

MyLab2 GB

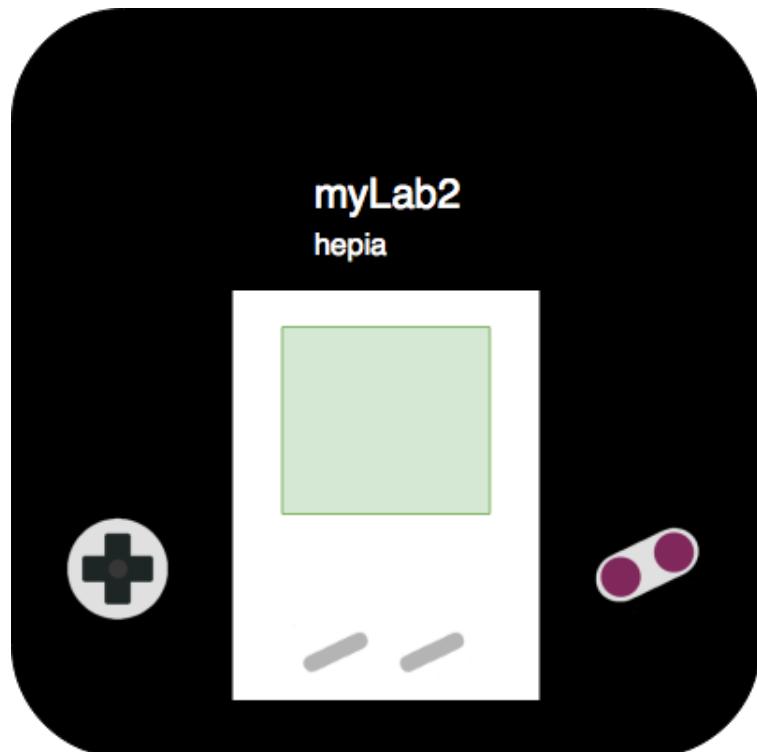
Emulateur de Gameboy sur MyLab2

Orphée Antoniadis

Projet de semestre - Prof. Fabien Vannel

Hepia ITI 3ème année

Semestre d'automne 2017-2018



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

Hes-SO GENÈVE
Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	Objectif	3
1.2	Méthode	3
1.3	Schéma	3
2	MyLab2	4
2.1	Introduction	4
2.2	Périphériques utilisés	5
2.2.1	Boutons	5
2.2.2	Joystick	5
2.2.3	Ecran LCD	5
2.2.4	Dalle tactile	6
2.2.5	UART	6
3	Gameboy	7
3.1	Introduction	7
3.2	CPU	8
3.2.1	Architecture	8
3.2.2	Registres	8
3.2.3	Instructions	8
3.3	Mémoire	10
3.3.1	Memory map	10
3.3.2	Cartouche	10
3.3.3	Bootstrap	11
3.3.4	DMA	11
3.4	Interruptions	11
3.4.1	Activer une interruption	11
3.4.2	Demander une interruption	12
3.4.3	Traiter une interruption	12
3.4.4	Comportement de HALT	13
3.5	Timer	13
3.5.1	Fonctionnement	13
3.5.2	Timer controller	13
3.5.3	Divider register	13
3.6	GPU	14
3.6.1	Contrôleur LCD	14
3.6.2	Affichage	14
3.7	Entrées	16
4	Émulateur	17
4.1	Introduction	17
4.2	Librairie d'émulation de la Gameboy	17
4.3	Programme principal	18
4.4	Problèmes rencontrés	19
4.4.1	Limites de la MyLab2	19
4.4.2	Débogage de l'émulateur	19
4.5	Résultats	20
5	Conclusion	21
6	Références	22

1 Introduction

1.1 Objectif

L'objectif principal de ce projet était de développer un émulateur de la console de jeux vidéos de Nintendo appelée Gameboy pour la carte de d'extension MyLab2 développée à heapia. Un emulateur est un logiciel permettant d'imiter le comportement physique d'un matériel informatique. Le but ici est donc d'imiter le comportement du processeur de la Gameboy avec tous ces périphériques. Nous allons voir dans un premier temps les caractéristiques de la MyLab2 ainsi que de ces périphériques. Nous allons ensuite regarder comment fonctionne la Gameboy. L'émulateur sera finalement présenté avec tout son fonctionnement mais aussi les problèmes rencontrés et la manière dont ils ont été résolus.

1.2 Méthode

Il a fallut dans un premier temps comprendre le fonctionnement de la Gameboy. Le projet a donc commencé par un travail de recherche et de documentation. Etant donné que Nintendo n'a jamais rendu public la datasheet de sa console, toutes les informations récoltées ont été obtenues après un travail de reverse engineering effectuée par la communauté. Heureusement, la communauté de développeurs d'émulateurs est très active, de nombreux forums et blogs existent ce qui a simplifié la recherche d'informations. Toutes les sources que j'ai trouvé seront listées à la fin de ce document et pourront faire office de base de donnée complète pour quiconque voulant en apprendre plus sur la console ou bien même voulant développer son propre émulateur. Ce n'est qu'ensuit que le travail de développement de l'émulateur a commencé. Ce projet de semestre a donc suivi les étapes suivantes.

- Travail de recherche
- Implémentation de l'émulateur
- Tests avec la MyLab2

1.3 Schéma

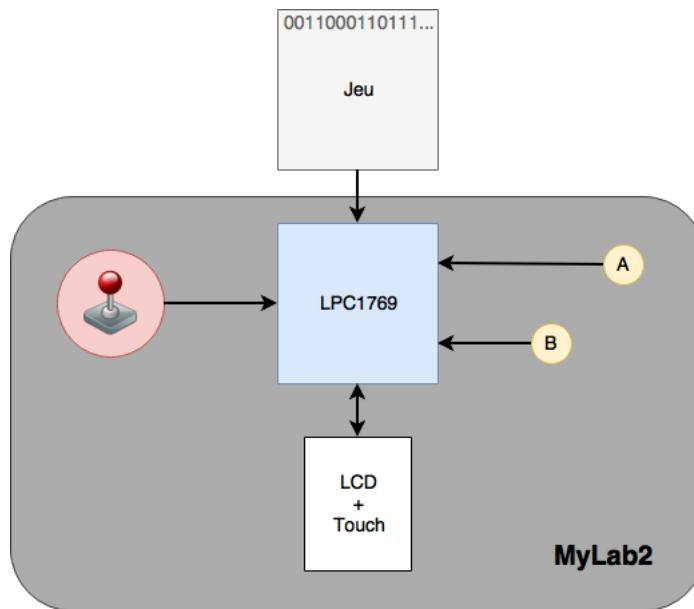


FIGURE 1 – Schéma explicatif du projet

2 MyLab2

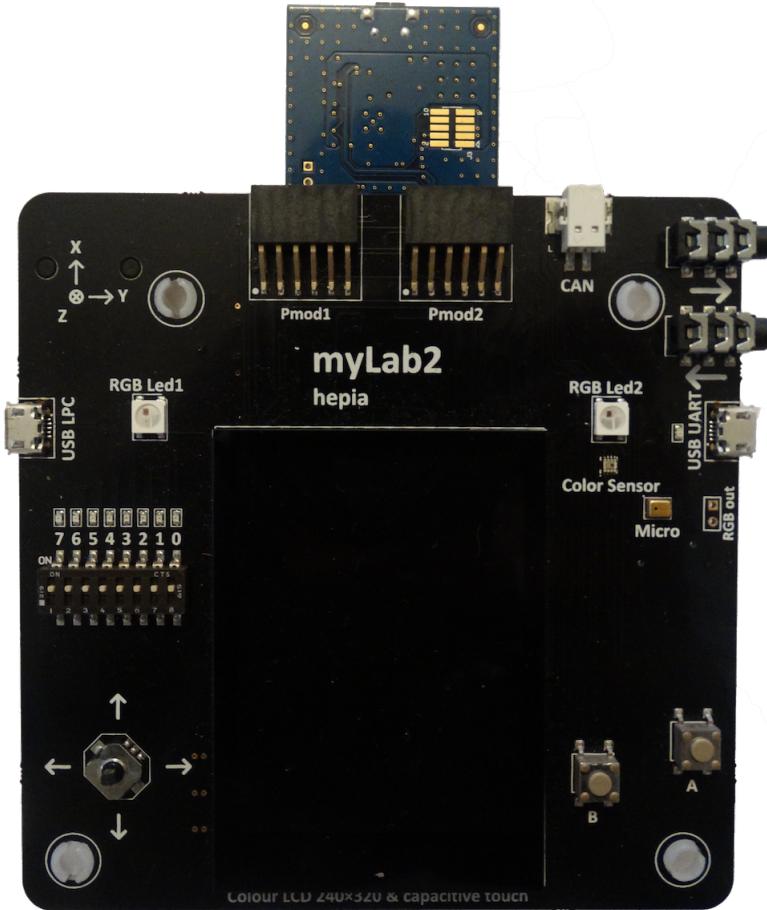


FIGURE 2 – La MyLab2

2.1 Introduction

La MyLab2 est une carte d'extension pour les kits de développement des microcontrôleurs LPC1769 et LPC4337 de NXP. Cette carte a été développée à hepia, au laboratoire de systèmes numériques. Elle vient se superposer aux cartes de NXP via des connecteurs broches.

Le LPC1769 de NXP est un microcontrôleur ARM Cortex-M3 ayant une fréquence d'horloge pouvant aller jusqu'à 120MHz. Ce dernier propose une mémoire flash de 512kB (mais seulement la moitié est programmable avec la version gratuite de LPCXpresso) ainsi qu'une SRAM de 64kB. A noter que les 64kB de SRAM sont discontinus et qu'il y a en réalité deux banques de RAM de 32kB chacune. Le LPC4337 de NXP est un microcontrôleur ARM Cortex-M4 ayant une fréquence d'horloge pouvant aller jusqu'à 204MHz mais inclut aussi un coprocesseur ARM Cortex-M0 pouvant aller à la même fréquence d'horloge. La SRAM de ce dernier fait 136kB.

Pour ce projet, le microcontrôleur utilisé sera le LPC1769 pour un soucis pratique. En effet, nous avons déjà eu à utiliser cette carte pour le cours de microcontrôleurs et périphériques de deuxième année ce qui fait que j'avais déjà une grande partie de la librairie de gestion des périphériques de la carte d'extension prête. C'était un gain de temps non négligeable qui m'a permis de me concentrer sur l'émulation de la Gameboy.

Le projet pourrait tout de même être repris et porté sur le LPC4337 afin d'avoir de meilleures performances étant donné que sa fréquence d'horloge est deux fois plus grande, qu'il dispose de deux processeurs permettant une parallélisation des tâches et qu'il y a plus de RAM.

2.2 Périphériques utilisés

2.2.1 Boutons

Les boutons A et B de la MyLab2 sont de simples pins GPIO. Le LPC1769 propose des interruptions (*EINT3*) sur les ports 0 et 2 du GPIO. Ici, le bouton A est sur la pin 10 du port 2 (P2.10) et le bouton B est sur la pin 19 du port 0 (P0.19). L'interruption peut se faire sur le flanc montant ou descendant (ou les deux). Pour l'activer, il faut mettre le bit correspondant à 1 dans le registre **IntEnF** (flanc descendant) ou **IntEnR** (flanc montant). Lors d'une interruption, il faut regarder laquelle a eu lieu dans le registre **IntStatF/IntStatR** puis la quittancer en mettant le bon bit à 1 dans le registre **IntClr**.

2.2.2 Joystick

Le joystick de la MyLab2 est aussi relié à une pin GPIO mais contrairement aux boutons A et B, il est relié au port 1 du GPIO. Il n'y a pas d'interruptions sur le port 1 du GPIO, il faut donc vérifier l'état des pins du joystick de manière régulière. Pour se faire, un timer sera utilisé qui provoquera une interruption (*TIMER0*) toutes les 10ms. La routine d'interruption appelle la fonction **joystick_handler** qui prend comme argument une fonction de callback (un pointeur sur une fonction qui sera appelée si une des directions du joystick est appuyée), l'argument de cette dernière, et le mode de vérification (**POLLING** ou **TRIGGER**). En mode **POLLING**, la fonction de callback sera appelée qu'une seule fois si le joystick est maintenu appuyé contrairement au mode **TRIGGER** où la fonction sera appelée tant que le joystick n'est pas relâché. La fonction de callback doit avoir comme prototype :

```
void joystick_callback(uint8_t pos, uint8_t edge, void *arg)
```

avec **pos** qui est la position du joystick, **edge** qui est le flanc (montant ou descendant) et **arg** qui contient l'argument de la fonction (peut être à **NULL**).

2.2.3 Ecran LCD

La MyLab2 utilise le bus de communication SPI pour communiquer avec l'écran. Afin d'initialiser le SPI, il faut d'abord sélectionner les bonnes pins dans les registres appropriés (**PINSEL0** et **PINSEL1**). En effet, les pins sont configurées par défaut sur des pins GPIO. Pour le LPC1769 ce sont donc les bits 31 :30 de **PINSEL0** et 5 :0 de **PINSEL1** qu'il faut modifier.

Il faut ensuite fixer la valeur de la fréquence de transmission. Un registre de configuration du SPI le permet. C'est le registre **SPCCR**. La valeur donné à ce registre va diviser la valeur de l'horloge du SPI. Pour atteindre une fréquence de transmission maximale, il faut mettre l'horloge du SPI à 100MHz en modifiant le registre **PCLKSEL0** puis fixer la valeur du registre **SPCCR** à 10 pour avoir une fréquence de transmission de 10MHz ($\frac{100}{10}$). Pour finir il faut juste activer la communication SPI en la mettant en master mode. Ceci se fait dans le registre **SPCR** (bit 5 à 1).

L'écriture et la lecture du bus SPI se fait à l'aide du même registre pour le LPC1769. Ce registre est le registre **SPDR**. Pour écrire, il faut fixer la valeur du registre aux données à envoyer puis attendre que le flag de confirmation d'envoi soit mis à 1. Ce flag est le bit 7 du registre **SPSR**. Pour venir lire sur le bus SPI, il faut d'abord envoyer 0xFF (donc en utilisant la fonction d'écriture) puis venir lire sur ce même registre (buffer bi-directionnel).

L'écran LCD accepte 2 types de données, les instructions et les arguments d'instruction. La pin DC (pin GPIO 1.16) permet de contrôler ce qui va être envoyé. Le DC est à 0 lors de l'envoi d'une instruction et à 1 pour l'envoi d'un argument. La liste complète des instructions est disponible dans la documentation de l'écran LCD. Pour ce projet, seulement 3 de ces instructions sont utilisées. Celle pour sélectionner la colonne d'écriture en pixels (instruction 0x2A), celle pour sélectionner la ligne d'écriture en pixels (instruction 0x2B) et enfin, celle pour écrire dans la mémoire de l'écran (instruction 0x2C). La mémoire est l'ensemble des données qui composent l'intégralité des pixels de l'écran. Ici l'écran est de 240×320 et un pixel est codé sur 16 bits donc la mémoire serait ces $240 \times 320 \times 16$ bits. Pour allumer un pixel sur l'écran, il faut d'abord sélectionner la zone d'écriture en utilisant les instructions 0x2A et 0x2B, puis il faut écrire les données relatives à la couleur du pixel désirée en utilisant l'instruction 0x2C).

2.2.4 Dalle tactile

La MyLab2 communique avec la dalle tactile en utilisant le bus I²C. La détection d'appuie sur la dalle tactile se fait quand à elle par interruption GPIO. Il faut donc activer d'abord ces interruptions (comme pour les boutons A et B) puis récupérer les informations voulues dans la routine d'interruption. Les informations sont par exemple les coordonnées de position et peuvent être lues dans les registres de la dalle tactile dont les adresses sont disponibles dans la documentation. Pour ce projet, il n'y a eu besoin que de récupérer des coordonnées de la position détectée. Pour récupérer ces informations, il faut d'abord envoyer (donc écrire sur le bus I²C) l'adresse du registre à lire et ensuite venir lire dans ce registre.

A noter qu'il faut bien entendu initialiser le bus I²C ce qui est fait relativement de la même manière que le bus SPI. Petite différence juste pour fixer la fréquence de transmission qui se fait par deux registres, les registres I2SCLH et I2SCLL. Ces registres correspondent respectivement à la fréquence de l'horloge à l'état haut et à l'état bas. La fréquence du bus I²C en fast mode est de 400kHz et l'horloge périphérique est à 25MHz par défaut donc il faut mettre ces deux registres à 32 ($\frac{25000}{32+32} = 400$). Il faut pour finir activer les interruptions I²C et créer l'algorithme représenté par un organigramme dans la documentation du LPC1769.

2.2.5 UART

Le périphérique UART de la MyLab2 peut être utilisé pour communiquer des informations depuis la carte vers une machine hôte. L'UART peut par exemple être utilisé pour envoyer des logs du microcontrôleur. Comme pour les bus SPI et I²C, l'UART doit d'abord être initialisé en sélectionnant les bonnes pins dans les registres PCOMP, PINSEL0. Il faut ensuite mettre le registre LCR de l'UART à la valeur 0x80 afin d'indiquer d'autoriser l'accès aux diviseurs d'horloge. Ces diviseurs sont les registres FDR, DLM et DLM et ils fixent la valeur de baudrate de la transmission. Le calcul pour trouver leurs valeurs est le suivant :

$$UART_{baudrate} = \frac{PCLK}{16 \times (256 \times DLM \times DLL) \times (1 + \frac{DivAddVal}{MulVal})}$$

DivAddVal contient les 4 bits de poids faible du registre FDR et *MulVal* ces 4 bits de poids fort. De plus leurs valeurs doivent respecter les conditions suivantes :

- $1 \leq MulVal \leq 15$
- $0 \leq DivAddVal \leq 14$
- $DivAddVal < MulVal$

Après avoir fixé le baudrate, il faut désactiver l'accès aux diviseurs d'horloge et fixer la transmission à 8 bits (5 bits par défaut) en mettant le registre LCR à 0x03. Pour finir, la communication UART peut être activée en mettant le registre FCR à 1. La communication se fera en utilisant le registre THR.

3 Gameboy

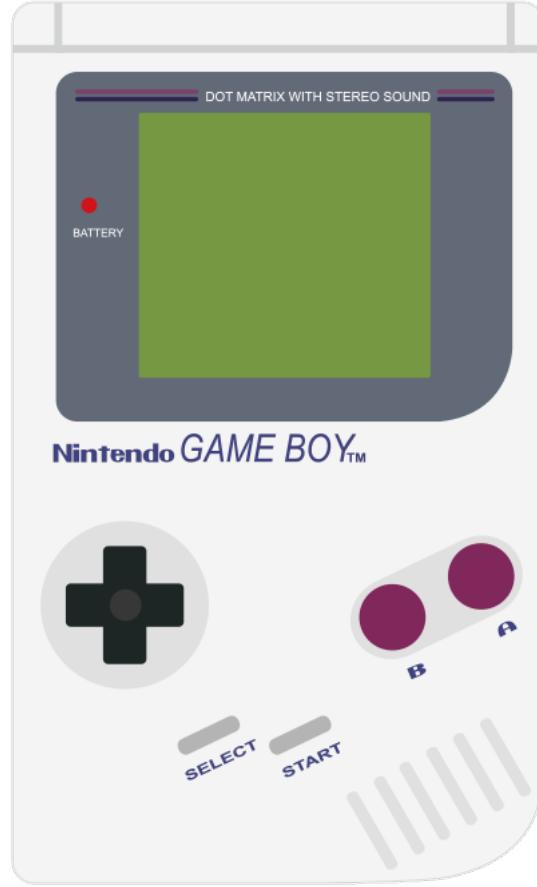


FIGURE 3 – La Gameboy

3.1 Introduction

La Gameboy est une console de jeux vidéos portable 8 bits développée et fabriquée par la firme japonaise Nintendo. La console a été mise en vente en 1989 et a connu un franc succès à travers le monde jusqu'à la fin de sa production en 2003. Nous allons dans cette partie étudier les caractéristiques et les périphériques de la console.

Le processeur de la Gameboy est le LR35902, processeur semblable au Zilog Z80 et cadencé à 4,19MHz. La mémoire de la console est de 64kB. Elle possède quatre boutons, A, B, START et SELECT, une croix directionnelle et une fente pour insérer les cartouches de jeux qui était située sur le haut, à l'arrière de la console. Elle est aussi dotée de hauts parleurs et d'un port série pour la communication entre deux consoles. Le son et la communication série ne seront pas emulés pour ce projet mais une amélioration future pourrait les rajouter. Divisons donc toutes ces parties en blocs.

3.2 CPU

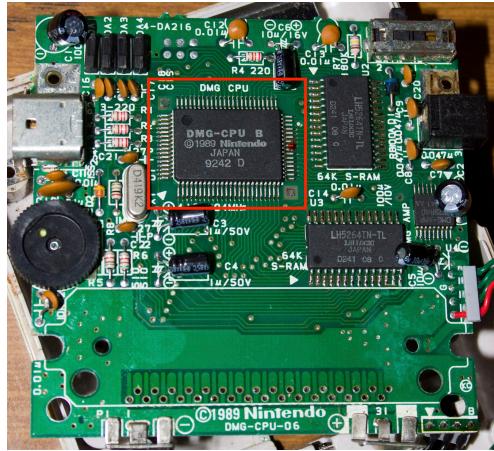


FIGURE 4 – Le processeur de la Gameboy

3.2.1 Architecture

Comme dit précédemment, le processeur de la Gameboy est semblable au Zilog Z80. C'est en fait un hybride entre le Zilog Z80 et le Intel 8080. Le Intel 8080 a été conçu pour être compatible avec le Zilog Z80 ce qui veut dire que les instructions du 8080 sont aussi présentes dans le Z80. Le nom de ce processeur hybride est Sharp LR35902.

Le processeur de la Gameboy est un processeur 8 bits avec 16 bits de bus d'adresse. Il utilise 6 registres de 16 bits dont 4 pouvant être séparés en deux registres de 8 bits. Il donne aussi accès à 256 instructions (2^8) plus 256 instructions supplémentaires et ses 16 bits de bus d'adresse permet d'adresser 64kB de mémoire. Regardons maintenant plus en détail les registres du LR35902.

3.2.2 Registres

Ci-dessous, un tableau explicatif des 6 registres du processeur de la Gameboy.

Registres	15 :8	7 :0
AF	A : registre	F : flags
BC	B : registre	C : registre
DE	D : registre	E : registre
HL	H : registre	L : registre
SP	Stack pointer	
PC	Program counter	

Les registres, A, BC, DE et HL sont les registres de travail donc utilisés pour toutes les opérations du programme. Le registre F contient les flags du processeur. Il y a 4 flags différents.

- Z (Zero flag), qui indique si le résultat de la dernière opération était 0
- N (Negative flag), qui indique si le résultat de la dernière opération était négatif
- H (Halfcarry flag), qui indique s'il y a eu une retenue sur les 4 premiers bits
- C (Carry flag), qui indique s'il y a eu une retenue

Note : le Halfcarry flag était en général utilisé pour les affichages en décimal sur l'écran (par exemple le score du joueur).

3.2.3 Instructions

Nous avons vu plus haut que le processeur de la Gameboy donnait accès à 256×2 instructions alors qu'une instruction était sur 8 bits. L'instruction 0xCB était en fait une instruction préfix. Toute instruction donnée après ce prefix faisait partie des 256 instructions supplémentaires. Nous verrons un exemple d'instruction plus bas. Regardons d'abord le jeu d'instructions de la Gameboy et divisons les en catégories.

Instructions arithmétiques

- INC, incrémentation du registre
- DEC, décrémentation du registre
- ADD, addition de deux registres
- SUB, soustraction de deux registres
- ADC, addition de deux registres et du carry flag
- SBC, soustraction de deux registres et du carry flag

Opérations logiques

- AND, ET bit à bit
- OR, OU bit à bit
- XOR, OU exclusif bit à bit

Opérations sur les bits

- RL, rotation à gauche
- RR, rotation à droite
- SL, décalage à gauche
- SR, décalage à droite
- SWAP, inversion des bits
- BIT, teste un bit
- SET, set un bit
- RES, reset un bit

Sauts

- JP, saut absolu à une adresse
- JR, saut relatif
- CALL, saut et stockage du program counter sur la pile (appel de fonction)
- RET, saut à l'adresse stockée dans la pile (retour de fonction)

Opérations avec la pile

- PUSH, stockage d'un registre dans la pile
- POP, récupération de la dernière donnée empilée

Commandes processeur

- NOP, pas d'opération
- HALT, arrête le processeur jusqu'à la prochaine interruption
- STOP, arrête le processeur
- EI, active une interruption
- DI, désactive une interruption

Autres instructions

- LOAD, stockage d'une donnée depuis ou dans la mémoire
- CP, comparaison de deux registres
- DAA, conversion du registre A en décimal

Exemples d'instructions

- 0x11 0x10 0x10 → LD DE, 0x1010
- 0xCB 0xC0 → SET 0, B

3.3 Mémoire

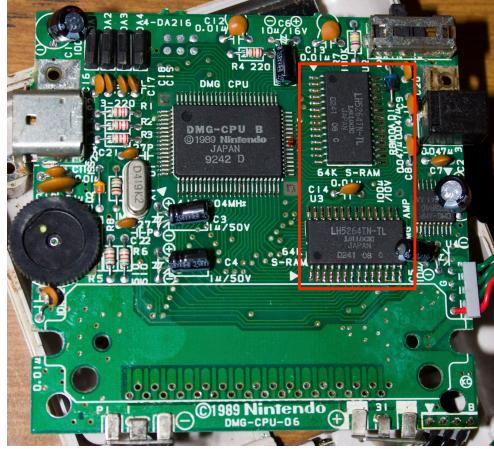


FIGURE 5 – La mémoire de la Gameboy

3.3.1 Memory map

Nous avons vu à plusieurs reprises que la Gameboy avait une mémoire de 64kB. Voyons plus en détail la structure de cette mémoire.

Adresses	Nom	Description
0000h – 3FFFh	ROM0	ROM non-échangeable
4000h – 7FFFh	ROMX	ROM échangeable
8000h – 9FFFh	VRAM	Video RAM
A000h – BFFFh	SRAM	RAM externe
C000h – CFFFh	WRAM0	Work RAM
D000h – DFFFh	WRAMX	Work RAM échangeable
E000h – FDFFh	ECHO	Echo de la WRAM
FE00h – FE9Fh	OAM	Sprites
FEA0h – FFFFh	UNUSED	-
FF00h – FF7Fh	I/O Registers	-
FF80h – FFFEh	HRAM	RAM interne du CPU
FFFFh	IE Register	Registre d'activation des interruptions

3.3.2 Cartouche

La cartouche est un périphérique externe sur la Gameboy originale. Tout le code qui est executé par la Gameboy est contenu dans la cartouche. Le jeu est mappé dans les 32 premiers kB de la mémoire de la console. Le problème qui se pose ici est que les jeux ne peuvent faire une taille que de 32kB si on ne prend en compte que cette information. Pour résoudre ce problème, la Gameboy met à disposition un mécanisme d'échanges de blocs mémoires entre sa mémoire et la mémoire du jeu (appelé MBC).

Ces échanges se font aux adresses allant de 0x4000 à 0x7FFF. Il existe de nombreux types de MBC dont la liste est disponible sur internet. Afin de savoir à quel type de MBC nous avons à faire, il faut lire à l'adresse 0x147. Il faut écrire à une adresse entre 0x2000 et 0x4000 pour changer de banque de ROM et écrire entre 0x4000 et 0x6000 pour changer de banque de RAM. L'échange de banques de RAM n'est pas activé par défaut. Le jeu doit d'abord écrire 0xA à une adresse entre 0x0000 et 0x2000. A noté que toutes ces écritures ne sont pas effectives, elle permettent juste de gérer les banques de mémoire. Aucune donnée n'est écrite en ROM.

3.3.3 Bootstrap

Dans la partie précédente, nous avons vu que les 32 premiers kB du jeu étaient mappés au début de la mémoire de la console. Le seul moment où ce n'est pas le cas est durant le démarrage de la console. Lors du démarrage de la console, le processeur exécute un petit bout de code allant de 0x0 à 0x100. Ce bout de code est stocké en dur dans la console et permet d'initialiser les registres et la mémoire de la Gameboy. Le code de bootstrap n'a jamais été donné par Nintendo et n'a été que récemment décodingé par la communauté de développeurs. Ce code est donc mappé dans les 256 premiers bytes de la console, le program counter commence à 0 puis après avoir executé l'ensemble des instructions, il arrive à 0x100. L'exécution du bootstrap était représenté par un scroll du logo de Nintendo sur l'écran. Ensuite, Le bootstrap est retiré et le jeu peut commencer son exécution. A noter que le code du jeu commence donc à l'adresse 0x100. Les 256 premiers bytes contiennent les routines d'interruption.



FIGURE 6 – Logo de Nintendo lors de l'exécution du bootstrap

3.3.4 DMA

Le registre DMA (0xFF46) permet d'activer le transfert DMA, entre tout adresse (entre 0x0 et 0xF19F) et l'OAM (mémoire contenant les sprites). Le transfert commence quand l'adresse source est écrite dans le registre DMA. Etant donné que le registre ne fait que 8 bits, l'adresse source est multipliée par 0x100 et donne la réelle adresse de départ du transfert.

Une fois que le transfert DMA commence, les données commençant à l'adresse écrite dans le registre DMA sont écrites dans la région OAM de la mémoire. Il y a 160 bytes écrits lors de ce transfert (taille de la région OAM). L'avantage du DMA est de permettre de copier l'intégralité des données de sprites en une seule instruction au lieu d'avoir à faire 160 instructions à la suite.

3.4 Interruptions

3.4.1 Activer une interruption

La Gameboy est capable de générer 5 types d'interruptions pour certains de ses périphériques. Ces interruptions peuvent être contrôlées depuis deux registres contenus dans la mémoire. Le registre IE (0xFFFF) et le registre IF (0xFF0F). Les 5 premiers bits de ces deux registres représentent chacun une interruption.

Bit	Interruption	Adresse
0	V-Blank	40h
1	LCD	48h
2	Timer	50h
3	Serial	58h
4	Joypad	60h

Ici, l'adresse est l'adresse dans la mémoire qui contient la routine d'interruption (comme expliqué en 3.3.2). Le registre IE (Interrupt Enable) est modifié par le jeu. Le registre IF (Interrupt Flag) quand à lui est modifié par les périphériques lorsqu'une interruption est demandée.

La dernière chose à savoir sur la gestion des interruptions est le "interrupt master". Il n'est pas contenu dans la mémoire de la console et est un simple booléen que les jeux mettent à 1 ou à 0. Si il est à 1, aucune interruption ne pourra être traité. C'est donc un interrupteur qui est mis à 0 ou à 1 par les instructions EI, DI ou RETI.

3.4.2 Demander une interruption

Comme dit précédemment, un périphérique demande une interruption en modifiant le bon bit dans le registre IF. Lorsqu'une interruption est demandée, elle n'est pas forcément traitée directement par le CPU. Tant que l'interruption n'est pas traitée, le flag d'interruption doit rester à 1. De plus, lorsque un bit du registre IF est mis à 1 par un périphérique que le même bit dans le registre IE est aussi à 1 et que le CPU exécute l'instruction EI, le CPU ne sautera pas à la routine d'interruption directement mais au prochain cycle d'horloge. A noter que cette particularité vaut pour l'instruction EI mais pas pour l'instruction RETI. Cette dernière retourne à la dernière adresse mise dans la pile mais active les interruptions au coup d'horloge actuel.

Exemple avec EI :

```
di
ld a, 4h
ld [FFFFh], a
ld [FF0Fh], a
ei
inc a // cette instruction va être exécutée avant la routine d'interruption
inc a // cette instruction va être exécutée après la routine d'interruption
```

Exemple avec RETI :

```
di
ld a, 4h
ld [FFFFh], a
ld [FF0Fh], a
reti
inc a // cette instruction va être exécutée après la routine d'interruption
inc a
```

3.4.3 Traiter une interruption

Nous avons pu voir qu'une interruption est traitée que si les bits correspondants sont actifs dans les registres IE et IF mais aussi que le "interrupt master" (IME) est à 1. La program counter est mis sur la pile puis il prend la valeur de l'adresse de la routine d'interruption demandée, IME est mis à 0 et le bit correspondant à l'interruption est mis à 0 dans le registre IF. Les routines d'interruption terminent normalement par une instruction RET ou RETI. Dans le cas de l'instruction RET, les interruptions ne sont pas réactivées. Par contre, RETI les réactive (IME à 1) ce qui permet à une autre interruption d'être traitée (si par exemple un autre périphérique avait demandé une interruption en même temps que le premier). Les priorités de traitement d'une interruption est dans l'ordre du tableau ci-dessus. Le bit de poids faible a donc la plus grande priorité et ainsi de suite.

3.4.4 Comportement de HALT

L'instruction HALT est une instruction particulière car elle arrête le processeur jusqu'à qu'une interruption a lieu. Son comportement varie en fonction de l'état des registres IE, IF et du IME. L'instruction a en fait 3 comportements différents.

- IME = 1
 - L'instruction HALT est exécutée normalement, le CPU s'arrête jusqu'à ce que deux bits correspondants soient mis à 1 dans IE et IF. Une fois fait, le CPU repart et saute directement à la routine d'interruption.
- IME = 0
 - Si deux bits correspondants ne sont pas encore à 1 dans IE et IF, HALT s'exécute normalement, comme lorsque IME = 1 sauf qu'une fois le CPU réveillé, l'exécution du programme continue (sans routine d'interruption).
 - Si deux bits correspondants sont déjà à 1 dans IE et IF, le bug de HALT se produit. L'instruction HALT n'est pas exécutée et le processeur n'incrémente pas le program counter. L'instruction après l'instruction HALT est donc exécutée deux fois.

3.5 Timer

3.5.1 Fonctionnement

La Gameboy possède un timer qui compte à une certaine fréquence et provoque une interruption lorsqu'il dépasse la limite du registre (overflow). Le timer se trouve à l'adresse 0xFF05 de la mémoire (TIMA). Sa fréquence est donné par les deux premiers bits du registre contrôle situé à l'adresse 0xFF07 (TAC). Le registre TIMA est sur 8 bits donc sa valeur maximale est 255. Lorsque TIMA dépasse cette valeur la requête d'interruption est envoyé et TIMA prend la valeur contenu par le registre à l'adresse 0xFF06 (TMA). On peut donc dire que TMA est le registre d'initialisation du timer. Il y a un dernier registre lié au timer situé à l'adresse 0xFF04 appelé le divider register (DIV). Nous verrons l'utilité de ce registre plus en détail après. Pour résumer :

Registre	Adresse	Description
DIV	FF04h	Divider register
TIMA	FF05h	Timer counter
TMA	FF06h	Timer modulo
TAC	FF07h	Timer controller

3.5.2 Timer controller

Le timer controller permet de fixer la fréquence du timer. Cette dernière peut être de 4096Hz, 262144Hz, 65536Hz ou 16384Hz. C'est aussi dans ce registre qu'il est indiqué si le timer est activé. C'est le bit 2 qui donne cette information (à 1 le timer est activé et à 0 il ne l'est pas). Les deux bits de poids faible du registre TAC indiquent à quelle fréquence va être incrémenté le timer.

TAC[1 :0]	Fréquence
00	4096Hz
01	262144Hz
10	65536Hz
11	16384Hz

3.5.3 Divider register

Le divider register est semblable au registre TIMA sauf que son incrémentation ne dépend pas du registre TAC. Ce registre est incrémenté dans tous les cas à une fréquence de 16382Hz et est toujours actif, même si le timer est désactivé. Ce registre était surtout utilisé pour la génération de nombres pseudo aléatoires. En effet, étant donné qu'il est incrémenté constamment à partir du démarrage de la console, il est très dur de prévoir quelle sera sa valeur. A noter que ce registre est remis à 0 si le jeu tente d'écrire dedans (à partir d'une instruction LOAD par exemple).

3.6 GPU

3.6.1 Contrôleur LCD

L'écran LCD de la Gameboy a une résolution de 160×144 . L'écran LCD peut être activé ou désactivé en modifiant le bit 7 du registre à l'adresse 0xFF40 appelé LCD control (LCDC). L'écran est activé lorsque ce bit est à 1. Si le LCD est activé, le contrôleur de l'écran scanne ligne par ligne donc il y a théoriquement 144 lignes à scanner. Cependant, le compteur de ligne (LY) situé à l'adresse 0xFF44 de la mémoire va de 0 à 153. Les 8 lignes entre 144 et 153 sont des lignes qui n'existent pas mais qui permettent au contrôleur LCD d'entrer dans ce qui est appelé la V-Blank period. Cette période où la mémoire vidéo de la console (VRAM) et la mémoire de sprites (OAM) peuvent être modifiés par le CPU. Lorsque le LCD arrive dans la V-Blank period, une requête d'interruption est envoyée. De plus, comme pour le registre DIV du timer, le registre LY est remis à 0 si le jeu essaie d'écrire dedans (par une instruction LOAD par exemple).

Nous avons vu un état du contrôleur de l'écran LCD qui est le V-Blank mais il y a en fait 4 états différents. H-Blank, V-Blank, recherche de sprites et transfert des données au LCD. Ces états sont indiqués dans le registre à l'adresse 0xFF41 (STAT). Les deux bits de poids faible de ce registre représentent l'état actuel du contrôleur.

STAT[1 :0]	État	Description
00	H-Blank	La VRAM et l'OAM peuvent être modifiées par le CPU
01	V-Blank	La VRAM et l'OAM peuvent être modifiées par le CPU et l'écran est désactivé
10	Recherche de sprites	Le contrôleur lit l'OAM qui est donc inaccessible par le CPU
11	Transfert des données	Le contrôleur lit l'OAM et la VRAM qui sont donc inaccessibles par le CPU

Lorsqu'une nouvelle ligne est scannée, le contrôleur entre dans l'état 2 puis il passe au 3 et enfin au 0. Ce pattern est ensuite répété jusqu'à ce que le contrôleur arrive en V-Blank period et passe à l'état 1. Tout est recommencé une fois le V-Blank passé. Il faut 456 coups d'horloge pour scanner une ligne et passer à la suivante. Ce qui sépare le nombre de cycles passés à chaque état de cette manière :

- 80 coups d'horloge pour l'état 2
- 172 coups d'horloge pour l'état 3
- 204 coups d'horloge pour l'état 0

Lors d'un changement d'état (par exemple lors du passage du mode 1 au mode 2), le contrôleur LCD peut demander une interruption. Les bits 3, 4 et 5 du registre STAT permettent d'activer ces interruptions. Le bit 3 autorise l'interruption lors du passage au mode 0, le bit 4 lors du passage au mode 1 et le bit 5 lors du passage au mode 2. Il n'y a pas d'interruption possible lors du passage au mode 3.

Un dernier registre est lié au contrôleur LCD, le registre à l'adresse 0xFF45 appelé LY compare (LYC). Si les registres LY et LYC ont la même valeur, le bit 2 du registre STAT est mis à 1. Si ce bit est à 1 et que son bit d'interruption associé, le bit 6, est aussi à 1 alors une interruption est demandée. Cette interruption permet au jeu de savoir quand une ligne est scannée pour faire certains effets.

3.6.2 Affichage

Contrôle de l'affichage

Nous avons vu précédemment que l'écran LCD de la Gameboy a une résolution 160×144 . Ceci est partiellement vrai. Physiquement, l'écran a ces dimensions mais dans la mémoire, l'écran a une résolution de 256×256 . Ces pixels supplémentaires permettent le scrolling des éléments de fond de l'affichage. Le scrolling se fait à l'aide de deux registres, SCROLLY et SCROLLX situés respectivement aux adresses 0xFF42 et 0xFF43. Ces 256×256 pixels sont rassemblés en 32×32 tiles. Une tile fait donc 8×8 pixels. En plus de cette zone de fond, l'affichage de la Gameboy possède aussi une zone appelée window (ou fenêtre). La fenêtre est composée de tiles, comme le fond sauf que cet élément est fixe, il ne peut pas être scrollé. La position de la fenêtre sur l'écran est définie à l'aide des registres WINDOWY et WINDOWX situés respectivement aux adresses 0xFF4A et 0xFF4B. L'intérêt d'une zone fixe est l'affichage d'éléments fixes

comme le score du joueur, sa vie, etc... Le dernier élément graphique qui a déjà été vu plus haut est le sprite. Un sprite représente tous les objets en mouvement sur l'écran (personnage contrôlé par le joueur, ennemis, briques de Tetris, etc...).

Pour résumer nous avons les éléments suivants :

- Backgroud : La zone de fond scrollable
- Window : La fenêtre fixe par dessus le fond
- Sprites : Les objets en mouvement

Afin de savoir où se trouvent tous ces éléments graphiques dans la mémoire, il faut regarder dans le registre LCDC (0xFF40). Ci-dessous l'explication sur l'utilité de chacun de ses bits.

Bit	Nom	États	
7	LCD Enable	0 : Off	1 : On
6	Window Tile Map Display Select	0 : 9800h-9BFFh	1 : 9C00h-9FFFh
5	Window Display	0 : Off	1 : On
4	BG / Window Tile Data Select	0 : 8800h-97FFh	1 : 8000h-8FFFh
3	BG Tile Map Display Select	0 : 980h0-9BFFh	1 : 9C00h-9FFFh
2	OBJ (Sprite) Size	0 : 8x8	1 : 8x16
1	OBJ (Sprite) Display Enable	0 : Off	1 : On
0	BG / WindowDisplay	0 : Off	1 : On

Afficher le background et la fenêtre

On peut déjà remarquer que les bits 6, 4 et 3 indiquent des adresses en mémoire. Ce sont les adresses où seront situées les données indispensables à l'affichage. Les tile map sont des ensemble d'identifiant de tiles. L'identifiant permet de trouver la tile à afficher dans la data table qui contient les données des pixels de tous les tiles possibles du jeu. L'identifiant est sur 8 bits mais est signé si les données sont situées entre 0x8800 et 0x97FF. Dans le cas contraire, l'identifiant est non signé.

Une fois l'identifiant trouvé, il faut afficher les données contenues dans la data table. Un pixel de l'écran de la Gameboy est codé sur deux bits et une tile est composée de 8×8 pixels. Une ligne d'une tile fait donc 16 bits. Il faut combiner ces 16 bits pour avoir la bonne information sur les pixels de la ligne.

Pixel	1	2	3	4	5	6	7	8
Octet 1	1	0	1	0	1	1	1	0
Octet 2	0	0	1	1	0	1	0	1
Identifiant couleur	2	0	3	1	2	3	2	1

Finalement, pour avoir la valeur réelle du pixel il faut aller chercher dans la palette de couleur située dans le registre à l'adresse 0xFF47 pour le background et la fenêtre (les sprites peuvent avoir deux palettes de couleur différentes mais nous verrons ça plus tard). Cette palette est sur 8 bits et l'identifiant trouvé précédemment indique quelle paire de bits contient la couleur. 0 pour les bits 0 et 1, 1 pour les bits 2 et 3, 2 pour les bits 4 et 5, 3 pour les bits 6 et 7. La couleur ainsi récupérée est aussi sur deux bits.

- 00 : Blanc
- 01 : Gris clair
- 10 : Gris foncé
- 11 : Noir

Afficher les sprites

Les tiles des sprites sont toujours situées aux mêmes adresses entre 0x8000 et 0x8FFF. Il est donc plus simple de les trouver en comparaison du background ou de la fenêtre. Il y a 40 tiles réservées au sprites et chaque sprite est lié à une table d'attributs, 4 registres sur 8 bits situés entre les adresses 0xFE00 et 0xFE9F. Ces attributs sont, dans l'ordre, sa position en y, sa position en x, son identifiant dans la data table et enfin un registre d'attributs. Les 4 bits de poids fort de ce registre d'attribut sont utilisés par la Gameboy et représentent, dans l'ordre, la priorité du sprite par rapport au background, sa rotation en y, sa rotation en x et son numéro de palette de couleurs (nous avions vu précédemment que les sprites avaient deux palettes de couleurs). Ces deux palettes sont situées aux adresses 0xFF48 et 0xFF49.

Pour afficher les sprites du jeu il faut donc parcourir l'ensemble des sprites entre 0xFE00 et 0xFE9F et les afficher en utilisant leurs attributs. Le fonctionnement de la palette de couleur est le même que pour le background et la fenêtre.

3.7 Entrées

La gameboy possède 8 entrées différentes. La croix directionnelle et les boutons A, B, START et SELECT. Leur contrôle se fait par l'intermédiaire d'un seul registre en mémoire, le registre P1, situé à l'adresse 0xFF00. Ce registre est structuré de cette manière :

Bit	Nom	États	
7	Not used	-	
6	Not Used	-	
5	Select Button Keys	0 : On	1 : Off
4	Select Direction Keys	0 : On	1 : Off
3	Input Down or Start	0 : Pressed	1 : Not Pressed
2	Input Up or Select	0 : Pressed	1 : Not Pressed
1	Input Left or Button B	0 : Pressed	1 : Not Pressed
0	Input Right or Button A	0 : Pressed	1 : Not Pressed

On peut voir que la croix directionnelle et les boutons partagent les même bits (de 3 à 0). C'est en fait le jeu qui va sélectionner quelles entrées vont l'intéresser en sélectionnant les boutons ou la croix directionnelle avec les bits 5 et 4. De plus, lors du passage d'une des entrées de l'état haut à l'état bas (donc lors de la pression d'un bouton étant donné qu'ils sont actifs à l'état bas), une interruption est demandé au processeur.

4 Émulateur

4.1 Introduction

Une fois toutes ces informations trouvées sur la Gameboy il a fallut commencer à développer l'émulateur. Ce dernier est divisé en 3 parties. La librairie de gestion des périphériques de la MyLab2, la librairie d'émulation des périphériques de la Gameboy et enfin le programme principal qui va utiliser ces deux librairies afin de faire tourner l'émulateur sur la MyLab2. Chacun des périphériques de la MyLab2 et de la Gameboy décrits ci-dessus sont présents sous forme de modules dans ce deux librairies C. Les algorithmes implémentés sont les même que ceux décrits dans les partie 2 et 3.

4.2 Librairie d'émulation de la Gameboy

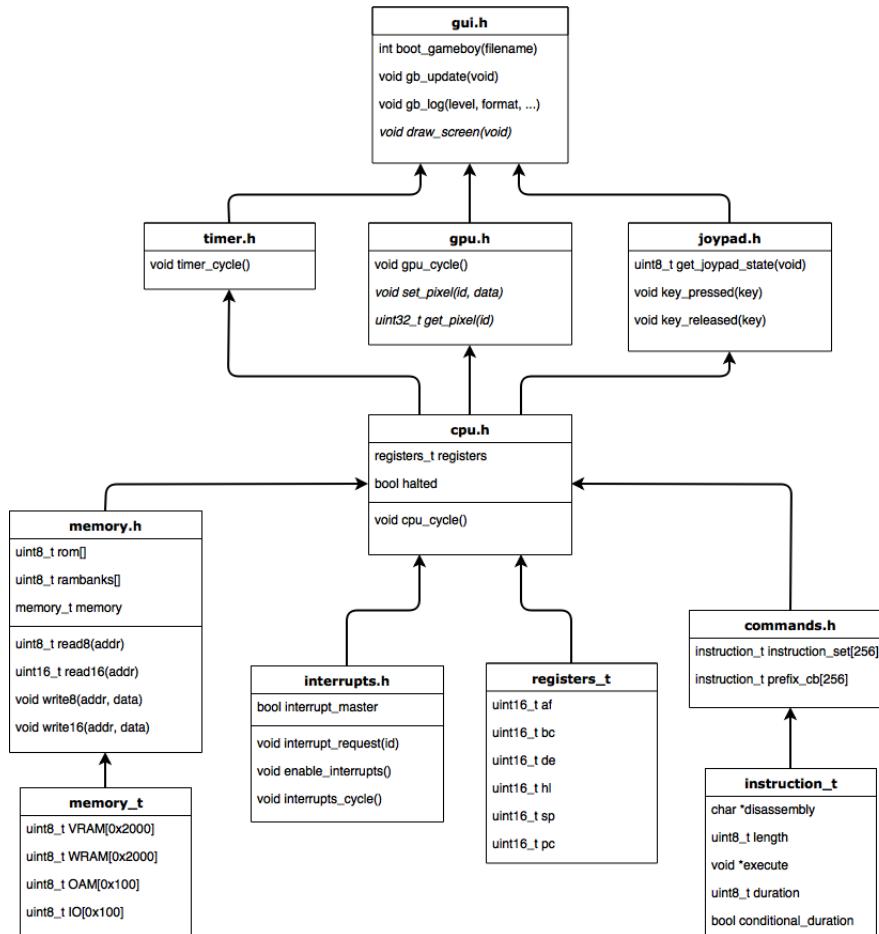


FIGURE 7 – Diagramme de la librairie de la Gameboy

Le processeur est représenté sous forme de deux structures C. L'une représente les registres et l'autre une instruction. Une instruction contient son nom, sa longueur, un pointeur vers une fonction, sa durée en cycles d'horloge de la Gameboy et un booléen qui indique si la durée dépend du résultat de l'instruction (un saut conditionnel par exemple ne prend pas autant de cycles d'horloge si le saut se fait ou non). Toutes les instructions sont stockées sous forme de tableau et permet une grande flexibilité. Par exemple, si le program counter indique qu'il faut exécuter l'instruction 0x11, il suffit de faire `instruction_set[0x11]`. Il faut bien sûr prendre en compte la longueur de l'instruction ainsi que regarder si l'instruction ne fait pas partie de l'extension d'instructions (prefixé par 0xCB) mais dans l'idée c'est ce qu'il faut faire.

La mémoire est accessible un peu moins facilement. En effet, à cause des problèmes de mémoire de la MyLab2, la ROM a été mise entièrement en constante afin qu'elle soit stockée dans la flash. De plus, toutes les zones mémoires non utilisées par la Gameboy n'ont pas été émulées. La structure C représentant la mémoire n'est donc pas continue (il ne suffit pas de faire `mem[addr]` pour accéder à la mémoire). Ceci rend les accès mémoires un peu plus lent mais c'était indispensable pour faire tourner l'émulateur sur le microcontrôleur.

Les modules du CPU, des interruptions, du timer et du GPU contiennent chacun une fonction `cycle`. Ces 4 fonctions sont en fait appelées par la fonction `gb_update` de `gui.h` dans une boucle infinie. Ces fonctions permettent de mettre à jour l'état des périphériques qu'elles émulent. La fonction `cpu_update` retourne le nombre de cycles d'horloges théorique qu'aurait du prendre la Gameboy pour effectuer l'instruction actuelle. A chaque cycle, ce nombre est ajouté à un total de nombres de cycles qui, une fois arrivé à $\frac{4194304}{FREQ}$, affiche l'horloge et recommence à nouveau. Ici, $FREQ$ est le nombre de rafraîchissement de l'écran par seconde et 4194304 est la fréquence réelle du processeur de la Gameboy (les 4,19MHz dont j'ai parlé plus haut). Pour être plus précis, il faudrait calculer le temps réel passé à faire un `gb_update`, le soustraire à la période et endormir le programme le temps obtenu. Ce n'est pas fait ici car l'émulateur est plus lent que la vraie Gameboy, il n'y a donc pas besoin d'attendre. Ceci donne le schéma suivant.

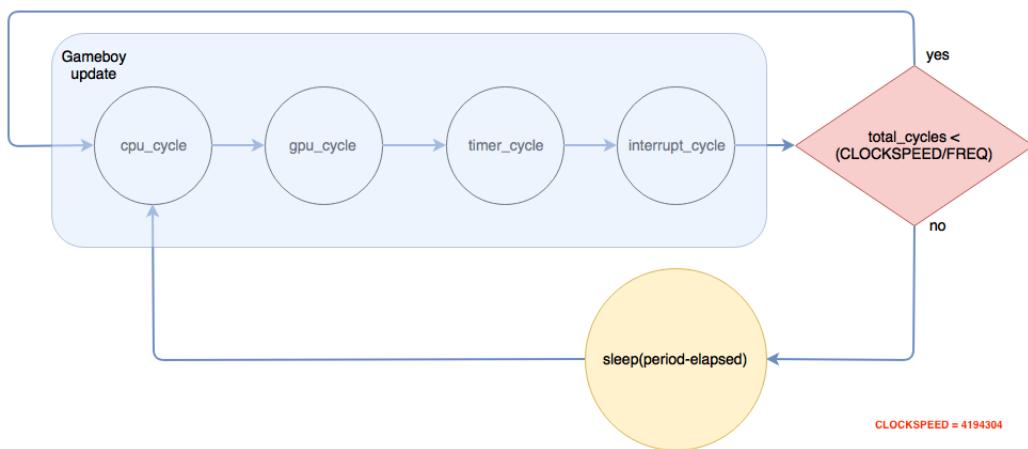


FIGURE 8 – Schéma de déroulement de l'émulateur

Les fonctions écrites en italique dans le diagramme sont des fonctions non implémentées dont seulement les prototypes sont données. Ceci n'a été fait que sur les fonctions graphique `set_pixel`, `get_pixel` et `draw_screen`. Ceci permet de réutiliser la librairie sur un autre environnement de programmation en ne changeant que ces 3 fonctions. La librairie faite durant ce travail de semestre peut ainsi être compilée dans un programme C sur un ordinateur. Il a juste fallut faire des fonctions d'affichage en utilisant la librairie graphique SDL2 en plus. Cette fonctionnalité m'a beaucoup aidé pour le debug étant donné la lenteur d'affichage de la MyLab2. L'émulateur est donc multiplateforme.

Une dernière fonctionnalité de cette librairie est la possibilité de faire des logs. La fonction `gb_log` affiche les différents états de l'émulateur ainsi que les erreurs. Le niveau de log peut être choisi. Il y a 4 niveaux de log, `ERROR`, `WARNING`, `INFO`, `DEBUG` et le niveau est à `INFO` par défaut. Lorsque l'émulateur est compilé sur un ordinateur, les logs sont affichés sur `stderr`. Sur la MyLab2, les logs sont envoyés sur l'UART avec un baudrate de 115200.

4.3 Programme principal

Le programme principal est divisé en deux fichiers, `display.c` et `controls.c`. Comme leurs noms l'indiquent, l'un gère les entrées (joystick, boutons et dalle tactile) et l'autre l'affichage (écran LCD). La MyLab2 a un joystick et les boutons A et B mais pas de boutons START et SELECT. Ils sont émulés par deux boutons affichés sur l'écran tactile.

Le problème avec l'émulation des boutons sur l'écran tactile est que le bus I²C a besoin des interruptions pour fonctionner sauf que nous avons vu plus haut que la détection de l'écran marche avec une interruption GPIO. L'interruption I²C ne se fera jamais tant que nous nous trouvons dans l'interruption $\overline{EINT3}$. Il faut donc simplement avertir avec des flags si l'écran a été appuyé ou relâché puis venir vérifier ces flags régulièrement et appeler les fonctions de la dalle tactile. Ici, ces flags sont vérifiés avec la même fréquence que le rafraîchissement de l'écran. Pour l'émulation graphique, il a fallut diminuer le plus possible le nombre d'écritures sur l'écran LCD. J'ai donc décidé de créer un tableau contenant les données des 160 × 144 pixels de l'écran. Pour optimiser le plus possible l'espace, chaque pixel est sur deux bits dans ce tableau (comme pour la gameboy). Voilà finalement à quoi ressemble le `main` du programme C flashé sur la carte.

```

15 void init_project(void) {
16     init_lcd();
17     init_graphics();
18     initTimer(TIMERO, 25000);
19     enableTimerInterrupt(TIMERO, 10, 1, 0);
20     startTimer(TIMERO);
21     enableGPIOInterrupt(GPIO2, RISING, BUTTON_A);
22     enableGPIOInterrupt(GPIO2, FALLING, BUTTON_A);
23     enableGPIOInterrupt(GPIO0, RISING, BUTTON_B);
24     enableGPIOInterrupt(GPIO0, FALLING, BUTTON_B);
25     init_touchscreen(POLLING);
26     uart_init(UART0, 115200);
27     boot_gameboy(NULL);
28 }
29
30 int main(void) {
31     init_project();
32     while(1) {
33         gb_update();
34         check_buttons();
35     }
}

```

4.4 Problèmes rencontrés

4.4.1 Limites de la MyLab2

Durant tout le développement de l'émulateur, de nombreux problèmes ont été rencontrés. Tout d'abord, j'ai vite été confronté aux limitations de la MyLab2. En effet, son processeur n'est pas assez rapide pour émuler la Gameboy. Il faut 5sec à la Gameboy pour passer le code de Bootstrap alors qu'il en faut 25 à la MyLab2 pour faire la même chose. L'émulateur est donc 5 fois plus lent sur le microcontrôleur. De plus, sa mémoire n'est pas suffisante pour accueillir l'intégralité de la mémoire de la Gameboy. Comme déjà expliqué précédemment, j'ai du scinder la mémoire afin de retirer les parties inutiles et mettre la ROM en flash. Même comme ça, les jeux les plus lourds ne pourront jamais être émulés par la MyLab2 car il faudrait au moins émuler 32kB de RAM pour la Gameboy. J'ai aussi essayé un moment d'utiliser le DMA du LPC1769 afin de communiquer avec l'écran. Pour utiliser le DMA, il ne faut pas utiliser l'interface SPI mais l'interface SSP0. Ce n'est qu'une fois l'implémentation de la gestion du SSP0 que j'ai découvert un bug avec le SSP0 sur le LPC1769. La ligne MOSI de l'interface reste toujours à l'état haut. Je n'ai donc pas pu utiliser le DMA pour la communication avec l'écran LCD.

4.4.2 Débogage de l'émulateur

La Gameboy doit être une des consoles la plus émulée de part sa simplicité mais aussi sa valeur nostalgique. Comme je l'ai déjà dit plus haut, ceci fait que l'on peut trouver énormément de documentation sur internet voir même trop. Il a été difficile de séparer les informations vraies des fausses. J'ai trouvé de nombreux documents, projets ou blogs se contredisant les uns des autres. Il a donc fallut tester, voir si le comportement est bien le bon mais même comme ça, il était difficile de vraiment savoir si l'émulateur était juste (surtout avant l'implémentation de l'écran LCD). Heureusement, des tests unitaires ont été

développés par la communauté afin d'aider dans le développement d'émulateurs. Ces tests sont les tests de Blargg et les tests de Mooneye. J'ai personnellement plus travaillé avec les tests de Blargg car ils sont plus globaux alors que ceux de Mooneye sont spécifique à des comportements précis de la Gameboy. La première chose qu'il a fallut valider était l'implémentation du CPU. Au départ les tests ne passaient pas mais c'est ainsi que j'ai pu trouver des erreurs dans certaines implémentations d'instructions. Les tests de Blargg affichent les résultats des tests sur l'écran mais pour ceux n'ayant pas encore implémenté l'affichage, les résultats sont aussi écrites dans le registre SB, à l'adresse 0xFF01 de la Gameboy. Si 0x81 est écrit dans le registre SC (adresse 0xFF02), il faut venir lire le registre SB. Chaque donnée est un caractère du résultat du test. Ces registres permettent normalement de contrôler la communication série de la Gameboy.

4.5 Résultats

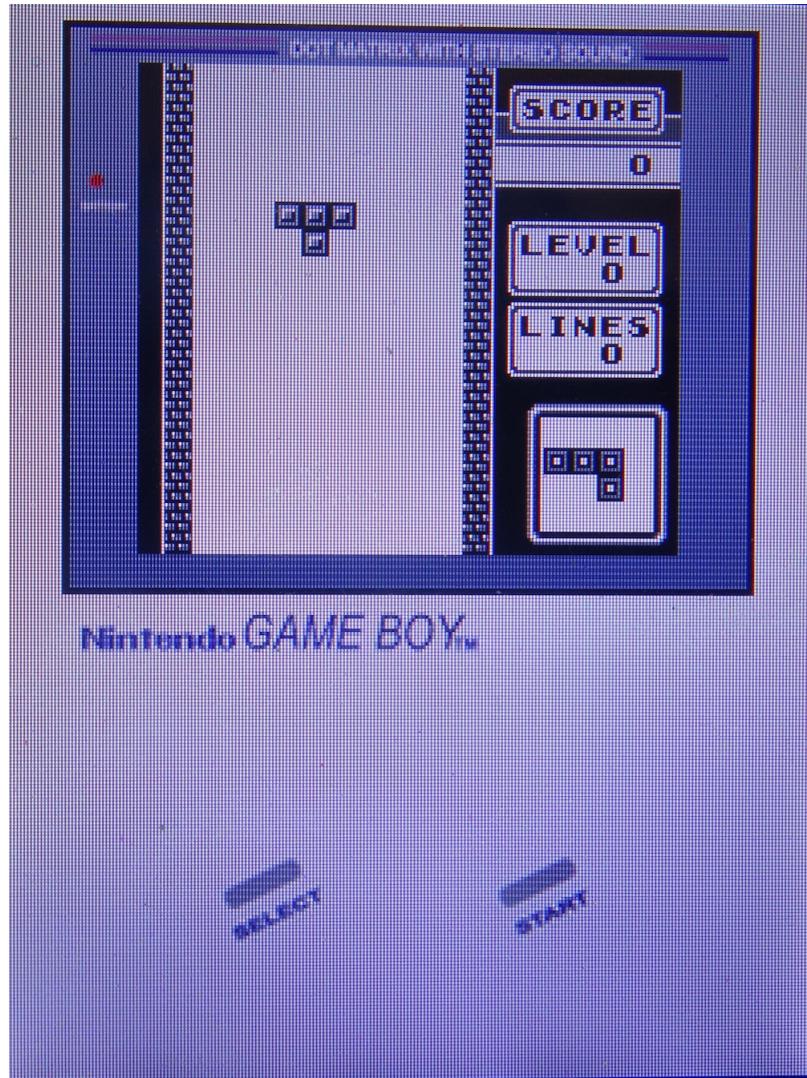


FIGURE 9 – MyLab2 GB en marche

L'émulateur est entièrement fonctionnel sur la MyLab2. A noter que toutes les composantes graphiques supplémentaires comme le logo de Nintendo ou l'indicateur de batterie sont des fichiers bitmap mises en constantes dans le programme. Il manque tout de même certaines choses comme le son ou la communication série (on pourrait imaginer deux MyLab2 pouvant communiquer). L'émulateur n'est donc pas fini il permet de faire tourner certains jeux mais pas tous. L'émulation de toutes les banques de mémoire est aussi à finir. Tout ce qui reste à faire est indiqué sur la page Github du projet. Il faudrait aussi trouver une solution pour le problème de latence.

5 Conclusion

Bien que plus lent que la Gameboy originale, l'émulateur développé durant ce semestre est finalement fonctionnel. Il peut encore y avoir un peu d'optimisation mais au final il sera toujours plus lent. Une idée avait été de porter l'émulateur sur la MyLab2 avec le LPC4337 qui est dual core. Même si les horloge des deux processeurs de ce microcontrôleur ont une fréquence d'horloge plus élevée, je pense que ça ne rendra toujours pas l'émulateur aussi rapide que l'original. Nous avons vu plus haut que actuellement, l'émulateur est 5 fois plus lent que normalement. Le LPC4337 et seulement 2 fois plus rapide que le LPC1769. Même paralléliser les tâches ne servirait pas ici car ce n'est pas l'affichage qui ralentit mais bien le travail d'émulation du CPU. L'émulateur serait juste un peu plus jouable avec le LPC4337.

Une solution à laquelle j'ai pensé est de refaire entièrement le processeur de la Gameboy sur une FPGA. La FPGA serait connectée à la MyLab2 (par les pins Pmod par exemple). La FPGA s'occuperait de toute la partie logique et la MyLab2 de tout l'affichage et des entrées. Une partie de l'émulateur fait durant ce semestre serait donc utilisable et toute la partie FPGA serait à faire. On pourrait imaginer un nouveau travail de semestre portant sur ce sujet.

En conclusion, je dirais que ce projet a été très intéressant. Il m'a permis de découvrir le fonctionnement d'une console à laquelle j'ai pu jouer par le passé. J'ai aussi pu expérimenter les limites de la MyLab2 qui est une carte que nous avons beaucoup utilisé en deuxième année. J'espère que des idées d'amélioration pourront être trouvées afin d'avoir un émulateur réellement fonctionnel fait à hepia.

6 Références

- [1] Gameboy cpu manual. <http://marc.rawer.de/Gameboy/Docs/GBCPUman.pdf>.
- [2] Antonio Niño Díaz (AntonioND). The cycle-accurate game boy docs. <https://github.com/AntonioND/giibiiadvance/blob/master/docs/TCAGBD.pdf>, 2014.
- [3] media.ccc.de. The ultimate game boy talk. <https://www.youtube.com/watch?v=HyzD8pNlpwI>, dec 2016.
- [4] Gameboy instruction set. http://www.pastraiser.com/cpu/gameboy/gameboy_opcodes.html.
- [5] gbdev.gg8.se. *GameBoy Bootstrap ROM*.
- [6] Blargg. Blargg's tests. <http://gbdev.gg8.se/files/roms/blargg-gb-tests/>.
- [7] Mooneye. Mooneye's tests. <https://github.com/Gekkio/mooneye-gb>.
- [8] Cinoop. Writing a game boy emulator. <https://cturt.github.io/cinoop.html>.
- [9] Tomek. Why did i spend 1.5 months creating a gameboy emulator ? <http://blog.rekawek.eu/2017/02/09/coffee-gb/>.
- [10] codeslinger.co.uk. Emulating the gameboy. <http://www.codeslinger.co.uk/pages/projects/gameboy.html>.
- [11] serginho89. Complete, fast, accurate, free, game boy/game boy color/super game boy emulator for linux/unix. <https://realboyemulator.wordpress.com>.
- [12] reddit. Emulator development. <https://www.reddit.com/r/EmuDev/>.
- [13] nesdev. Gbdev. <https://forums.nesdev.com/viewforum.php?f=20&sid=489c538fac210e3719c81d4f65ed4247>.
- [14] JackTech. The game boy, a hardware autopsy - part 1 : the cpu. <https://www.youtube.com/watch?v=RZUDEaLa5Nw>.
- [15] JackTech. The game boy, a hardware autopsy - part 1.5 : a few mistakes and register f. <https://www.youtube.com/watch?v=t0V-D2YMhrs>.
- [16] JackTech. The game boy, a hardware autopsy - part 2 : memory mapping. <https://www.youtube.com/watch?v=ecTQVa42sJc&t=576s>.
- [17] peterwynroberts.com. Gameboy programming tutorial : Hello world ! <http://peterwynroberts.com/?p=10>.