant de l'[exemple](#), nous avons créé notre module qui nous dit bonjour et au revoir. Pour instancier le module il nous faut nous rendre dans le répertoire où se trouve notre module au format `*.ko` et exécuter la commande `insmod *.ko`. Pour le retirer, nous utilisons la commande `rmmod <module>`. Le affichage effectué par le module ne sont pas visible sur le terminal dans l'espace utilisateur. Pour les visionner, nous devons utiliser la commande `dmesg`. Les commandes `lsmod` et `cat /proc/modules` nous permettent de visualiser les modules installés.

Pour ajouter aux modules référencés, nous devons installer le module en ajoutant la commande `make install` aux Makefiles de notre module. Cela ajoutera notre module dans `/lib/modules/<kernel_version>/modules.dep`, qui référence tout les modules et leurs dépendances.

```
#besion de l'exporter PATH pour faire modules_install
MODPATH := /rootfs # production mode install:
install:
    $(MAKE) -C $(KDIR) M=$(PWD) INSTALL_MOD_PATH=$(MODPATH)
    modules_install
```

Pour l'installer, nous effectuons la commande `sudo make install` sur la machine hôte. Voici les paramètres de `modprobe` :

Usage: `modprobe [-alrqvsD] MODULE [SYMBOL=VALUE]...`

```
-a      Load multiple MODULEs
-l      List (MODULE is a pattern)
-r      Remove MODULE (stacks) or do autoclean
-q      Quiet
-v      Verbose
-s      Log to syslog
-D      Show dependencies
```

Note.

Le [makefile d'exemple](#) propose d'utiliser `TOOLS := /buildroot/output/host/usr/bin/aarch64-linux-gnu-`, qui est incorrect, nous avons utilisé `TOOLS := /buildroot/output/host/usr/bin/aarch64-buildroot-linux-gnu-` afin de compiler.

Il faut également ajouter `clean` pour la commande `make clean`

Après, remarque, feedback

Utilisation de `make` de façon récursive, extrêmement utile et puissant. Manipulation avec `modprobe` facilite l'installation et le retrait des modules, ainsi que la gestion des dépendances. La gestion de dépendance n'a pas encore été testée, serait un plus.

Exercice 2

Cette exercice à pour but de [passer des parammetres au module](#) lors de son initialisation. Nous réutilisons le code de l'exercice précédent.

Utilisation de macro [module_param](#). Code ajouté :

```
/*my_module.c*/
#include <linux/moduleparam.h> /* needed for module parameters */
static char* name = "Module ex 2";
module_param(name, charp, 0);
static int elements = 1;
module_param(elements, int, S_IRUSR | S_IWUSR | S_IRGRP | S_IWGRP)
;
static int __init my_module_init(void){
    pr_info("Name: %s\telement: %d\n", name, elements);
    ...
}
```

```
#passage de paramètres :
insmod mod_ex_noyau_2.ko elements=1024 name="test_1"
#chage param
vi /sys/module/mod_ex_noyau_2/parameters/elements

# avec modprobe ajouter fichier /etc/modprobe.conf et dedans:
options mod_ex_noyau_2 elements=12 name="From modprobe"
```

Apris, remarque, feedback

Utilisation des paramètres avec les modules, donner les drois de modifiaction des paramètre.

Exercice 3

Trouvez la signification des 4 valeurs affichées lorsque l'on tape la commande `cat /proc/sys/kernel/printk`. [Message logging with printk](#) nous apprend que les valeurs retournées par cette commande nous informe du *console_loglevel* courant. Elles corespondent au niveau courant, par défaut, minimum et du boot-time. Le niveau peut être modifié avec la commande `echo 8 > /proc/sys/kernel/printk` (8 = print all messages to the console). La corespondance des niveaux: [Source](#)

Name	String	Alias function
KERN_EMERG	"0"	<code>pr_emerg()</code>
KERN_ALERT	"1"	<code>pr_alert()</code>
KERN_CRIT	"2"	<code>pr_crit()</code>
KERN_ERR	"3"	<code>pr_err()</code>
KERN_WARNING	"4"	<code>pr_warn()</code>
KERN_NOTICE	"5"	<code>pr_notice()</code>
KERN_INFO	"6"	<code>pr_info()</code>
KERN_DEBUG	"7"	<code>pr_debug()</code> and <code>pr_devel()</code> if <code>DEBUG</code> is defined
KERN_DEFAULT	""	
KERN_CONT	"c"	<code>pr_cont()</code>

Le *log level* définit l'importance du message de `printk(log_level"Message: %s\n", arg);`. Si le niveau est supérieure au niveau courant, le message sera affiché directement dans le terminal.

Note pas sur d'avoir compris comment changer et surtout afficher..

Remarque. Nous avons remarqué que le print se fait dans le terminal série et pas le ssh. Donc fonctionne. Cependant, il faudrait voir s'il est possible de printer dans le terminal qui lance la commande pour le module.

Apris, remarque, feedback

Pas réussi a utiliser correctement les niveaux de message..

Exercice 4

Cette exercice nous demande de faire de l'allocation dynamique de memoire au niveau du kernel. Pour cela, nous devons utiliser la fonction `kmalloc()`.

Nous aurons besoin de :

1. [l'allocation dynamique](#)
2. Traitement des strings
3. [Gestion de list](#)

Attention à bien libérer l'espace lors du exit

Apris, remarque, feedback

Nous avons revu comment faire une allocation de mémoire au niveau kernel. Nous avons également appris à utiliser les list avec la librairie `list.h`.

Exercice 5: Accès aux entrées/sorties

Cette exercice nous demande de récupérer les informations se trouvant dans des registres sur notre cible. Pour ce faire, nous devons accéder à des zones précises dans la mémoire. On utilise alors le MMIO memory-mapped I/O et un remapping dans la memoire virtuelle.

Note

L'utilisation de `request_mem_region` pose problème. La réservation ne se passe pas correctement. Nous avons également testé avec le code de correction fourni, et l'erreur est également présente.

//TODO (ca sonne mal) : Sans la reservation peut aussi fonctionner.

Avec la commande `cat /proc/iomem`, nous avons pu observer que cette espace est déjà réservé par :

```
01c30000-01c3ffff : 1c30000.ethernet ethernet@1c30000
```

attention les données sont en BigEndian Note

Les valeurs retournées pour la température semblent cohérente, mais sont pas exactement les même qu'avec la commande `cat /sys/class/thermal/thermal_zone0/temp`

Apris, remarque, feedback

Nous avons appris la reservation de mémoire, ainsi que le fait qu'elle ne bloque pas le bon exécution de programme si elle échoue. Il faut également faire attention avec le Big et Little Endean.

Exercice 6: Threads du noyau

Dans cette exercice, nous devons implémenté un module qui lancera un thread à son instantiation. Ce thread devra afficher un message toutes les 5 secondes.

Nous avons utiliser les fonctions proposé dans le cours pour faire cette exercice. A noter que le parametre `namefmt` donné lors de l'initialisation `struct task_struct* kthread_run(int (*threadfn)(void *data), data namefmt, ...)`; peut être retrouvé en effectuant la commande `ps -aux` qui nous liste les processes en execution.

Apris, remarque, feedback

Nous avons appris à lancer les threads au niveau kernel. Tout comment en C, ils peuvent récupérer des données à leurs lancement à travers des structures de données.

Exercice 7: Mise en sommeil

Le but de cette exercice est de synchroniser deux thread du noyau à l'aide d'événements. Pour ce faire, nous aurons besoin d'une queue d'attente, qui nous permettra d'informer un thread qu'une modification a été effectuée. Une fois le thread informé, il se réveillera et effectuera une vérification sur la condition qui lui est donnée. Si la condition est remplie, il effectuera l'action qui lui est demandé. Sinon, il se remettra en sommeil.

Dans notre cas, la condition est une valeur de variable atomique. Cette variable nous permet d'effectuer des opérations atomiques et donc nous autorise un accès concurrent.

Le thread qui fera la notification (le réveil) incrémentera la variable atomique. Le thread qui fera l'attente (le sommeil) vérifiera la variable et la décrémentera. Si elle est positive, le thread qui attend effectuera l'action.

Afin de partager l'information entre deux threads, nous avons deux solutions :

1. utiliser une variable globale

2. utiliser une variable partagée

Nous avons opter pour les variables partagées, même si elles sont plus complexes à mettre en place, nous trouvons que c'est une solution plus propre.

Pour partager les données entre les threads, nous avons utilisé une structure de données qui nous permet de stocker les données et de les passer en paramètre à nos fonctions.

Nos deux fonctions fonctionnent correctement et donne les résultats attendu. A noter qu'il ne faut pas oublier le `\n` à la fin de la chaîne de caractère pour que le message soit affiché immédiatement, sinon cela pour porter confusion lors des observations.

Apris, remarque, feedback

Nous avons appris à utiliser les variables atomiques, ainsi que les queues d'attente. Il était particulièrement intéressant de mettre en place une exécution concurrente avec une communication inter thread. C'est une notion que nous pensons peut être souvent utile. Nous avons également mis en place un affichage coloré que facilite la lecture des messages.

Exercice 8: Interruptions

Cette exercice nous demande de créer un module qui va nous permettre de récupérer les interruptions des switches. Pour ce faire, nous devons utiliser les fonctions `request_irq`, `gpio_to_irq` et `free_irq`. Pour la gestion des GPIO nous avons utilisé la librairie `gpio.h`, plus particulièrement les fonctions `gpio_is_valid`, `gpio_request`, `gpio_direction_input` et `gpio_free`.

Après initialisation, si nous appuyons sur un des boutons, le terminal nous affiche le numéro d'interruption du bouton correspondant.

Apris, remarque, feedback

Le numéro du GPIO à utiliser peut être retrouvé dans [le schéma](#).

La commande `cat /proc/interrupts` nous permet de voir les interruptions en cours:

```
88:          31          0          0          0  sunxi_pio_edge
   0 Edge      irq_k1
90:          42          0          0          0  sunxi_pio_edge
   2 Edge      irq_k2
91:          36          0          0          0  sunxi_pio_edge
   3 Edge      irq_k3
```

Attention à garder l'interruption en cours.

2.2 Pilotes de périphériques

Quatre types de pilotes de périphériques sont disponibles dans le noyau Linux :

- pilotes orientés caractère (char device driver) - pilotes orientés bloc (block device driver) - pilotes orientés réseaux (network device driver) - pilotes orientés mémoire (uio device driver)

Exercice 1: Pilotes orientés mémoire

Cette exercice nous demande de créer un **pilote orienté mémoire**. C'est le plus simple des pilotes à créer qui nous permet de mapper dans l'espace virtuel du processus les registres et zones mémoires. Ce mapping se fait avec la fonction `mmap` qui prend en paramètre le fichier `/dev/mem` qui offre ce service par défaut sous Linux.

Cette methode permet d'accéder à la mémoire uniquement depuis l'application développée, ne partageant pas cette information les autres parties du système à travers des fichiers partagés.

Il faut faire attention avec les adresses. Nous pouvons adresser uniquement depuis le début de la page d'adresse. De ce fait nous devons savoir à quelle offset de la page se trouve notre donnée.

Pour le faire, nous pouvons utiliser la fonction `getpagesize()` qui nous retourne la taille d'une page.

Pour avoir l'offset de notre donnée, nous devons faire `offset = adresse % getpagesize()`.

Puis nous pouvons obtenir l'adresse de la page avec `adresse_page = adresse - offset`.

De plus lorsque nous voulons accéder à une donnée, nous devons faire `regs + (offset + position * 4) / sizeof(uint32_t)` ou `regs + offset / sizeof(uint32_t) + (position)`.

Apris, remarque, feedback

Nous avons appris à utiliser `mmap` au niveau utilisateur. Nous avons rencontré des problèmes avec l'adressage, que nous avons pu régler en nous aidant du code de correction fourni. De plus, il était compliqué de créer un Makefile pour compiler notre programme. Nous avons donc utilisé le Makefile fourni dans le dossier de correction. Nous pensons que ça serait une bonne idée d'avoir un petit explicatif sur les différents Makefile kernel et userspace.

Exercice 2: Pilotes orientés caractère

Cette exercice nous demande de créer un **pilote orienté caractère** nous permettant de stocker et récupérer une valeur à l'aide des commandes `read` et `write`. Ce pilote est un module et donc est développé au niveau du noyau. Il va nous permettre d'interagir à travers le fichier `/dev/[char_driver]`.

Le pilote doit comporter les fonctions `open`, `release`, `read` et `write`. Il doit aussi être enregistré avec la fonction `alloc_chrdev_region` et déregistré avec `unregister_chrdev_region` et associé à un fichier avec `cdev_init` et `cdev_add`.

Une fois le pilote chargé, nous devons créer le fichier `/dev/[char_driver]` avec la commande `mknod /dev/[char_driver] c [MAJOR] [MINOR]`. L'affichage de ces valeurs est pratique lors de l'initialisation avec `MAJOR(dev_t)` et `MINOR(dev_t)`. Pour retirer le fichier, une fois que le module est retiré, nous pouvons utiliser la commande `rm /dev/[char_driver]`.

Apris, remarque, feedback

Nous nous sommes rafraîchis la mémoire sur la création de pilote de type caractère et avons appris à utiliser la commande `mknod` pour rendre accessible par à travers le fichier notre pilote.

Exercice 3: Pilotes orientés caractère

Dans cette exercice, nous devons reprendre le pilote de l'exercice 2 et le modifier pour que nous puissions spécifier le nombre d'instances que nous voulons créer.

Les fonctions `static inline unsigned iminor(const struct inode *inode)` et `static inline unsigned imajor(const struct inode *inode)` permettent de récupérer le numéro major et

minor du fichier qui est utilisé. De cette manière, nous pouvons savoir vers quel buffer adresser l'opération. Nous pouvons aussi retrouver cette information à partir du descripteur de fichier avec la fonction `iminor(file_inode(f))` ou `iminor(f->f_inode)`; et `imajor(file_inode(f))` ou `imajor(f->f_inode)`.

Ne pas oublier d'ajouter le paramètre dans `vi /etc/modprobe.conf` : `options mod_ex_pilotes_3 instances=5` Puis il faut refaire la commande `mknod /dev/[char_driver] c [MAJOR] [MINOR]` pour créer les fichiers.

Ajout personnel

Nous avons ajouté un script de lancement pour savoir plus facilement quand notre cible est prête pour que nous puissions s'y connecter en ssh.

```
# in /etc/init.d/S90kirillEasy
#!/bin/sh
cd /sys/class/gpio/
echo 10 > export
echo out > gpio10/direction
echo 1 > gpio10/value
```

31.03.23 on commence: sysfs (Exercice #5: Développer un pilote)