Ecole Nationale
Supérieure
de l'Electronique
ENSEA et de ses Applications

Linux Embarqué

Séance 3 : Démarrage et Device Trees

Laurent Fiack
Bureau D212 – laurent.fiack@ensea.fr

Menu du jour

Démarrage

Pourquoi c'est compliqué ?

- Dans FreeRTOS
  - Un peu de code ASM avant le `main()` : Mémoires, horloges
  - Initialisations basiques dans le `main()`
  - Créations des tâches
  - Démarrage de l'ordonnanceur
- Dans Linux
  - Exécution depuis la RAM
  - Chargement de drivers (Contrôleurs mémoire, port série, réseau, affichage, clavier...)
  - Système(s) de fichier
  - Dans cet ordre
  - Mais les drivers sont des fichiers...

Démarrage

- Composants logiciels impliqués dans le démarrage :
  - Bootloader
  - Kernel Image
  - Root file system (rootfs) – image `initrd` ou lien NFS
- Étapes du démarrage d'un PC
  - System Startup - PC-BIOS/BootMonitor
  - Stage1 bootloader - MBR
  - Stage2 bootloader - LILO,GRUB etc
  - Kernel - Linux
  - Init - The User Space
- Démarrage d'un système embarqué
  - Au lieu du BIOS, le processeur démarre à partir d'une adresse de la Flash
  - Le processeur exécute un seul et unique "boot strap firmware" ou "boot loader"
  - Le bootloader fournit des fonctionnalités utiles pour le développement et le debugging

Boot loader

- BIOS/UEFI (dépends du matériel)
  - Le CPU exécute le code du BIOS
  - Première étape : POST (Power On Self Test)
  - "run time services" : Énumération des périphériques et initialisation
  - À la fin du POST : code vidé de la mémoire. Certains services du BIOS restent en mémoire et sont disponibles pour l'OS
  - Recherche des périphériques bootables (disque durs), et sélectionne selon la configuration
  - Le Primary boot loader est chargé et prends le contrôle
- Primary boot loader
  - Initialisations optionnelles
  - Charge le secondary boot loader
- Secondary boot loader
  - Charge Linux et un RAM disk optionel dans la RAM
  - Chargement du initrd (temporaire sur PC, rootfs définitif sur système embarqué)
  - Le noyau est décompressé et initialisé

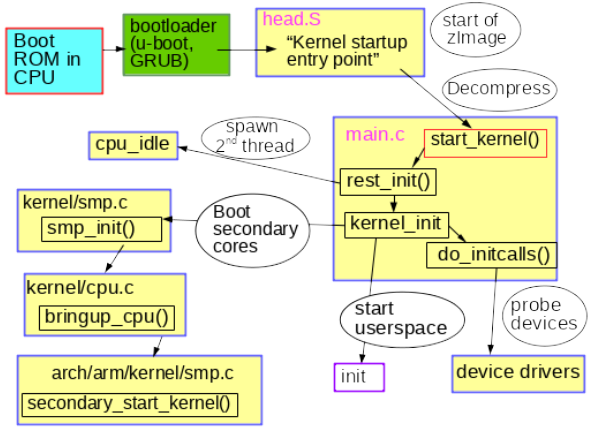
U-boot

- U-Boot (Universal Boot Loader) est l'équivalent du BIOS sur les cartes embarqués
- Si aucun système d'exploitation n'est requis pour l'application, U-Boot peut être utilisé comme base de développement
- U-Boot est open source (GPL), sans royalties et bénéficie d'une communauté de développeurs importante et extrêmement active
- Les tâches principales d'U-Boot
  - Initialisation du matériel et plus particulièrement du contrôleur mémoire
  - Passage des paramètres de démarrage au noyau Linux
  - Lancement du noyau Linux
- U-Boot permet aussi de :
  - Lire et écrire dans différentes zones mémoire
  - Charger des images binaires dans la RAM par cable série, Ethernet ou USB
  - Copier des images binaires de la RAM vers la FLASH
  - Configurer le FPGA

Le noyau

- Invocation du noyau
  - Vérifications du matériel, énumère les périphériques, monte le rootfs
  - Charge les modules nécessaires au démarrage du système
  - Démarrage du premier programme en user-space (init) et initialisations de haut-niveau
  - Similaire sur PC et cible embarquée
- Kernel Image
  - Image compressée (zlib)
  - Appelée zImage (<512 KB) ou bzImage (> 512 KB)
  - `head.S` à la tête du fichier pour décompresser l'image

Récapitulatif



Device Tree

Device Tree

C'est quoi ?

- Structure de données décrivant les périphériques d'une machine
- Utilisé par le noyau (Linux ou autre)
- Décrit le(s) CPU(s), la mémoire, les bus et les périphériques.

- Pas utilisé sur PC
  - Périphérique « découvrables » de manière dynamique
  - Mécanisme d'énumération et d'identification
  - PCI, USB...
  - Architectures très normalisées
- Provient des architectures SPARC et PowerPC
  - Autres bus sans énumération
  - Architectures moins normalisées
- Quasi-obligatoire pour Linux sur architecture ARM Cortex-Axx

« *Gaah. Guys, this whole ARM thing is a f*cking pain in the ass.* »

– Linus Torvalds

Référence


REPÈRES & SCIENCES

INTRODUCTION AU « DEVICE TREE » SUR ARM

Thomas PETAZZONI
CTO et ingénieur Linux embarqué, Free Electrons

Depuis plusieurs années, le support de l'architecture ARM dans le noyau Linux est passé progressivement au « Device Tree » pour la description du matériel. Cet article se propose de décrire les motivations derrière ce changement, ainsi que l'utilisation et le fonctionnement du « Device Tree ».

`http://jmfriedt.free.fr/devicetree_os19.pdf`

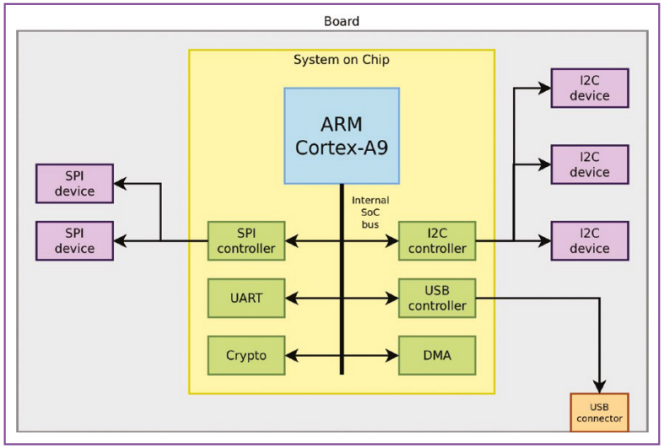
Spécificité des SoC

- Processeur + plein de périphériques
  - Bus : UART, SPI, I2C, CAN...
  - Accélérateurs : CRC, Crypto, GPU...
- Composants connectés aux bus
  - Codec audio, PHY ethernet, Capteurs, HMI...
- Trois niveaux : Processeur, SoC, Carte
- CPU ARM + Intégration d'IP $\rightarrow$ Grand diversité

Linux sur un SoC

- Pour porter le noyau Linux sur un SoC
  - Jeu d'instruction insuffisant
  - Porter l'ensemble des périphériques
- Périphériques pas découvrables dynamiquement
- Besoin de connaître l'ensemble des périphériques intégrés

Exemple de SoC



Sans Device Tree

- Code spécifique dans `/arch/arm`
  - Support CPU (IRQs, MMU, Cache..)
- `mach-*` contient le code spécifique aux SoC (eg `mach-socfpga`)
- Beaucoup de code C pour chaque SoC
- Encore plus pour les cartes
- Utilisation d'un *machine ID* pour trouver quels drivers charger

arch/arm/mach-orion5x/mv2120-setup.c

```
MACHINE_START(MV2120, "HP Media Vault mv2120")
        /* Maintainer: Martin Michlmayr <tbm@cyrius.com> */
        .init_machine   = mv2120_init,
  [...]
MACHINE_END
```

Exemple de fonction init()

mv2120_init()

```
static void __init mv2120_init(void) {
  [...]
        orion5x_ehci0_init();
        orion5x_ehci1_init();
        orion5x_eth_init(&mv2120_eth_data);
        orion5x_i2c_init();
        orion5x_sata_init(&mv2120_sata_data);
        orion5x_uart0_init();
        orion5x_xor_init();
  [...]
        platform_device_register(&mv2120_button_device);
  [...]
}
```

Exemple avec un contrôleur USB

- Passage des adresses physiques, numéro d'IRQ et type de contrôleur

arch/arm/mach-orion5x/common.c

```
void __init orion5x_ehci0_init(void) {
        orion_ehci_init(ORION5X_USB0_PHYS_BASE, IRQ_ORION5X_USB0_CTRL,
                        EHCI_PHY_ORION);
}
```

- Enregistrement d'un `platform_device`
  - Structure décrivant un périphérique attaché au SoC ($\neq$ pas sur un bus)
- Déclenche l'appel de la fonction `->probe()`
  - Itinitialise le périphérique et l'enregistre auprès du noyau

Exemple avec un contrôleur USB

- Passage des adresses physiques, numéro d'IRQ et type de contrôleur

arch/arm/plat-orion/common.c

```
static struct platform_device orion_ehci = {
        .name           = "orion-ehci",
        .id             = 0,
  [...]
};

void __init orion_ehci_init(unsigned long mapbase, unsigned long irq,
                            enum orion_ehci_phy_ver phy_version) {
  [...]
        fill_resources(&orion_ehci, orion_ehci_resources, mapbase, SZ_4K - 1, irq);
        platform_device_register(&orion_ehci);
}
```

Exemple avec un contrôleur USB

drivers/usb/host/ehci-orion.c

```
static int ehci_orion_drv_probe(struct platform_device *pdev) {
  [...]
}

static struct platform_driver ehci_orion_driver = {
        .probe          = ehci_orion_drv_probe,
  [...]
        .driver = {
                .name   = "orion-ehci",
        },
};
```

- En résumé :
  - L'ensemble des périphériques de chaque SoC doivent être décrits en C
  - Code très redondant
  - Taille de code importante
- Le Device Tree permet d'éviter ça

Côté bootloader

- Image binaire unique : zImage
- U-Boot responsable de :
  - Charger l'image du noyau dans la RAM
  - Lancer l'exécution du noyau
- Exemple :

Dans U-Boot

```
U-Boot> tftp 0x200000 zImage
[...]
U-Boot> bootz 0x200000
```

- U-Boot est compilé spécifiquement pour la plateforme
- Passe le *machine ID* à travers le registre `R1`

Principe

- Description du matériel du SoC passé au noyau lors du démarrage
- Description dans un fichier appelé *Device Tree Source* (DTS)
- Compilé en binaire dans un fichier *Device Tree Blob* (DTB)
  - Compilation réalisée par *Device Tree Compiler* (DTC)

Dans les sources du noyau

```
$ make ARCH=arm mvebu_v7_defconfig
$ make ARCH=arm CROSS_COMPILE=arm-linux-gnueabihf
$ ls arch/arm/boot/dts/
arch/arm/boot/dts/armada-370-db.dtb                arch/arm/boot/dts/armada-385-linksys-cobra.dtb
arch/arm/boot/dts/armada-370-dlink-dns327l.dtb     arch/arm/boot/dts/armada-388-db.dtb
arch/arm/boot/dts/armada-370-mirabox.dtb           arch/arm/boot/dts/armada-388-gp.dtb
arch/arm/boot/dts/armada-370-netgear-rn102.dtb     arch/arm/boot/dts/armada-388-rd.dtb
arch/arm/boot/dts/armada-385-linksys-caiman.dtb    arch/arm/boot/dts/armada-xp-linksys-mamba.dtb
arch/arm/boot/dts/dove-sbc-a510.dtb                arch/arm/boot/dts/dove-d2plug.dtb
[...]
$
```

Principe

- Indépendant de l'OS
- Peut être utilisé par Linux, un Unix, un bootloader...
- Uniquement utilisé pour des périphériques non découvrables ou énumérables
  - Périphériques USB ou PCI ne sont pas dans le device tree
  - Mais les contrôleurs y sont

Démarrage

- Un fichier en plus à charger par U-Boot
  - Il faut donc charger le noyau et le .dtb

Dans U-Boot

```
U-Boot> tftp 0x2100000 zImage
[...]
U-Boot> tftp 0x2000000 armada-385-linksys-cobra.dtb
[...]
U-Boot> bootz 0x2100000 - 0x2000000
```

- `bootz` a 3 arguments
  - L'adresse de l'image du noyau
  - L'adresse (optionnelle) d'un initramfs
  - L'adresse (optionnelle) d'un .dtb

Compatibilité

- Sur des vieux systèmes avec un vieux U-Boot
- Il suffit de concaténer l'image du noyau avec le .dtb

Après la compilation

```
cat arch/arm/boot/zImage \
  arch/arm/boot/dts/armada-385-linksys-cobra.dtb \
  > zImage.armada-385-linksys-cobra
```

Syntaxe

- Structure en arbre
- Composée d'un ensemble de **nœuds** (nodes) imbriqués
- Chaque node peut contenir un ensemble de **propriétés** (properties)

tegra20-harmony.dts

```
i2c@7000c000 {
        status = "okay";
        clock-frequency = <400000>;

        wm8903: wm8903@1a {
                compatible = "wlf,wm8903";
                reg = <0x1a>;
                interrupt-parent = <&gpio>;
                gpio-controller;
                #gpio-cells = <2>;
                [...]
        };
};
```

Syntaxe

tegra20-harmony.dts

```
i2c@7000c000 {
        status = "okay";
        clock-frequency = <400000>;

        wm8903: wm8903@1a {
                compatible = "wlf,wm8903";
                reg = <0x1a>;
                interrupt-parent = <&gpio>;
                gpio-controller;
                #gpio-cells = <2>;
                [...]
        };
};
```

- i2c@7000c000 est un node
- Deux properties **status** et clock-frequency
- wm8903@1a est un sous-node

Syntaxe

tegra20-harmony.dts

```
i2c@7000c000 {
        status = "okay";
        clock-frequency = <400000>;

        wm8903: wm8903@1a {
                compatible = "wlf,wm8903";
                reg = <0x1a>;
                interrupt-parent = <&gpio>;
                gpio-controller;
                #gpio-cells = <2>;
                [...]
        };
};
```

- Chaîne de caractères (status)
- Entiers (clock-frequency)
- Booléens (gpio-controller)
- Pointeur vers d'autres nodes (interrupt-parrent) = *phandle*

Syntaxe

- Commence par une racine /
- On peut include des fichiers */include/*
- Ou en utilisant le précompilateur C `#include`
- On peut aussi utiliser des `#define`
- `dtc` effectue une vérification syntaxique
  - Mais c'est tout !

Exemple d'include

```
#include <dt-bindings/input/input.h>
#include "tegra20.dtsi"

/ {
  [...]
} ;
```

Inspection d'un .dtb

Dé-compilation du Device tree

```
$ dtc -I dtb -O dts arm/boot/dts/armada-xp-gp.dtb
$
```

Dans /sys/

```
# ls -l /sys/firmware/devicetree/base/
-r--r--r--    1 root     root     4 Jan  1 00:00 #address-cells
-r--r--r--    1 root     root     4 Jan  1 00:00 #size-cells
drwxr-xr-x    2 root     root     0 Jan  1 00:00 chosen
drwxr-xr-x    3 root     root     0 Jan  1 00:00 clocks
-r--r--r--    1 root     root    34 Jan  1 00:00 compatible
[...]
-r--r--r--    1 root     root     1 Jan  1 00:00 name
drwxr-xr-x   10 root     root     0 Jan  1 00:00 soc
```

Nodes et properties de base

- La property `model` à la racine définit le nom de la plateforme
- `compatible` utilisable par le système
- Le node `memory` contient l'adresse et la quantité de RAM
- Le node `chosen` contient plusieurs proprités
  - eg `bootargs` les paramètres passés au noyau

usb_a9260.dts

```
/ {
        model = "Calao USB A9260";
        compatible = "calao,usb-a9260", "atmel,at91sam9260", "atmel,at91sam9";
        chosen {
                bootargs = "mem=64M console=ttyS0,115200 root=/dev/mtdblock5 rw rootfstype=ubifs";
        };
        memory {
                reg = <0x20000000 0x4000000>;
        };
  [...]
};
```

Organisation générale

- Nodes décrivent des périphériques
- Organisés dans une hierarchie
- Même hierarchie que dans le système
  - Bus systèmes (AXI, AHB, APB...)
  - Bus externes (SPI, I2C, MMC...)
  - Périphériques externes

Interaction entre le DT et le driver

- Adresse du .dtb dans le registre `R2`
- Le noyau parcourt le .dtb pour découvrir le matériel
- Pour chaque node `compatible = "simple-bus"`
  - Le noyau instancie une structure `platform_device`
- Sinon, le node décrit un contrôleur (eg I2C)
  - Instancie les nodes fils en tant que `i2c_client`
  - Pareil pour les autres types de bus
- Permet d'éviter de décrire ces structures en C et de les enregistrer à la main.

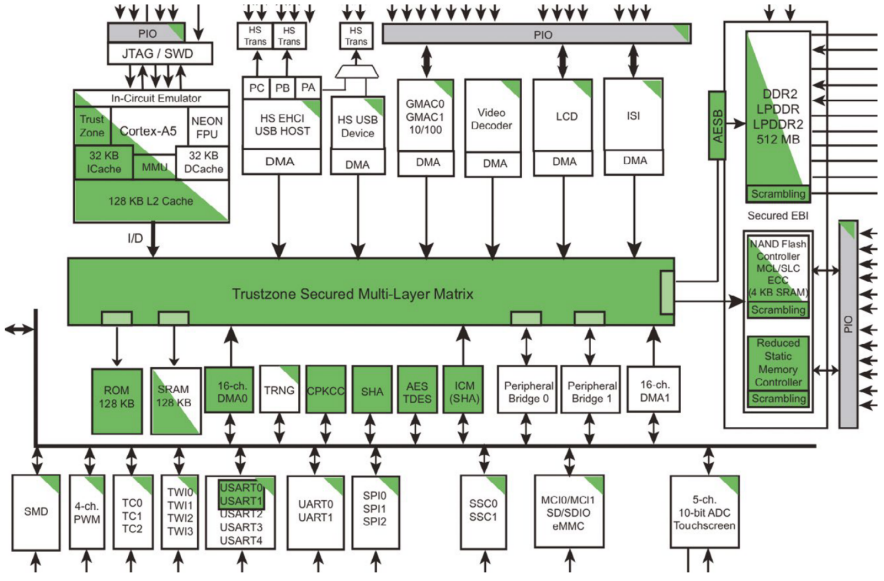
Illustration

Création de platform_device

```
/ {
 ahb {
  compatible = "simple-bus";
  [...]
  apb {
   compatible = "simple-bus";
   [...]
   uart0: serial@f8004000 {
     compatible = "atmel,at91sam9260-usart";
     reg = <0xf8004000 0x100>;
     interrupts = <27 IRQ_TYPE_LEVEL_HIGH 5>;
     [...]
     status = "okay";
   };
   i2c0: i2c@f8014000 {
     compatible = "atmel,at91sam9x5-i2c";
     reg = <0xf8014000 0x4000>;
     interrupts = <32 IRQ_TYPE_LEVEL_HIGH 6>;
     [...]
     status = "okay";
     wm8904: codec@1a {
       compatible = "wlf,wm8904";
       reg = <0x1a>;
       [...]
     };
   };
   uart1: serial@fc004000 {
     compatible = "atmel,at91sam9260-usart";
     reg = <0xfc004000 0x100>;
     interrupts = <28 IRQ_TYPE_LEVEL_HIGH 5>;
     [...]
     status = "okay";
   };
  } ;
 } ;
```

Interaction entre le DT et le driver

- Les nodes */ahb/apb/serial@f8004000*, */ahb/apb/i2c@f8014000* et */ahb/apb/serial@fc004000* sont sur un `"simple-bus"`
  - Il vont créer et enregistrer un `platform_device`
- Le node */ahb/apb/i2c#f8014000/codec@1a* est le fils d'un contrôleur I2C
  - Il va instancier et enregistrer un `i2c_client`
- Les deux nodes `uart0` et `uart1` ont le même **`compatible`**
  - Même bloc matériel 2 fois dans le SoC
  - Adresses et interruptions différents
- Un seul `platform_driver` est utilisé
  - Gère deux `platform-device`
  - Il y a donc deux methodes `->probe()`
  - Un pour chaque UART
- La hierarchie dans le .dts représente la hierarchie des bus dans le SoC


PIO
JTAG / SWD
In-Circuit Emulator
Trust Zone
Cortex-A5
NEON FPU
32 KB ICache
MMU
32 KB DCache
128 KB L2 Cache
I/D
HS Trans
HS Trans
HS Trans
PC
PB
PA
HS EHCI USB HOST
DMA
HS USB Device
DMA
PIO
GMAC0 GMAC1 10/100
DMA
Video Decoder
DMA
LCD
DMA
ISI
DMA
AESB
DDR2 LPDDR LPDDR2 512 MB
Scrambling
Secured EBI
NAND Flash Controller MCL/SLC ECC (4 KB SRAM)
Scrambling
Reduced Static Memory Controller
Scrambling
PIO
Trustzone Secured Multi-Layer Matrix
ROM 128 KB
SRAM 128 KB
16-ch. DMA0
TRNG
CPKCC
SHA
AES TDES
ICM (SHA)
Peripheral Bridge 0
Peripheral Bridge 1
16-ch. DMA1
SMD
4-ch. PWM
TC0 TC1 TC2
TWI0 TWI1 TWI2 TWI3
USART0 USART1 USART2 USART3 USART4
UART0 UART1
SPI0 SPI1 SPI2
SSC0 SSC1
MCI0/MCI1 SD/SDIO eMMC
5-ch. 10-bit ADC Touchscreen

drivers/i2c/busses/i2c-at91.c

```
static const struct of_device_id atmel_twi_dt_ids[] = {
  {
    .compatible = "atmel,at91rm9200-i2c",
    .data = &at91rm9200_config,
  }, {
    [...]
  }, {
    .compatible = "atmel,at91sam9x5-i2c",
    .data = &at91sam9x5_config,
  }
};
MODULE_DEVICE_TABLE(of, atmel_twi_dt_ids);

static struct platform_driver at91_twi_driver = {
  .probe   = at91_twi_probe,
  .driver    = {
    .name  = "at91_i2c",
    .of_match_table = of_match_ptr(atmel_twi_dt_ids),
  },
};
```

Découverte par le noyau

- Node */ahb/apb/i2c@f8014000* a la property `compatible="atmel,at91sam9x5-i2c"`
  - Chaine présente dans `atmel_twi_dt_ids[]`
  - La fonction `at91_twi_probe()` sera appelée pour initialiser le contrôleur
- Accès aux informations du .dtb (registres, irq, clocks...)
- `platform_get_resource(pdev, IORESOURCE_MEM, 0)`
  - Renvoie un pointeur sur une `struct resource`
  - Contient un champ `dev` qui contient les registres
- `platform_get_irq(pdev, 0)`
- `clk_get(&pdev->dev, NULL)`

#address-cells, #size-cells

- Certaines properties commencent par un `#`
  - **`#address-cells`**, **`#size-cells`**
  - `#gpio-cells`, `#interrupt-cells`
  - `#phy-cells`, `clock-cells`, `dma-cells`
- Une *cell* est une valeur de 32 bits
  - eg `<32 12>` est une liste de 2 cells
- Les properties **`#address-cells`**, **`#size-cells`** :
  - Indiquent le nombre de cells décrivant les registres de la property **`reg`** dans les nodes fils

sama5d4.dtsi

```
/ {
  ahb {
    apb {
      compatible = "simple-bus";
      #address-cells = <1>;
      #size-cells = <1>;
      spi0: spi@f8010000 {
        #address-cells = <1>;
        #size-cells = <0>;
        compatible = "atmel,at91rm9200-spi";
        reg = <0xf8010000 0x100>;
        cs-gpios = <&pioC 3 0>, <0>, <0>, <0>;
        status = "okay";
        m25p80@0 {
          compatible = "atmel,at25df321a";
          spi-max-frequency = <50000000>;
          reg = <0>;
        };
      };
    };
  };
};
```

Les interruptions

- Plusieurs properties :
- `interrupts` :
  - Indique le numéro de l'interruption
- `interrupt-parent` :
  - Indique à quel contrôleur d'interruption il est lié
  - Pointe sur le phandle d'un autre node
- `interrupt-controller` :
  - Booléen, indique si le node est un contrôleur d'interruptions
- `#interrupt-cells` :
  - Défini combien de cells sont nécessaires dans la property `interrupts` des nodes fils

Exercices

- On se base sur le fichier `soc_system.dts` et sur les sources du noyau utilisées en TP
- Explorer le fichier `soc_system.dts` et trouver le label `ledr`
- Quels sont les rôles des différentes properties ?
- Trouver dans les sources du noyau le fichier qui instancie ce module
  - On pourra se servir de la property `compatible`
- Dans ce fichier, expliquer comment on accède aux registres pour écrire et lire sur le gpio