

Projet système à microprocesseur

Mise en œuvre d'une application sur un microcontrôleur à
cœur ARM

Louison GOUY

Yiying WEI

17 janvier 2022

Résumé

Ce rapport présente un projet de réalisation d'une application sur un microcontrôleur à cœur ARM. Elle est abordée en six étapes qui permettent, les unes après les autres, d'enrichir la configuration de départ puis observer les résultats pratiques attendus.

"It's not you can use C to generate good code for hardware. If you think like a computer writing C actually makes sens."

Linus Torvalds

Table des Matières

1	Glossaire	6
2	Le langage C	7
3	Présentation du projet	8
3.1	Introduction	8
3.2	Description de l'application	8
3.2.1	Cahier des charges	8
3.2.2	Conception fonctionnelle	8
3.2.3	Définition de la réalisation	9
3.2.4	Travail à effectuer	11
3.3	Plate-forme de développement	11
3.3.1	Le matériel	11
3.3.2	Le logiciel	12
4	Programme de base	13
4.1	Vue globale	13
4.2	Affinage	13
5	Programmation d'un timer	15
5.1	Fonctionnement d'un timer	15
5.2	Configuration TC6	17
5.2.1	Configuration du Generic Clock(GCLK)	17
5.2.2	Configuration du Power Manager(PM)	20
5.2.3	Configuration des ports d'E/S parallèles	21
5.2.4	Configuration du périphérique Timer Counter	23
5.3	Test et validation	26
6	Fonction sous interruption	27
6.1	Présentation du problème	27
6.2	Fonctionnement d'une interruption	28
6.3	Configuration interruption	29
6.3.1	Timer TC6	29
6.3.2	NVIC	29
6.3.3	Routine	30
7	Implémentation fonction calcul gabarit	32
7.1	Conception fonctionnelle	32
7.2	Implémentation logicielle	33
7.3	Test calcul gabarit et configuration DAC	35
7.3.1	Configuration du périphérique	35
7.3.2	Configuration du Generic Clock(GCLK)	37
7.3.3	Configuration du Power Manager(PM)	40
7.3.4	Configuration des ports d'E/S parallèles	40

8	Implantation de la commande PWM et modélisation du moteur	41
8.1	Génération du signal PWM	41
8.1.1	Présentation la fonctionnement du TC en mode PWM	41
8.1.2	Configuration et programmation	42
8.2	Dimensionnement du filtre modélisant le moteur	44
8.2.1	Calculs pour un filtre passe bas	44
8.2.2	Test du filtre passe bas	45
8.3	Résultats de l'implantation	47
9	Conclusion	49

Liste des figures

1	Gabarit en vitesse à respecter	9
2	Solution fonctionnelle du système à concevoir	10
3	Structure détaillée du système à concevoir	10
4	Spécification d'implantation	11
5	Mode de fonctionnement en WAVEFORM pour les compteurs	15
6	Fonctionnement timer configuré en MFRQ	16
7	Représentation digramme bloc TC	16
8	Fonctionnement du Generic Clock Controller	17
9	Description registre GENCTRL	18
10	Configuration des différents bits du CLKCTRL	19
11	Description registre APBCSEL	20
12	Extrait de description registre APBCMASK	20
13	Description registre CPUSEL	21
14	Extrait tableau multiplexage fonction port	21
15	Description registre CPUSEL	22
16	Description registre PMUXn	22
17	Description registre PINCFGn	23
18	Description registre CTRLA	24
19	Configuration des différents bits du CTRLBCLR	25
20	Configuration des différents bits du CTRLC	25
21	Signal de sortie du TC6	26
22	Ordonnancement tâches avec polling	27
23	Schéma bloc NVIC	28
24	Registre INTENSET	29
25	Registre NVIC_IUSER ARMv6-M	30
26	Oscillogramme vérification procédure interruption	31
27	Description fonctionnelle calcul gabarit (FSM)	32
28	Description diagramme bloc DAC	35
29	Description registre DAC CTRLA	35
30	Description registre DAC CTRLB	36
31	Description registre DAC CTRLB	36
32	Extrait description registre GENCTRL	37
33	Configuration des différents bits du CLKCTRL	38
34	Extrait description registre GENDIV	39
35	Oscillographe validation configuration DAC	40
36	Principe de la PWM	41
37	Fonctionnement du mode MPWM	42
38	Schéma du filtre passe-bas	44
39	Tensions de références disponibles pour le CAN	45
40	Test de la sortie du filtre passe bas	46
41	Test du PWM	47
42	Signal en sortie du CAN (bleu) et en sortie du filtre (jeune)	48

1 Glossaire

Requête d'interruption : (IRQ : interrupt request) Signal matériel indiquant qu'une interruption est requise.

Polling : approche d'ordonnancement dans laquelle le logiciel répète un test sur une condition pour déterminer s'il doit exécuter une tâche. [1]

Une **machine état ou automate fini** est une construction mathématique abstraite, susceptible d'être dans un nombre fini d'*états* , mais étant un moment donné dans un seul état à la fois. Le passage d'un état à un autre se fait par une *transition*.

2 Le langage C

Le langage C est un langage combiné, il a les caractéristiques des langages évolués (boucles itératives etc.) associé à des fonctionnalités des langages assemblés (décalage de bit, adressage indirect généralisé etc.). C'est la combinaison de ces deux caractéristiques qui font la force du langage [2]. Sa proximité avec l'assembleur le rendant très efficace, il est ainsi devenu le langage indispensable dans la programmation des applications comme l'automatique, la robotique, les OS ect. Cette même proximité impose peu de contraintes à l'utilisateur sur la structure de son programme. Aussi, il est possible d'écrire des fonctions avec plusieurs points de sorties, ou encore, d'échapper à une boucle avant son terme. Là où certains trouveront une grande souplesse, les critiques le considéreront trop permissif. On notera qu'un certain nombre d'organismes officiels proposent un ensemble de règles visant, tout en conservant son efficacité, à éviter les problèmes liés à une programmation peu soignée. L'Agence Nationale de la Sécurité des Systèmes Informatiques française (ANSSI) propose un rapport complet, *Règles de programmation pour le développement sécurisé de logiciels en langage C* [3], visant à "favoriser la production de logiciels C plus sécurisés, plus sûrs, d'une plus grande robustesse et portables". Il servira de référence durant ce projet.

3 Présentation du projet

3.1 Introduction

Ce projet a pour objectif de développer nos connaissances des technologies basées sur les microprocesseurs 16-32 bits ainsi que sur les outils associés de développement et de mise au point. Ce projet aborde :

- la prise en main d’une carte d’évaluation d’un microcontrôleur Microchip construit autour du cœur ARM Cortex-M0+,
- la prise en main des outils de développement et de test associés à ce type de cartes (environnement de développement Microchip Studio, debugger, analyseurs logiques),
- le développement incrémental d’une application nécessitant la mise en œuvre des particularités du cœur ARM et des périphériques du microcontrôleur,
- la mise en œuvre d’un composant développé auparavant (projet de conception de circuits) et implanté dans un FPGA.

Pour la réalisation de ce projet, nous disposons de plusieurs outils de documentation mis à disposition. Il est donc nécessaire d’avoir la curiosité d’aller chercher l’information dans les différentes datasheet pour pouvoir correctement implémenter l’application.

Ce rapport présente l’étude approfondie et les différents résultats des étapes de ce projet.

3.2 Description de l’application

Il s’agit d’implanter une application volontairement simplifiée ici pour tenir compte du volume horaire alloué au projet. La conception selon la méthodologie MCSE est brièvement présentée dans un premier temps, puis une démarche est proposée pour l’implantation de la solution.

3.2.1 Cahier des charges

L’application à développer a pour objectif de générer des cycles de fonctionnement d’un moteur à partir de deux informations :

- la vitesse de rotation souhaitée,
- l’instant de démarrage des cycles.

Chaque cycle est déclenché par un ordre de démarrage et comporte trois phases :

- accélération d’une durée de 128 ms,
- vitesse constante d’une durée de 512 ms,
- décélération d’une durée de 128 ms.

Le gabarit en vitesse à respecter peut donc être représenté par la figure 1.

Les ordres (Start et VPalier) sont transmis au système par l’intermédiaire d’un réseau LIN. Pour limiter l’étendu du problème, on considère qu’aucun ordre n’est transmis pendant un cycle. Le moteur a une gamme de vitesse de 0 à 5000 tr/mn. La valeur de VPalier évolue donc dans cette gamme, avec une précision de 10 tr/mn. La commande du moteur doit être de type PWM avec une fréquence de rafraîchissement de 100 μ s. La mesure de la vitesse est effectuée à l’aide d’une dynamo tachymétrique de résolution 0.66 mv/tr/mn.

3.2.2 Conception fonctionnelle

L’étape de conception fonctionnelle a pour objectif de définir une solution en ne considérant que l’aspect fonctionnel et sans tenir compte des contraintes technologiques telles que l’utilisation du bus LIN dans notre cas, la commande moteur de type PWM et la mesure de la vitesse à

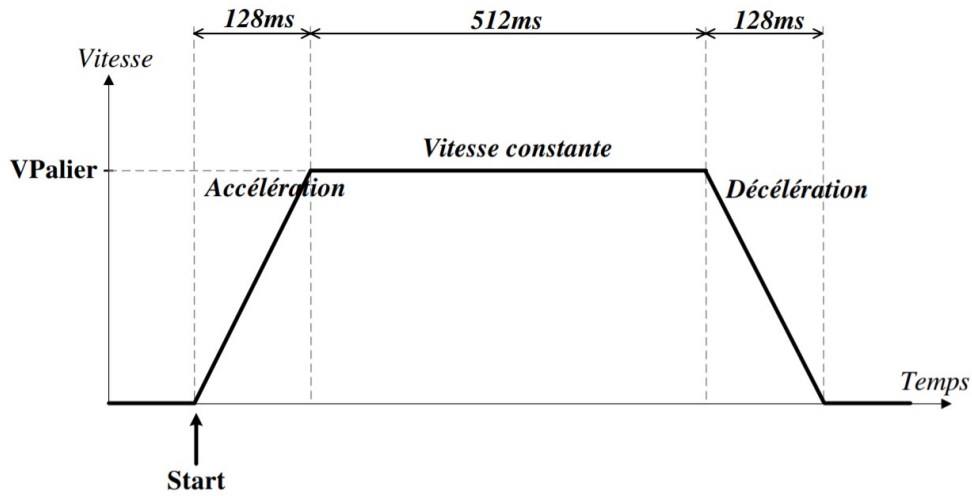


FIGURE 1 – Gabarit en vitesse à respecter

l'aide d'une dynamo tachymétrique. La solution fonctionnelle proposée pour notre application est donnée par la figure 2.

3.2.3 Définition de la réalisation

Cette étape a pour objectif d'introduire les contraintes technologiques dans la solution. Elle consiste dans un premier temps à ajouter les fonctions nécessaires pour faire l'interface entre les entrées/sorties physiques et les entrées/sorties fonctionnelles. Dans le cas de notre application, il faut introduire :

- un convertisseur analogique numérique pour traduire la mesure de vitesse effectuée par la dynamo tachymétrique,
- un générateur PWM pour produire la commande du moteur,
- un récepteur de trames LIN.

La structure détaillée (figure 3) intègre toutes ces fonctions.

L'étape de définition de la réalisation a aussi pour objectif de spécifier la répartition d'implantation matérielle-logicielle des fonctions et de spécifier l'implantation logicielle des différentes fonctions. L'analyse des caractéristiques du microcontrôleur SAMD21 permet d'envisager l'utilisation de timers pour implanter les fonctions Horloge et PWM et d'un convertisseur pour implanter la fonction CAN. Pour ce qui est de l'implantation de la fonction Recept_LIN, une interface de communication série présente au sein du microcontrôleur est utilisée. L'émission de la trame de données au format LIN est effectuée par un émetteur intégré au sein d'un FPGA. La spécification d'implantation est résumée par la figure 4.

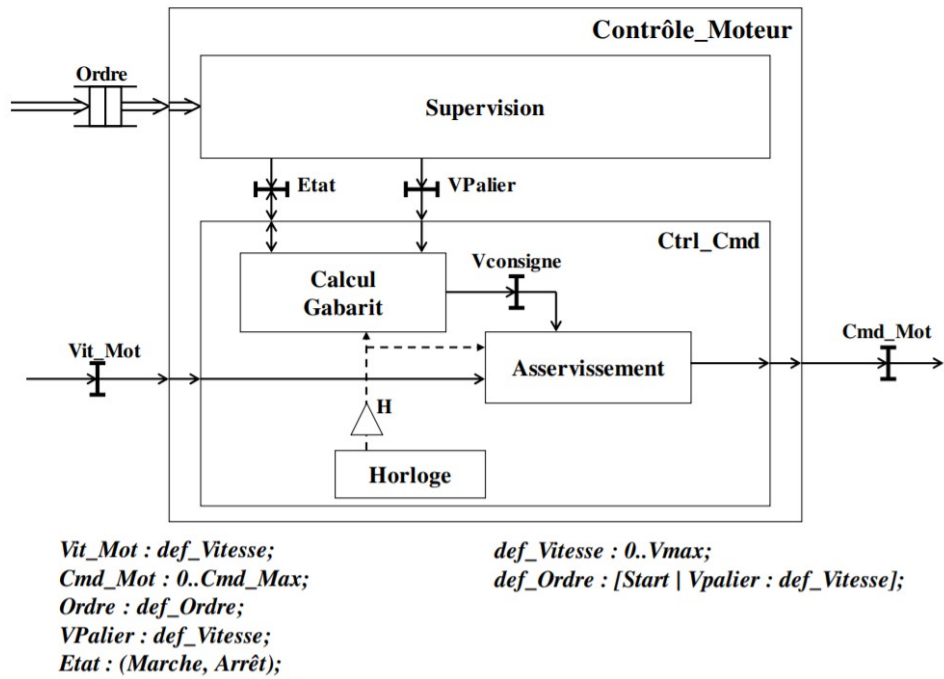


FIGURE 2 – Solution fonctionnelle du système à concevoir

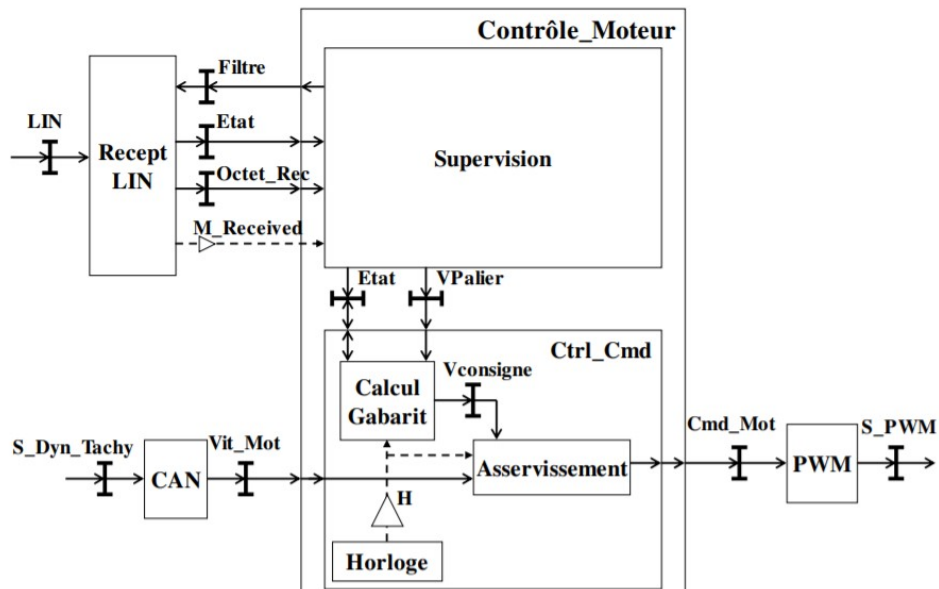


FIGURE 3 – Structure détaillée du système à concevoir

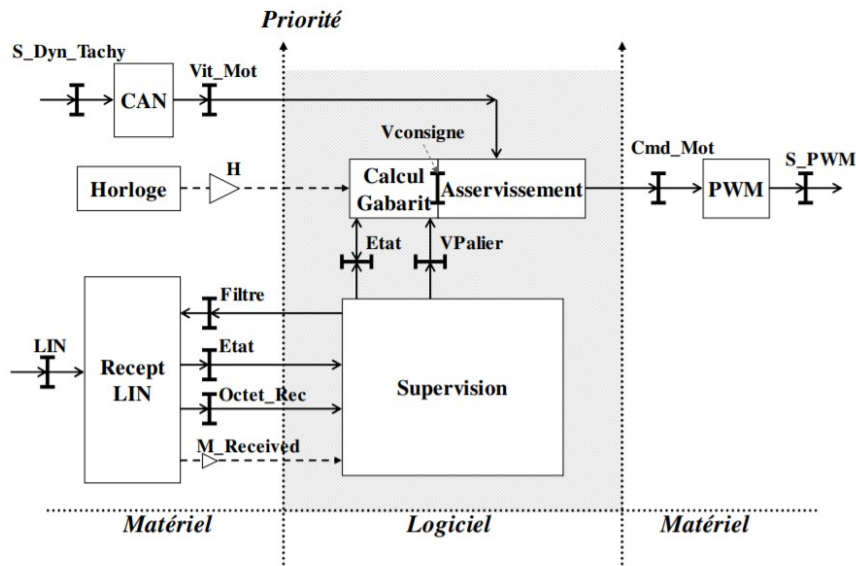


FIGURE 4 – Spécification d'implantation

3.2.4 Travail à effectuer

Après avoir spécifié l'implantation de la solution, il faut envisager sa mise en œuvre. Ce travail ne doit pas être effectué en une seule fois au risque d'avoir des difficultés pour le test et éventuellement le debug. Il s'agit donc de trouver une mise en œuvre incrémentale de la solution en validant chaque étape. Une proposition de découpage de l'implantation peut être la suivante :

- programmation d'un timer du microcontrôleur pour implanter la fonction Horloge,
- implantation d'une fonction sous interruption (clignotement d'une LED par exemple, validation de la fréquence d'activation),
- implantation de la fonction Calcul_Gabarit et utilisation du CNA,
- implantation de la commande de type PWM et d'un filtre (modélisation du moteur),
- implantation de la fonction Asservissement et utilisation d'un CAN,
- implantation de la fonction Supervision.

3.3 Plate-forme de développement

L'application du projet en Systèmes à microprocesseurs sera développée pour un support matériel donné (carte à microprocesseurs), à l'aide des outils de développement appropriés (compilateurs, assembleurs, éditeur de liens et outils de mise au point). La plate-forme matérielle sur laquelle le logiciel sera intégré sera composée d'une carte microcontrôleur Microchip (ex-Atmel) Xplained Pro SAMD21.

3.3.1 Le matériel

Le matériel utilisé dans le cadre de ce projet comprend les éléments suivants :

- une valise transparente, utilisée pour stocker les cartes électroniques mises à disposition,
- une carte d'évaluation Xplained Pro SAMD21, dans son emballage d'origine,

- une carte d’extension Xplained Pro PROTO1, dans son emballage d’origine,
- un câble d’alimentation USB, contenu par un cordon en plastique.

La carte utilisée est une carte d’évaluation développée par la société Microchip. Elle fait partie de l’offre de nombreuses cartes fabriquées par la société. La version retenue est la Xplained Pro SAMD21.

3.3.2 Le logiciel

Le firmware

La carte Xplained Pro SAMD21 comporte un debugger désigné par le terme Atmel Embedded Debugger (EDBG). Cet élément est utilisé afin de programmer et de déboguer le microcontrôleur ATSAM21J18A. A la mise sous tension de la carte Xplained Pro SAMD21, le microcontrôleur exécute le programme situé en mémoire Flash interne.

Le développement du logiciel

Les outils de développement sont disponibles dans l’ensemble appelé Atmel Studio. Cet ensemble est composé d’exécutables accessibles par des commandes en ligne ou bien par un environnement graphique.

Les commandes en ligne

Elles se composent des éléments suivants :

- un compilateur C ou C++ (ARM GNU C Compiler),
- un assembleur (ARM GNU Assembler),
- des bibliothèques de fonctions écrites en C ou C++,
- d’un éditeur de liens produisant un code absolu au format ELF (ARM GNU Linker),
- d’un debugger.

L’environnement graphique

Toutes les commandes sont accessibles via une interface graphique appelée également GUI (Graphic User Interface). Elle comporte :

- un outil de gestion des solutions et des projets créés pour la carte,
- un outil de gestion des bibliothèques propres à la carte appelé Atmel Software Framework (ASF),
- d’outils de débogage pour la validation de l’exécution du programme.

Il est également possible d’ajouter des outils complémentaires proposés par la société Microchip ou par des compagnies tierces.

4 Programme de base

Dans un premier temps un nouveau projet est créé de type "GCC C ASF Board project". Microchip studio génère alors une arborescence de fichiers dont un `main.c`. Ce dernier est étudié de manière globale puis affinée par étape dans la section suivante.

4.1 Vue globale

Cette partie détaille le fonctionnement du programme de base.

```
1 #include <asf.h>
2
3 int main (void)
4 {
5     system_init();
6
7     /* Insert application code here, after the board has been initialized. */
8
9     /* This skeleton code simply sets the LED to the state of the button. */
10    while (1) {
11        /* Is button pressed? */
12        if (port_pin_get_input_level(BUTTON_0_PIN) == BUTTON_0_ACTIVE) {
13            /* Yes, so turn LED on. */
14            port_pin_set_output_level(LED_0_PIN, LED_0_ACTIVE);
15        } else {
16            /* No, so turn LED off. */
17            port_pin_set_output_level(LED_0_PIN, !LED_0_ACTIVE);
18        }
19    }
```

La première ligne permet d'inclure la bibliothèque `asf` et ainsi de profiter du niveau d'abstraction mis à disposition par Microship. La suivante, `int main ()` bien connue des développeurs C, est le point d'entrée du programme. C'est la première fonction exécutée. La ligne 5 `system_init()`; a été générée automatiquement par le logiciel à la création du projet. C'est elle qui nous offre ce niveau d'abstraction en initialisant les horloges et les entrées/sorties etc. Elle est spécifique à la cible utilisée, dans notre cas la carte Microchip SAMD21 Xplained Pro. La ligne 10 correspond à l'implémentation d'une boucle infinie. Cette dernière permet de lire l'état du bouton (ligne 12) en "continu". La condition suivante d'éclanche le résultat souhaité : allumage ou extinction de la LED0.

4.2 Affinage

Include ASF

L'Advanced Software Framework (ASF) fournit un riche ensemble de pilotes éprouvés et de modules de code développés par des experts pour réduire le temps de conception. Il simplifie l'utilisation des microcontrôleurs en fournissant une abstraction au matériel. ASF est une bibliothèque de code gratuite et open-source conçue pour être utilisée lors des phases d'évaluation, de prototypage, de conception et de production. Elle sera utilisée tout au long de ce TP et fera l'objet de nombreuses références.

System_init

Au début du `main` la fonction `system_init()` est appelée. Comme son nom l'indique elle a pour but d'initialiser le système. Elle est définie dans le fichier `system.c` et consiste en un simple appel successif à cinq fonctions de configuration : `system_clock_init()`; `system_board_init()`;

`_system_events_init(); _system_extint_init();` et `_system_divas_init();`. Elles jouent chacune un rôle essentiel dans l'initialisation de carte.

Boucle infinie

Implémenté à travers un **tant que VRAI**, cette ligne n'est pas difficile à comprendre mais il peut être intéressant d'en établir le contexte. Le guide des bonnes de pratiques de l'ANSSI [3] indique toutefois que la forme d'une boucle infinie est bien **while(1)** et non **for(;;)**

De manière générale, le bouclage répète un jeu d'instruction jusqu'à se qu'une condition particulière soit atteinte. On définit une boucle infinie dès lors que cette condition n'arrive jamais en raison d'une caractéristique inhérente à la boucle. Dans notre cas la condition de sortie serait VRAI=FAUX. C'est impossible, la boucle est bien infinie.

Condition sur E/S

Les lignes suivantes implémentées via une structure **if else** traduisent le comportement souhaité du point de vue utilisateur. A savoir, le maintient en position enfoncé du bouton provoque l'illumination de la LED0. La lecture de son état est permis grâce à la fonction **port_pin_get_input_level** retournant un entier. Elle est alors comparé à **LED_0_ACTIVE** défini comme XX. Si la condition est vrai la fonction **port_pin_set_output_level** est appelé avec comme paramètre **LED_0_ACTIVE** sinon **!LED_0_ACTIVE**.

5 Programmation d'un timer

Cette étape vise à générer un signal carré de période 1ms sur une des sorties timer du microcontrôleur. Il s'agit de préparer l'implantation de la fonction Horloge. Cette fonction sera donc réalisée par une ressource matérielle du microcontrôleur : un timer.

5.1 Fonctionnement d'un timer

Le microcontrôleur SAMD21 possède 5 timers/counters allant de TC3 à TC7. Il est possible de les paramétrer en fonction de l'utilisation qu'il en sera fait. Dans notre cas, le timer TC6 est imposé par le sujet du TP.

Chaque timer peut prendre 3 configurations possibles : 8, 16 ou 32 bits¹. Le nombre de registres associés à chacune des configurations est différent. Nous utiliserons le mode 16 bits (65536 valeurs possibles).

Fonctionnement du TC en mode waveform

Les timers/counters (TC) du microcontrôleur SAMD21 proposent un mode de fonctionnement adapté à la production de signaux logiques : le mode *waveform*. La sélection du mode se fait via la configuration de certains registres. L'objectif est de générer un signal rectangulaire de rapport cyclique quelconque.

Il existe 4 modes de fonctionnement pour les compteurs en mode WAVEFORM présenté par la figure ci-dessous.

Name	Operation	TOP	Update	Output Waveform		OVFIF/Event	
				On Match	On Update	Up	Down
NFRQ	Normal Frequency	PER	TOP/ ZERO	Toggle	Stable	TOP	ZERO
MFRQ	Match Frequency	CC0	TOP/ ZERO	Toggle	Stable	TOP	ZERO
NPWM	Single-slope PWM	PER	TOP/ ZERO	See description above.		TOP	ZERO
MPWM	Single-slope PWM	CC0	TOP/ ZERO	Toggle	Toggle	TOP	ZERO

FIGURE 5 – Mode de fonctionnement en WAVEFORM pour les compteurs

Le mode Match Frequency Generation (MFRQ) est le plus adapté à l'application. En effet, la fréquence n'est fixée qu'avec un seul paramètre : CC0. D'après la datasheet du SAMD21, le fonctionnement du mode MFRQ est le suivant.

1. Le timer 32bits fonctionne en assemblant 2 timers 16 bits en cascade

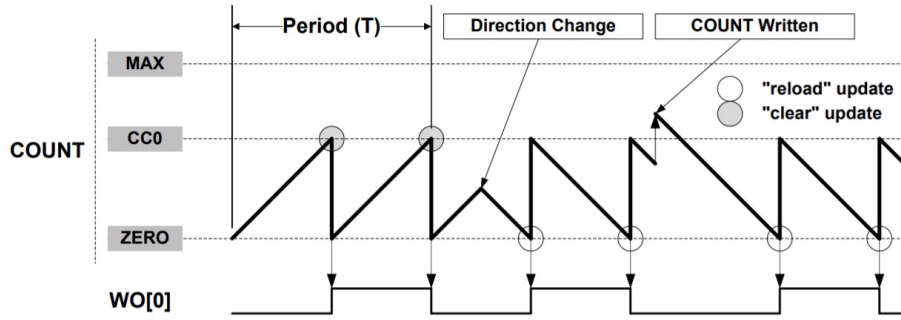


FIGURE 6 – Fonctionnement timer configuré en MFRQ

La période T du signal est contrôlée par le registre $CC0$. Le signal de sortie est numérique, sa valeur se trouve dans $WO[0]$. A chaque fois que le compteur $COUNT$ atteint la valeur du registre $CC0$. Le signal de sortie $WO[0]$ est permuté. La valeur MAX correspond à la résolution du compteur : ici 16 bits donc 65536 valeurs possibles. Il faudra être vigilant car la fréquence du compteur vaut deux fois celle du signal de sortie.

Calculs pour une fréquence de 1kHz

Pour obtenir une fréquence de 1kHz il faut déterminer la valeur de $CC0$ comme expliqué précédemment. Pour faire cela il est primordial de bien comprendre son fonctionnement et les registres impliqués dans la configuration. La figure ci-dessous donne la fréquence de comptage.

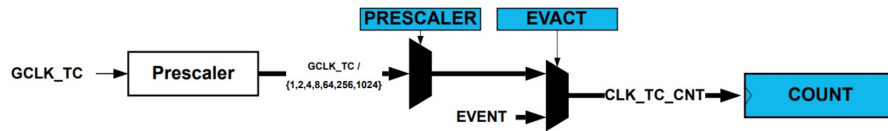


FIGURE 7 – Représentation digramme bloc TC

L'horloge count est fournie à partir de l'horloge $GCLK_TC$ (Generic clock for TC). Elle est l'horloge de référence pour les TC. Elle a une fréquence de 8MHz. Cette horloge peut être divisée en y appliquant un prescaler afin d'obtenir CLK_TC_CNT . N est une pré division de l'horloge du timer. Dans notre cas, le prescaler n'est pas appliqué et prendra la valeur $N = 1$. L'équation ci-dessous présente la fréquence à laquelle sera effectué le comptage.

$$T_{GCLK_TC} = N * T_{CLK_TC_CNT} = T_{CLK_TC_CNT} \quad (1)$$

On sait que f_{GCLK_TC} est égale à 8 MHz. Pour une fréquence $f_{WO[0]}$ de 1kHz, on obtient :

$$f_{WO[0]} = \frac{f_{CLK_TC_CNT}}{2 * (CC0 + 1)} \Rightarrow CC0 = \frac{f_{GCLK_TC}}{2 * f_{WO[0]}} - 1 = 3999 \quad (2)$$

La valeur chargée dans le registre $CC0$ sera donc 3999.

5.2 Configuration TC6

Cette partie détaille les configurations nécessaires à la génération d'un signal carré de 1kHz grâce à TC6. Les éléments suivants seront configuré : le generic clock controller, le power manager, un port d'entrée sortie et finalement TC6.

5.2.1 Configuration du Generic Clock(GCLK)

En fonction de l'application, chaque périphérique de la carte SAMD21 peut avoir besoin d'une horloge de fonctionnement déferente. Le Generic Clock Controller peut générer jusqu'à 9 signaux. Les générateurs peuvent être configurés pour utiliser différentes sources de référence, internes comme externes. L'horloge de chaque générateur peut être divisée. Les sorties des générateurs sont utilisées comme sources pour les multiplexeurs d'horloge générique permettant plus de modularité. Dans notre cas le périphérique Timer 6, correspond à GCLK_TC6 (Generic clock for TC6) commun avec TC7. La figure ci-dessous présente la vue fonctionnelle du générateur des signaux de l'horloge sous forme d'un diagramme bloc.

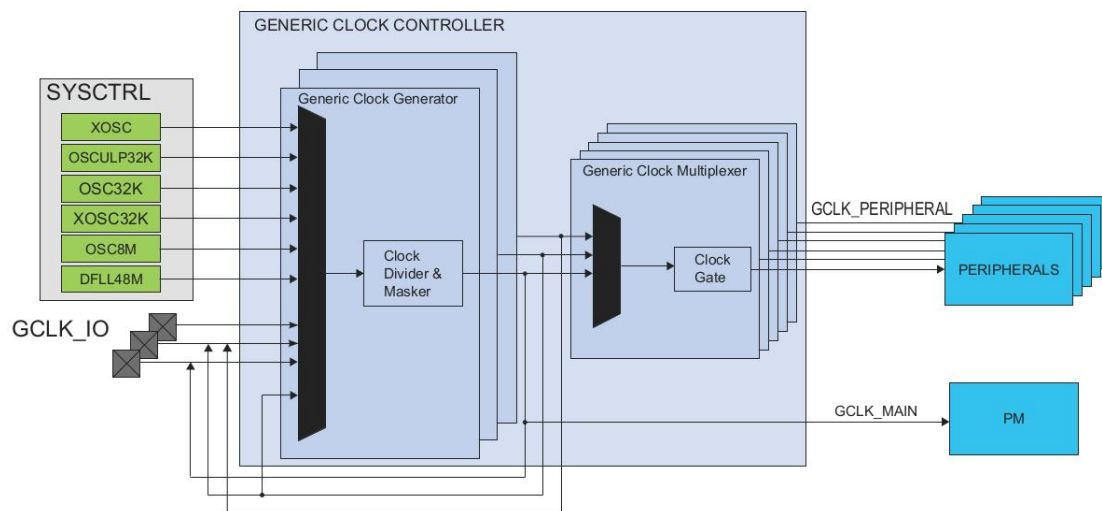


FIGURE 8 – Fonctionnement du Generic Clock Controller

On remarque que le Generic Clock Controller est divisé en deux parties, d'une part le Generic Clock Generator configuré par le registre GENCTRL et d'autre part le Generic Clock Multiplexer configuré par le registre CLKCTRL. Le premier permet de sélectionner la source et de la diviser. Le facteur de division est défini dans un registre de taille variable en fonction du générateur pouvant aller de 5 à 16 bits. Par exemple pour le n°0 est sur 8 bits soit une division maximum par 512. Le signal divisé se retrouve ensuite en sortie du générateur. C'est là que commence le second bloc composé de 28 multiplexeurs. Leurs entrées sont connectées à chacun des 9 générateurs et peuvent devenir le signal d'horloge du périphérique.

Ce système de sélection est à la fois très modulaire tout en restant parfaitement optimisé.

Configuration du registre GENCTRL

Le détail de Generic Clock Generator Control (GENCTRL) est donné dans la figure ci-dessous :

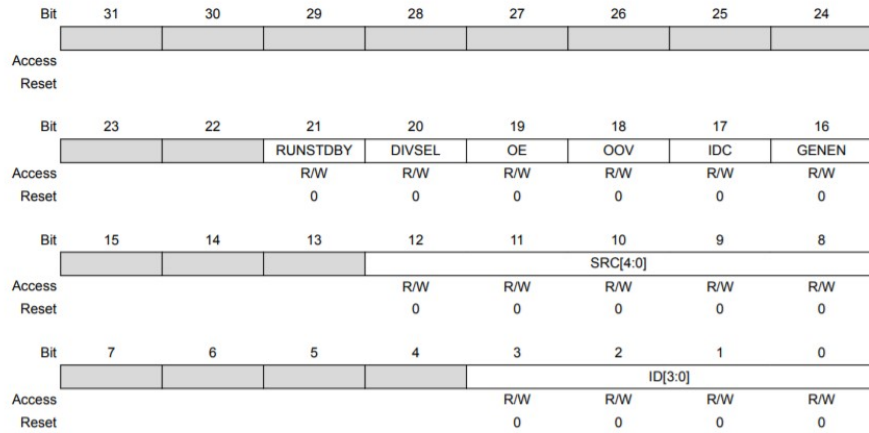


FIGURE 9 – Description registre GENCTRL

- **RUNSTDBY** : Fonctionnement en mode Standby ou non. Dans notre cas, nous voulons la désactiver donc il faut mettre **0** << **21** dans ce champ.
- **DIVSEL** : Définit le facteur de division de l'horloge. Nous ne voulons pas la diviser donc il faut mettre la valeur **0** << **20** dans ce champ.
- **OE** : Permet d'autoriser l'activation sur une sortie de GCLK. Nous ne voulons pas activer cette option donc il faut mettre la valeur **0** << **19** dans ce champ.
- **OOV** : Définit la valeur de la sortie de GCLK. Lorsque l'OE est à 0 il faut mettre également 0 dans ce champ donc la valeur **0** << **18**.
- **IDC** : Définit du rapport cyclique en cas de division impaire. Dans notre cas, il faut mettre la valeur **0** << **17** dans ce champ.
- **GENEN** : Validation ou non du générateur d'horloge. Nous voulons l'activer donc il faut mettre la valeur **1** << **16** dans ce champ.
- **SRC[4 :0]** : Choix de la source d'horloge. Nous voulons choisir la source OSC8M donc d'après la datasheet il faut mettre la valeur **6** << **8** dans ce champ.
- **ID[3 :0]** : Définit le numéro du générateur que l'on configure (0 à 8). Nous choisissons la générateur 0 donc il faut mettre la valeur **0** << **0**.

Configuration du registre CLKCTRL

Ce registre permet de choisir parmi les 9 générateurs décrit précédemment. Le détail de Generic Clock Control (CLKCTRL) est donné dans la figure ci-dessous :

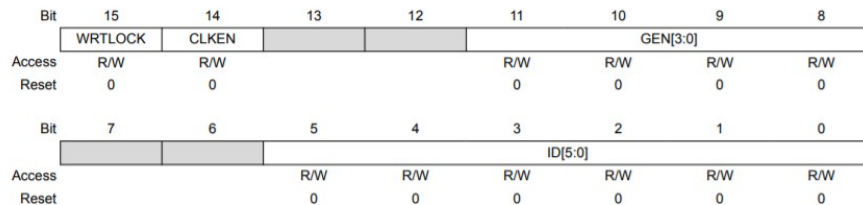


FIGURE 10 – Configuration des différents bits du CLKCTRL

- **WRTLOCK** : Permet le verrouillage de l'horloge générique pour les générateurs 1 à 9. Nous avons choisi le générateur 0 et il n'y a pas de verrouillage donc il faut mettre **0** dans ce champ.
- **CLKEN** : Validation de l'horloge générique donc **1** dans ce champ.
- **GEN[3:0]** : Permet de choisir le générateur d'horloge d'entrée. Ici il s'agit GCLK_GEN[0] donc il faut mettre **0** dans ce champ.
- **ID[5:0]** : Définit le périphérique vers lequel est dirigé l'horloge générique. Dans notre cas, il faut l'envoyer vers TC6 donc d'après la datasheet du SAMD21 il faut mettre la valeur **1** dans ce champ.

Code de la configuration du GCLK

La configuration du GCLK traduite en langage C donne le résultat suivant :

```

1  void config_GCLK_TC6(void){
2      Gclk *ptr_GCLK = GCLK;
3
4      ptr_GCLK->CLKCTRL.reg = GCLK_CLKCTRL_NOWRTLOCK |
5                              GCLK_CLKCTRL_CLKEN |
6                              GCLK_CLKCTRL_GEN_GCLK0 |
7                              GCLK_CLKCTRL_ID_TC6_TC7 ;
8
9      ptr_GCLK->GENCTRL.reg = GCLK_GENCTRL_NORUNSTDBY |
10                             GCLK_GENCTRL_NODIVSEL |
11                             GCLK_GENCTRL_NOOE |
12                             GCLK_GENCTRL_NOOV |
13                             GCLK_GENCTRL_NOIDC |
14                             GCLK_GENCTRL_GENEN |
15                             GCLK_GENCTRL_SRC_OSC8M |
16                             GCLK_GENCTRL_ID(0) ;
17  }
18

```

5.2.2 Configuration du Power Manager(PM)

Les périphériques communiquent avec le microprocesseur via un bus synchrone. L'horloge est délivrée par le Power Manager (PM). Il gère trois domaines d'horloge, une pour le CPU, une pour le bus AHB à destination de la mémoire et trois clocks pour le bus APB à destination des périphériques. Le "Synchronous Clock Controller" prend en entrée la sortie de GCLK et sort 3 horloges pour les 3 bus internes du microprocesseur : APBA, APBB et APBC.

D'après la cartographie des produits, le Timer TC6 est placé sur le bus APBC. Il faut donc configurer les registres :

- APBCSEL
- APBCMASK
- CPUSEL

Ils sont respectivement en charge du facteur de division appliqué sur l'horloge de APBC, du masque d'activation et du facteur de division appliqué sur l'horloge du CPU.

Configuration du registre APBCSEL

Le registre APBA Clock Select (APBCSEL) ne contient qu'un seul champ :

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
						APBCDIV[2:0]		
Access						R/W	R/W	R/W
Reset						0	0	0

FIGURE 11 – Description registre APBCSEL

- **APBCDIV[2 :0]** : Définit le facteur de division de l'horloge d'entrée GCLKMAIN. On choisit la division par 1 donc il faut mettre **0** < < **0**.

Configuration du registre APBCMASK

Le registre APBC Mask (APBCMASK) contient les validations d'horloge bus pour tous les périphériques connectés sur le bus APBC.

Bit	15	14	13	12	11	10	9	8
	TC7	TC6	TC5	TC4	TC3	TCC2	TCC1	TCC0
Access	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Reset	0	0	0	0	0	0	0	0

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	SERCOM5	SERCOM4	SERCOM3	SERCOM2	SERCOM1	SERCOM0	EVSYS	PAC2
Access	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Reset	0	0	0	0	0	0	0	0

FIGURE 12 – Extrait de description registre APBCMASK

Les bits 20 :0 permettent de stopper les différentes horloges bus de APBC s'ils sont mis à zéro ou bien de les activer s'ils sont mis à un.

- **TC6** : Ici on veut activer l'horloge bus pour TC6 donc il faut mettre **1** < < **14**.

Configuration du registre CPUCSEL

Le registre CPU Clock Select (CPUCSEL) ne contient qu'un seul champ :

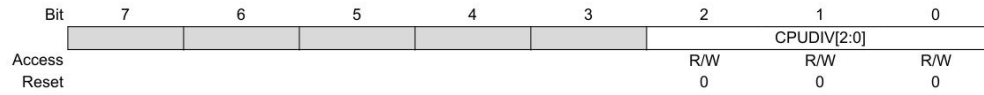


FIGURE 13 – Description registre CPUCSEL

- **CPUDIV[2:0]** : Permet de définir le facteur de division de l'horloge du CPU par rapport à GCLKMAIN. On choisit la division par 1 donc il faut mettre **0** < **0**.

Code de la configuration du PM

La configuration du PM traduite en langage C donne le résultat suivant :

```
1 void config_PM(void){
2     Pm *ptr_PM = PM;
3
4     ptr_PM -> CPUCSEL.reg = PM_CPUCSEL_CPUDIV_DIV1;
5     ptr_PM -> APBCSEL.reg = PM_APBCSEL_APBCDIV_DIV1;
6     ptr_PM -> APBCMASK.reg |= PM_APBCMASK_TC6;
7 }
8
```

5.2.3 Configuration des ports d'E/S parallèles

Le nombre de broches du microprocesseur est limité : le SAMD21 en possède 64, un nombre bien inférieur à la somme des entrées/sorties de tous les périphériques. Il faut donc multiplexer les entrées ou les sorties des périphériques via les ports d'entrée/sortie A et B. Dans un premier il nous faut donc déterminer quelles broches, et dans quel multiplexeur il est possible d'observer le signal WO[0] du TC6. D'après la table de multiplexage présente dans la datasheet du SAMD21 (extrait figure 14), ce signal est disponible sur 2 pins : PB02 et PB16. Cependant la pin PB16 est déjà utilisée pour d'autres fonctions, il est donc préférable de prendre la **broche PB02**. Il faudra sélectionner le **multiplexeur E**.

Pin ⁽¹⁾			I/O Pin	Supply	A					C		D	E	F	G	H
SAMD2xE	SAMD2xG	SAMD2xJ			EIC	REF	ADC	AC	PTC	DAC	SERCOM(2)(3)	SERCOM-ALT	TC ⁽⁴⁾ /TCC	TCC	COM	AC/ GCLK
	47	63	PB02	VDDANA	EXTINT[2]		AIN[10]		Y[8]			SERCOM5/ PAD[0]	TC6WO[0]	TCC3/ WO[2]		

FIGURE 14 – Extrait tableau multiplexage fonction port

Pour accéder à la sortie WO[0] de TC6, il faudra configurer :

- Registre **DIRSET** pour choisir la broche PB02 en sortie
- Registre **PMUX** pour choisir le multiplexage de type E
- Registre **PINCFG** pour valider le multiplexage choisi

Configuration du registre DIRSET

Le registre Data Direction Set (DIRSET) permet à l'utilisateur de définir une ou plusieurs broches d'E/S en sortie. Ce registre sert à mettre à 1 en bits correspondants dans le registre DIR. Le registre DIR contient la configuration de chacune des pattes du port A ou B.

Bit	31	30	29	28	27	26	25	24
	DIRSET[31:24]							
Access	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Reset	0	0	0	0	0	0	0	0
Bit	23	22	21	20	19	18	17	16
	DIRSET[23:16]							
Access	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Reset	0	0	0	0	0	0	0	0
Bit	15	14	13	12	11	10	9	8
	DIRSET[15:8]							
Access	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Reset	0	0	0	0	0	0	0	0
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	DIRSET[7:0]							
Access	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Reset	0	0	0	0	0	0	0	0

FIGURE 15 – Description registre CPUSEL

- **DIRSET[31 :0]** : Le bit à 0 n'a aucun effet. Le bit à 1 configure la broche d'E/S comme une sortie. Pour le port B, il faut configurer la patte 2 en sortie donc il faut mettre **1<<2**.

Configuration du registre PMUX

Il y a jusqu'à 16 registres de multiplexage périphérique dans chaque groupe, un pour chaque ensemble de deux lignes d'E/S. Le n désigne le numéro de l'ensemble des lignes d'E/S. Le registre Peripheral Multiplexing n (PMUXn) est composé de 16 octets, chacun composé de 2 parties : 4 bits pour les pins impaires, 4 bits pour les pins paires. Ainsi PMUX0 contient le multiplexage des pins 0 (paire) et 1 (impaire). La pin 2 est alors la partie paire de PMUX1.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	PMUXO[3:0]				PMUXE[3:0]			
Access	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Reset	0	0	0	0	0	0	0	0

FIGURE 16 – Description registre PMUXn

- **PMUXE[3 :0]** : 0x0 étant le multiplexage A, et 0x8 le I. On spécifie alors le multiplexage à mettre en place : E, donc il faut mettre la valeur **0x4<<0**.

Configuration du registre PINCFG

Enfin, il faut activer la broche PB02 en passant par les registres Pin Configuration (PINCFG). Ils sont définis ainsi :

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
		DRVSTR				PULLEN	INEN	PMUXEN
Access		R/W				R/W	R/W	R/W
Reset		0				0	0	0

FIGURE 17 – Description registre PINCFGn

- **DRVSTR** : Contrôle la force du driver de sortie. 1 pour fort, 0 pour normal. Ne nous concerne pas ici donc il faut mettre $0 < 6$ dans ce champ.
- **PULLEN** : Active ou non la résistance pull-up ou pull-down interne d'une broche d'E/S configurée en entrée. Ne nous concerne pas ici, donc $0 < 2$.
- **INEN** : Validation de la patte comme une entrée. On considère ici une sortie donc il faut mettre $0 < 1$ dans ce champ.
- **PMUXEN** : Validation ou non le multiplexage E mis en place par le registre PMUX correspondant donc il faut mettre $1 < 0$.

Code de la configuration du PORT

La configuration du PORT traduite en langage C donne le résultat suivant :

```

1 void config_PORT(void){
2     Port *ptr_port = PORT ;
3
4     ptr_port -> Group[1].DIRSET.reg = PORT_PB02;
5     ptr_port -> Group[1].PMUX[2/2].reg = PORT_PMUX.PMUXE.E;
6     ptr_port -> Group[1].PINCFG[2].reg = PORT_PINCFG.DRVSTR_NO |
7                                         PORT_PINCFG.PULLEN_NO |
8                                         PORT_PINCFG.INEN_NO |
9                                         PORT_PINCFG.PMUXEN;
10 }
11
```

5.2.4 Configuration du périphérique Timer Counter

Nous utiliserons pour cette partie le Timer Counter 6 (TC6) configuré dans le mode 16 bits. Pour générer un signal de fréquence 1kHz, il faut programmer le registre :

- CTRLA
- CTRLBLR
- CTRLC
- CC0

Configuration du registre CTRLA

Le détail de Control A (CTRLA) est donné dans la figure ci-dessous :

Bit	15	14	13	12	11	10	9	8
			PRESCSYNC[1:0]		RUNSTDBY	PRESCALER[2:0]		
Access			R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Reset			0	0	0	0	0	0
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
		WAVEGEN[1:0]			MODE[1:0]		ENABLE	SWRST
Access		R/W	R/W		R/W	R/W	R/W	R/W
Reset		0	0		0	0	0	0

FIGURE 18 – Description registre CTRLA

- **PRESCSYNC[1 :0]** : Le registre de comptage est piloté par une horloge issue de GCLK_TC via un prescaler. Il faut donc mettre la valeur **1<<12**.
- **RUNSTDBY** : Définit le fonctionnement du TC en mode STANDBY. Il n'y a pas d'intérêt à garder le TC actif en veille donc **0<<11**.
- **PRESCALER[2 :0]** : Applique un facteur de division à l'horloge d'entrée entre 1 et 1024. Il ne sera pas nécessaire de diviser au préalable l'horloge donc on garde un prescaler de 1 alors **0<<8**.
- **WAVEGEN[1 :0]** : Sélectionne le mode de fonctionnement du compteur. Le mode MFRQ est utilisé, il faut donc **1<<5**.
- **MODE[1 :0]** : Sélectionne le mode de comptage pour le compteur, c'est-à-dire le nombre de bits de comptage : 8, 16 ou 32 bits. Il nous faut ici compter 4000 valeurs (de 0 à 3999) d'après le modèle présenté en début de section. C'est donc le mode 16 bits qui est choisi, alors **0<<2**.
- **ENABLE** : Valide le timer ou non. Ici nous voulons le valider donc il faut mettre la valeur **1<<1**.
- **SWRST** : Nous ne voulons pas de RESET du Timer donc il faut mettre la valeur **0<<0**.

Configuration du registre CTRLBCLR

Le détail de Control B Clear (CTRLBCLR) est donné dans la figure ci-dessous :

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	CMD[1:0]					ONESHOT		DIR
Access	R/W	R/W				R/W		R/W
Reset	0	0				0		0

FIGURE 19 – Configuration des différents bits du CTRLBCLR

- **CMD[1 :0]** : Sélectionne la commande lors du prochain cycle de GCLK du TC : NONE, RETRIGGER ou STOP. Aucun comportement particulier n'est souhaité, on place alors NONE $0 < 6$.
- **ONESHOT** : Le One-Shot stop le compteur lors d'un débordement du compteur (inférieur à 0 ou supérieur à la valeur maximale). Placé ce bit à 1 stop cette fonctionnalité. On veut le désactiver donc il faut mettre la valeur $1 < 2$.
- **DIR** : Paramètre le sens de comptage : incrémentation(1) ou décrémentation(0). On choisit le mode incrémentation donc $1 < 0$.

Configuration du registre CTRLC

Le détail de Control C (CTRLC) est donné dans la figure ci-dessous :

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
			CPTEN1	CPTEN0			INVEN1	INVEN0
Access			R/W	R/W			R/W	R/W
Reset			0	0			0	0

FIGURE 20 – Configuration des différents bits du CTRLC

- **CPTENx** : Autorise la capture sur les channel 1 et 0. On veut désactiver le mode capture 1 et capture 0 donc il faut mettre la valeur $0 < 5$ et $0 < 4$.
- **INVENx** : Inverse les sorties WO[1] et WO[0] lorsque ces bits sont à 1. On ne veut pas inverser la sortie WO[1] et WO[0] donc il faut mettre la valeur $0 < 1$ et $0 < 0$.

Configuration du registre CC0

Ce registre permet de définir la demi période CC0 du signal W0[0].

D'après les calculs présenté précédemment, pour générer un signal de fréquence 1kHz, la valeur chargée dans le registre CC0 est donc 3999.

Code de la configuration du TC6

La configuration du TC6 traduite en langage C donne le résultat suivant :

```
1 void config_TC6(void){
2     Tc *ptr_TC = TC6 ;
3
4     ptr_TC -> COUNT16.CTRLA.reg = TC_CTRLA_PRESCSYNC_PRESC |
5                                     TC_CTRLA_NORUNSTDBY |
6                                     TC_CTRLA_PRESCALER_DIV1 |
7                                     TC_CTRLA_WAVEGEN_MFRQ |
8                                     TC_CTRLA_MODE_COUNT16 |
9                                     TC_CTRLA_ENABLE |
10                                    TC_CTRLA_NOSWRST;
11     ptr_TC -> COUNT16.CTRLC.reg = TC_CTRLC_NOCPTEN0 |
12                                    TC_CTRLC_NOCPTEN1 |
13                                    TC_CTRLC_NOINVEN0 |
14                                    TC_CTRLC_NOINVEN1;
15     ptr_TC -> COUNT16.CTRLBCLR.reg = TC_CTRLBCLR_CMD_NONE |
16                                       TC_CTRLBCLR_ONESHOT |
17                                       TC_CTRLBCLR_DIR;
18     ptr_TC -> COUNT16.CC[0].reg = 3999;
19     ptr_TC -> COUNT16.CTRLA.reg |= TC_CTRLA_ENABLE;
20 }
21
```

5.3 Test et validation

Les spécifications ci-dessus sont traduites en langage C et implantées sur la carte. A l'aide d'un oscilloscope, on visualise le signal de sortie sur la broche PB02 paramétrée précédemment. Le signal en sortie du TC6 présenté en figure ci-dessous :

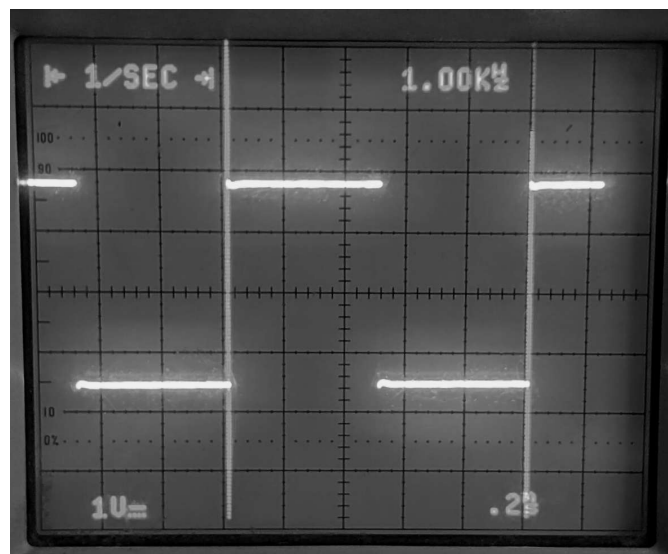


FIGURE 21 – Signal de sortie du TC6

On obtient bien un signal carré de fréquence 1kHz comme signal en sortie du TC6.

6 Fonction sous interruption

Les interruptions sont des outils essentiels pour concevoir des systèmes réactifs (en : responsive) dès lors qu'ils doivent exécuter des opérations logicielles et matérielles simultanément. Avant de présenter le fonctionnement et la configuration du système d'interruption du Cortex-M il est préférable de donner un aperçu du problème.

6.1 Présentation du problème

L'environnement avec lequel interagi le microcontrôleur est dit asynchrone. Il ne peut à priori par connaître l'instant d'apparition d'un événement. Il est alors obligé de le scruter fréquemment pour être averti rapidement d'un changement. C'est précisément ce que fait l'étape 1. La lecture du bouton est placée dans une boucle infinie, si l'utilisateur appui sur ce dernier l'état de la led est modifié. Bien que ce programme soit inefficace, il fonctionne bien et offre une faible latence. Ce mode de fonctionnement est appelé "polling". Le problème survient dès lors qu'une tâche logicielle est ajoutée au programme. Le processeur n'est plus seulement occupé à contrôler l'état du bouton mais également à exécuter une autre partie du programme. La réactivité n'est alors plus garantie. Dans certains cas, si la tâche logicielle est importante, le changement d'état du bouton pourra être invisible pour le programme.

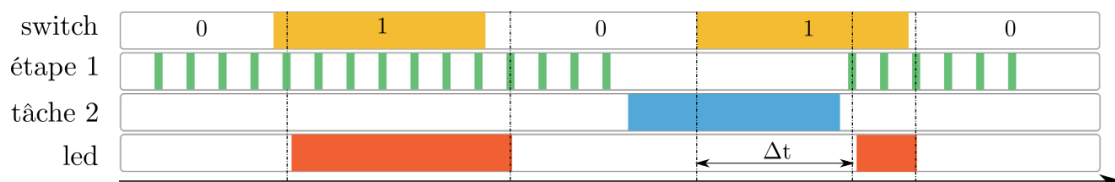


FIGURE 22 – Ordonnancement tâches avec polling

La figure ci-dessus représente l'exécution² d'un programme comme celui de l'étape 1 auquel une seconde tâche a été ajoutée (tâche 2). Deux cas sont illustrés dans cet exemple. Le premier, à gauche, correspond au bon déroulement, le processeur lit de manière successive l'état du switch (étape 1), lorsque une lecture vaut '1' l'état de la led est mis à '1' et même chose pour '0'. Une petite (latence) est présente mais elle sera généralement négligée. Dans le second cas, à droite, la tâche 2 est en cours d'exécution et empêche la lecture du bouton. Une fois terminée la mise à jours de la led peut s'opérer comme précédemment. L'exécution de la tâche 2 a généré un retard qui n'est cette fois-ci plus négligeable du point de vue de l'utilisateur. Si la tâche 2 avait duré un instant de plus le système n'aurait pas réagi à la stimulation. Un tel cas ne doit, en aucun cas, se produire pour un système dont la sécurité est critique.

En pratique ce problème survient fréquemment. Les interactions utilisateurs, tel que l'appui sur un bouton, sont relativement lentes comparés à la vitesse de fonctionnement des processeurs. Un "polling" pourra suffire dans certains cas. Mais pour ce qui est des événements matériels, comme un timer ou un protocole série, la situation est plus critique. Il n'y a alors pas d'autres solutions que d'utiliser une interruption. De manière générale les logiciels utilisant des interruptions fonctionnent plus efficacement que ceux basés sur le "pooling". Aucun temps n'est perdu à contrôler l'apparition d'un événement. L'approche par déclenchement sur événements (en : even-trigger) offre également une meilleure réactivité. [1]

2. Aucune échelle précise n'est choisie le but étant une simple présentation du fonctionnement.

6.2 Fonctionnement d'une interruption

Une interruption est définie comme une suspension temporaire de l'exécution d'un programme informatique par le microprocesseur afin d'exécuter un programme prioritaire (routine d'interruption). La dite suspension est déclenchée par une source externe.

La gestion d'une interruption s'effectue comme tel : pause du programme, sauvegarde du contexte, identification de la routine d'interruption à exécuter (en fonction de sa source), exécution de la routine et rétablissement du contexte. Ces actions sont gérées par le NVIC, Nest Vectored Interrupt Controller faisant l'interface entre les périphériques et le CPU.

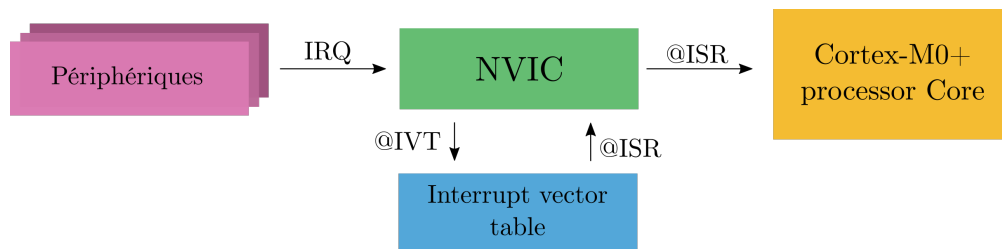


FIGURE 23 – Schéma bloc NVIC

Lorsqu'une interruption x se produit, la demande d'interruption (IRQ) est envoyée au NVIC. Si le NVIC accepte la demande, l'étape suivante du NVIC consiste à trouver l'adresse de départ de la routine d'interruption (@ISR). Cette adresse est stockée dans la table de vecteurs d'interruption (IVT). Le NVIC utilise le numéro d'interruption x pour calculer l'adresse de l'exception dans la table des vecteurs d'interruption. Il utilise ensuite le contenu de cette adresse mémoire pour exécuter le gestionnaire d'exception. Le compteur de programme est alors chargé avec l'adresse de l'ISR et le CPU commence à exécuter la routine d'exception. Un rappel du vocabulaire utilisé dans la figure 23.

@	adresse mémoire
IRQ	Interrupt Service Routine
NVIC	Nest Vectored Interrupt Controller
IVT	Interrupt Vector table
ISR	Interrupt Service Routine

TABLE 1 – Terminologie mécanisme d'interruption

La table des vecteurs d'interruptions, est une structure de données et, comme son nom l'indique, un tableau contenant des vecteurs. En programmation embarquée, un vecteur désigne une adresse mémoire. Par conséquent, une table de vecteurs est une table contenant des adresses mémoire. **La table des vecteurs d'interruption contient les adresses (pointeurs de fonction) des routines d'interruption et des fonctions de gestion des exceptions.** Les exceptions désignent les événements en mesure d'interrompre le déroulement normal du programme pour effectuer une courte tâche. Les interruptions sont donc partie des exceptions. Elles ne sont pas les seules le processeur lui même peut déclencher le mécanisme d'exception lorsque on lui demande de faire quelque chose qu'il ne parvient pas à faire. Par exemple la lecture d'un mot de 32 bits à une adresse impaire provoquera une exception à l'exécution.

6.3 Configuration interruption

Pour qu'une interruption se produise il faut que le périphérique soit configuré de sorte à réagir à l'occurrence d'un événements spécifique. Dans le contexte du projet nous devons calculer le gabarit toutes les 1 ms. Cette partie présente la configuration à effectuer pour que le timer TC6 déclenche une routine d'interruption contenant la fonction calcul gabarit. Elle détaillera également l'autorisation de l'interruption par le NVIC.

6.3.1 Timer TC6

L'activation de l'interruption sur le périphérique TC6 est documentée en détaille dans la datasheet. [4] Chaque source d'interruption est associée à un drapeau d'interruption. Le drapeau d'interruption (en : interrupt flag), dans le registre (INTFLAG), est activé lorsque la condition d'interruption en vrai. Chaque interruption peut être activée individuellement en écrivant un '1' au bit correspondant dans le registre d'activation Interrupt Enable Set (INTENSET) et désactivée en écrivant un '1' au bit correspondant dans le registre de désactivation Interrupt Enable Clear (INTENCLR). Le registre INTENSET se présente comme tel :

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
			MC1	MC0	SYNCRDY		ERR	OVF
Access			R/W	R/W	R/W		R/W	R/W
Reset			0	0	0		0	0

FIGURE 24 – Registre INTENSET

Ayant programmé le timer en mode MFRQ dans la partie précédente, seul le bit 4 nous intéresse. Il est chargé à '1' pour activer l'interruption sur correspondance de COUNT et MC0. L'implémentation en C est intuitive :

```
1 void configure_TC6_IT(void){
2     Tc *ptr_TC = TC6;
3     ptr_TC->COUNT16.INTENSET.reg = TC.INTFLAG_MC0;
4 }
5
```

Comme l'indique la datasheet après la configuration du périphérique il faut activer l'interruptions correspondante dans NVIC.

"The interrupt request line is connected to the Interrupt Controller. In order to use interrupt requests of this peripheral, the Interrupt Controller (NVIC) must be configured first." [4](page 557)

6.3.2 NVIC

Le NVIC est un élément interne au processeur. La documentation de Microchip donne pour chaque périphérique le numéro d'interruption associée mais renvoie à la documentation de Arm pour la configuration du NVIC. Le numéro du TC6 est 21. Comme nous avons pu l'évoquer plus haut le NVIC peut accepter ou non les interruptions provenant des périphériques. Il consulte pour cela un registre nommé NVIC.ISER contenant un seul champ de 32 bits SETENA littéralement set enable. L'extrait de la documentation [5] Arm ci-dessous nous donne la valeur des bits à charger.

Bits	Name	Function
[31:0]	SETENA	Enables, or reads the enabled state of one or more interrupts. Each bit corresponds to the same numbered interrupt:
	On reads	0 the associated interrupt is disabled. 1 the associated interrupt is enabled.
	On writes	0 no effect. 1 enable the associated interrupt.

FIGURE 25 – Registre NVIC_ISER ARMv6-M

Ce registre permet de lire l'activation ou d'activer l'interruption sur chaque ligne. A noter : il faut utiliser un autre registre pour la désactivation, écrire un '0' n'aura aucun effet. **Nous devons dans notre cas placer un '1' sur le bit 21.** Cette configuration est grandement simplifiée par l'ASF. Mais il est essentiel de comprendre et de retenir qu'une activation supplémentaire au périphérique est nécessaire. Le code ajouter à la fonction main est le suivant :

```
1 system_interrupt_enable (SYSTEM_INTERRUPT_MODULE.TC6);
```

L'appel de cette fonction est simple et permet l'abstraction du matériel. Le paramètre passé est le numéro d'interruption TC6_IRQn comme le montre la définition dans `system_interrupt_features.h`

```
1 SYSTEM_INTERRUPT_MODULE.TC6 = TC6_IRQn
```

TC6_IRQn est défini plus haut et dépend de la cible utilisée dans notre cas le SAMD21J18A.

```
1 TC6_IRQn = 21
```

Sa valeur est bien 21. Nous venons d'observer la cohérence entre la datasheet et l'ASF. Pour finaliser le raisonnement regardons l'implémentation de la fonction `system_interrupt_enable()`.

```
1 static inline void system_interrupt_enable(  
2 const enum system_interrupt_vector vector)  
3 {  
4     NVIC->ISER[0] = (uint32_t)(1 << ((uint32_t)vector & 0x0000001f));  
5 }
```

Cette fonction est particulièrement intéressante d'un point de vue pédagogique par l'utilisation de static, inline et du masquage sur le vecteur. D'un point de vue fonctionnel, elle place un '1' décalé du numéro d'interruption sur le registre ISER de NVIC. C'est précisément ce qui doit être fait pour activer les interruptions comme le montre le figure 25.

6.3.3 Routine

La routine d'interruption est la fonction appelée automatiquement par le NVIC lors d'un événement. L'adresse stocké à l'indice TC6_IRQn de la table des vecteurs d'interruption coreposn-
dant à cette fonction est chargée dans PC. Elle est exécutée puis le PC retourne à sa valeur d'origine. La définition de TC6_Handler est réalisée par l'Asf, il n'est pas nécessaire de déclarer son prototype.

Dans la suite du projet la fonction calcul gabarit est exécutée par la routine d'interruption. N'étant pas encore développée, le changement d'état de PB6, jouera le rôle de témoin pour valider le bon déclenchement toutes les 1ms.

```
1 void procedure_traitement_IT(void){  
2     Port *ptr_Port = PORT;  
3     ptr_Port->Group[1].OUTTGL.reg = PORT_PB06;  
4 }
```

```

5
6 void TC6_Handler(void){
7     Tc *ptr_TC = TC6;
8
9     procedure_traitement_IT();
10
11     ptr_TC->COUNT16.INTFLAG.reg = TC_INTFLAG_MC0;
12 }
13

```

Cette fonction d'interruption témoin commence par la déclaration du pointeur TC6. Mais si cette variable ne sert qu'à la dernière ligne il est impératif de l'initialisation au début de la fonction comme l'indique la recommandation 53 de guide de référence de l'ANSI [3]. Ensuite, la procédure de traitement est appelée. Elle consiste à inverser (en :toggle) l'état du pin PB6. Pour finir, le drapeau d'interruption est remis à zéro grâce au registre Flag Status and Clear (INTFLAG) dont la structure est identique à celle de la figure 24. Il peut être intéressant de noter que la fonction `procedure_traitement_IT()` ; n'étant appelée qu'une seule fois dans le programme sera insérée directement dans le code en assembleur. C'est l'équivalent d'un `inline` réalisé automatiquement par le compilateur.

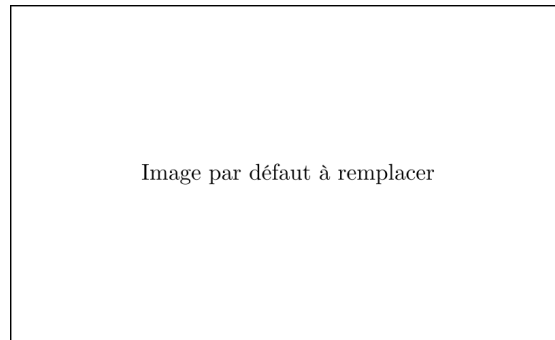


FIGURE 26 – Oscillogramme vérification procédure interruption

La fréquence du signal observé est de XXHz.

Cette partie a permis de soulever un problème lié à une programmation conjointe logiciel matériel et de proposer une solution, les interruptions. Le fonctionnement global du système d'interruption des microcontrôleurs basés sur un Cortex-M a pu être détaillé. La configuration à travers un exemple concret utilisant le TC6 a finalement illustré ces explications.

7 Implémentation fonction calcul gabarit

Cette partie présente la conception de la fonction calcul gabarit conformément au cahier des charges donné dans le sujet. Elle a pour fonction de déterminer la vitesse de rotation du moteur, comprise entre 0 et 5000 tr/min, en fonction du temps. Le gabarit se décompose en trois phases :

- accélération d'une durée de 128 ms
- vitesse constante d'une durée de 512 ms
- décélération d'une durée de 128 ms

La valeur du palier correspondant à la vitesse constante est un paramètre variable fournis par un bloc externe avec une précision de 10 tr/min. Pour simplifier le problème elle ne pourra être modifiée au cours d'un cycle. A ce niveau dans le projet les blocs externes ne sont pas encore développés. Pour faciliter l'observation lors de tests le gabarit sera généré en boucle. Un état Repos doit être ajouté pour les délimiter, sa durée sera de 64 ms.

7.1 Conception fonctionnelle

L'étape de conception fonctionnelle a pour objectif de définir une solution en ne considérant que l'aspect fonctionnel et sans tenir compte des contraintes technologiques. Il est donc question de trouver une solution en mesure de générer **le gabarit constitué des quatre étapes : repos, accélération, constante et décélération**. Ainsi la description sous forme d'un automate à état finis s'impose par la séquentialité du problème. La traduction donne le résultat suivant :

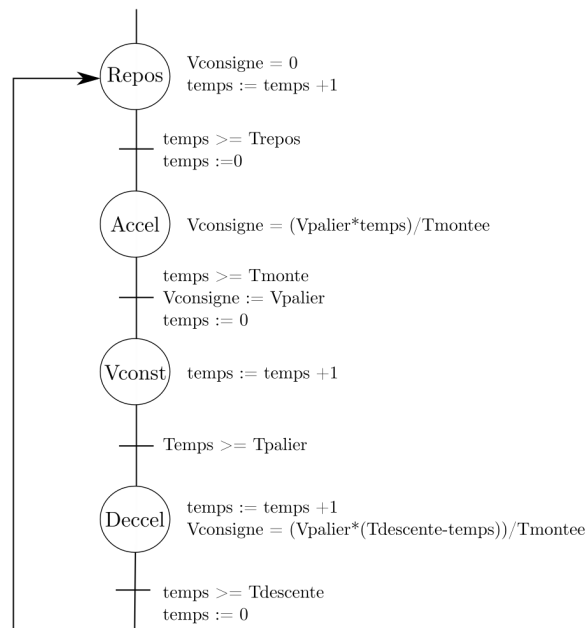


FIGURE 27 – Description fonctionnelle calcul gabarit (FSM)

Cet automate est constitué des quatre états repos, accélération, constante et décélération et de leur transition respective. La variable **Vpalier** correspond au paramètre d'entrée de la fonction. Le résultat de l'exécution, placé dans **Vconsigne**, devra être communiqué au reste du système.

7.2 Implémentation logicielle

La conception fonctionnelle précédente a permis de clarifier le problème. La première étape de la traduction en C est la déclaration des constantes. Elle se fait par l'instruction préprocesseur `define` ayant pour fonction de remplacer les instances suivantes de l'identifieur par la suite de lexèmes³. [6]

```
1 #define identifieur suite-de-lexemes
```

Ce procédé est utilisé pour définir les constantes utilisées ci-dessous. Le code C est le suivant :

```
1 #define TMontee 128
2 #define TPalier 512
3 #define TDescente 128
4 #define TRepos 64
```

Les valeurs numériques proviennent directement du cahier des charges.

Avant de traduire l'automate figure 27 il est important de définir précisément le type des variables utilisées.

nom	min	max	type générique	type C
temps	0	512	entier	uint16_t
Vconsigne	0	5000	entier	uint16_t
Vpalier	0	5000	entier	uint16_t

TABLE 2 – Types des variables fonction calcul gabarit

Le tableau ci dessus rassemble les informations permettant de choisir efficacement les types des variables. Elles sont toutes les trois entières, leur valeur minimum est supérieur à zéro et leur maximum compris entre 255 et 65535. Le type C correspondant est donc nécessairement `uint16_t`. Il existe une autre variable implicite à l'implémentation d'un automate. C'est l'état courant `state` de type énumération. Il peut prendre pour valeur chacun des états repos, accélération, constante et décélération. Sa définition en langage C est la suivante :

```
1 enum state_t {Repos , Accel , Vconst , Decel };
```

Le type énumération correspond à un entier dont la taille peut contenir le nombre d'élément. Par défaut le premier élément vaut 0, et les suivants sont supérieures de 1 par rapport à la valeur de la constante précédente. Il est possible d'affecter une valeur manuellement. Le guide des bonnes pratiques de l'ANSSI [3] indique par la règle 68 qu'il ne faut pas mélanger des constantes explicites et implicites dans une énumération pour éviter tout comportement indéterminé. Toute tentative d'affectation à une valeur non définie dans l'énumération provoquera une erreur à la compilation. Dans notre cas nous laisserons la définition à la charge du compilateur. Tel qu'est construit la machine état il est nécessaire de sauvegarder les valeurs des variables d'une exécution à l'autre. Il faudra donc ajouter le qualificatif `static`.

Une fois les variables et constantes déclarées le corps de la fonction peut être implémenté. Il convient de convertir la machine état figure 27 en langage C. Cela se fait simplement autour d'un "`switch case`". Il est nécessaire de déclarer la variable `state` de type `state_t`. Un cas par défaut a été ajouté à la description fonctionnelle pour couvrir les cas d'erreur. Lors d'une exécution normale la variable `state` ne peut prendre d'autres états que ceux déclarés dans l'énumération. Si toutefois, pour une raison inconnue, elle venait à prendre une autres valeurs, le programme se trouverait dans un état indéterminé et y resterait. Avec le cas défaut le programme peut se trouver dans un état non défini, mais il sera alors remis dans son état d'origine et l'exécution pourra continuée. L'implémentation en C est la suivante :

3. Unité minimale de signification appartenant au lexique (Larousse)

```

1  /* file : calcul_gabarit.c */
2
3  uint16_t calcul_gabarit (uint16_t VPalier){
4
5      static uint16_t Temps = 0;
6      static enum state_t state = Repos;
7      static uint16_t Vconsigne = 0;
8
9      switch (state)
10     {
11         case Repos :
12             Vconsigne = 0;
13             Temps ++;
14             if(Temps >= 64){
15                 state = Accel;
16                 Temps = 0;
17             }
18             break;
19
20         case Accel :
21             if(Temps>=TMontee){
22                 state = Vconst;
23                 Temps = 0;
24                 Vconsigne = VPalier;
25             }
26             else{
27                 Temps ++;
28                 Vconsigne = (VPalier * Temps) / TMontee;
29             }
30             break;
31
32         case Vconst :
33             if (Temps>=TPalier){
34                 state = Decel;
35                 Temps = 0;
36             }
37             else{
38                 Temps ++;
39             }
40             break;
41
42         case Decel:
43             if(Temps >= TDescente){
44                 state = Repos;
45                 Temps = 0;
46                 Vconsigne = 0;
47             }
48             else{
49                 Temps ++;
50                 Vconsigne = (VPalier * (TDescente - Temps)) / TDescente;
51             }
52             break;
53
54         default :
55             state = Repos;
56             Temps = 0;
57             Vconsigne =0;
58             break;
59     }
60     return Vconsigne;
61 }
62 }

```

7.3 Test calcul gabarit et configuration DAC

La fonction calcul gabarit a été implémenté et doit donc être testée. Le résultat retourné est **Vconsigne**, dont la valeur analogique est comprise entre 0 et 5000. Pour visualiser son évolution dans le temps on peut s'appuyer sur un périphérique présent dans le SAMD21, le convertisseur numérique vers analogique (DAC : Digital Analog Converter). Ainsi il sera possible de visualiser le gabarit généré sous sa forme temporel tel qu'il a été décrit initialement dans le cahier des charges. Le DAC converti une valeur numérique en tension. Celui présent dans le microcontrôleur utilisé dispose d'une voix 10 bits sur 3,3V, soit une précision de 3,32mV. Sa représentation structurelle sous forme d'un diagramme bloc est la suivante :

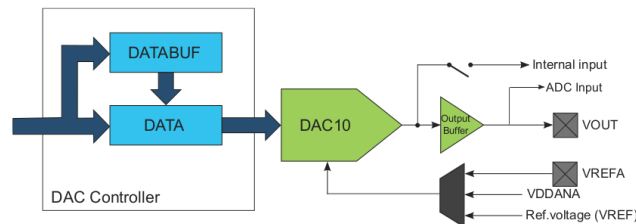


FIGURE 28 – Description diagramme bloc DAC

Les données à convertir transitent sur le bus APB BRIDGE C et doivent être dans le registre **DATA** ou **DATABUF**. Ils correspondent respectivement à la valeur actuellement convertie et à la prochaine valeur convertie. Dans notre cas nous n'utiliserons que le registre **DATA**. Sa valeur est ensuite transmise à l'unité de conversion 10 bits dont la tension de référence, tension maximum, peut être sélectionnée parmi plusieurs sources. Le résultat sort finalement sur une sortie interne, un buffer capable de débiter un courant plus important. Comme pour les autres périphériques un certain nombre de registres sont à disposition pour configurer ses nombreuses fonctionnalités.

7.3.1 Configuration du périphérique

Configuration du registre CTRLA

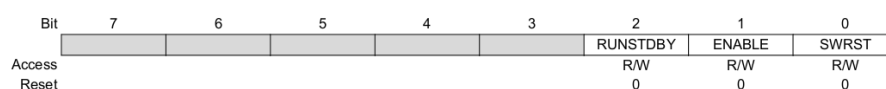


FIGURE 29 – Description registre DAC CTRLA

- **SWRST** - Software Reset - Ce champ permet de remettre les registres du DAC dans leur état initial. Nous ne souhaitons pas faire cela, on écrira dans le registre **0 << 0**
- **ENABLE** - Enable DAC Controller - Ce champ permet d'activer le Dac il faut donc écrire **1 << 1** dans le registre.
- **RUNSTDBY** - Run in Standby - Ce champ permet d'activer ou de désactiver le buffer du DAC et mode veille. Dans notre cas cela a peu d'importance ce bit peut être mis à 1 le laisser activé dans tous les cas : **1 << 2**.

Configuration du registre CTRLB

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	REFSEL[1:0]			BDWP	VPD	LEFTADJ	IOEN	EOEN
Access	R/W	R/W		R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Reset	0	0		0	0	0	0	0

FIGURE 30 – Description registre DAC CTRLB

- **EOEN** - External Output Enable - Ce champ permet d'activer ou de désactiver la sortie du buffer. Nous ne souhaitons appliquer la tension sur le pin Vout, on écrit dans le registre $1 \ll 0$
- **IOEN** - Internal Output Enable - La sortie interne n'est pas utilisée on écrit $0 \ll 1$ dans le registre.
- **LEFTADJ** Left-Adjusted Data - La taille du registre **DATA** est de 16 bits mais seul les 10 premiers sont utilisés. Ce champs permet de sélectionner les bits en partant de la droite ou de la gauche. Dans notre cas les poids faibles sont à droite on choisira l'option d'alignement à droite. On écrit dans le registre $0 \ll 2$
- **VPD** - Voltage Pump Disabled - Cette option permet d'économiser de l'énergie. Sa gestion est conservée comme automatique par l'écriture de $1 \ll 3$ dans le registre.
- **BDWP** - Bypass DATABUF Write Protection - Le registre DATABUF n'est pas utilisé, il n'est donc pas nécessaire de le protéger, on écrit $1 \ll 4$ dans le registre.
- **REFSEL[1 :0]** - Reference Selection - Ce registre permet de sélectionner la source de tension de référence. Nous prendrons l'alimentation destinée aux circuits analogiques en écrivant $0x1 \ll 6$ dans le registre.

Initialisation du registre DATA

Bit	15	14	13	12	11	10	9	8
	DATA[15:8]							
Access	W	W	W	W	W	W	W	W
Reset	0	0	0	0	0	0	0	0

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	DATA[7:0]							
Access	W	W	W	W	W	W	W	W
Reset	0	0	0	0	0	0	0	0

FIGURE 31 – Description registre DAC CTRLB

Ce registre contient la valeur 10 bits à convertir dont l'alignement a été sélectionné avec le registre **LEFTADJ**. Pour tester la bonne configuration ce champ pourra être chargé à $1023/2$. Une tension de $3,3/3V$ devrait pouvoir être observée.

Code configuration périphérique DAC

La configuration du DAC traduite en langage C donne le résultat suivant :

```

1 void config_DAC(void){
2   Dac *ptr_DAC = DAC ;
3
4   ptr_DAC -> CTRLA.reg = DAC_CTRLA_RUNSTDBY |
5                         DAC_CTRLA_ENABLE |
6                         DAC_CTRLA_SWRST_NO ;
7
8   ptr_DAC -> CTRLB.reg = DAC_CTRLB_REFSEL_AVCC |
9                         DAC_CTRLB_BDWP_NO |
10                        DAC_CTRLB_VPD_NO |
11                        DAC_CTRLB_LEFTADJ_NO |
12                        DAC_CTRLB_IOEN_NO |
13                        DAC_CTRLB_EOEN ;
14 /* Initialisation pour test */
15 ptr_DAC -> DATA.reg = 1024/2;
16 /* DATA.reg valeur 10bits max */
17 }

```

De nouveau l'utilisation des structures de l'ASF facilite grandement le travail. Cela améliore aussi la compréhension et donc la modification par un tiers.

7.3.2 Configuration du Generic Clock(GCLK)

Comme pour les autres périphériques le DAC a besoin d'un signal d'horloge pour fonctionner. Ce dernier est généré par le Generic Clock (GCLK). La fréquence maximum du DAC est de 350Ksps et celle de référence de 8MHz. Il faut donc ajuster le facteur de division selon la formule suivante :

$$GENDIV = \frac{F_{mclk}}{F_{DAC}} = \frac{8.10^6}{350.10^3} = 22,85 \quad (3)$$

En arrondissant à l'entier supérieur, la valeur retenue est 23.

La configuration du GCLK s'opère en deux temps avec le registre GENCTRL puis CLKCTRL.

Configuration du registre GENCTRL

Le détail de Generic Clock Generator Control (GENCTRL) est donné dans la figure ci-dessous :

Bit	23	22	21	20	19	18	17	16
			RUNSTDBY	DIVSEL	OE	OOV	IDC	GENEN
Access			R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Reset			0	0	0	0	0	0
Bit	15	14	13	12	11	10	9	8
						SRC[4:0]		
Access				R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Reset				0	0	0	0	0
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
						ID[3:0]		
Access					R/W	R/W	R/W	R/W
Reset					0	0	0	0

FIGURE 32 – Extrait description registre GENCTRL

- **RUNSTDBY** : Fonctionnement en mode Standby ou non. Dans notre cas, nous voulons la désactiver donc il faut mettre **0** << **21** dans ce champ.
- **DIVSEL** : Définit le facteur de division de l'horloge. **Nous ne voulons pas la diviser donc il faut mettre la valeur 0** << **20** dans ce champ.
- **OE** : Permet d'autoriser l'activation sur une sortie de GCLK. Pour effectuer un test préliminaire lors de la configuration du DAC le **signal d'horloge sera observé sur une broche**. Il faut mettre la valeur **1** << **19** dans ce champ.
- **OOV** : Définit la valeur de la sortie de GCLK. Lorsque l'OE est à 0 il faut mettre également 0 dans ce champ donc la valeur **0** << **18**.
- **IDC** : Définit du rapport cyclique en cas de division impaire. Dans notre cas, il faut mettre la valeur **0** << **17** dans ce champ.
- **GENEN** : Validation ou non du générateur d'horloge. Nous voulons l'activer donc il faut mettre la valeur **1** << **16** dans ce champ.
- **SRC[4 :0]** : Choix de la source d'horloge. Nous voulons choisir la source OSC8M donc d'après la datasheet il faut mettre la valeur **6** << **8** dans ce champ.
- **ID[3 :0]** : Définit le numéro du générateur que l'on configure (0 à 8). **Nous choisissons le générateur 1** donc il faut mettre la valeur **0x1** << **0**.

Configuration du registre CLKCTRL

Ce registre permet de choisir parmi les 9 générateurs décrit précédemment. Le détail de Generic Clock Control (CLKCTRL) est donné dans la figure ci-dessous :

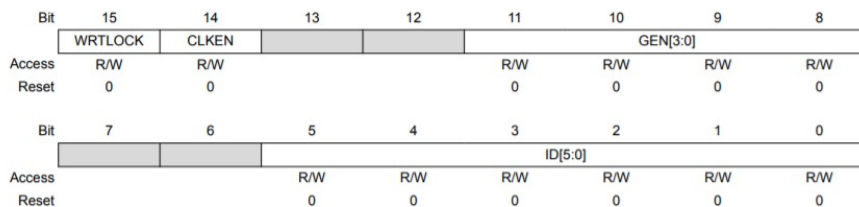


FIGURE 33 – Configuration des différents bits du CLKCTRL

- **WRTLOCK** : Permet le verrouillage de l'horloge générique pour les générateurs 1 à 9. Nous avons choisi le générateur 1 et il n'y a pas de verrouillage donc il faut mettre **0** << **15** dans le registre.
- **CLKEN** : Validation de l'horloge générique donc **1** << **14** dans le registre.
- **GEN[3 :0]** : Permet de choisir le générateur d'horloge d'entrée. Ici il s'agit GCLK_GEN[1] donc il faut mettre **0x1** << **8** dans ce champ.

- **ID[5 :0]** : Définit le périphérique vers lequel est dirigé l'horloge générique. Dans notre cas, il faut l'envoyer vers DAC donc d'après la datasheet du SAMD21 il faut mettre la valeur **0x21<<0** dans le registre.

Configuration du registre GENDIV

Ce registre permet de choisir le facteur de division à appliquer sur l'horloge source.

Bit	23	22	21	20	19	18	17	16
	DIV[15:8]							
Access	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Reset	0	0	0	0	0	0	0	0
Bit	15	14	13	12	11	10	9	8
	DIV[7:0]							
Access	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Reset	0	0	0	0	0	0	0	0
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
					ID[3:0]			
Access					R/W	R/W	R/W	R/W
Reset					0	0	0	0

FIGURE 34 – Extrait description registre GENDIV

- **DIV** : Permet la sélection du facteur de division. Dans notre cas la valeur est 23. Il faut mettre la valeur **0x23<<8** dans le registre.
- **ID[3 :0]** : Définit le numéro du générateur que l'on configure (0 à 8). **Nous choisissons le générateur 1** donc il faut mettre la valeur **0x1<<0** dans le registre.

Code de la configuration du GCLK

La traduction en langage C de la spécification ci-dessus est la suivante.

```

1 Gclk *ptr_GCLK = GCLK;
2
3 ptr_GCLK->CLKCTRL.reg = GCLK_CLKCTRL_NOWRTLOCK |
4     GCLK_CLKCTRL_CLKEN |
5     GCLK_CLKCTRL_GEN_GCLK1 |
6     GCLK_CLKCTRL_ID_DAC ;
7
8 ptr_GCLK->GENCTRL.reg = GCLK_GENCTRL_NORUNSTDBY |
9     GCLK_GENCTRL_NODIVSEL |
10    GCLK_GENCTRL_OE |
11    GCLK_GENCTRL_NOOVS |
12    GCLK_GENCTRL_NOIDC |
13    GCLK_GENCTRL_GENEN |
14    GCLK_GENCTRL_SRC_OSC8M |
15    GCLK_GENCTRL_ID(0x1);
16
17 ptr_GCLK->GENDIV.reg = GCLK_GENDIV_ID(0x1) |
18    GCLK_GENDIV_DIV(23);

```

7.3.3 Configuration du Power Manager(PM)

Aucune division d'horloge supplémentaire n'est faite pour le DAC. Nous sommes donc dans la même situation que précédemment. La mise à jour du masque APBCMASK suffit. Cela se traduit en C de la manière suivante :

```
1 ptr_PM -> APBCMASK.reg |= PMLAPBCMASK_TC6 | PMLAPBCMASK_TC7 | PMLAPBCMASK_DAC;
```

7.3.4 Configuration des ports d'E/S parallèles

Nous avons souhaité, pour effectuer un test préliminaire durant la configuration du DAC, observer le signal d'horloge sur une broche. Lors de la configuration du GLCK il faut préciser que le signal sera placé en sortie. Cela étant fait, nous pouvons dès à présent configurer le port de sortie lui même.

```
1 ptr_port -> Group[0].DIRSET.reg = PORT_PA02;  
2 ptr_port -> Group[0].PMUX[2/2].reg = PORT_PMUX_PMUXE_B;  
3 ptr_port -> Group[0].PINCFG[2].reg = PORT_PINC_CFG_DRVSTR_NO |  
4                                     PORT_PINC_CFG_PULLEN_NO |  
5                                     PORT_PINC_CFG_INEN_NO |  
6                                     PORT_PINC_CFG_PMUXEN;
```

Observation GCLK

Avant de vérifier le fonctionnement global du DAC. Il est possible d'observer la bonne génération de son signal d'horloge.

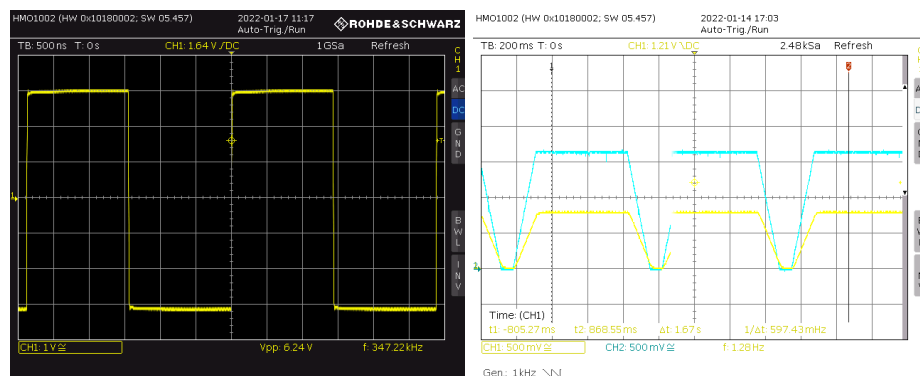


FIGURE 35 – Oscilloscope validation configuration DAC

La fréquence observée sur la figure de gauche représentant le signal GCLK est de 347 kHz. Cela est parfaitement conforme aux spécifications puisque il était question de générer un signal proche mais inférieur à 350KHz. L'objectif de cette étape peut sembler discutable mais dans la pratique l'observation du signal d'horloge a facilité le debug en éliminant des causes potentielles de dysfonctionnement.

La figure de droite observant la sortie du DAC modulée permet de valider la fonction calcul gabarit. Les mesures effectuées avec l'oscilloscope sur le temps d'accélération, de vitesse constantes, de décélération et d'attentes sont conformes au cahier des charges.

8 Implantation de la commande PWM et modélisation du moteur

Le cahier des charges requiert une commande de type PWM pour le moteur. Cette étape consiste à mettre en œuvre ce type de commande en utilisant un Timer. Le moteur sera quant à lui modélisé par un filtre passe-bas de constantes de temps 10ms. Éventuellement, ce filtre passe-bas pourra avoir une fonction d'atténuation, afin d'adapter le niveau de sortie du PWM à celui d'entrée du CAN. Le filtre sera alors réalisé par deux résistances et un condensateur. Selon la configuration du CAN qu'il sera bon d'étudier dans cette étape, il faudra trouver la structure de ce filtre ainsi que les valeurs des composants.

8.1 Génération du signal PWM

8.1.1 Présentation la fonctionnement du TC en mode PWM

Il nous faut ici réaliser une commande de type PWM pour le moteur, représentative du gabarit mis en place. Le principe de la PWM est le suivant :

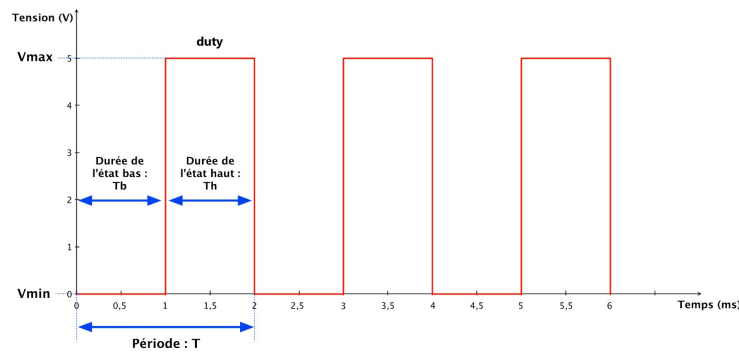


FIGURE 36 – Principe de la PWM

Le signal émis est rectangulaire et varie entre 2 états de tension : U_{max} et U_{min} (généralement 0V). La tension moyenne de ce signal, notée U_{moy} , s'évalue de la façon suivante :

$$U_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{T} [U_{max} * t]_0^{T_h} = U_{max} \frac{T_h}{T} \quad (4)$$

La tension moyenne ne dépend donc que du rapport cyclique entre T_h et T . Si T_h est nul, la tension moyenne est nulle. Si $T_h = T$, la tension moyenne est maximale.

En se basant sur ce principe, le but est de transformer l'information de $V_{consigne}$ en une variation du rapport cyclique d'un signal envoyé au moteur. Si $V_{consigne}$ augmente, le rapport augmente et si $V_{consigne}$ atteint $V_{palierMax}$ alors le rapport est maximal. Cette fonction est réalisable grâce aux timers présents sur la carte. En effet il est possible de programmer un timer en mode MPWM (Match Pulse-Width Modulation). Le fonctionnement de ce mode est le suivant :

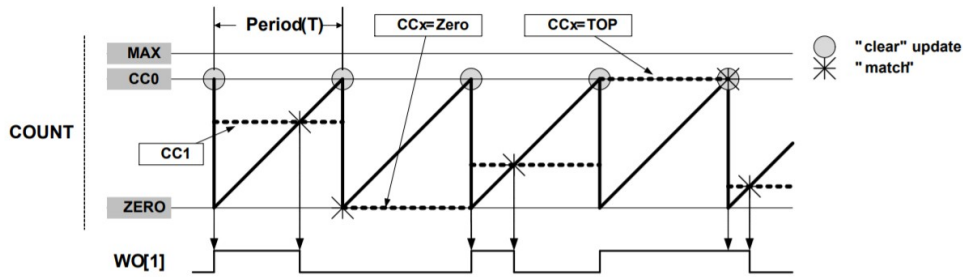


FIGURE 37 – Fonctionnement du mode MPWM

Ce mode permet de créer en sortie un signal de période définie par le rapport entre CC1 et CC0. Donc le rapport cyclique est contrôlable. Tant que COUNT a une valeur inférieure à CC1, WO[1] est à l'état haut puis il passe à l'état bas lorsque COUNT est entre CC1 et CC0.

Le but de cette application étant d'avoir une fréquence de 10 kHz, il faut donc diviser l'horloge mère par 800 c'est à dire prendre un CC0 d'une valeur de 799.

Le CC1 ne sera pas constant contrairement à CC0, il faudra l'actualiser à chaque fois que la vitesse imposée est changée soit toutes les microsecondes. La valeur de CC1 sera définie par la formule suivante :

$$CC1 = \frac{V_{consigne} * CC0}{V_{palierMax}} = \frac{V_{consigne} * 799}{V_{palierMax}} \quad (5)$$

On sait que $0 < V_{consigne} < V_{palierMax}$. CC1 évoluera donc entre 0 et CC0 ce qui permettra d'avoir un rapport cyclique entre 0 et 100% comme souhaite.

8.1.2 Configuration et programmation

Au niveau, le timer TC7 sera utilisé. En effet celui-ci est déjà activé dans le registre GCLK car l'identifiant de TC7 est lié à celui de TC6 (voir partie 4.2). Il est donc préférable d'utiliser ce timer plutôt que d'en déclarer un nouveau. Les codes reprend en grande partie le principe de TC6 vu précédemment.

La partie sur le registre GCLK n'a pas besoin d'être réécrite car TC6 et TC7 partageant le même identifiant, l'horloge est déclarée pour les 2 timers lors de l'initialisation de TC6.

Configuration du Power Manager(PM)

L'activation du timer TC7 auprès du Power Manager sans altérer les composants déjà présents. On ajout le code suivant dans la fonction config_projet() qui est créé pour le TC6 au début :

```

1 void config_PM(void){
2     Pm *ptr_PM = PM;
3
4     ptr_PM -> APBCMASK.reg |= PMLAPBCMASK_TC7;
5 }
6

```

Configuration des ports d'E/S parallèles

D'après la datasheet SAMD21, la sortie WO[1] du TC7 est disponible sur les pin PA21, PB01 et PB23. Pour des raisons pratiques vis-à-vis de la disposition des pins sur la carte, la pin PB01 est

choisie. WO[1] est donc récupéré en sortie sur la pin 1 du port B en multiplexage E. On ajout le code suivant dans la méthode config_PORT() :

```
1 void config_PORT(void){
2     /* PWM */
3     ptr_port -> Group[1].DIRSET.reg = PORT_PB01;
4     ptr_port -> Group[1].PMUX[1/2].reg = PORT_PMUX_PMUXO_E;
5     ptr_port -> Group[1].PINCFG[1].reg = PORT_PINC_CFG_DRVSTR_NO |
6                                         PORT_PINC_CFG_PULLEN_NO |
7                                         PORT_PINC_CFG_INEN_NO |
8                                         PORT_PINC_CFG_PMUXEN;
9 }
```

A noter que 1 est impair, il faut donc spécifier le multiplexage E dans la partie impaire du registre PMUX0. D'où l'utilisation de la constante PORT_PMUX_PMUXO_E.

Configuration du périphérique Timer Counter 7

Une nouvelle fonction config_PWM() est créé dans le programme.

La configuration du registre CTRLA du TC7, reprenant les mêmes éléments que pour TC6, sauf au niveau du mode sélectionné. Ici le mode est le MPWM et mis en place par la constante TC_CTRLA_WAVEGEN_MPWM.

```
1 void config_PWM (void){
2     Tc *ptr_TC = TC7 ;
3
4     ptr_TC -> COUNT16.CTRLA.reg = TC_CTRLA_PRESCSYNC_PRESC |
5                                     TC_CTRLA_NORUNSTDBY |
6                                     TC_CTRLA_PRESCALER_DIV1 |
7                                     TC_CTRLA_WAVEGEN_MPWM |
8                                     TC_CTRLA_MODE_COUNT16 |
9                                     TC_CTRLA_NOENABLE |
10                                    TC_CTRLA_NOSWRST;
11     // .....
12 }
```

La configuration des registres CTRLC et CTRLBCLR du TC7, reprenant la même logique que pour TC6, d'où la configuration similaire.

```
1     ptr_TC -> COUNT16.CTRLC.reg = TC_CTRLC_NOCPTEN0 |
2                                     TC_CTRLC_NOCPTEN1 |
3                                     TC_CTRLC_NOINVEN0 |
4                                     TC_CTRLC_NOINVEN1;
5
6     ptr_TC -> COUNT16.CTRLBCLR.reg = TC_CTRLBCLR_CMD_NONE |
7                                     TC_CTRLBCLR_ONESHOT |
8                                     TC_CTRLBCLR_NODIR;
```

La configuration des 2 champs CC0 et CC1. CC1 est initialisé à 400 et variera par la suite. CC0 est affecté de la constante TC_CC0_Val, constante à la valeur 799 comme exprimé précédemment.

```
1     ptr_TC -> COUNT16.CC[0].reg = TC_CC0_Val; // 10kHz
2     ptr_TC -> COUNT16.CC[1].reg = 400; // duty 50%
```

L'activation du timer TC7 en fin d'initialisation.

```
1     ptr_TC -> COUNT16.CTRLA.reg |= TC_CTRLA_ENABLE;
```

Le timer TC7 est à présent défini, il faut maintenant mettre en place la fonction permettant de faire évoluer le palier CC1 en fonction de *duty* (Vconsigne). Cette fonction est la suivante :

```
1 void write_PWM (uint16_t duty){
2     Tc *ptr_TC = TC7 ;
3
4     ptr_TC -> COUNT16.CC[1].reg = (duty * TC_CC0_Val) / V_MAX;
5 }
```

CC1 est défini sur [0 : TC_TC0_Val], c'est-à-dire [0 : 799]. V_MAX est la constante de la valeur 5000.

8.2 Dimensionnement du filtre modélisant le moteur

8.2.1 Calculs pour un filtre passe bas

Pour ce projet, le moteur est représenté par un filtre passe-bas ainsi qu'un étage d'atténuation (pour effectuer des ajustements sur les plages de tension) composés de résistances et de condensateurs. La structure utilisée est la suivante :

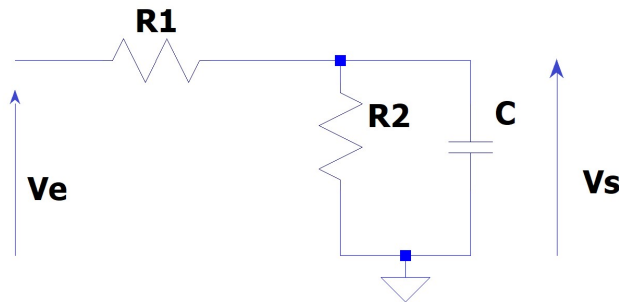


FIGURE 38 – Schéma du filtre passe-bas

La fonction de transfert est déterminée par l'équation suivante :

$$H(p) = \frac{G}{1 + \tau p} \quad (6)$$

Avec

$$G = \frac{V_s}{V_e} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (7)$$

$$\tau = (R_1 // R_2)C = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C \quad (8)$$

Il nous à présent dimensionner les composants. Le choix du filtre doit permettre d'avoir une tension de sortie égale à $\frac{3,3}{2}$ V c'est-à-dire 1,65V. Pour cela, il faut travailler avec REFSEL à 0x2 pour avoir INTVCC1, c'est-à-dire $\frac{1}{2}$ de V_{DDANA} mais tant que cela reste [valeur comparée] < 2,7V.

REFSEL[3:0]	Name	Description
0x0	INT1V	1.0V voltage reference
0x1	INTVCC0	1/1.48 VDDANA
0x2	INTVCC1	1/2 VDDANA (only for VDDANA > 2.0V)
0x3	VREFA	External reference
0x4	VREFB	External reference
0x5-0xF		Reserved

FIGURE 39 – Tensions de références disponibles pour le CAN

Pour obtenir le signal désiré en sortie du filtre, il faut déterminer le gain. Celui-ci est $V_{DDANA}/2$ soit $G = \frac{1}{2}$. De plus, la constante de temps de ce filtre est prise à 10 ms d'après le cahier des charges. Donc les composants reposent sur 2 conditions exprimées dans l'étape :

- Constante de temps du filtre passe bas de 10ms
- Gain de 0,5

Selon l'équation (7) et (8), on peut obtenir :

$$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C = 10ms \quad (9)$$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{2} \quad (10)$$

D'après l'équation (10), on suppose que $R_1 = R_2 = R$. On peut obtenir alors

$$\frac{R^2}{2R} C = \frac{R}{2} C = 10ms \quad (11)$$

Le choix de C étant limité dans les valeurs de composants existants, il est défini à 10 μ F. Donc la valeur de R est 2,2 k Ω .

8.2.2 Test du filtre passe bas

Le circuit peut à présent être réalisé sur la planche à pain. Pour vérifier la constante de temps, nous utilisons l'oscilloscope pour observer la sortie du filtre. Le résultat est présenté dans la figure ci-dessous :

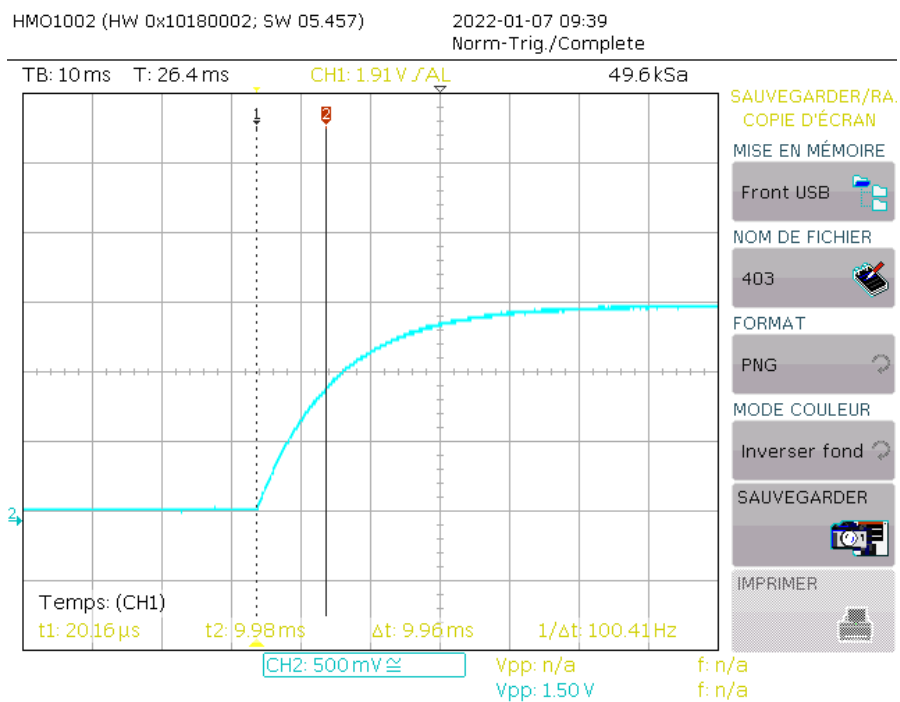


FIGURE 40 – Test de la sortie du filtre passe bas

D'après le résultat du test, la constante de temps est environ 10 ms qui vérifie le cahier des charges. Une fois le montage effectué, il suffit de relier les cartes ensemble ensuite de faire la simulation.

8.3 Résultats de l'implantation

Afin de vérifier la commande PWM fonctionne comme convenu, nous allons observer le rapport cyclique du signal sur la PIN PB01. Le résultat de l'oscilloscope est présenté dans la figure 41.

Comme montré en figure 41, le rapport cyclique de notre commande PWM varie entre 0 et 50% avec une période de signal de $100\text{ }\mu\text{s}$ lorsque notre vitesse de moteur varie entre 0 et 2500 rad/s ce qui permet de valider l'étape.

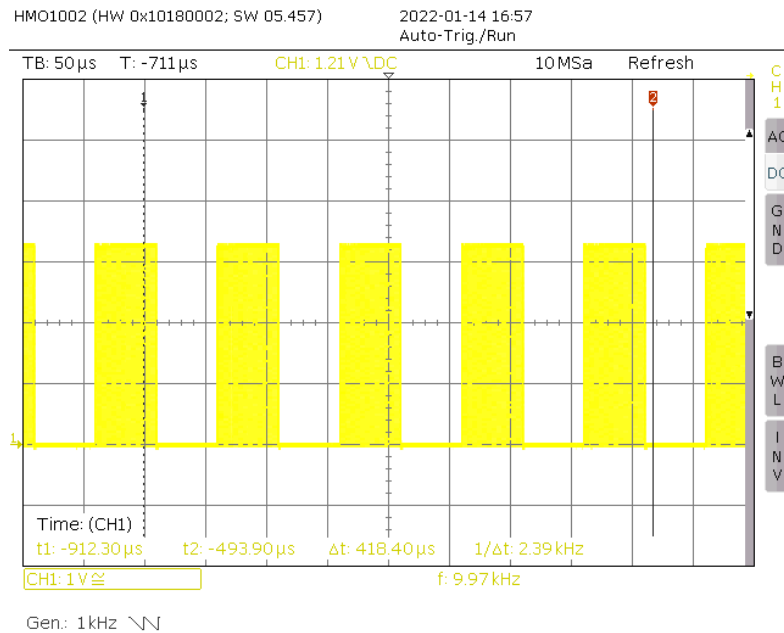


FIGURE 41 – Test du PWM

La sortie du filtre représenté en jaune sur la figure 42 correspond à la sortie de notre gabarit en bleu, avec une amplitude divisée par deux due au gain de $1/2$. Les variations abruptes de tension du gabarit sont lissées grâce au comportement passe-bas du filtre.

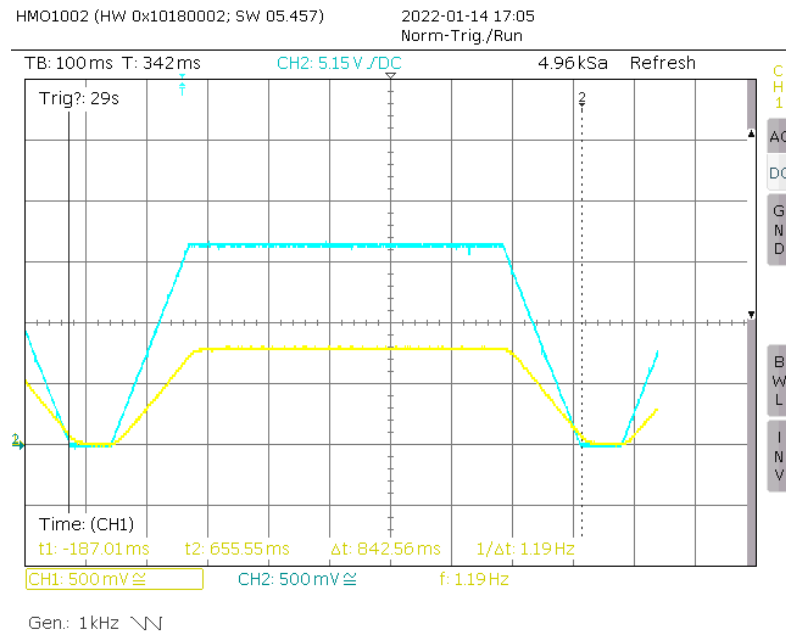


FIGURE 42 – Signal en sortie du CAN (bleu) et en sortie du filtre (jaune)

De plus, on note que la sortie du filtre représenté en jaune sur la figure 42 possède bien un retard de 10 ms sur la sortie du CAN représentée en bleu.

9 Conclusion

Ce travail abordant la conception détaillée d'un logiciel embarqué sur une carte de développement basée sur SAMD21 et répondant à un cahier des charges précis. Il spécifie la forme de la commande à générer pour le pilotage d'un moteur à courant continu. Cette forme est composée de trois phases distincte accélération constante pendant 128 ms, vitesse constante pendant 512ms, décélération constante pendant 128ms. Pour faciliter l'observation de ce signal, généré périodiquement pendant les tests, une quatrième phase d'attente d'une durée de 64ms a été ajoutée. La fonction calcul gabarit est la partie dédiée du programme en charge de fabriquer ce signal. Il est ensuite utilisé pour moduler la PMW pilotant le moteur. Pour simplifier l'aspect pratique ce dernier est modélisé par un système du premier ordre implémenté en pratique par un circuit RC. Pour des résultats pédagogiques identiques on s'affranchi ainsi d'un étage de puissance, du moteur DC lui-même et d'un système de mesures tel qu'une dynamo-tachymétrique. Bien que nous n'ayons pas eu le temps d'achever ce mini-projet, le travail effectué a pu être validé par des mesures. Après le moteur, se comportant comme un filtre passe vis à visvis de signal PWM, le gabarit conforme au cahier des charges a pu être observé.

Pour arriver à un tel résultat il a été nécessaire de faire appel à un certain nombre de périphériques intégrés à la carte. Tout d'abord les contraintes temporelles du cahier des charges, à savoir calcul du gabarit toutes les 1ms, impose la configuration d'un timer/counter. Dans le cadre du développement incrémental ce dernier a premièrement été placé sur une broche afin de l'observer et de valider son bon fonctionnement à l'oscilloscope. Il a ensuite servi à déclencher sous interruption, sa fonction handler. Pour tester sa bonne exécution, elle déclenchait l'inversion d'un signal de sortie. Sachant cela nous avons pu y intégrer pas à pas la fonction calcul gabarit. Son intégration s'est faite sous forme d'un automate à 4 états. Il a fallu de nouveau, pour contrôler la bonne configuration, mettre en place un mécanisme d'observation. Le paramètre à observer n'étant plus une période mais une grandeur analogique, le convertisseur numérique vers analogique a été utilisé. Nous avons opéré sa configuration, puis le signal issu de la fonction a pu être observé puis valider, après quelques ajustements. Il n'est évidemment pas possible de piloter directement le moteur avec ce dernier. L'étape suivante a été de mettre en place un signal PWM constant premièrement, puis modulé par la fonction calcul gabarit. La visualisation à l'oscilloscope d'un tel signal n'est pas pertinente et raison d'écarts importants entre la fréquence du gabarit et celle du PWM. Nous avons développé, en parallèle, le modèle du moteur jouant le rôle de filtre passe bas. Le résultat obtenu après filtrage est très proche (niveau de tension près) du signal observé sur le DAC. C'est de cette manière que le fonctionnement global a finalement pu être validé.

Ce projet à but pédagogique s'est déroulé dans un cadre favorable à l'apprentissage. Nous remercions nos deux professeurs encadrants M.Friot et M.Leprevost tous deux experts du domaine. Ce Tp traitant d'une thématique concrète a suscité notre intérêt et a permis d'illustrer les séances théoriques de travaux dirigés. Une étude bibliographique importante a été réalisée en complément du support de cours. Cela a été très bénéfique en termes de connaissances acquises notamment sur le ARM Cortex-M0+. La collaboration au sein du binôme a parfaitement fonctionné.

Références

- [1] Alexander G. Dean. *Embedded Systems Fundamentals with ARM Cortex-M based Microcontrollers*. ARM Education Media UK, March 2017.
- [2] Pompignac Hernando Monteil, Nicomette. *Du langage C au C++*. Pour l'ingénieur, 2012.
- [3] ANSSI. Règles de programmation pour le développement sécurisé de logiciels en langage c, November 2021.
- [4] Microchip. complet datasheet sam d21/da1 family. Technical report, Microchip Technology Inc., 2021. DS40001882G.
- [5] Arm. *ARMv6-M ArchitectureReference Manual*. Arm, 2010.
- [6] Brian W. Kernighan Denis M. Ritchie. *Le Langage C : Norme ANSI*. Dunod, Paris, 2000.