

SYSTÈMES D'EXPLOITATION ET
ENVIRONNEMENTS D'EXÉCUTION
EMBARQUÉS

Rapport de laboratoire
Master HES-SO

Émilie GSPONER, Grégory EMERY

22 mars 2016
version 1.0

Table des matières

1	Introduction REPTAR	3
1.1	Mise en place de l'environnement, utilisation de git	3
1.2	Démarrage de Qemu	4
1.3	Tests avec U-boot	6
1.4	Tests avec Linux	8
1.5	Tests sur la plate-forme réelle	11
1.6	Accès aux périphériques REPTAR	13
2	Émulation de périphériques	15
2.1	Environnement Qemu et machine Reptar	15
2.2	Émulation de la FPGA Spartan6	16
2.3	Émulation des devices de type LED (output)	17
2.4	Émulation de type boutons (input)	18
2.5	Gestion des interruptions (IRQ) avec les boutons	18
2.6	Émulation de l'afficheur 7 segments	18
2.7	Mini-application utilisant les boutons et l'afficheur 7 segments	19

1 Introduction REPTAR

1.1 Mise en place de l'environnement, utilisation de git

a) **Donnée** : Il faut tout d'abord récupérer le dépôt étudiant pour les laboratoires SEEE à l'aide de la commande suivante (via une fenêtre de terminal) :

```
1 $ git clone firstname.lastname@eigit.heig-vd.ch:/home2/reds/seee/seee_student
```

Travail réalisé : Nous n'avons pas les droits d'accès pour le dépôt git, nous l'avons donc téléchargé, puis extrait depuis le lien : <https://drive.switch.ch/index.php/s/TbHxQZtm09IVdkb>. Le dossier seee_student a ensuite été placé dans : /home/redsuser/

b) **Donnée** : Lancez Eclipse et ouvrez le workspace seee_student. Vous devriez obtenir la liste des projets (à gauche). Chaque projet a un lien symbolique dans la racine du workspace.

Travail réalisé : En introduisant le path du dossier seee_student comme workspace au lancement d'Eclipse, nous obtenons la liste de projets suivante :

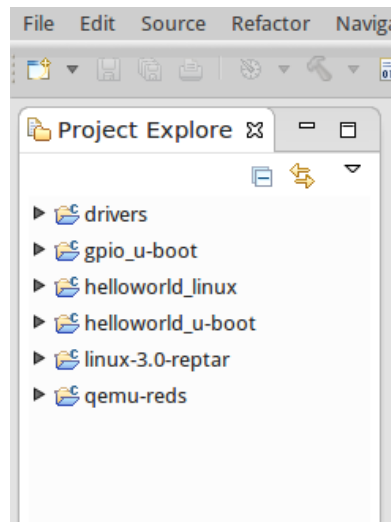


FIGURE 1 – Liste des projets

c) **Donnée** : Compilez maintenant l'émulateur Qemu. Dans une fenêtre de terminal, lancez la commande suivante à partir de votre répertoire seee_student :

```
1 $ make qemu
```

Travail réalisé : Vu que nous n'avons pas téléchargé le dossier de projets depuis git, il faut nettoyer le contenu du dossier avec clean ou distclean avant de pouvoir utiliser qemu. Le make qemu prend quelques instants.

```
1 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$ make clean
2 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$ make qemu
3 ...
4 make[1]: Leaving directory '/home/reduser/seee_student/qemu-reds'
5 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$
```

1.2 Démarrage de Qemu

a) **Donnée :** Depuis Eclipse, lancez le debugger avec la configuration de debug « qemu-reds Debug ». Dans la fenêtre Console, vous pourrez entrer directement des commandes de U-boot (tapez help par exemple).

Travail réalisé :

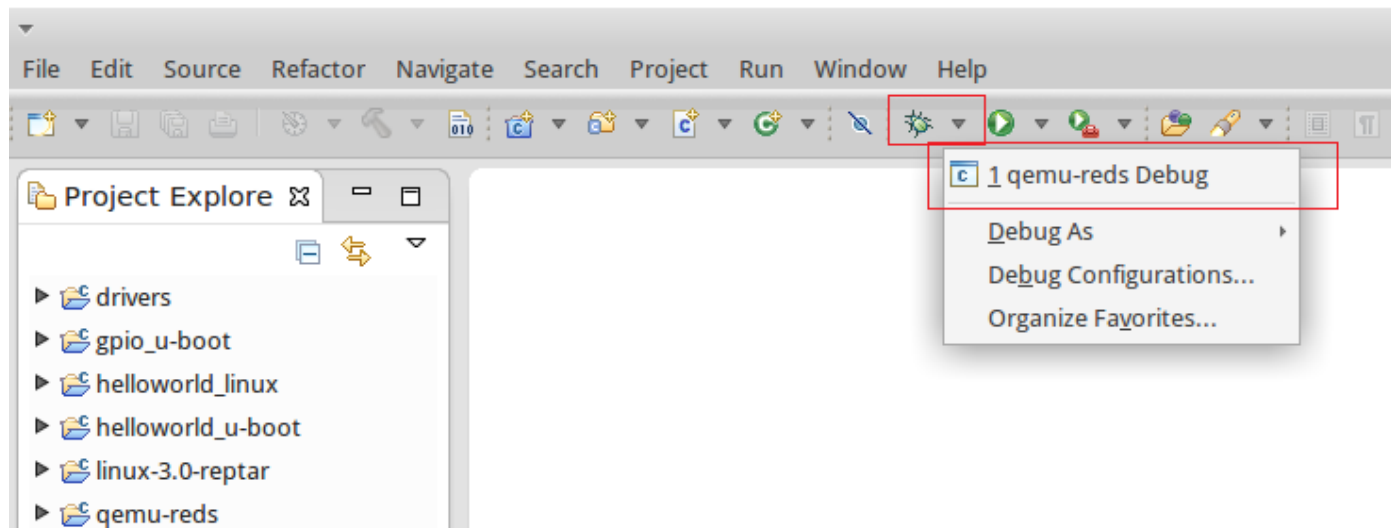


FIGURE 2 – Lancement d'Eclipse en mode Debug

Remarque : Après le lancement du Debug, il faut changer d'onglet en haut à droite en choisissant *Debug* pour avoir la console. Ce changement d'onglet ne se fait pas automatiquement.

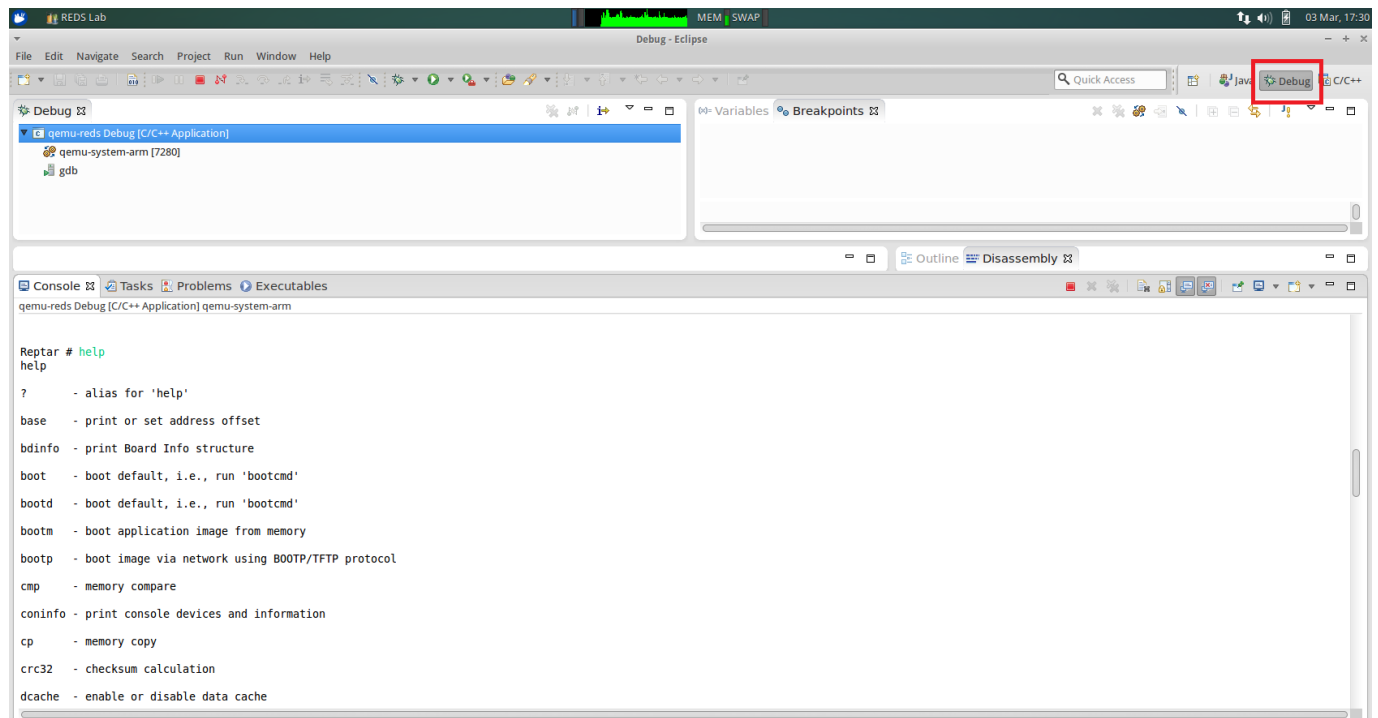


FIGURE 3 – Command help dans l'U-boot

b) **Donnée** : Interrompez l'exécution du programme en cliquant sur l'icône pause. Identifiez la ligne en cours d'exécution dans le code source.

Travail réalisé : En interrompant le programme avec le bouton *suspend*, on obtient la vue assembleur ci-dessous. L'environnement essaie d'ouvrir le fichier `ppoll.c`, on est donc en attente d'un événement. Le programme est interrompu après un `syscall`.

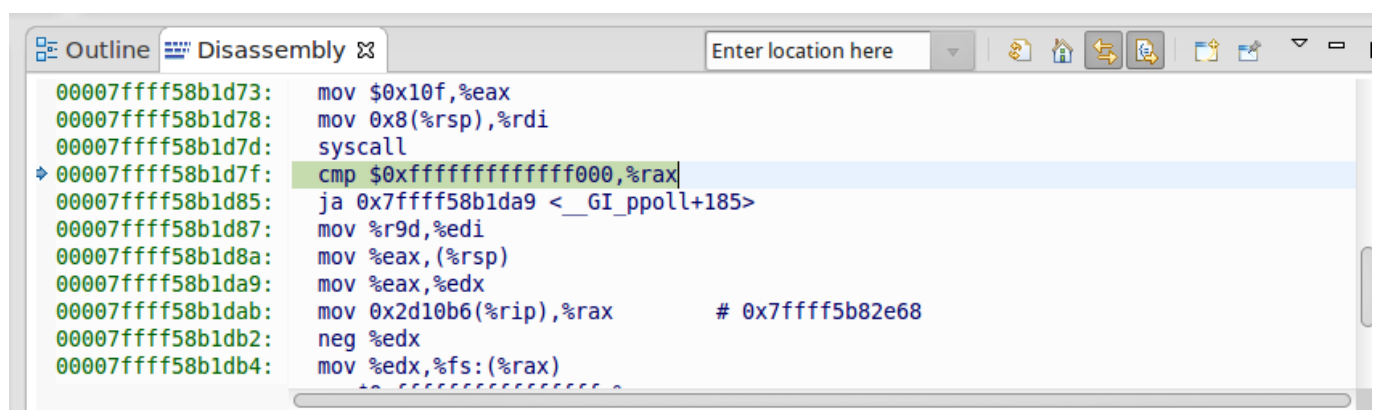


FIGURE 4 – Command help dans l'U-boot

c) **Donnée** : Stoppez l'exécution, et dans une fenêtre de commande, démarrez `qemu` à l'aide du script `stf` (en tapant `./stf`) dans le répertoire racine. Vous arrivez dans U-boot.

Travail réalisé : Cette partie n'a plus rien avoir avec Eclipse, on peut le fermer et lancer un terminal. Avec la commande *stf* tapée à la racine du répertoire *seee_student*, on arrive au même point qu'en lançant le Debug dans Eclipse. On peut également essayer la commande *help*

```

1 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$ ./stf
2 WARNING: Image format was not specified for 'filesystem/flash' and probing
   guessed raw.
3 ...
4
5 Reptar # help
6 ?      - alias for 'help'
7 base   - print or set address offset
8 binfo  - print Board Info structure
9 boot   - boot default, i.e., run 'bootcmd'
10 bootd  - boot default, i.e., run 'bootcmd'
11 bootm  - boot application image from memory
12 bootp  - boot image via network usi
13 ...

```

1.3 Tests avec U-boot

a) Donnée : Dans U-boot, listez les variables d'environnement avec la commande *printenv*. Observez les variables prédéfinies « *tftp1*, *tftp2* et *goapp* ». Ces variables définissent des commandes U-boot qui peuvent être exécutées à l'aide de la commande *run* (par exemple *run tftp1*). La commande *go <addr>* permet de lancer l'exécution à l'adresse physique *<addr>*. Vous pouvez définir/modifier vos propres variables et les sauvegarder dans la flash émulée avec la commande *saveenv* (seulement avec le lancement via *stf*).

Travail Réalisé : Après être entré dans l'U-boot avec *stf*, nous avons pu lister les variables d'environnement suivantes :

```

1 redsuser@vm-reds-2015s2:~$ cd seee_student/
2 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$ ./stf
3 WARNING: Image format was not specified for 'filesystem/flash' and probing
   guessed raw.
4 ...
5 goapp=go 0x81600000
6 ...
7 tftp1=tftp helloworld_u-boot/helloworld.bin
8 tftp2=tftp gpio_u-boot/gpio_u-boot.bin
9
10 Environment size: 930/4092 bytes
11 Reptar #

```

Les variables *tftp1* et *tftp2* sont des alias permettant de lancer des applications, la variable *goapp* est un alias permettant de lancer l'exécution de l'adresse physique 0x81600000. Elle définit l'adresse de début des applications. Voici un exemple d'utilisation de ces variables :

```

1 redsuser@vm-reds-2015s2:~$ cd seee_student/
2 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$ cd helloworld_u-boot/
3 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student/helloworld_u-boot$ make
4 ...
5 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student/helloworld_u-boot$ cd ../gpio_u-boot/
6 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student/gpio_u-boot$ make
7 ...
8 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student/gpio_u-boot$ cd ..
9 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$ ./stf
10 WARNING: Image format was not specified for 'filesystem/flash' and probing
    guessed raw.
11 ...
12 Reptar # run tftp1
13 smc911x: detected LAN9118 controller
14 smc911x: phy initialized
15 smc911x: MAC e4:af:a1:40:01:fe
16 Using smc911x-0 device
17 TFTP from server 10.0.2.2; our IP address is 10.0.2.10
18 Filename 'helloworld_u-boot/helloworld.bin'.
19 Load address: 0x81600000
20 Loading: #
21 done
22 Bytes transferred = 776 (308 hex)
23
24 Reptar # run goapp
25 ## Starting application at 0x81600000 ...
26 Example expects ABI version 6
27 Actual U-Boot ABI version 6
28 Hello World
29 argc = 1
30 argv[0] = "0x81600000"
31 argv[1] = "<NULL>"
32 Hit any key to exit ...
33 ## Application terminated, rc = 0x0
34
35 Reptar # run tftp2
36 smc911x: detected LAN9118 controller
37 smc911x: phy initialized
38 smc911x: MAC e4:af:a1:40:01:fe
39 Using smc911x-0 device
40 TFTP from server 10.0.2.2; our IP address is 10.0.2.10
41 Filename 'gpio_u-boot/gpio_u-boot.bin'.
42 Load address: 0x81600000
43 Loading: #
44 done
45 Bytes transferred = 3080 (c08 hex)
46
47 Reptar # run goapp
48 ## Starting application at 0x81600000 ...
49 Start of the GPIO U-boot Standalone Application
50 Stop of the GPIO U-boot Standalone Application
51 ## Application terminated, rc = 0x0
52 Reptar #

```

La commande `run tftp<x>` charge une application à l'adresse `0x81600000`, tandis que `run goapp` va exécuter l'application à cette adresse comme le montre l'exemple ci-dessus.

b) Donnée : La production de l'exécutable `helloworld_u-boot` s'effectue en tapant la commande `make` dans le répertoire contenant les sources du programme. Ensuite, vous pouvez transférer le fichier (extension `.bin`) dans U-boot et exécuter le binaire (aidez-vous des variables d'environnement prédéfinies).

Travail réalisé : Ce point a été fait en même temps que le précédent.

c) Donnée : Testez le debugger dans Eclipse avec le projet `helloworld_u-boot`. Mettez un breakpoint dans le code source au démarrage du programme, et lancez le debugger avec la configuration de debug « `helloworld_u-boot Debug` ».

Travail Réalisé : Il faut que U-boot soit démarré dans un terminal externe avec `stf` pour que la manipulation fonctionne avec Eclipse.

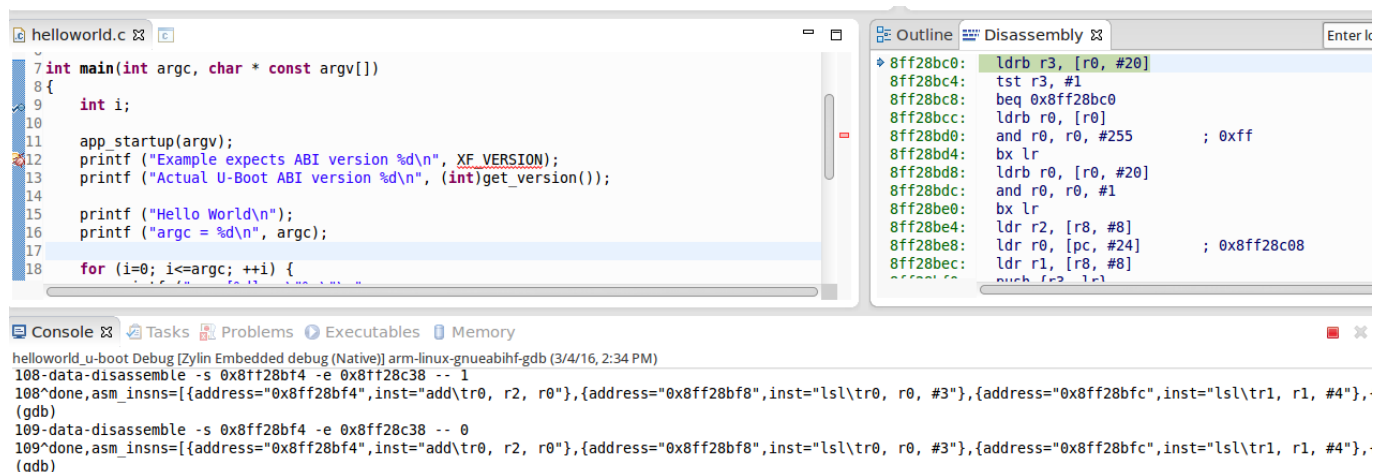


FIGURE 5 – Debug d'hello_world_u-boot

Remarque : Qemu se comporte comme un serveur GDB, ce qui permet à Eclipse de communiquer avec lui et de debugger des applications...à retravailler

1.4 Tests avec Linux

a) Donnée : Lancez le script `./deploy` qui permettra de déployer le noyau Linux dans la sdcard virtuelle (ignorez l'erreur due à l'absence de certains fichiers).

Travail réalisé :

```

1 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$ ./deploy
2 Deploying into reptar rootfs ...
3 Mounting filesystem/sd-card.img...
4 [sudo] password for redsuser:
5 SD card partitions mounted in 'boot_tmp' and 'filesystem_tmp' directories

```



```

6 cp: cannot stat 'drivers/sp6.ko': No such file or directory
7 cp: cannot stat 'drivers/usertest': No such file or directory
8 cp: cannot stat 'drivers/buttons_test': No such file or directory
9 Unmounting SD card image...
10 Synchronizing .img file
11 Unmounting 'boot_tmp' and 'filesystem_tmp' ...
12 Done !
13 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$

```

b) Donnée : Poursuivez ensuite en cross-compilant l'application helloworld pour Linux (via make).

Travail réalisé :

```

1 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$ cd helloworld_linux/
2 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student/helloworld_linux$ make
3 ...
4 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student/helloworld_linux$ cd ..

```

c) Donnée : Copiez l'exécutable dans le rootfs

Travail réalisé :

```

1 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$ ./mount-sd.sh
2 Mounting filesystem/sd-card.img...
3 SD card partitions mounted in 'boot_tmp' and 'filesystem_tmp' directories
4
5 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$ sudo cp helloworld_linux/helloworld
  filesystem_tmp/root
6
7 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$ ./umount-sd.sh
8 Unmounting SD card image...
9 Synchronizing .img file
10 Unmounting 'boot_tmp' and 'filesystem_tmp' ...
11 Done !
12 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$

```

d) Donnée : Lancez le script stq suivi de la commande boot dans U-boot pour amorcer le démarrage de Linux

Travail réalisé : Avec la commande stq, une représentation de la carte se lance.

```

1 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$ ./stq
2 libGL error: failed to authenticate magic 1
3 libGL error: failed to load driver: vboxvideo
4 Running QEMU
5 ...
6 Warning: smc911x-0 MAC addresses don't match:
7 Address in SROM is          52:54:00:12:34:56
8 Address in environment is   e4:af:a1:40:01:fe
9 Reptar # boot

```

```

10 reading uImage
11 ...
12 *** Welcome on REPTAR (HEIG-VD/REDS): use root/root to log in ***
13 reptar login: root
14 Password:
15 #

```

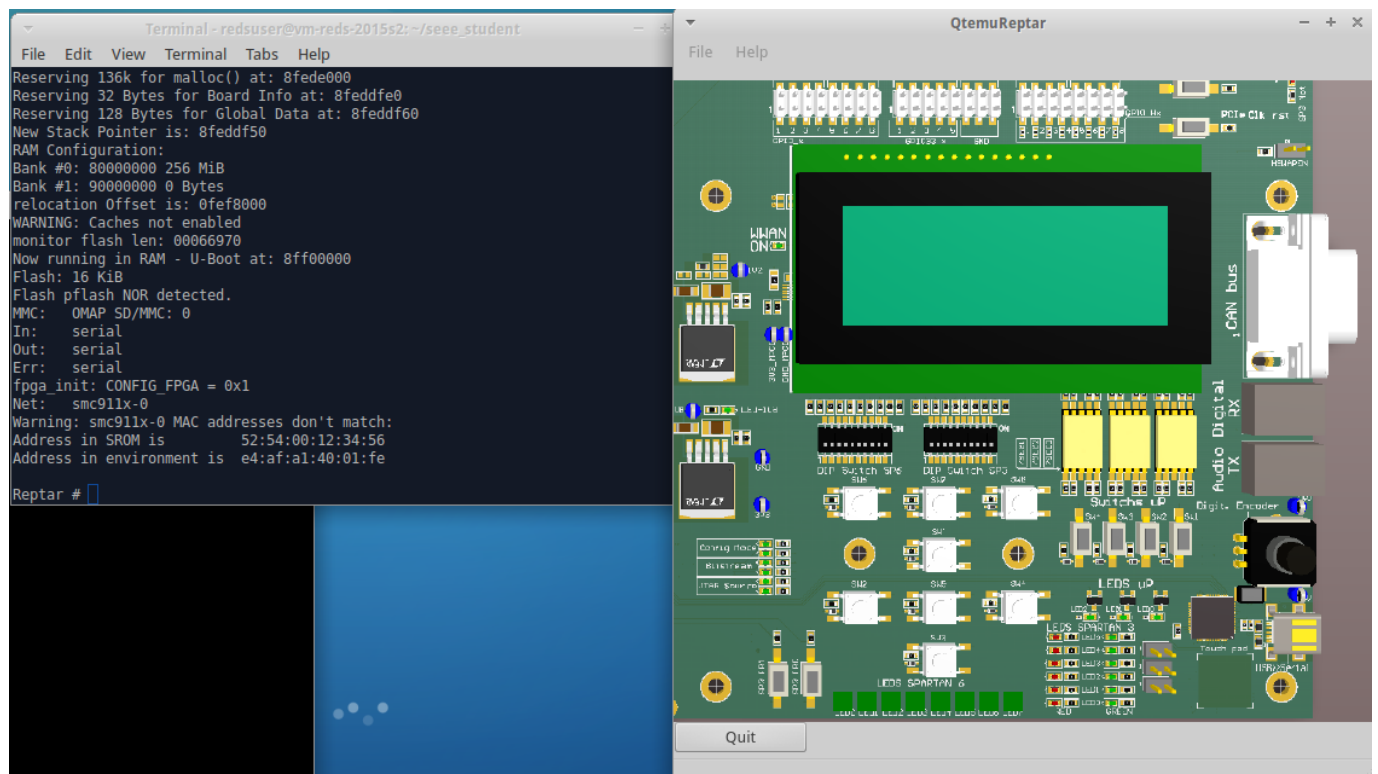


FIGURE 6 – Environnement émulé

e) **Donnée :** Lancez votre application

Travail réalisé :

```

1 # ls
2 Settings          fs          helloworld        roots_domU.img
3 # ./helloworld
4 Hello world within Linux
5 argv[0] = ./helloworld
6 #

```

f) **Donnée :** Dans Linux, tapez la commande suivante :

```

1 $ /usr/share/qt/examples/effects/lighting/lighting -qws &

```

Travail réalisé : Cette commande permet de lancer une application pré installée de l'émulateur.

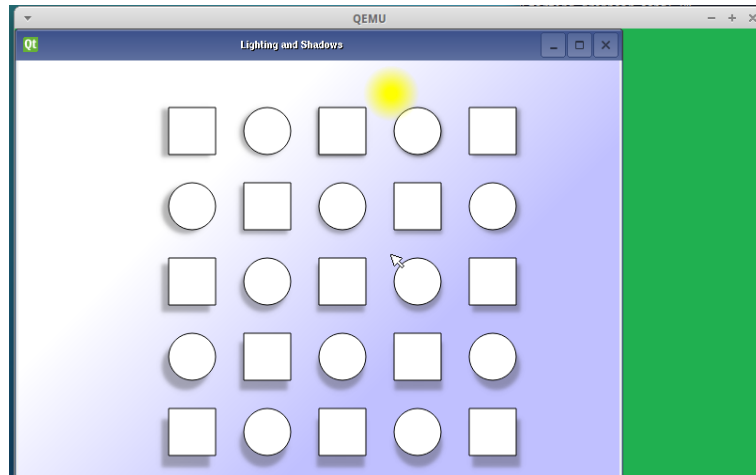


FIGURE 7 – Lancement d'une application

1.5 Tests sur la plate-forme réelle

a) Donnée : Déployez l'application helloworld dans U-boot sur la plate-forme REPTAR avec l'interface réseau. Le transfert peut s'effectuer avec la commande tftp. Il est nécessaire d'exécuter la commande suivante pour mettre à jour les adresses IP et MAC de la plate-forme REPTAR :

```
1 # run setmac setip
```

Travail réalisé : Avec la commande tftp il faut donner comme paramètre le *.bin* de l'application ainsi que l'adresse physique où charger le programme. Cette adresse est 0x81600000 comme dans les exercices précédents.

```
1 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$ cd helloworld_u-boot/
2 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student/helloworld_u-boot$ make
3 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student/helloworld_u-boot$ cp helloworld.bin /
  home/redsuser/tftpboot
4 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student/helloworld_u-boot$ sudo picocom -b
  115200 /dev/ttyUSB0
5 [sudo] password for redsuser:
6 picocom v1.7
7 ...
8 Terminal ready
9
10 Reptar # run setmac setip
11 Reptar # tftp 0x81600000 helloworld.bin
12 smc911x: detected LAN9220 controller
13 smc911x: phy initialized
14 smc911x: MAC e4:af:a1:40:01:fe
15 Using smc911x-0 device
16 TFTP from server 192.168.1.1; our IP address is 192.168.1.254
```

```

17 Filename 'helloworld.bin'.
18 Load address: 0x81600000
19 Loading: T #
20 done
21 Bytes transferred = 776 (308 hex)
22
23 Reptar # go 0x81600000
24 ## Starting application at 0x81600000 ...
25 Example expects ABI version 6
26 Actual U-Boot ABI version 6
27 Hello World
28 argc = 1
29 argv[0] = "0x81600000"
30 argv[1] = "<NULL>"
31 Hit any key to exit ...

```

Remarque : La commande tftp ne fonctionnera pas tant que la configuration réseau n'est pas correcte. Il faut impérativement que l'adresse Ip de la connexion par pont de la VM soit 192.168.1.1.

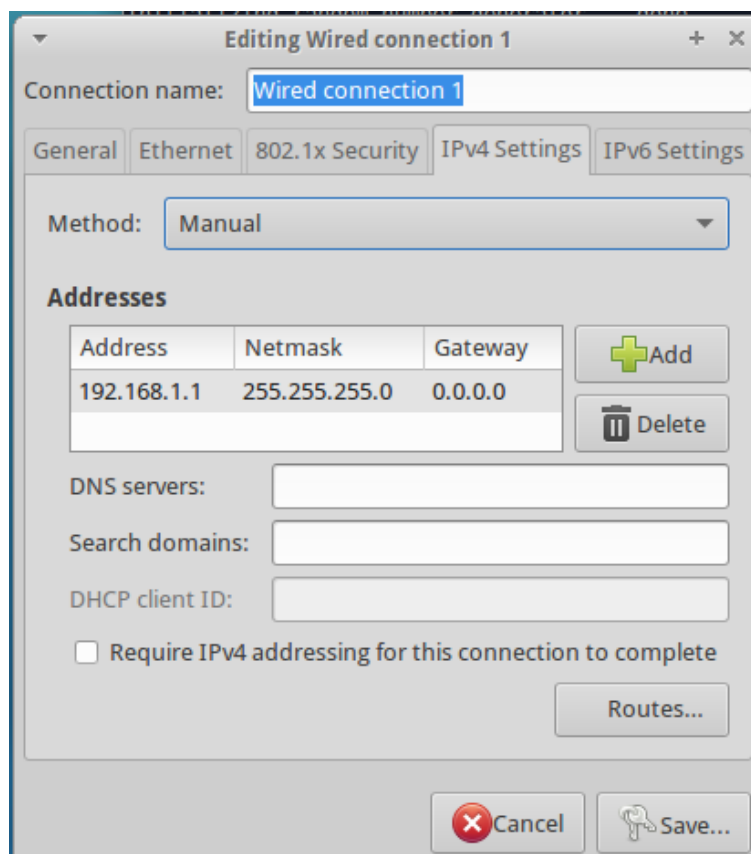


FIGURE 8 – Configuration réseau

b) Donnée : Déployez l'application helloworld dans Linux à l'aide du réseau et de la commande scp.

Travail réalisé : Nous avons découvert que l'adresse Ip de la carte n'était pas celle attendue, nous avons donc dû adapter scp pour l'adresse Ip 192.168.1.254.

```

1 Reptar # boot
2 reading uImage
3 ...
4 *** Welcome on REPTAR (HEIG-VD/REDS): use root/root to log in ***
5 reptar login: root
6 Password:
7 # ifconfig
8 eth0      Link encap:Ethernet  HWaddr E4:AF:A1:40:01:FE
9 inet addr:192.168.1.254  Bcast:192.168.1.255  Mask:255.255.255.0
10 ...

```

La commande scp permet de transférer le helloworld_linux à la carte reptar par l'interface réseau depuis la machine hôte.

```

1 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student/helloworld_linux$ scp helloworld
   root@192.168.1.254: helloworld
2
3 The authenticity of host '192.168.1.254 (192.168.1.254)' can't be established.
4 RSA key fingerprint is fb:59:a3:73:97:9d:b7:b9:8a:40:e8:bc:19:ab:ab:70.
5 Are you sure you want to continue connecting (yes/no)? yes
6 Warning: Permanently added '192.168.1.254' (RSA) to the list of known hosts.
7 root@192.168.1.254's password:
8 helloworld                                100% 6877      6.7KB/s   00:00

```

L'application helloworld est maintenant chargée sur la cible, il ne reste plus qu'à l'exécuter sur celle-ci.

```

1 # ls
2 bitstreams  helloworld      tests
3 # ./helloworld
4 Hello world within Linux
5 argv[0] = ./helloworld
6 #

```

1.6 Accès aux périphériques REPTAR

a) Donnée : Sur la base de l'exemple gpio_u-boot., vous devez développer une application permettant d'interagir avec les LEDs et les switches présents sur la carte CPU de la plate-forme REPTAR. Le but de l'application est d'allumer une LED lorsqu'on appuie sur un switch.

1. La LED 0 doit s'allumer lorsqu'on appuie sur le SWITCH 0.
2. La LED 1 s'allume si l'on appuie sur le SWITCH 1.
3. Et ainsi de suite pour les LEDs et switches 0..3 de la carte CPU.

Le switch numéro 4 sert à quitter l'application. Aidez-vous des fichiers d'en-tête (`#include`) déjà présents dans le chablon fourni.

L'application `gpio_u-boot` est à déployer dans U-boot via la commande `tftp`.

Emplacement du code réalisé : `/gpio_u-boot.c`

Ce code est très basique, mais implémente correctement les points exigés par la donnée. Les commandes suivantes ont permis de lancer l'application sur la cible réelle dans l'U-boot. Une pression sur le switch numéro 4 permet de terminer l'application.

```
1 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student/gpio_u-boot$ make
2 ...
3 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student/gpio_u-boot$ cp gpio_u-boot.bin /home/
   redsuser/tftpboot
4 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student/gpio_u-boot$ sudo picocom -b 115200 /dev
   /ttyUSB0
5 [sudo] password for redsuser:
6 picocom v1.7
7 ...
8 Terminal ready
9
10 Reptar # tftp 0x81600000 gpio_u-boot.bin
11 smc911x: detected LAN9220 controller
12 smc911x: phy initialized
13 smc911x: MAC e4:af:a1:40:01:fe
14 Using smc911x-0 device
15 TFTP from server 192.168.1.1; our IP address is 192.168.1.254
16 Filename 'gpio_u-boot.bin'.
17 Load address: 0x81600000
18 Loading: T #
19 done
20 Bytes transferred = 776 (308 hex)
21
22 Reptar # go 0x81600000
23 ...
24 Stop of the GPIO U-boot Standalone Application
25 Reptar #
```

2 Émulation de périphériques

2.1 Environnement Qemu et machine Reptar

Cette étape vous permet de vous familiariser avec l'environnement que nous utiliserons pour l'émulation de périphériques. Dans cette étape, il est nécessaire de travailler avec l'application graphique Qtemu, qui constitue le frontend graphique de Qemu. L'application est développée en C++ et utilise la librairie Qt.

a) Donnée : A partir du répertoire `seee_student`, lancez le frontend graphique avec le script `stq`

Travail réalisé :

```
1 redsuser@vm-reds-2015s2:~$ cd seee_student /
2 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$ ./stq
3 ...
4 Reptar #
```

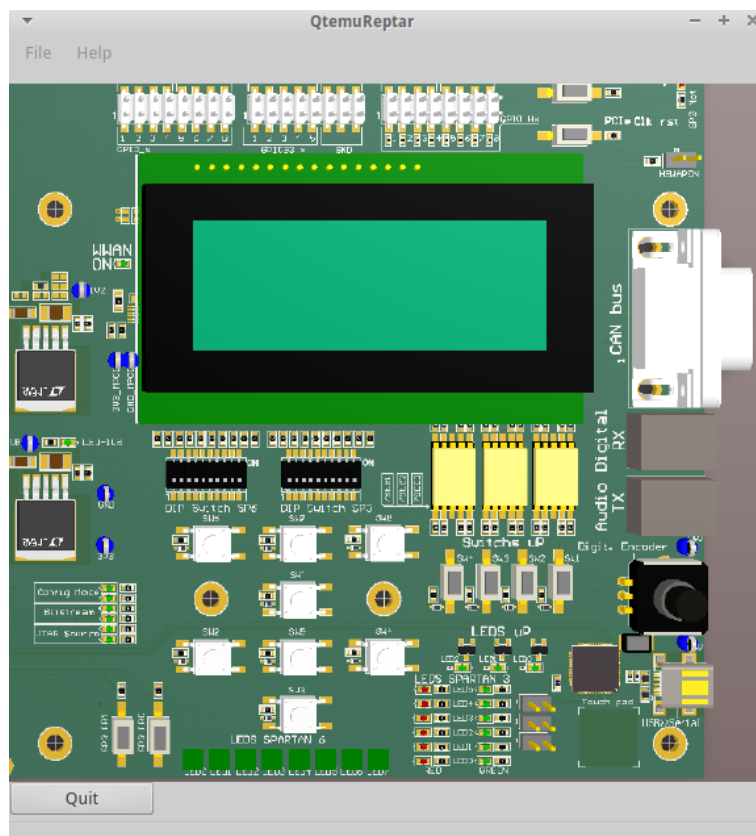


FIGURE 9 – Frontend graphique de Qemu

b) Donnée : Les fichiers sources de Qemu se trouvent dans le répertoire `qemu-reds`. Examinez les fichiers suivants :

1. hw/arm/reptar/reptar.c Emulation plate-forme REPTAR
2. hw/reptar_sp6.c Emulation de la FPGA
3. hw/reptar_sp6_clcd.c Emulation gestion du LCD4x20
4. hw/reptar_sp6_buttons.c Emulation gestion des boutons
5. hw/reptar_sp6_emul.c Gateway entre Qemu et Qtemu

Vous trouverez également toute la documentation nécessaire sur la plate-forme Reptar dans le répertoire doc.

Remarque : Ces différents fichiers implémentent ce qui ressemble à des modules noyaux.

c) Donnée : La compilation de Qemu pourra s'effectuer dans le répertoire qemu-reds directement, avec la commande `make` (utilisez `make -j4` ou `-j8` pour aller plus vite!).

Travail réalisé : Par la suite, seule la commande *make* sera nécessaire pour recompilier l'émulateur.

En lançant `./qtemu` et Eclipse, on pourra debugger l'émulateur Qemu.

```

1 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$ cd qemu-reds/
2 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student/qemu-reds$ ./configure --target-list=arm
   -softmmu --enable-debug --disable-attr --disable-docs
3 ...
4 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$ make -j8
5 ...
6 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$

```

2.2 Émulation de la FPGA Spartan6

Dans cette étape, il s'agit de mettre en place la structure nécessaire à l'émulation de la FPGA intégrée à la plate-forme. La FPGA implémente des registres associés aux périphériques externes. Dans cette étape, il s'agit de s'assurer que l'accès aux adresses I/O en lecture et écriture fonctionne.

a) Donnée : Complétez l'émulation de la FPGA afin de tester l'écriture et la lecture à l'une ou l'autre adresse dédiée à la FPGA (affichez simplement un message).

Emplacement du code :

`/emulationSpartan6_part2/reptar_sp6.c`
`/emulationSpartan6_part2/reptar.c`

Travail réalisé : Nous avons modifié les fichiers *reptar_sp6.c* et *reptar.c*

Le point crucial de cette partie du labo a été de trouver l'adresse de base de la FPGA qui est **0x18000000**. Nous avons en effet besoin de cette adresse pour instancier le *reptar_sp6* dans la partie *reptar*.

```

1 sysbus_create_simple("reptar_sp6", 0x18000000, NULL);

```


Pour le reste de l'implémentation, nous nous sommes basés sur le diagramme de séquence du support de cours et avons pris le document *versatilepb.c* comme exemple pour le contenu des méthodes callback.

Le bon fonctionnement du code a été "testé" premièrement en réussissant la compilation sans erreurs, puis le lancement sans crash. Nous avons également ajouté des messages affichés dans la console dans les différentes méthodes callback pour suivre l'initialisation. L'exécution a été faite de la manière suivante :

```
1 redsuser@vm-reds-2015s2:~$ cd seee_student/qemu-reds/
2 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student/qemu-reds$ make
3 ...
4 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student/qemu-reds$ cd ..
5 redsuser@vm-reds-2015s2:~/seee_student$ ./stq
6 ...
7 sp6 init
8 reptar-sp6-emul: sp6_emul_init
9 sp6 initfn
10 ...
11 Reptar #
```

b) Donnée : Testez les accès en lecture-écriture avec U-Boot.

Travail réalisé : Pour l'instant, les callback de lecture/écriture que nous avons implémentés contiennent uniquement des messages d'indication qui sont affichés dans la console. À l'aide des commandes suivantes, nous avons pu en tester le bon fonctionnement. Les commandes tentent de lire, puis écrire à l'adresse de la FPGA.

```
1 Reptar # md.l 0x18000000 1
2 18000000:sp6 read
3 00000000 ....
4 Reptar # mw.l 0x18000000 1
5 sp6 write
6 Reptar #
```

2.3 Émulation des devices de type LED (output)

Donnée : La FPGA est connectée à des LEDs qui sont visibles sur l'interface graphique. Cette étape consiste à implémenter le code d'émulation précédent afin de gérer l'accès aux LEDs reliées à la FPGA. Les interactions entre la FPGA et l'interface graphique doivent être gérées proprement.

Travail réalisé :

2.4 Émulation de type boutons (input)

La FPGA est connectée à une série de boutons (switches) sur la plate-forme Reptar. Cette étape consiste à mettre en place la structure nécessaire à la gestion de ces boutons.

a) Donnée : Adaptez les fichiers nécessaires afin que l'émulation de votre périphérique (FPGA) puisse détecter la pression d'une touche, sans vous préoccuper pour le moment des interruptions.

Travail réalisé :

b) Donnée : Le projet `sp6_buttons_u-boot` contient une application permettant de tester vos boutons (en mode polling). Compilez l'application et effectuez quelques tests.

Travail réalisé :

2.5 Gestion des interruptions (IRQ) avec les boutons

Complétez votre émulateur avec le code nécessaire à la gestion d'une interruption à niveau émise par la FPGA lorsqu'un bouton est pressé. L'interruption est censée être acquittée par le driver. Il faut donc gérer l'état interne associé à cette interruption.

a) Donnée : Commencez par adapter le code d'initialisation de la plate-forme (`reptar.c`) afin d'instancier une interruption en provenance de la FPGA ; l'interruption sera de type niveau.

Travail réalisé :

b) Donnée : Testez que l'interruption fonctionne en configurant le contrôleur GPIO et en interrogeant le registre d'état, dans U-Boot. Les registres du microcontrôleur à utiliser sont les suivants : `GPIO_RISINGDETECT`, `GPIO_IRQENABLE1` et `GPIO_IRQSTATUS1`. De plus, l'interruption doit aussi être activée au niveau de la FPGA (cf documentation).

Travail réalisé :

2.6 Émulation de l'afficheur 7 segments

La FPGA est connectée à un afficheur 7 segments, visible sur l'émulateur. Cette étape consiste à mettre en place la gestion de cet afficheur 7 segments. **a) Donnée :** Adaptez les fichiers nécessaires afin que l'émulation de votre périphérique (FPGA) puisse gérer les trois digits de l'afficheur 7 segments.

Travail réalisé :

b) Donnée : Le dossier `7seg_u-boot` contient une application permettant de tester l'afficheur 7 segments : les chiffres de 0 à 9 doivent défiler progressivement : 012, puis 123, 234, 456, 567, ..., 901, 012, etc. Compilez l'application et effectuez quelques tests.

Travail réalisé :

2.7 Mini-application utilisant les boutons et l'afficheur 7 segments

a) Donnée : Le dossier `miniapp_u-boot` contient un chablon. Complétez-le afin de créer une application qui utilise les boutons SW2, SW5, SW4 et SW3, ainsi que l'afficheur 7 segments.

1. Lors d'un appui sur SW2, SW5 ou SW4, le digit respectivement à gauche, au centre ou au milieu est incrémenté de 1, modulo 10. Si un digit atteint 9, il reviendra à 0.
2. La valeur initiale de chaque digit, au démarrage de l'application, est 0 (on affichera 000).
3. Un appui sur SW3 quitte l'application.
4. Vous devrez gérer l'anti-rebond : le digit ne devra être incrémenté que si le bouton est pressé puis relâché (comme un appui sur une touche de sonnette par exemple).

Travail réalisé :

b) Donnée : Testez votre application sur l'émulateur

Travail réalisé :

c) Donnée : Déployez et testez votre application sur la plate-forme réelle

Travail réalisé :