IN.RA.CI
Avenue Jupiter 188
1190 Bruxelles

Technique de qualification
Electronique
Année scoliare 2024-2025

MARS 1

Mechanical Arm Robotic System

James Gordon-Ball 6A
Avenue des Grives 4
1420 Braine-l'Alleud

IN.RA.CI
Avenue Jupiter 188
1190 Bruxelles

Technique de qualification
Electronique
Année scoliare 2024-2025

MARS 1

Mechanical Arm Robotic System

James Gordon-Ball 6A
Avenue des Grives 4
1420 Braine-l'Alleud

J’aimerais d’abord remercier ma famille, mes parents pour leur support physique et financière sur mon projet qui m’a permis d’avancer et d’évoluer non seulement mon TFE et connaissance mais aussi sur mes possibilités et options.

Également mon promoteur, Monsieur Kapita, qui a sans aucun doute joué l’une des plus grands rôles dans mon projet en m’offrant la possibilité de pousser mes compétences au-dessus de la limite et me guidant dans mon projet là où c’était considéré comme nécessaire.

Aussi Monsieur Mazzeo, qui est mon prof depuis la 5ème dans de nombreux cours divers et qui m’a suivi sur mon parcours scolaire en m’aidant énormément là où j’étais en difficulté, mais aussi ces cours bien structurés qui m’ont permis mes bases dans l’option.

De plus, mes autres profs tels que Mr Senga, Mme Hekster, Mr Pochet, Mr Desjonquères et mes autres professeurs généraux sur les années depuis ma 3ème. Finalement je veux remercier mes camarades de classe pour leurs aident et quelques autres profs qui m’ont donné la motivation de ne pas doubler.

Sommaire

1. Introduction 06

2. Caractéristique 07

3. Les principes mis en jeu 08
- 3.1 PWM 08
- 3.2 Torque 09
- 3.2 Magnétisme 11
- 3.4 Pont en H 13
- 3.5 Condensateur de filtrage 16
- 3.6 Diviseur de tension 17

4. Schema bloc 18
- 4.1 Explication 19

5. Etudes détaillée 20
- 5.1 Schema de principe 20
- 5.2 Explication 21
- 5.3 Le Driver-Servo 22
- 5.4 I2C 30
- 5.5 Le Servomoteur 37
- 5.6 Capteur de Courant 48
- 5.7 ADC/CAN 57
- 5.8 SPI 70
- 5.9 Module d’alimentation 74

6. Ordinogramme 84
- 6.1 Setup 84
- 6.2 Mode 1 (command mode) 85
- 6.3 Mode 2 (hive mode) 86
- 6.4 Mode 3 (individual mode) 87
- 6.5 Mode 4 (Bluetooth) 88

7. Fabrication 89
- 7.1 Schema de principe 89
- 7.2 PCB 93
- 7.3 Mecanique 96

8. Mise au point 97

9. Conclusion 100

10. Annexes 101
- 10.1 Schema de principe 101
- 10.2 PCB 103
- 10.3 Dessins 3D 106

11. Datasheets 118

12. Liens 119

1. Introduction

Pourquoi ce projet ?

Comme projet de TFE, j'ai décidé de faire un bras robotique équipé de différents capteurs pour indiquer toutes sortes de données que je pourrais ensuite les traiter pour faire une opération avec.

Ce projet m'intéresse car dans cette nouvelle ère de technologie, le bras reste l'un des systèmes les plus fréquemment retrouvés et donc très utile comme outil, on peut le retrouver sur la plupart des nouvelles intrument varient des submarins au fond de l'océan jusqu'à la station spatiale, plus de 400 km au-dessus de nous. Mais aussi ce projet a les capacités de me pousser et me motiver à apprendre plus

Comment ?

Le bras fonctionnerait à l'aide de 6 servomoteurs permettant 5 axes de motions et une main, les servomoteurs seront branchés à des capteurs de courant à l'entrée qui mesuront le courant rentrant dans les servos, tout cela sera ensuite relié au PCA9685 qui pourra non seulement agir comme extension au micro-controlleur mais aussi pourra faire une partie des tâches pour moins encombrer le micro-controlleur .

Ensuite, une file sera soudée sur la sortie des servos pour le relier au MCP3008 qui nous sert comme ADC pour donner plus d'entrée analogique et moins surcharger le CPU, ces fils nous permettront de lire la tension par rapport à l'angle du servo et ensuite de la traiter et l'utiliser pour enregistrer la position du bras.

Pour mieux capter la tension du servo, on va utiliser le MCP1525 qui est une référence de tension. Tout cela sera raccordé à l'ESP32 qui est le micro-controlleur. Le ESP32 pourra ensuite, à l'aide de son Bluetooth intégré, recevoir des commandes du contrôleur ou de la manette. Le tout sera alimenté par un convertisseur de tension, l'IRM30-5 qui fournira une tension de 5V et un courant de 6A à partir de 230V qui est adéquat par rapport à la consommation des servos qui est de 4.8-7.2V et 500m-900mA.

2. Caractéristique

General :

- Bras Robotique a 5axe de motion et une mains
- 6 capteurs de courants qui sert comme sécurité contre les surcharges
- 2 ADC qui permettent de lire les mesures de courant et de position
- 1 driver moteur qui est utilisé pour la commande des 6 servomoteurs

Electronique :

- 6x Servomoteurs (TD-8120MG)
  -> 1A / 5V
- 2x ADC (MCP3008)
  -> 425uA / 5V
- 1x Driver-Servo (PCA9685)
  -> 25mA/5V
- 6x Capteur de courant (ACS712)
  -> 10mA/5V
- 1x Module alim AC/DC 5V 6A (IRM-30-5)
- 1x Regulateur 3v3 (MCP1826)
- 1x Microcontroleur (ESP32)
- Reference de tension (MCP1525-I/TO)
- Courant total = 6A
- Tension total = 5V

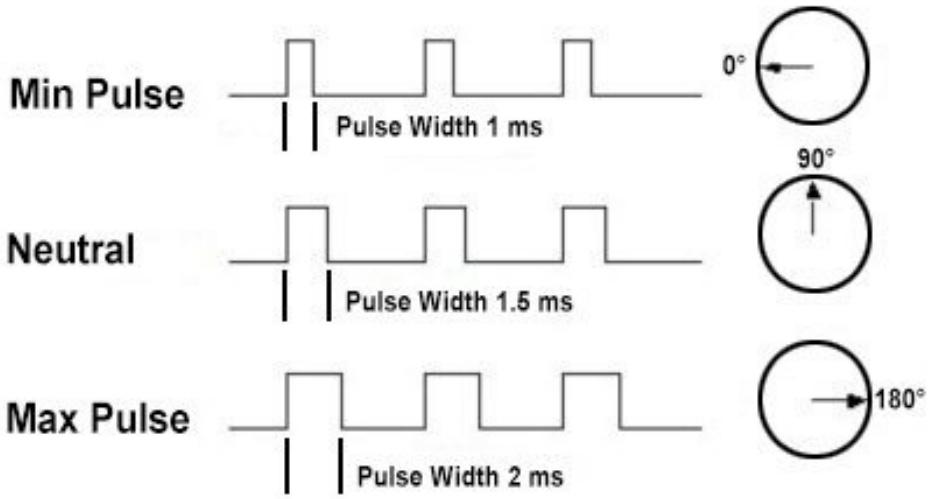
Mécanique :

- 4x murs (Plexi)
  -> Avant murs = 85 x 150 x 3
  -> murs Gauche = 85 x 130 x 3
  -> murs Droite = 85 x 130 x 3
  -> Arriére murs = 85 x 150 x 3
- 1x toit (Plexi)
  -> toit = 185 x 165 x 3
- 1x Base (Bois)
  -> toit = 360 x 250 x 5
- 4x palonier (Plastique)
  -> palonier = 23 x 85 x 23
- Bras mecanique (Aluminium)
  -> Bras max hauteur = 505mm
- 2x petit support base (Plastique)
  -> petit support base = 10 x 58 x 30
- 2x grand support base (Plastique)
  -> grand support base = 20 x 58 x 30
- 1x Bridge support base (Plastique)
  -> grand support base = 13 x 26 x 110
- 1X Slider (Plexi)
  ->Slider = 100 x 100
- PCB
  -> PCB = 115 x 135 x 1.5
- Poids total = 2 kg

3. Les principes mis en jeu

3.1 PWM :

Également, le PWM du servomoteur fonctionne sur des périodes de 20 ms et 50 Hz, généralement avec un flanc montant de 1 ms (0°) comme minimum et 2 ms (180°) comme maximum, mais cela peut varier de servo en servo.



Source: *An Introduction to the Servo Motor: How Servos work | Circuit Crush*

Le PWM (Pulse Width Modulation/modulation de largeur d'impulsion) est une technique utilisée pour contrôler la puissance délivrée à un dispositif électrique. Le principe repose sur la génération d'un signal carré où la durée des impulsions actives (signal haut) varie par rapport à la période totale du signal.

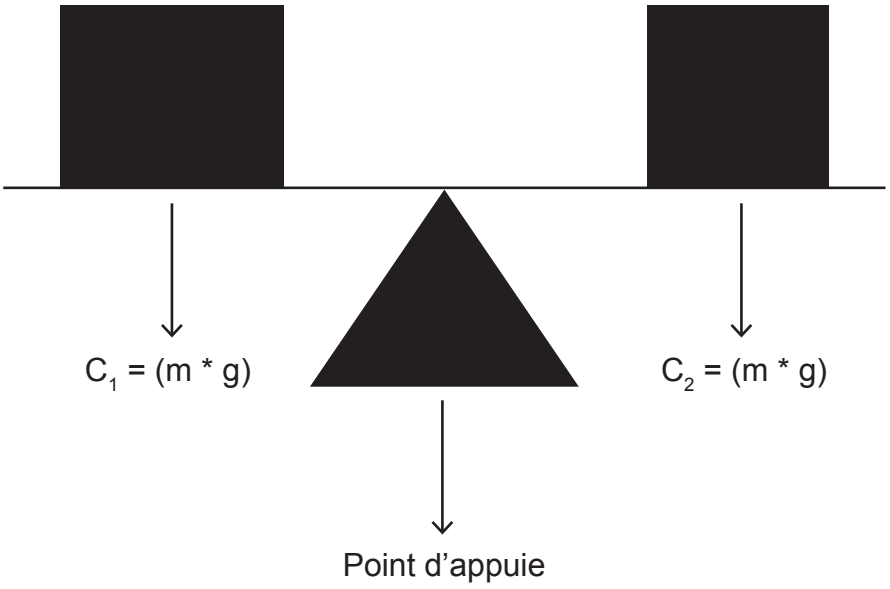
3.2 Torque :

Le Couple ou Torque en anglais est défini comme l'équivalent de la force pour un corps en rotation. Inverse à la force qui provoque une accélération linéaire, le couple provoque une accélération angulaire.

Il se note en $C = F * r$

- C = Couple
- F = Force en Newton
- r = Distance du point 0

Et donc le couple s'exprime en N*m (Newton * mètre).



Une force est une action mécanique capable de mettre un objet en mouvement, de modifier sa trajectoire ou de le déformer, et il s'exprime en Newton.

$F = m * g$

- F = force en Newton
- m = masse en kilogramme
- g = gravité en m/s²

Et la distance qui s'exprime en m est l'écart entre le point d'appui ou d'origine et la masse concernée.

Pour que la masse soit en équilibre sur un même point d'appui, il faut que leurs couples soient égaux (C1 = C2).

L'accélération est la grandeur physique qui mesure la variation de la vitesse d'un objet au cours du temps et se définit en m/s².

$a = F/m$

- a = accélération
- F = force en newton
- m = masse en kilogramme

L'accélération angulaire est la grandeur physique qui mesure la variation de la vitesse de rotation (vitesse angulaire) d'un objet au cours du temps et se précise en rad/s².

$a = T / J$

- T = couple en newton-mètre, N*m
- J = moment d'inertie en kg*m²
- a = accélération angulaire en rad/s²

Le moment d'inertie est une grandeur physique qui mesure la résistance d'un objet à la rotation autour d'un axe et se note en Kg * m².

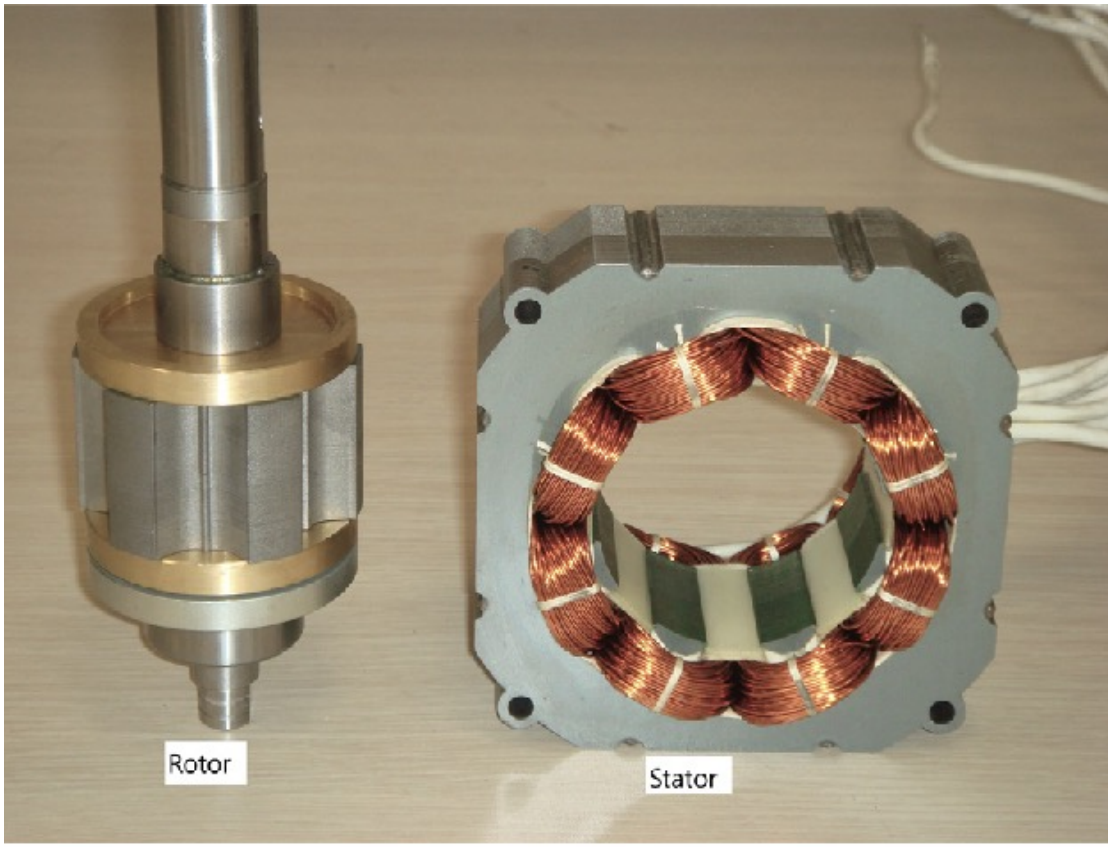
$I = \int r^2 \, dm$

- I = l'inertie
- r = distance du point d'appui ou centre
- dm = portion de la masse

3.3 Magnétisme:

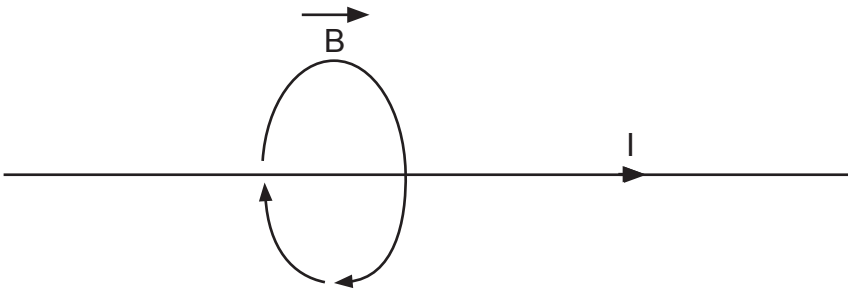
Le but d'un moteur est de transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique et il utilise la loi de magnétisme pour accomplir cette tâche avec un stator et un rotor.

D'abord, il utilise le champ d'induction magnétique qui se note avec "B" et s'exprime en Tesla (T). Il est créé avec le déplacement d'une charge électrique qui permet la commande de plusieurs électro-aimants.

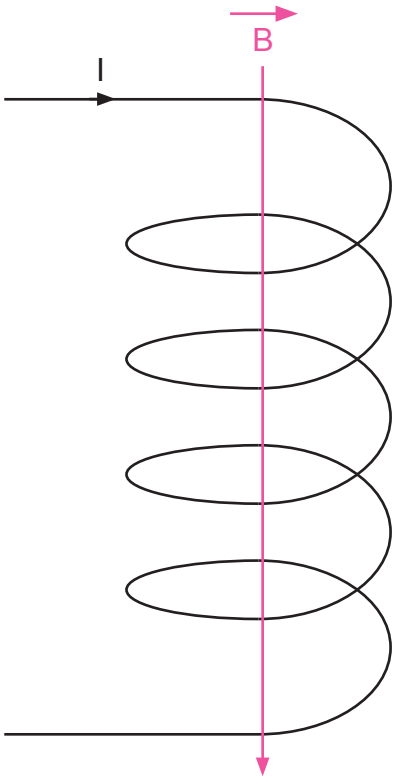


Source: *https://www.researchgate.net/figure/Photograph-rotor-and-stator-of-SRG_fig2_349489512*

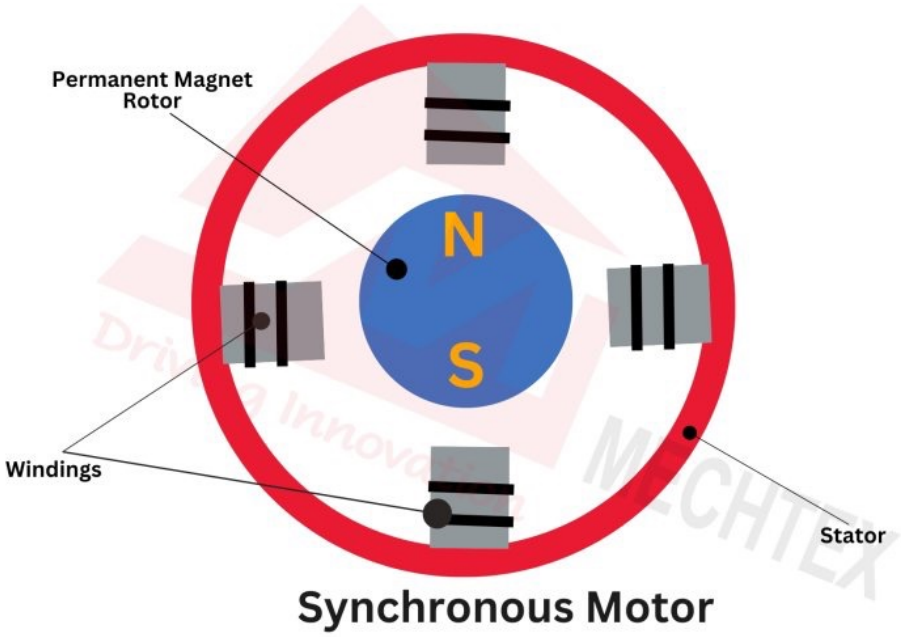
Mais avant de comprendre le fonctionnement d'un moteur, il faut déjà expliquer la relation entre l'électronique et le magnétisme. Quand un courant passe à travers un câble, ce déplacement d'électrons crée un champ magnétique d'après la loi d'ampérage.



Également, il existe 2 types de champs électromagnétiques, quand le câble est droit, c'est un champ magnétique circulaire qui suit le courant, mais inversement, si le câble est en spire ou bobiné, le champ magnétique prendra une forme perpendiculaire qui suit le sens du courant.



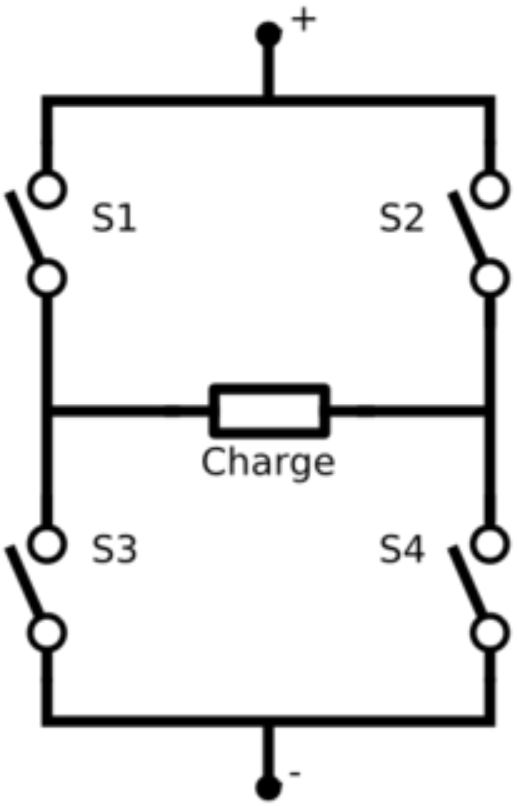
Ensuite, le système général d'un moteur se comporte de 2 parties principales, le stator qui est stationnaire et habituellement se compose de plusieurs électroaimants, et un rotor qui est la partie en motion et donc est composé d'un aimant qui va suivre les champs magnétiques du stator. Mais cette structure peut être inversée dans certains cas.



Source: *https://mechtex.com/blog/construction-of-synchronous-motor*

3.4 Pont en H :

Le pont en H permet non seulement de contrôler le sens de rotation d'un moteur, mais également, dans certains cas, de faire varier sa vitesse en utilisant un signal PWM (modulation de largeur d'impulsion) appliqué aux transistors MOSFET.



Source: *https://fr.wikipedia.org/wiki/Pont_en_H*

Dans le cas du schéma présenté ci-dessus, si la charge représente le moteur DC d'un servomoteur et les interrupteurs représentent, dans notre cas, les transistors, si chaque interrupteur retourne une valeur de "0" ou "1" et il y en a 4, cela nous offre 4 possibilités.

D’abord, pour contrôler la direction du moteur, il suffit simplement de compléter la connexion entre la masse et l’alimentation avec 2 interrupteurs de côté opposant, donc si S1 et S4 ou S2 et S3 sont fermés, le moteur tourne dans la direction du courant, mais s’ils sont relâchés et tous les interrupteurs sont à “0” ou ouverts alors le moteur est en rotation libre, ainsi pour arrêter le moteur commande, il est nécessaire d’actionner sinon S1 et S2 ou S3 et S4 ensemble pour avoir une valeur égale.

	S1	S2	S3	S4
Direction 1	1	0	0	1
Direction 2	0	1	1	0
Arrêt	1	1	0	0
Arrêt	0	0	1	1
Court cercuit	1	0	1	0
Court cercuit	0	1	0	1

Hall effect

Un capteur à effet Hall est un composant électronique qui permet de mesurer un champ magnétique produite par un courant et de le convertir en tension électrique.

Le capteur détecte ce champ sans contact direct avec le fil, ce qui permet une mesure independant et isolée du courant.

L'effet Hall est un phénomène physique qui fonctionne en faisant passer un courant électrique dans un semi-conducteur ou un conducteur, et lorsqu'un courant passe dans un fil à proximité, un champ magnétique est généré autour de ce courant, selon la loi d'Ampère. À cause de ce champ magnétique et en suivant la loi de Lorentz qui précise que les électrons passant à travers le conducteur vont être décalés et repoussés contre l'un des côtés, cela va créer une différence de potentiel qui se nommera " la tension hall". Cette tension est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique et donc peut être utiliser pour mesurer le courant.

La loi d'Ampere

La loi d'Ampère décrit la relation entre un champ magnétique et les courants électriques qui le génèrent. Elle fait partie des lois fondamentales de l'électromagnétisme et est souvent exprimée sous une forme intégrale ou différentielle, mais également est fortement utilisée dans la mesure et le calcul d'onde électromagnétique.

Loi de Lorentz

La loi de Lorentz fait partie des lois essentielles de l'électromagnétisme et démontre comment réagit une particule chargée sous la pression d'un champ électromagnétique. La particule subit la force de non seulement le champ magnétique mais également électrique. Le champ magnétique n'affecte pas l'énergie de la particule mais sa polarité et donc sa direction, et le champ électronique modifie la vitesse de la particule.

Formule

F = q (E + v * B)

F : la force exercée sur la particule.

q : la charge de la particule.

E : le champ électrique appliqué.

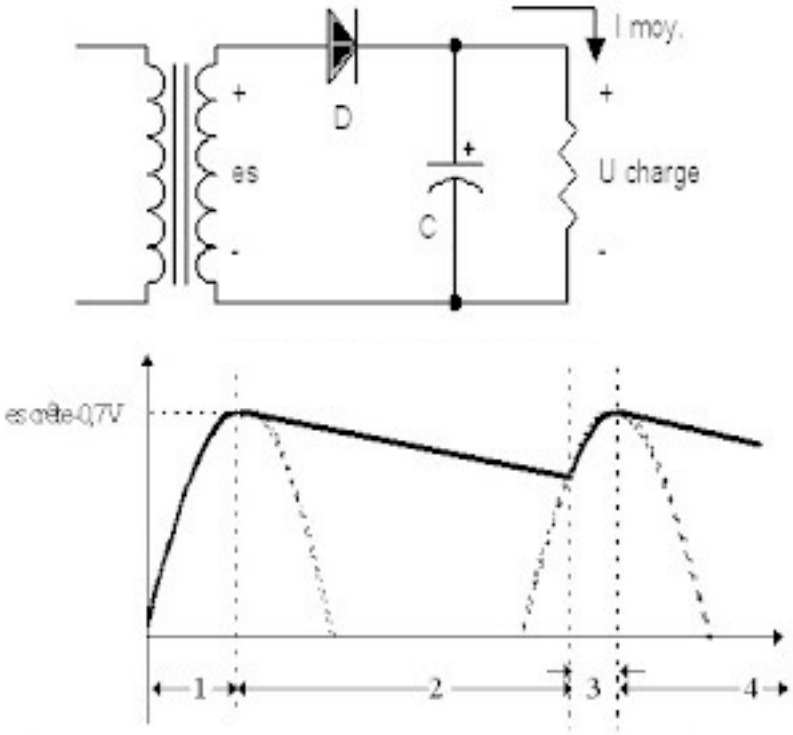
B : le champ magnétique appliqué.V

v : la vitesse de la particule.

Source: *ChatGPT.com*

3.5 Condensateur de filtrage :

Le condensateur est un composant qui stocke de l'énergie sous forme de tension (volt) et peut également être utilisé dans des applications de filtrage pour une longue liste de besoins, principalement dans l'élimination de bruit qui vient sous forme d'une tension AC (courant alternatif) et peut être dangereux, voire provoquer des erreurs ou de mauvaises données dans certains cas.



Source: *https://schemas-electronique.blogspot.com/2012/07/le-filtrage-principe-ronflement-calcul.html*

Lorsqu'un signal passe à travers le câble, il va d'abord charger le condo et suite à cela, le condo va se comporter comme un interrupteur ouvert pour des tensions DC (courant continu) mais fermé pour des tensions AC (courant alternatif) ou bruit.

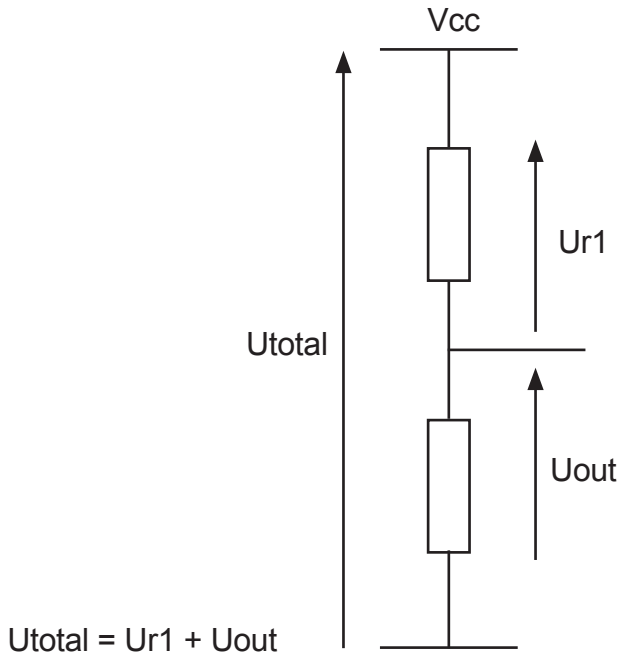
3.6 Diviseur de tension :

Le diviseur de tension est un montage avec deux résistances en série. Il sert à baisser une tension trop haute pour la rendre plus petite et adaptée à d'autres composants.

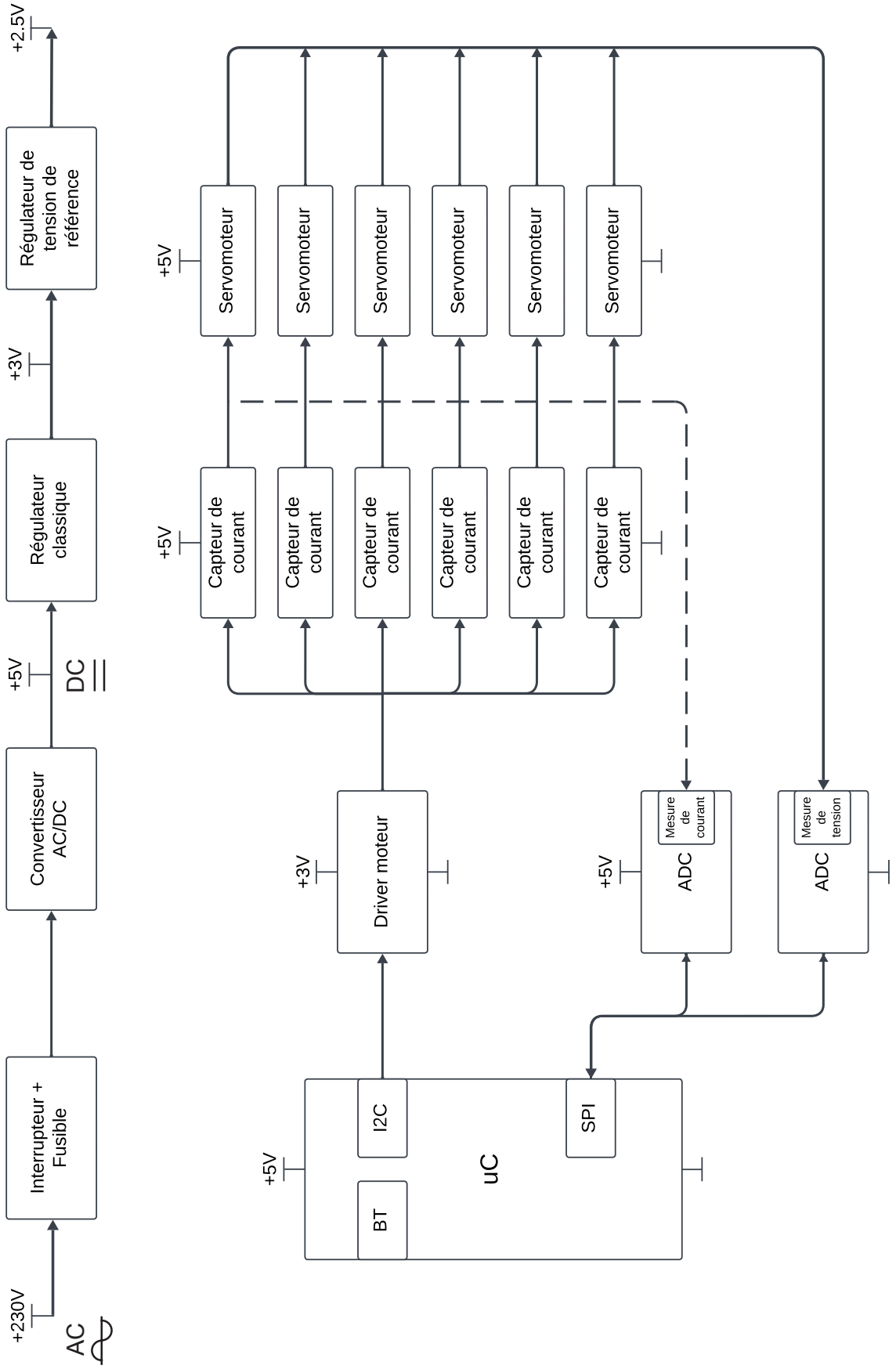
Quand on applique une tension au diviseur, cette tension se partage entre les deux résistances. La tension que l'on récupère entre les deux résistances est donc plus faible que la tension d'entrée.

Ce montage est très utile pour mesurer des tensions ou protéger des appareils qui ne supportent pas de tensions trop fortes.

Mais si on choisit mal les résistances, ça peut changer la valeur de la tension qu'on attend ou faire apparaître des erreurs dans la mesure.



4. Schema bloc



4.1 Explication

Convertisseur AC/DC :
Transforme 230V en 5V et fournit un courant de 6A

Régulateur classique :
Transforme 5V en 3.3V et fournit un courant de 1A

Régulateur de tension de référence :
Fourni une tension de référence de 2.5V

uC (Microcontrôleur) :
Permet d'envoyer des commandes et recevoir des données pour ensuite les traiter.

Driver servo :
Il facilite le contrôle de plusieurs servos en une fois pour le uC en faisant une partie de ces tâches telles que le PWM ou la lecture des pattes (fonctionne en I2C).

BT(Bluetooth) :
Permet au uC d'envoyer un signal Bluetooth à l'aide d'une antenne, d'un oscillateur et d'un émetteur.

ADC(Analogique to digital converter) :
Fourni plus de patte analogique au uC (fonctionne en SPI).

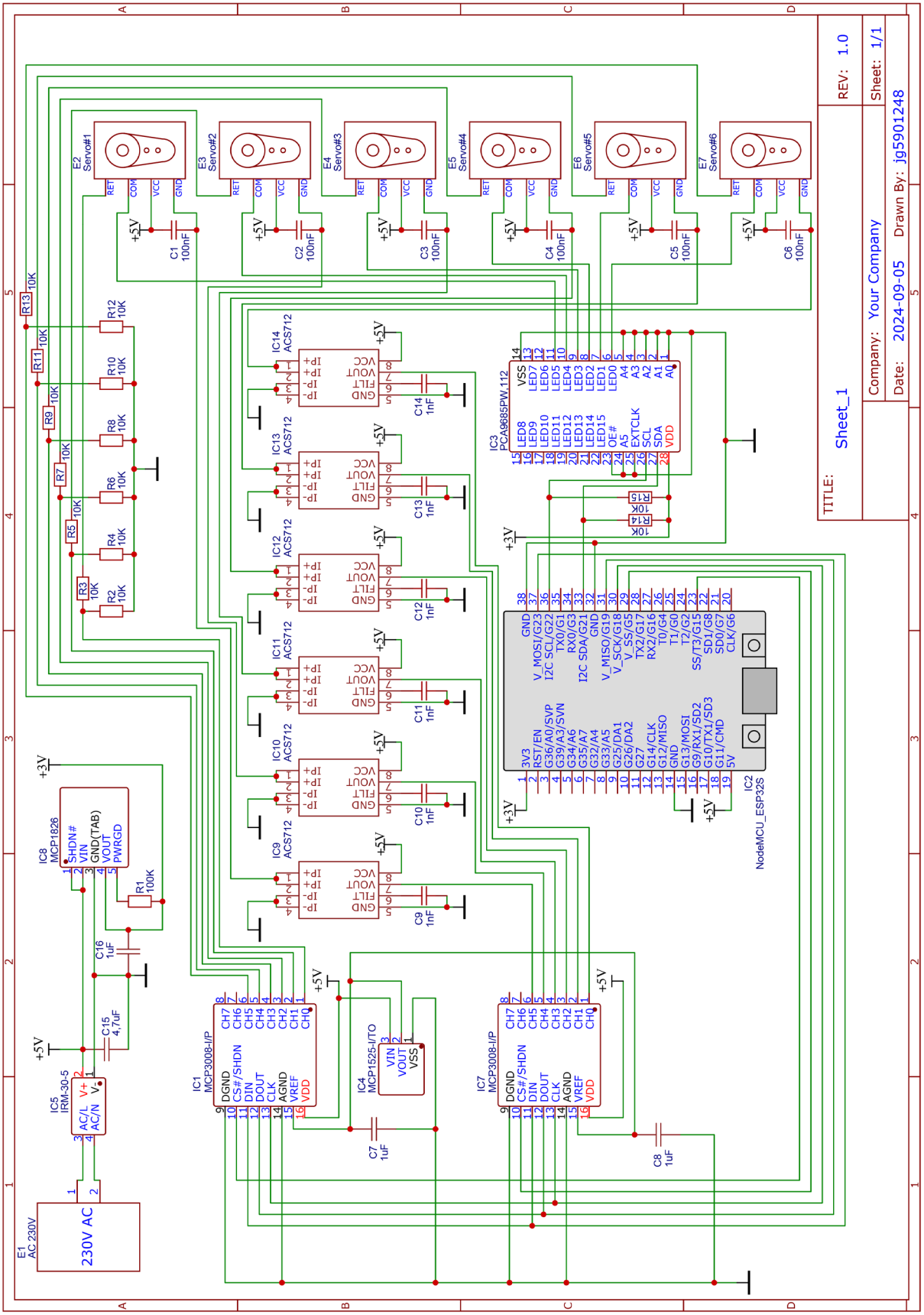
Mesure de position:
A l'aide du fil reliant le ADC et les servomoteurs, ça nous permet de lire la tension en fonction de l'angle donc la position.

Capteur de courant :
Nous permet de lire le courant rentrant dans les servomoteurs.

Servomoteur :
Permet une rotation de 0° a 180°.

5. Etudes détaillée

5.1 Schema de principe



5.2 Explication

C1-C6 : Condensateur de filtrage pour les servomoteurs (TD 8120mg)

C7-C8 : Condensateur de filtrage pour les ADC (MCP3008)

C9-C14 : Condensateur de filtrage pour les capteurs de courant (ACS712)

C15 : Condensateur de filtrage à la sortie du module d'alimentation (IRM-30-5)

C16 : Condensateur de filtrage à la sortie du régulateur linière (MCP1826)

E1-E6 : Entrée et sortie de servomoteur

IC1 : L'ADC qui capte la position/tension des servomoteurs (MCP3008)

IC2 : Le microcontrôleur qui sert comme maître pour le système entier (ESP32)

IC3 : Le Driver-servo qui crée le signal PWM permet la commande des servomoteurs (PCA9685)

IC4 : Référence de tension permettent une tension stable et fiable vers les ADC's (MCP1525)

IC5 : Module d'alimentation qui sort 5V/6A stable et continu (IRM-30-5)

IC7 : L'ADC qui capte le courant à l'entrée des servomoteurs (MCP3008)

IC8 : Régulateur linier sortant une tension stable de 3V3/1A (MCP1826)

R1 : Résistance Pull up pour la sortie du régulateur 3V3 car il est open drain (MCP1826)

R2-R13 : Diviseur de tension de la position/tension des servomoteurs (TD 8120mg)

R14-R15 : Resistance Pull up pour I²C du Driver-servo (PCA9685)

5.3 Le Driver-Servo

Mon Driver-Servo permet à mon microcontrôleur de commander plusieurs servomoteurs simultanément grâce à un signal PWM (un signal carré qui alterne entre un état haut et un état bas sur une période, ce qui permet de modifier la tension moyenne). Cela simplifie la tâche du microcontrôleur tout en permettant d'alimenter les servomoteurs via une source externe.

Fonctionnement

D'abord, le PCA9685 s'initialise et met tous ses sorties à 0 et attend un signal I²C. Ce signal I²C contient d'abord l'adresse du périphérique et ensuite la commande précise pour le canal souhaité. Ensuite, grâce à son oscillateur interne de 25 MHz, le PCA9685 génère un signal PWM pour contrôler la sortie spécifiée.

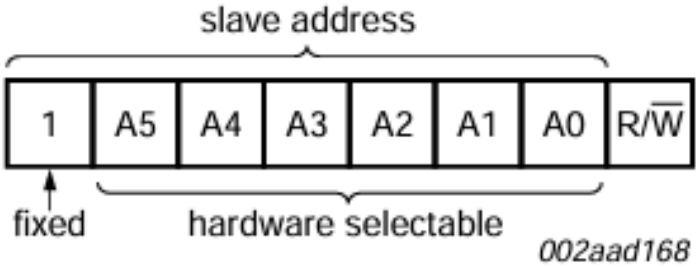
Caracterisque

- Le PCA9685 est équipé de 16 canaux (0-15) de sortie indépendants les uns des autres, complètement programmables
- Il a une résolution de 12 bits, ce qui revient à 4096 pas
- Son oscillateur interne est de 25 MHz mais il peut utiliser un oscillateur externe (max 50 MHz), par contre la fréquence de PWM réglable est entre 24 Hz et 1526 Hz
- Il a une adresse I²C configurable via les pins A0-A5
- Tension d'entrée : 2.3V - 5.5V
- Sortie : max 5.5V - 25mA
- Max 62 PCA9685 sur une ligne I²C à la fois

Adresse

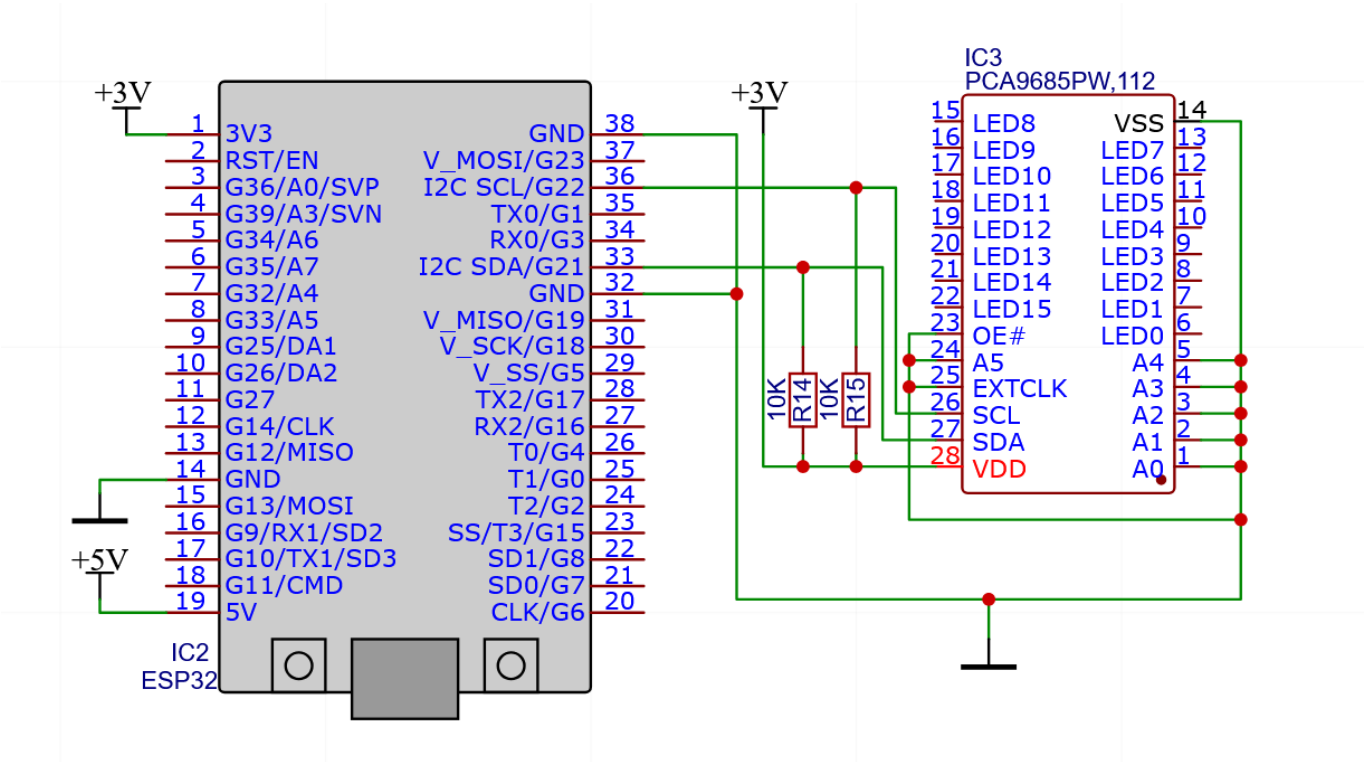
L'adresse I²C du PCA9685 se compose de 7 bits et 1 bit Read/Write. À la fin, 6 de ces 7 bits sont modifiables avec les pins A0-A5. Si la pine est branchée à la mass, la pine sélectionnée sera mise à "0" et inversement si elle est connectée au VCC, l'adresse de la pine est mise à "1".

L'adresse par défaut est établie à 0100 0000 (Ox40) mais peut aller jusqu'à 0111 1111 (Ox7F), l'adresse est facilement échangeable pour pouvoir utiliser plusieurs appareils I²C sur la même ligne.

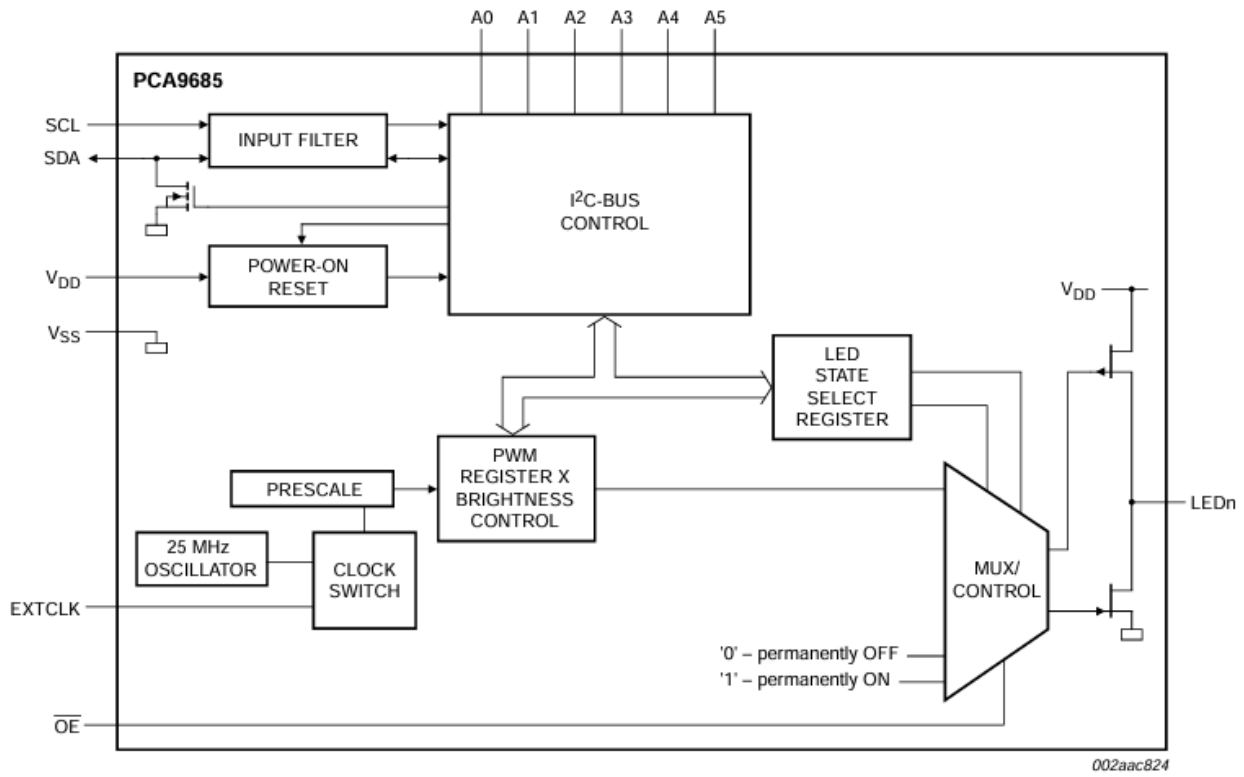


Source: **PCA9685 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I2C-bus LED controller*

Schema de fonctionnement



Schema Bloc



Remark: Only one LED output shown for clarity.

Fig 1. Block diagram of PCA9685

Source: **PCA9685 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I2C-bus LED controller*

Explication

- Input Filter (Filtre d’entrée) : Élimine tout bruit ou interférence à l’entrée des signaux I²C.

- Power on Reset (Reset sur lancement) : Réinitialise tous les registres et système interne de la carte à une valeur de défaut telle que “0”, pour qu’il soit prêt pour les signaux I²C et qu’il ne garde pas les valeurs d’autres opérations.

- I²C Bus Control (Controleur I²C) : S’occupe de la gestion des lignes SDA (Serial Data) et SCL (Serial Clock), mais également de l’adresse, des commandes de registre et du R/W (Read/Write) de l’esclave.

- Clock Switch (Switch horloge) : Permet de varier entre un oscillateur interne de 25 MHz ou un oscillateur externe si une plus haute horloge (Clock) est nécessaire.

- 25MHz Oscillator (Oscillateur interne de 25 MHz) : Fabrique une horloge (clock) interne de 25 MHz qui permet de réguler le timing interne, ce qui est indispensable dans la création d’un signal PWM.

- Prescale (Diviseur de fréquence) : Divise l’horloge interne afin d’obtenir la fréquence d’échantillonnage désirée, ce qui est essentiel dans la génération d’un signal PWM.

- PWM register X brightness control (Contrôle de la luminosité du registre PWM X) : contrôle la luminosité et/ou la position à l’aide du signal PWM, en modifiant le cycle de travail (duty cycle) en variant l’état haut et l’état bas, et donc la tension moyenne.

- LED State Select Register (Registre de sélection d’état des LED) : permet de configurer l’état de chaque sortie, soit en forçant un état haut, en bloquant le signal PWM, ou en laissant le signal PWM agir normalement.

- Mux/Control (Multiplexeur / Contrôle) : Dirigent et gèrent la transmission de signaux à travers les différentes sorties et interprètent les commandes par rapport au registre.

Code de test (librairie)

Servo

```
#include “FaBoPWM_PCA9685.h”

FaBoPWM faboPWM;
int pos = 0;
int MAX_VALUE = 600;
int MIN_VALUE = 300;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  if(faboPWM.begin()) {
    Serial.println(“Find PCA9685”);
    faboPWM.init(300);
  }
  faboPWM.set_hz(50);

}

void loop() {
  for (pos = MIN_VALUE; pos <= MAX_VALUE; pos += 1) {
    faboPWM.set_channel_value(0, pos);
    delay(15);
  }
  for (pos = 600; MAX_VALUE >= MIN_VALUE; pos -= 1) {
    faboPWM.set_channel_value(0, pos);
    delay(15);
  }
}
```

Servo rotation

```
/*
  Rotation Servo Sample.
  Sample of controle FS90R(FEETECH RC Model Co.,Ltd.)
*/
#include “FaBoPWM_PCA9685.h”

FaBoPWM faboPWM;
int pos = 0;
int STOP = 0;
int FORWARD = 400;
int BACK = 250;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  if(faboPWM.begin()) {
    Serial.println(“Find PCA9685”);
    faboPWM.init(STOP);
  }
  faboPWM.set_hz(50);

}

void loop() {

  faboPWM.set_channel_value(0, STOP);
  faboPWM.set_channel_value(1, STOP);
  delay(1000);
  faboPWM.set_channel_value(0, FORWARD);
  faboPWM.set_channel_value(1, BACK);
  delay(1000);
}
```

Liens a mon GitHub : https://github.com/RocketJGB/TFE_JGB_2025

Datasheet

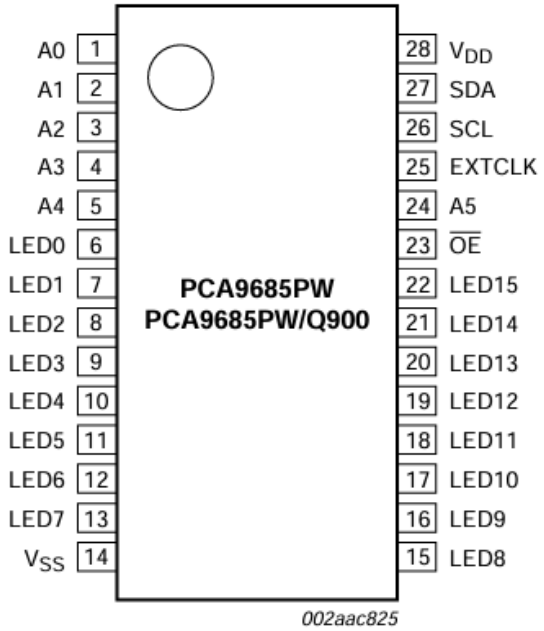


Fig 2. Pin configuration for TSSOP28

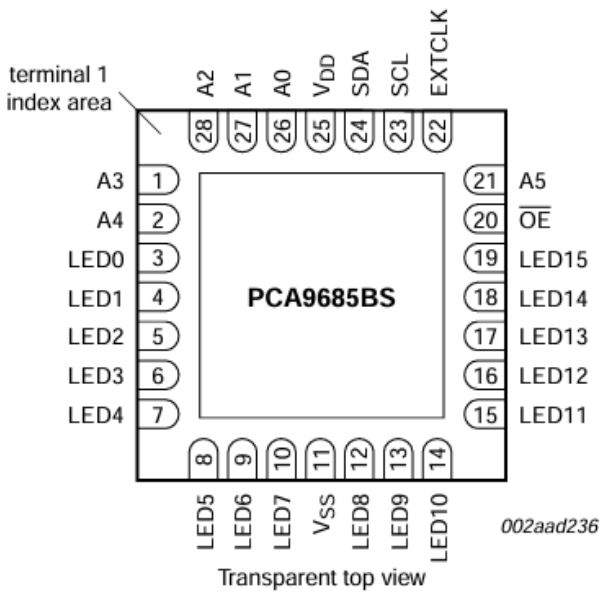


Fig 3. Pin configuration for HVQFN28

Source: **PCA9685 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I2C-bus LED controller*

Datasheet

Table 3. Pin description

Symbol	Pin		Type	Description
	TSSOP28	HVQFN28		
A0	1	26	I	address input 0
A1	2	27	I	address input 1
A2	3	28	I	address input 2
A3	4	1	I	address input 3
A4	5	2	I	address input 4
LED0	6	3	O	LED driver 0
LED1	7	4	O	LED driver 1
LED2	8	5	O	LED driver 2
LED3	9	6	O	LED driver 3
LED4	10	7	O	LED driver 4
LED5	11	8	O	LED driver 5
LED6	12	9	O	LED driver 6
LED7	13	10	O	LED driver 7
V_{SS}	14	11[1]	power supply	supply ground
LED8	15	12	O	LED driver 8
LED9	16	13	O	LED driver 9
LED10	17	14	O	LED driver 10
LED11	18	15	O	LED driver 11
LED12	19	16	O	LED driver 12
LED13	20	17	O	LED driver 13
LED14	21	18	O	LED driver 14
LED15	22	19	O	LED driver 15
$\overline{OE}$	23	20	I	active LOW output enable
A5	24	21	I	address input 5
EXTCLK	25	22	I	external clock input[2]
SCL	26	23	I	serial clock line
SDA	27	24	I/O	serial data line
V_{DD}	28	25	power supply	supply voltage

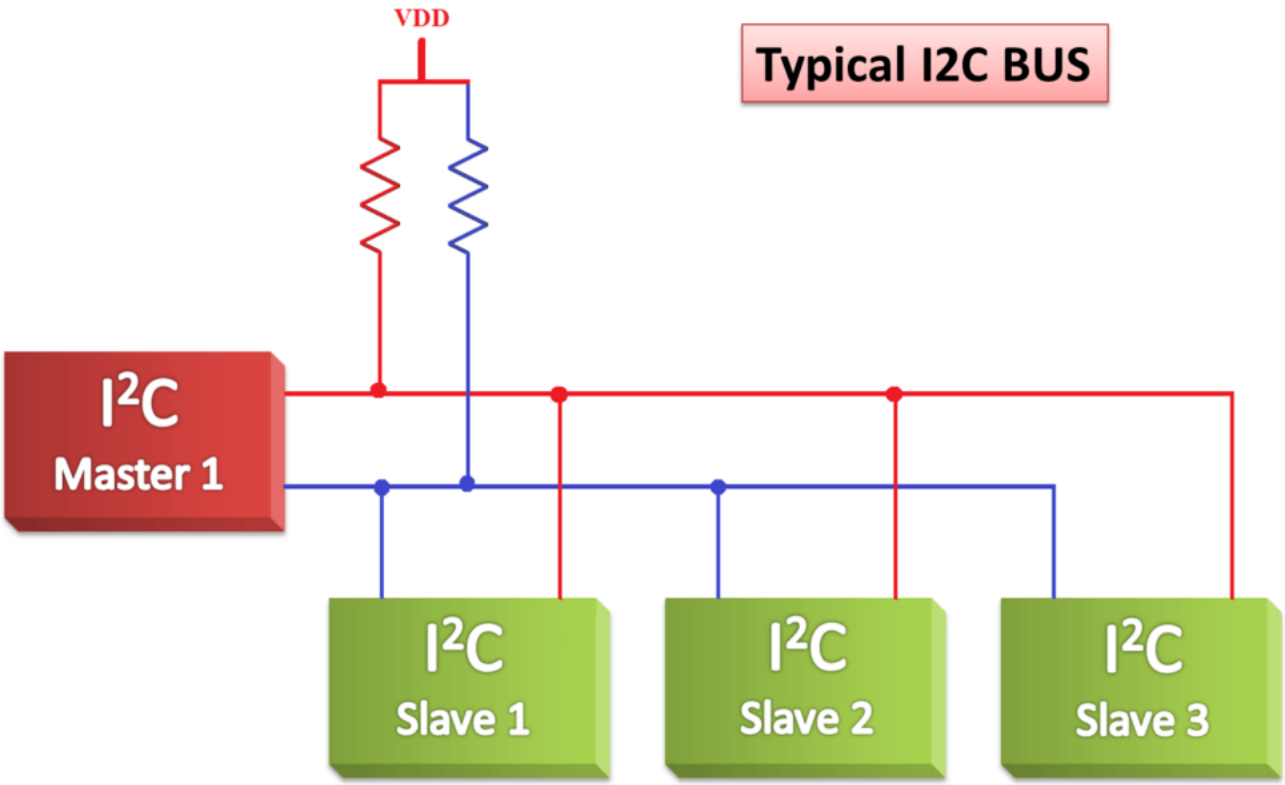
Source: **PCA9685 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I2C-bus LED controller*

5.4 I²C

I2C, créé dans les années 80 par PHILLIPS, est un bus ou protocole de communication utilisé dans de nombreuses technologies telles que l'audio, l'écran, etc.

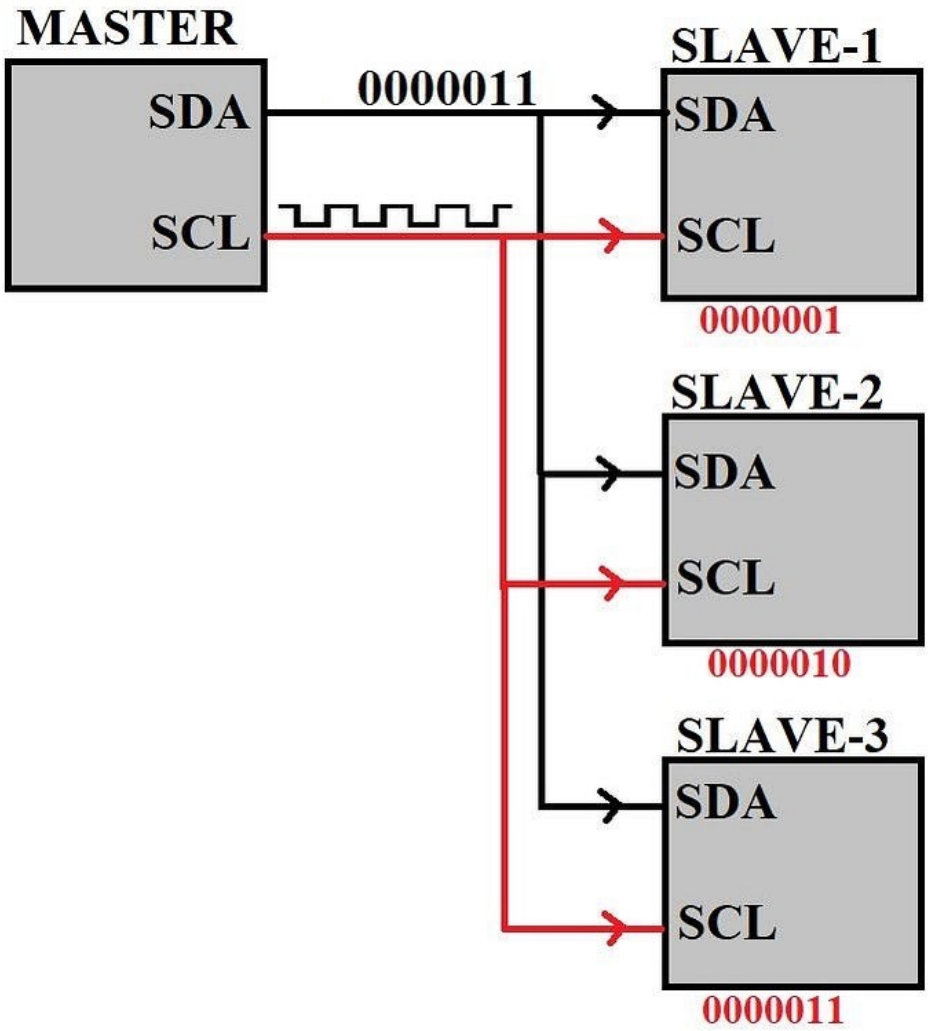
Fonctionnement

I2C est un protocole ou bus de communication qui permet la réception et la transmission stable et fiable de données entre le Master (maître) et le Slave (esclave). Il est capable de cela car il fonctionne en half duplex, ce qui signifie qu'il ne peut accomplir qu'une tâche à la fois, sinon transmettre ou recevoir. Mais donc, il fonctionne avec des packets de 8 bytes qu'il traite l'une à la fois, ce qui lui rend plus fiable avec moins de perte mais plus lent que d'autres bus ou protocoles de communication tels que le SPI, UART, etc.



Source: *Inter Integrated Circuit (I2C): A Guide to Understanding and Implementing the Communication Protocol – HIGH-END FPGA Distributor*

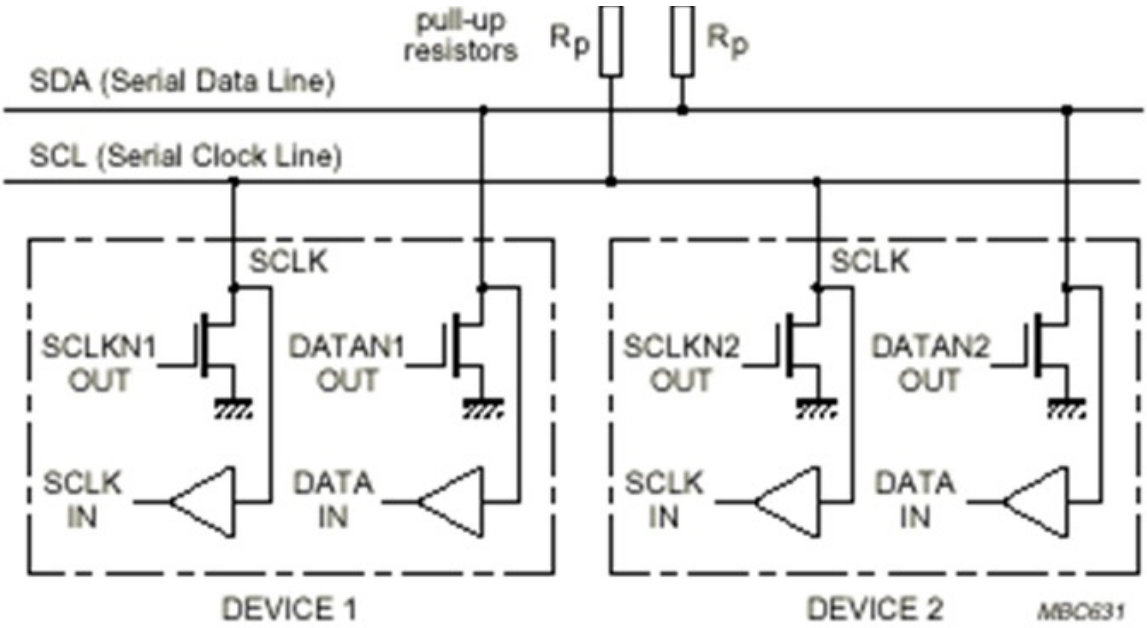
Les 2 lignes de transmission nécessitent malgré tout des résistances pull-up pour faire fonctionner le tout. Chaque dispositif Slave (esclave) est équipé d'une adresse qui va permettre au maître de les identifier, le Master (maitre) commence le protocole avec la condition de départ (START) suivie de l'adresse du Slave (esclave) et il termine l'opération avec la condition d'arrêt (STOP). Chaque octet est confirmé ou non confirmé avec le ACK (acquis) et NACK (non acquis). Il fonctionne sur une plage de fréquence entre 100 kHz (mode standard) et 3.4 MHz (high speed mode).



Source: *The Circuit Board - Your Ultimate Guide to Electronics and VLSI Design: Choosing the Right Communication Protocol: A Deep Dive into UART, I2C, and SPI.*

Ce schéma montre bien comment le protocole ou bus I2C fonctionne en grande détail.

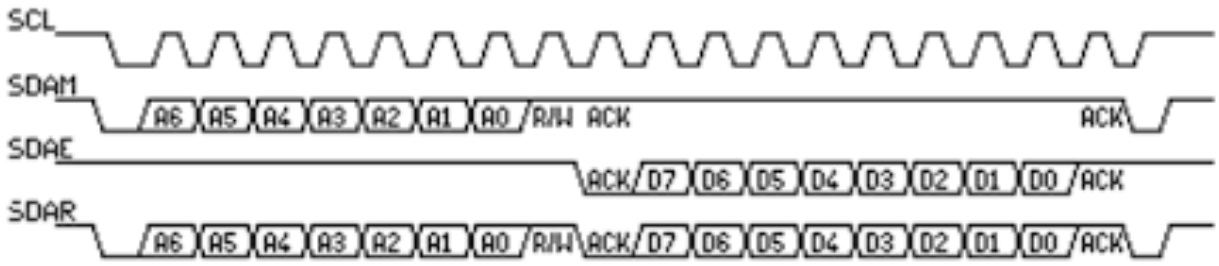
Ce schéma montre en détail la composition du protocole ou d'un bus I2C. Premièrement, chacun des appareils est équipé d'une horloge dans ce cas et d'un récepteur et transmetteur de données. Chacun d'entre eux est capable de sinon transmettre un signal ou des données à l'aide d'un transistor (Saturer = 1 / Bloquer = 0) ou recevoir des données à l'aide d'un fil, mais il ne peut qu'effectuer l'une de ces tâches à la fois.



Source: *https://www.technologuepro.com/cours-systemes-embarques/cours-systemes-embarques-Bus-I2C.htm*

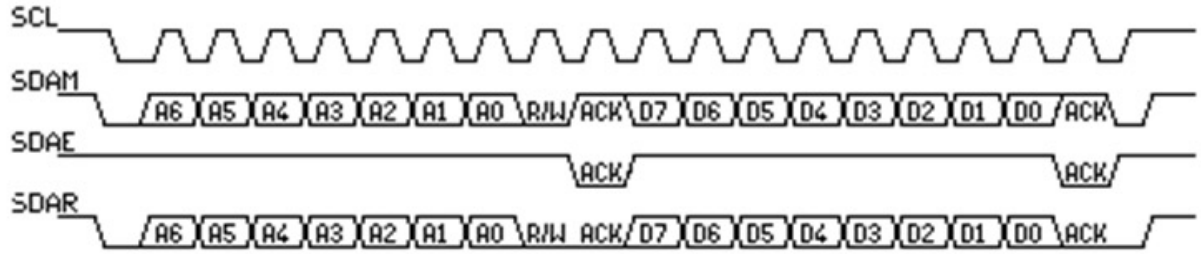
Comme on le constate ici, le 0 l'emporte sur le 1 car quand un des appareils transmet un 1, son transistor est saturé, ce qui signifie ouvert, et que l'autre appareil transmet un 0, ce qui signifie que son transistor bloque et donc est connecté à la masse. La donnée 1 venant du premier appareil va être directement envoyée à la masse. C'est avec cette opération qu'il lui permet d'effectuer un ACK (acquis) ou un NACK (non-acquis) et donc à la fin de chaque paquet de Bits (octet), 2 flanc sont réservés au R/W (Read/Write), ce qui permet d'identifier qui écrit et qui fait une lecture (0 = Write/1 = Read), et l'ACK/NACK (acquis/non-acquis).

Chronogramme d’une lecture



Source: *https://www.technologuepro.com/cours-systemes-embarques/cours-systemes-embarques-Bus-I2C.htm*

Chronogramme d’une écriture



Source: *https://www.technologuepro.com/cours-systemes-embarques/cours-systemes-embarques-Bus-I2C.htm*

SCL: Serial Clock

SDAM: Serial Data Maitre

SDAE: Serial Data Esclave

SDAR: Serial Data Résultant

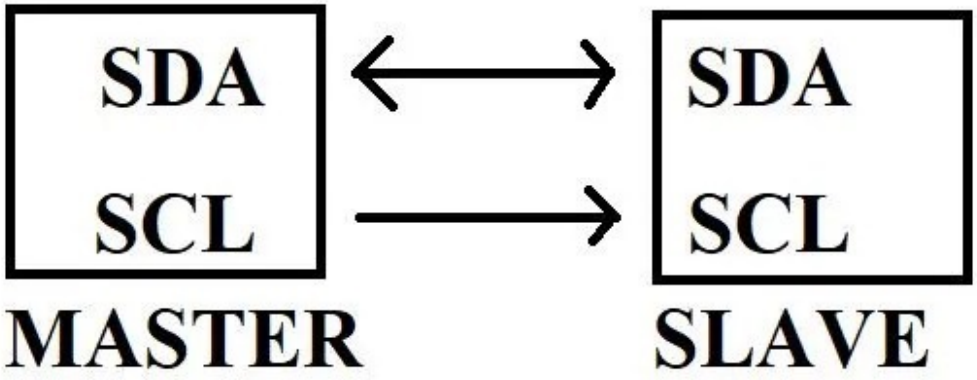
A6-A0: Bits d’Adresse (0-6)

D7-D0: Bits de Données (0-7)

ACK: Acquis

R/W: Read/Write

Rôle des signaux



Source: *The Circuit Board - Your Ultimate Guide to Electronics and VLSI Design: Choosing the Right Communication Protocol: A Deep Dive into UART, I2C, and SPI.*

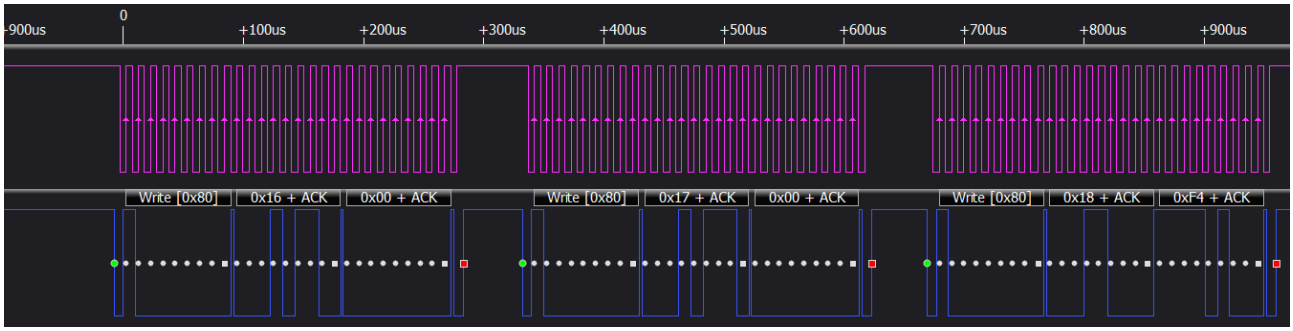
- SCL (Serial Clock Line) : Il génère une horloge qui est composée de 8 flancs montants, ce qui représente les 8 bits ou paquets d'information. Cette ligne est contrôlée par le Master (maître) et permet la synchronisation entre les 2 technologies.

- SDA (Serial Data Line) : La ligne SDA est utilisée pour transmettre et recevoir les données, mais il n'en est pas capable quand la ligne SCL est en état haut et donc pendant les 8 flancs montants.

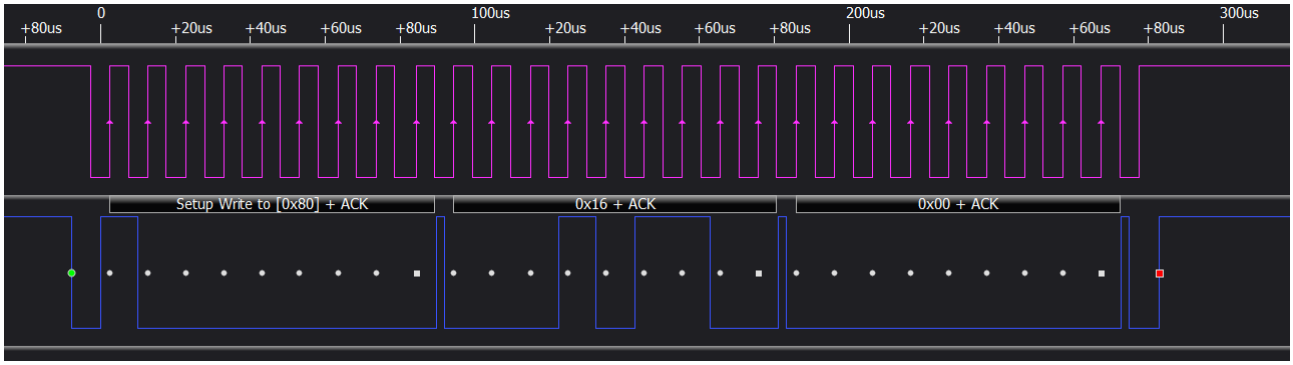
Pendant la condition START (début), le SDA passe de haut à bas lorsque SCL est haut et inversement pendant la condition STOP (arrêt), SDA passe de bas à haut lorsque SCL est haut.

Mesures

Mesure packet (10us /10kHz)



Mesure packet (10us /10kHz)



= SCL

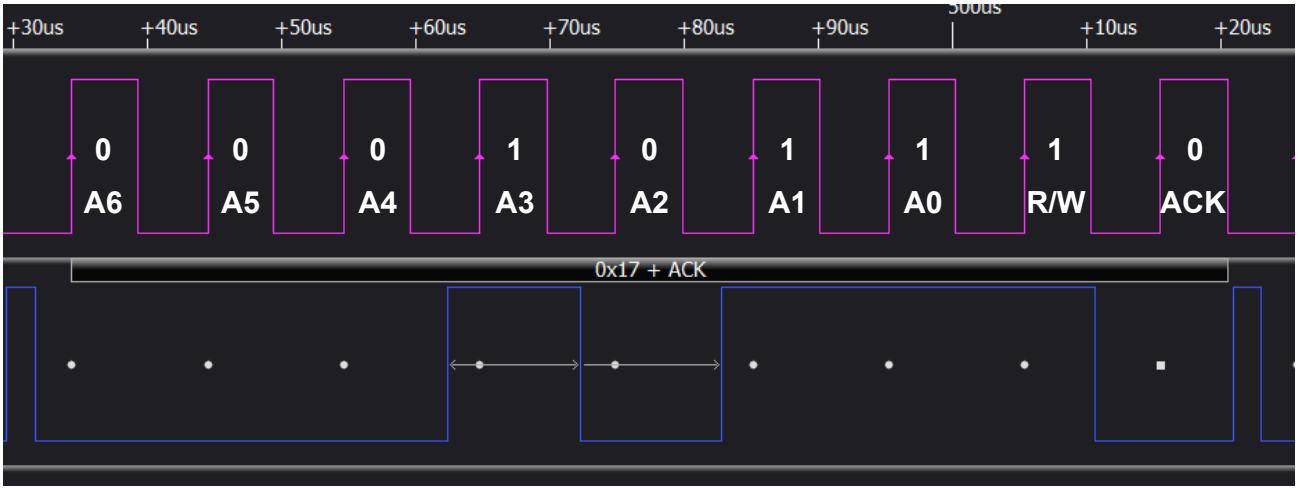
= SDA

Dans le signal ci-dessus, on peut observer que l'adresse n'est pas la même que celle affichée et on se retrouve avec Ox80 au lieu du Ox40 prévu, mais c'est une simple erreur dans la lecture du signal à cause d'un décentrement des bits entre eux et l'adresse est donc bien Ox40.

L'avant-dernière bit qui sert comme référence de lecture ou écriture est forcé à 1 par le maître, ce qui implique que le maître fait une écriture à laquelle il envoie tout d'abord l'adresse de l'appareil et ensuite une commande du registre, ce qui permet au driver-servo de savoir à qui il doit parler et ce qu'il doit dire.

Mesure packet (10us /10kHz)

Mesure packet (10us /10kHz)



= SCL

= SDA

Comme on peut l'observer, on reçoit l'adresse sur les 7 flancs suivi d'une 8éme (R/W) et un 9ème flanc, ce qui représente la condition d'acquisition (ACK/NACK).

- Si le récepteur a reçu les données correctement, il force la ligne SDA à 0 (ACK), ce qui est le cas ici.
- S'il n'a pas reçu les données correctement ou ne peut pas les traiter, il laisse la ligne SDA à 1 (NACK).

ADD 0b0100 0000 = 64 = 0x40

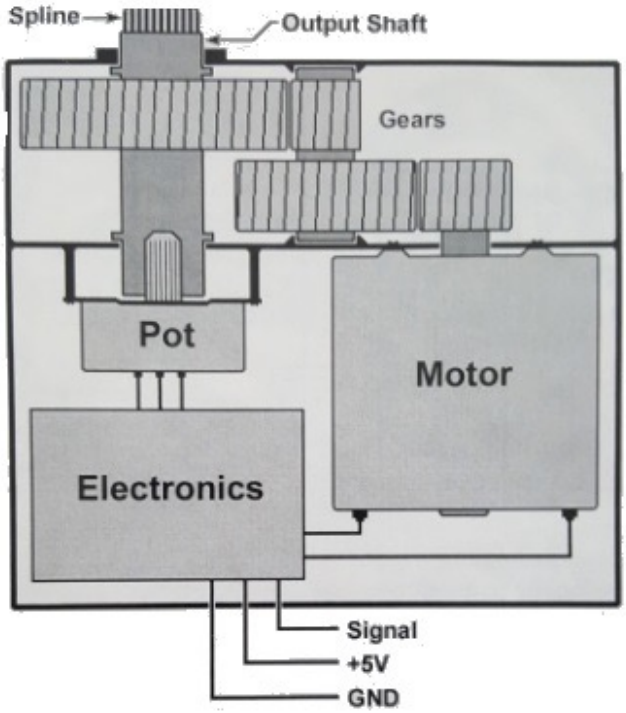
DON 0b0001011 = 11 = 0xB

5.5 Le Servomoteur

Un servomoteur est un mécanisme de régulation qui a pour objectif d'ajuster la position d'un palonnier en réponse à un signal de commande de 1ms à 2ms sur une période de 20ms.

Structure

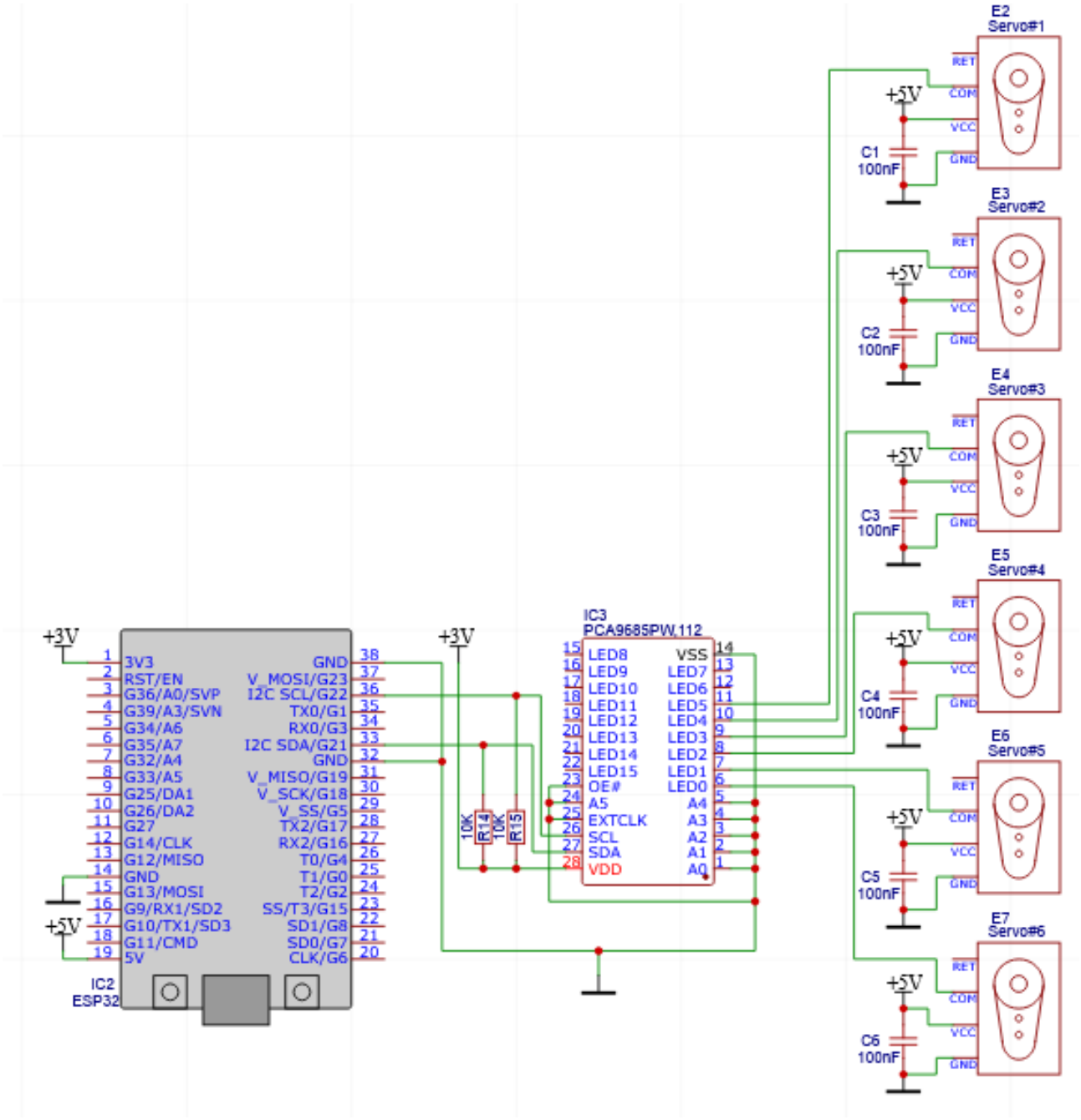
Source: *Arduino-Pi Ramblings: Followup on 3D printer from Scavenged DC Motor / Encoders Blog*



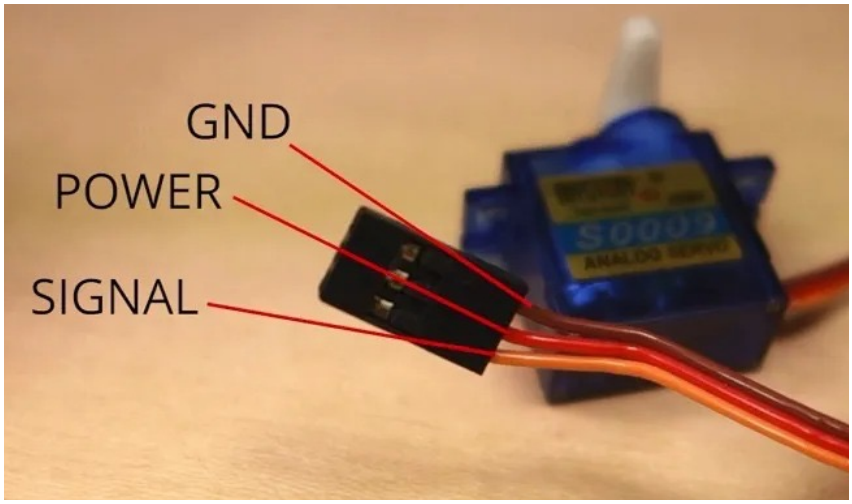
- 3 fils de connexion:
  +5V, GND, PWM (commande)
- Palonnier (sortie rotative)
- Moteur DC
- Engrenages
- Potentiometre
- Cercuit de controle electronique

Source: *An Introduction to the Servo Motor: How Servos work | Circuit Crush*

Schema de fonctionnement



Pins



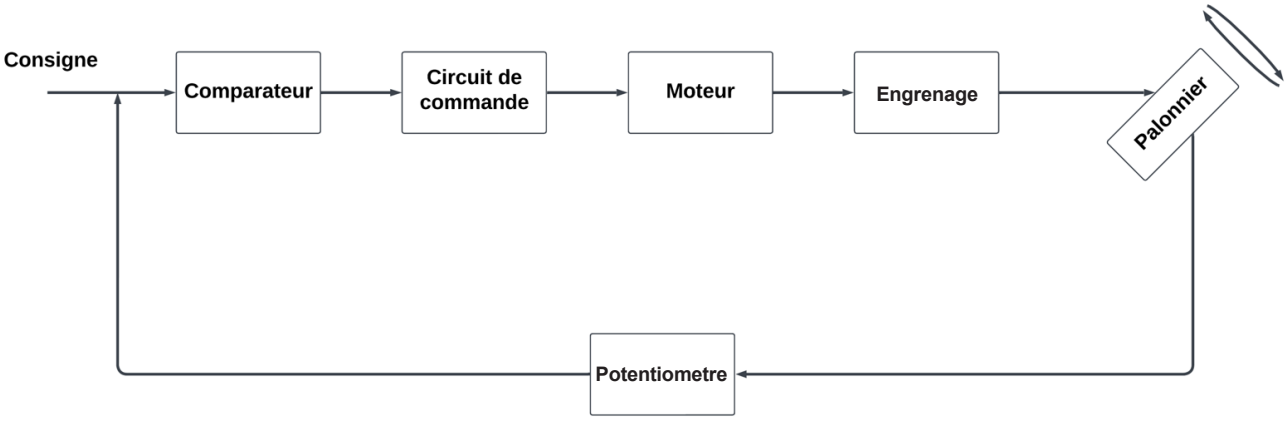
- GND: masse (noire)
- VCC: +5V (rouge)
- PWM: Commande/Pulse Width Modulation (jaune)

Source: *https://www.organised-sound.com/servo-motor-arduino-wiring-diagram-pdf/*

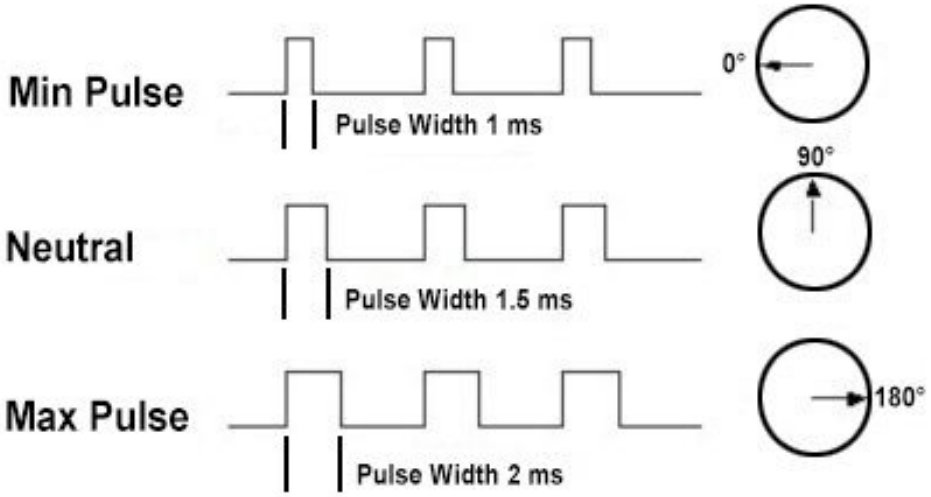
Theorie

Grâce à un signal PWM, le servomoteur peut modifier la rotation d'un palonnier en lui ordonnant une position entre 180° et 0°. Ensuite, cela va permettre au potentiomètre de fournir une tension proportionnelle à l'angle qu'il va utiliser pour connaître la position du palonnier et, à l'aide d'un système de réglage, qui va envoyer une tension vers le moteur DC pour pouvoir faire une correction, ce qui permettra au palonnier de faire une rotation en série avec la tension pour obtenir l'angle voulu. Néanmoins, à cause de la vitesse élevée du moteur DC, un mécanisme d'engrenage est instauré pour diminuer cette vitesse et augmenter le couple.

Le servomoteur fonctionne avec un système asservi ou régulé en boucle fermée, ce qui lui permet d'effectuer des corrections constamment. À chaque fin de boucle, l'angle obtenu est comparé avec l'angle voulu et en cas d'erreur, le système de régulation va effectuer une correction de x degrés en envoyant une tension préconisée au moteur.



Également, le PWM du servomoteur fonctionne sur des périodes de 20 ms et 50 Hz, généralement avec un flanc montant de 1 ms (0°) comme minimum et 2 ms (180°) comme maximum, mais cela peut varier de servo en servo.



Source: *An Introduction to the Servo Motor: How Servos work | Circuit Crush*

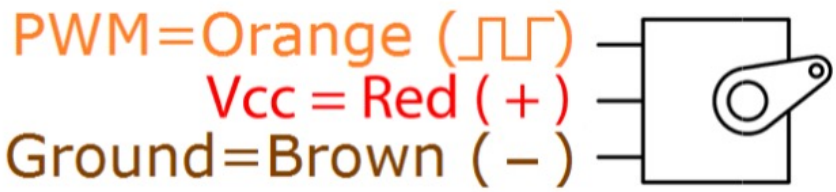
Le PWM (Pulse Width Modulation/modulation de largeur d'impulsion) est une technique utilisée pour contrôler la puissance délivrée à un dispositif électrique. Le principe repose sur la génération d'un signal carré où la durée des impulsions actives (signal haut) varie par rapport à la période totale du signal.

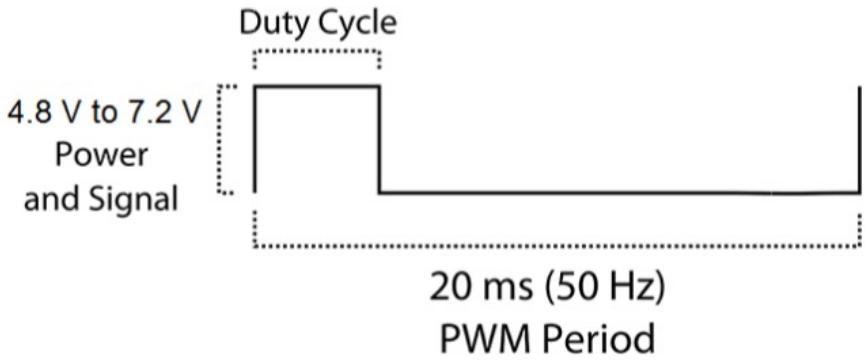
Datasheet

MG996R High Torque
Metal Gear Dual Ball Bearing Servo

Specifications

- Weight: 55 g
- Dimension: 40.7 x 19.7 x 42.9 mm
- Stall torque: 9.4 kgf·cm (4.8 V), 11 kgf·cm (6 V)
- Operating speed: 0.17 s/60º (4.8 V), 0.14 s/60º (6 V)
- Operating voltage: 4.8 V a 7.2 V
- Running Current 500 mA – 900mA(6V)
- Stall Current 2.5 A (6V)
- Dead band width: 5 µs
- Temperature range: 0 ºC – 55 ºC



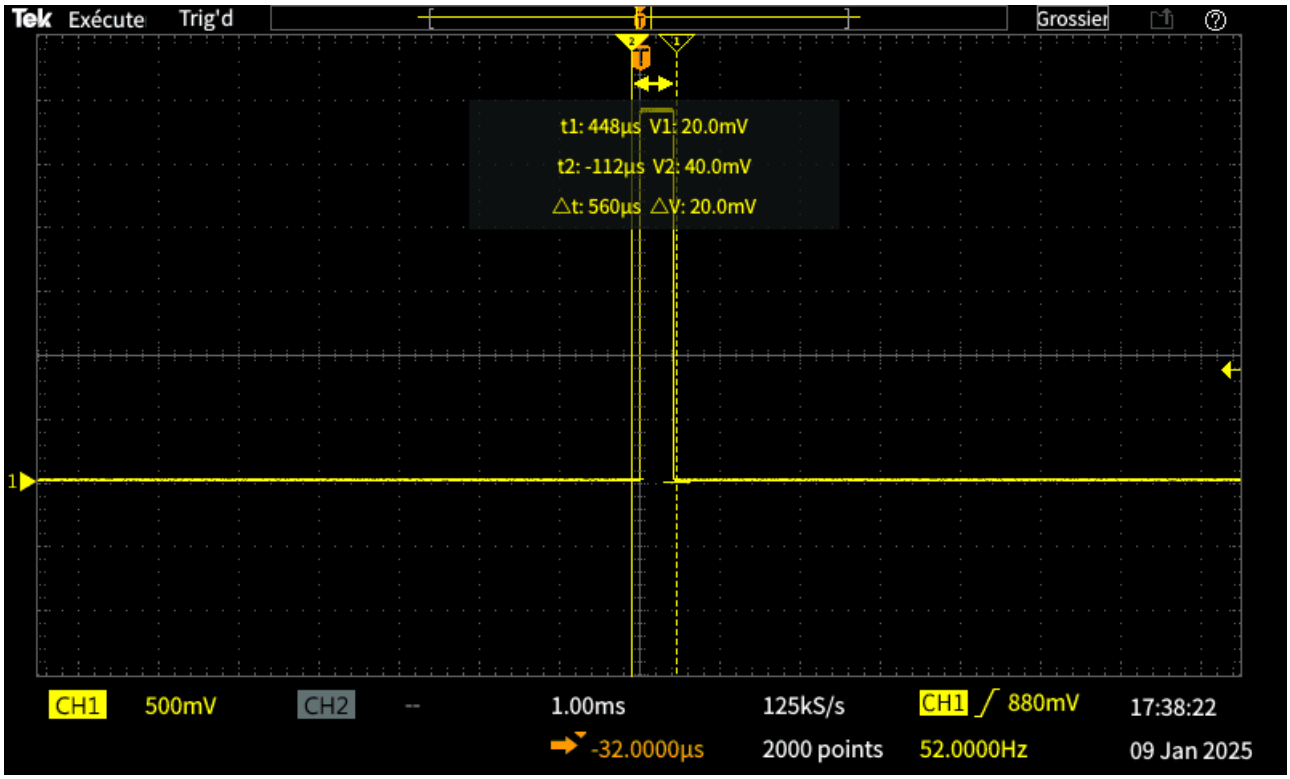


Source: *https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG996R_Tower-Pro.pdf?srsltid=AfmBOoq4mVOTdDzhfk-1W2EPKGLcKJVfYvouTJCeIwCql5tTW_VoI1Xmy*

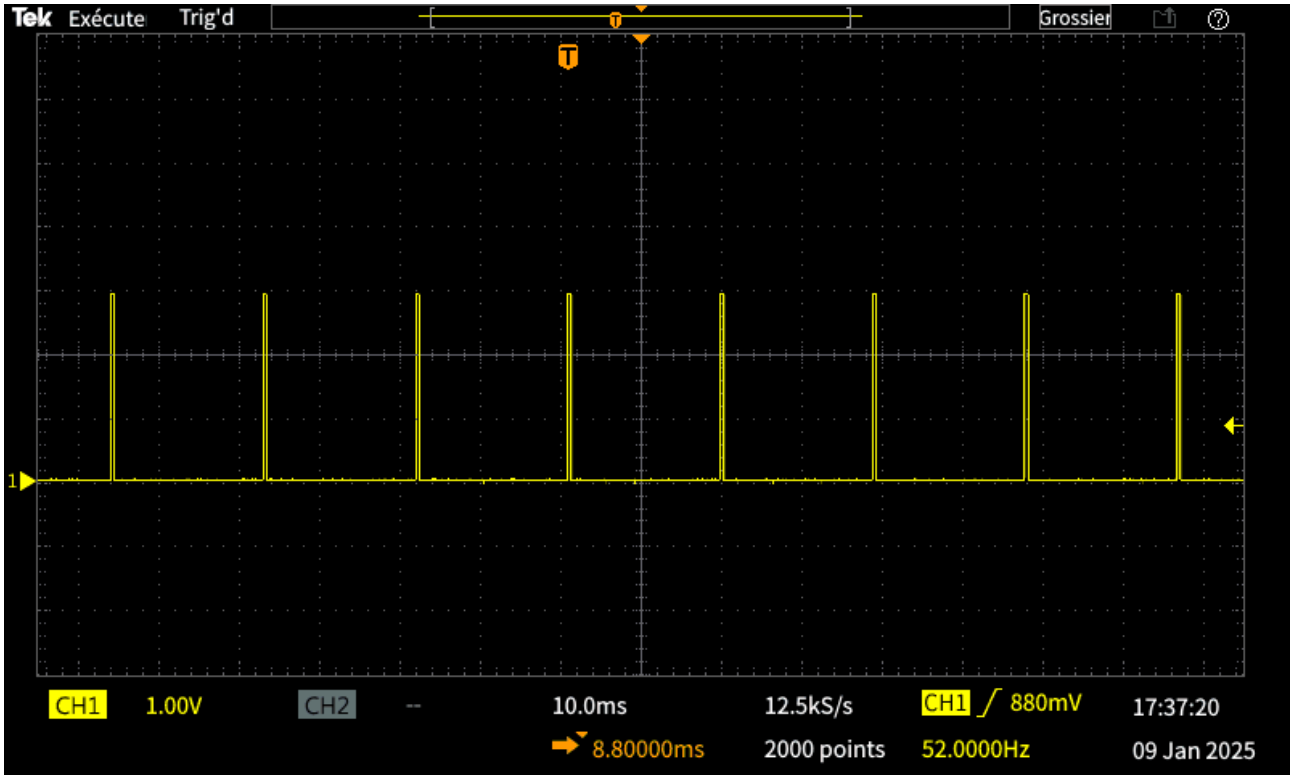
Measures

PWM

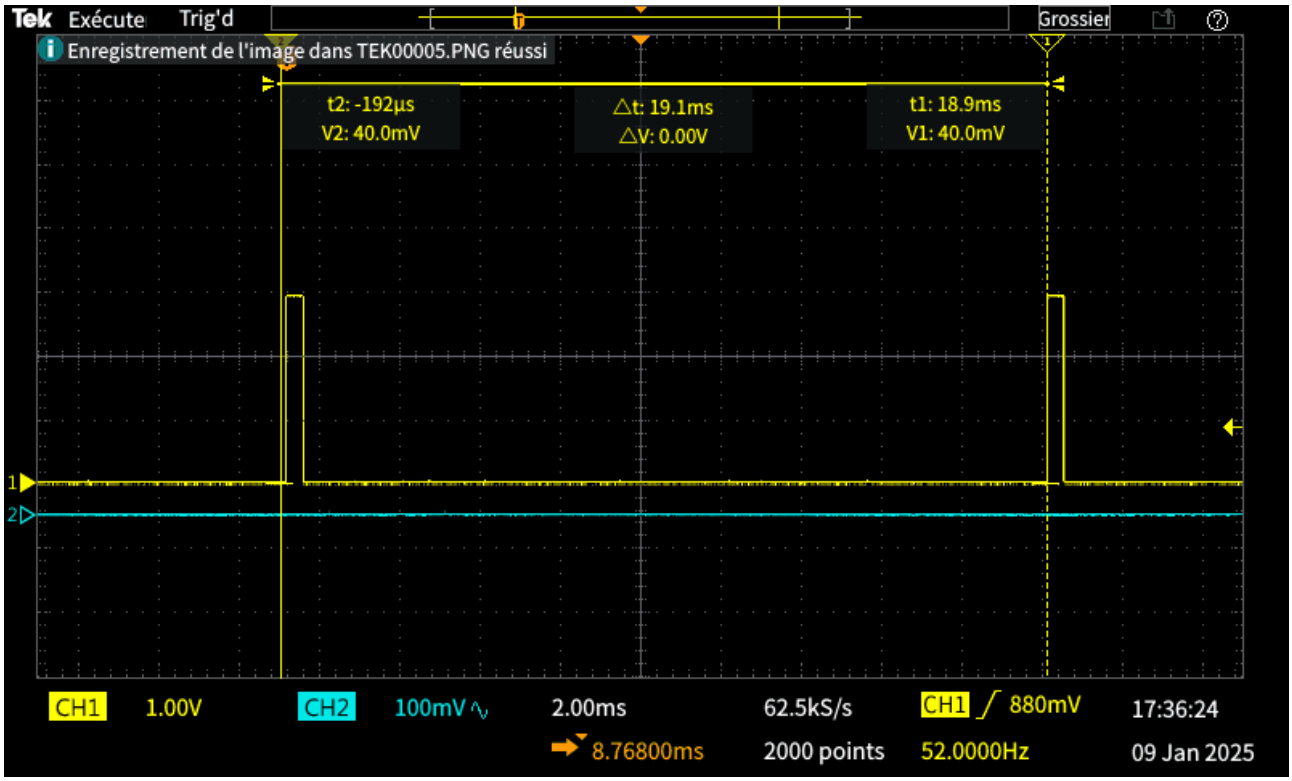
Mesure du flanc minimum (+/-0.5ms / 50Hz/ -0°)



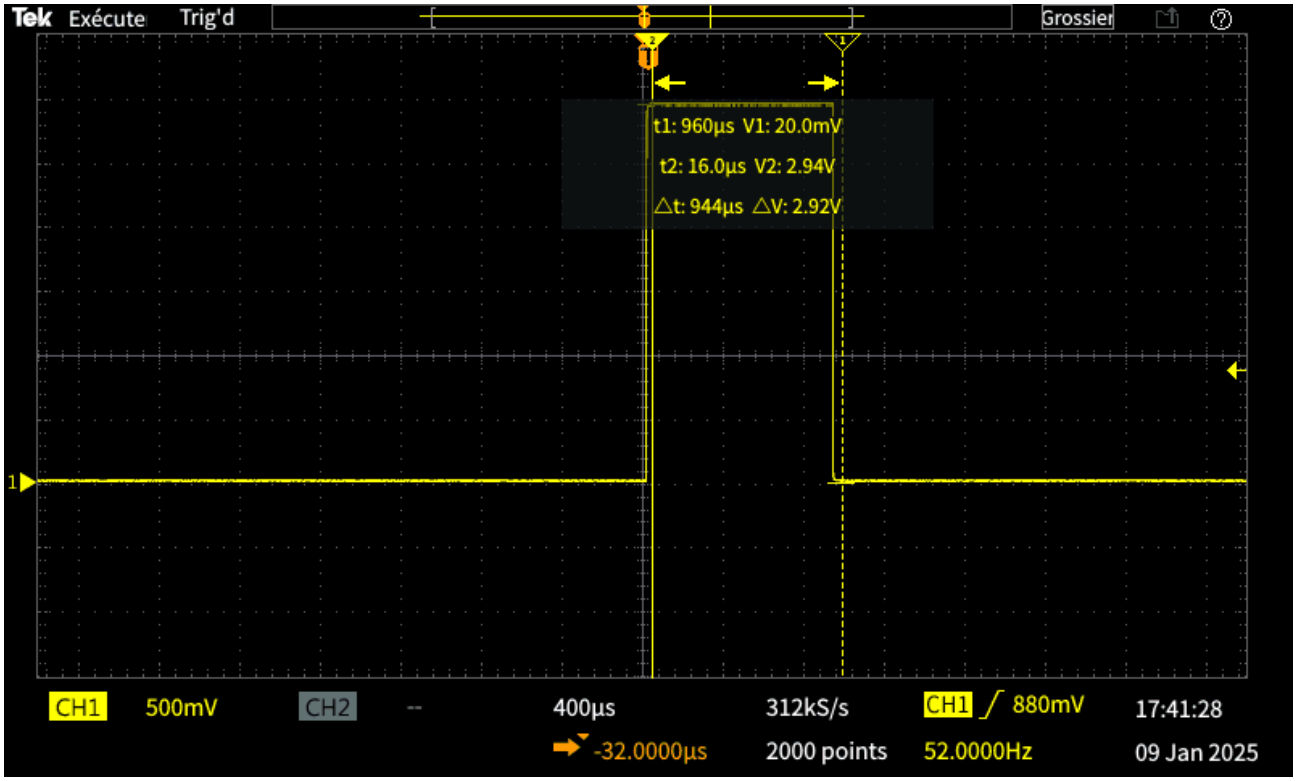
Signal minimum (-0°)



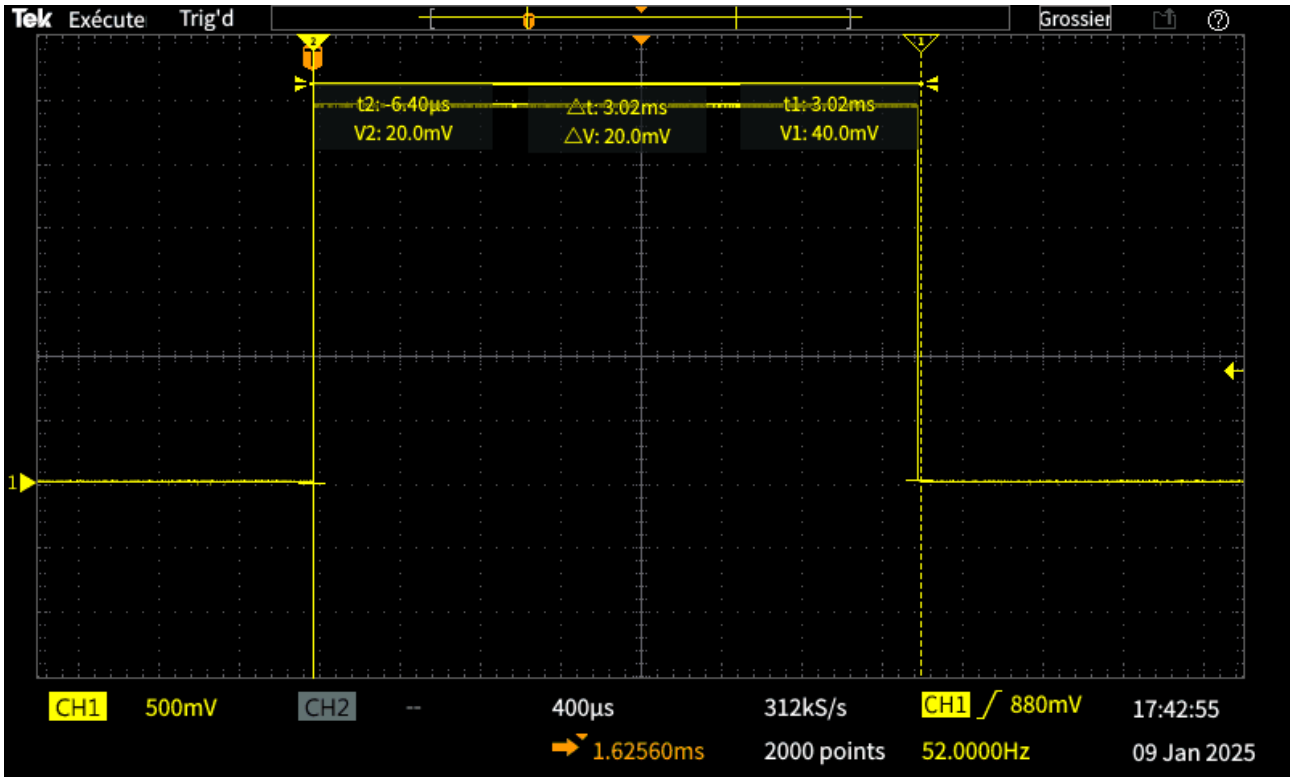
Mesure de la periode (+/- 20ms /50Hz)



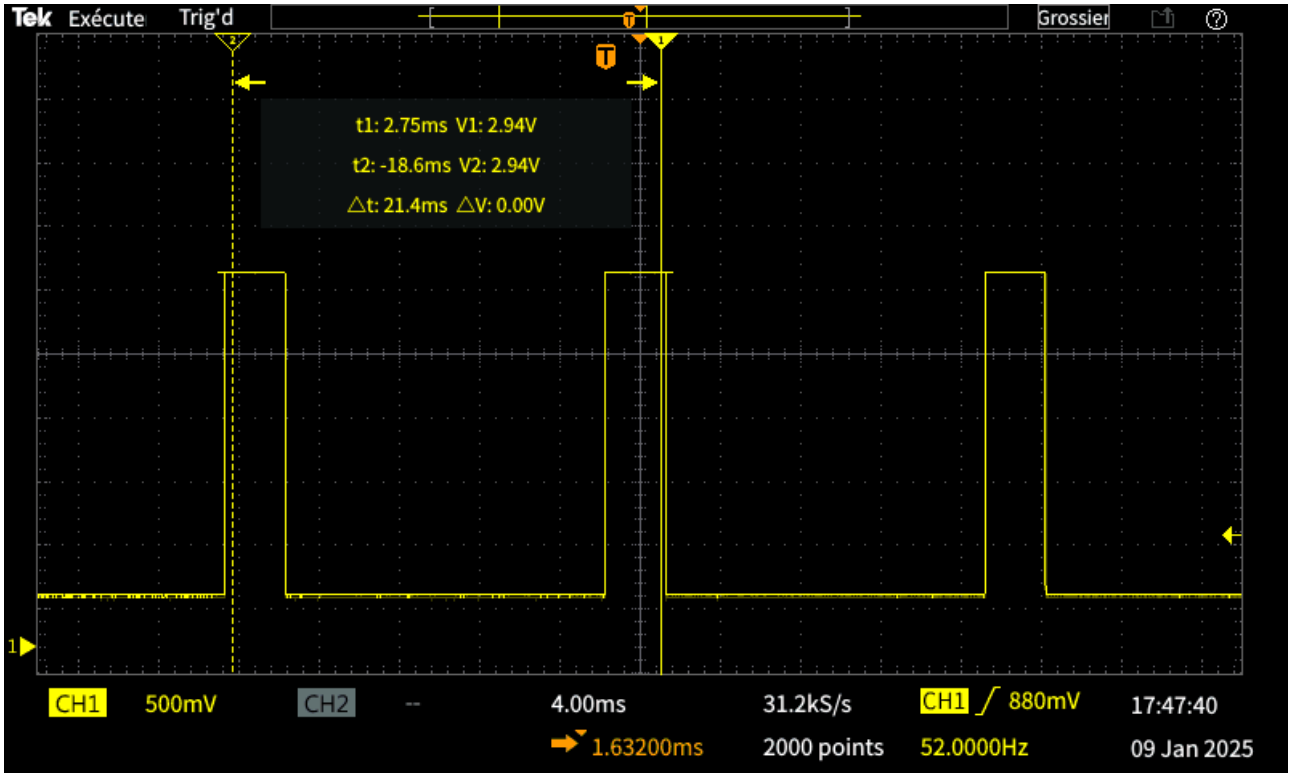
Mesure du flanc minimum normal (+/-1ms / 50Hz/ 0°)



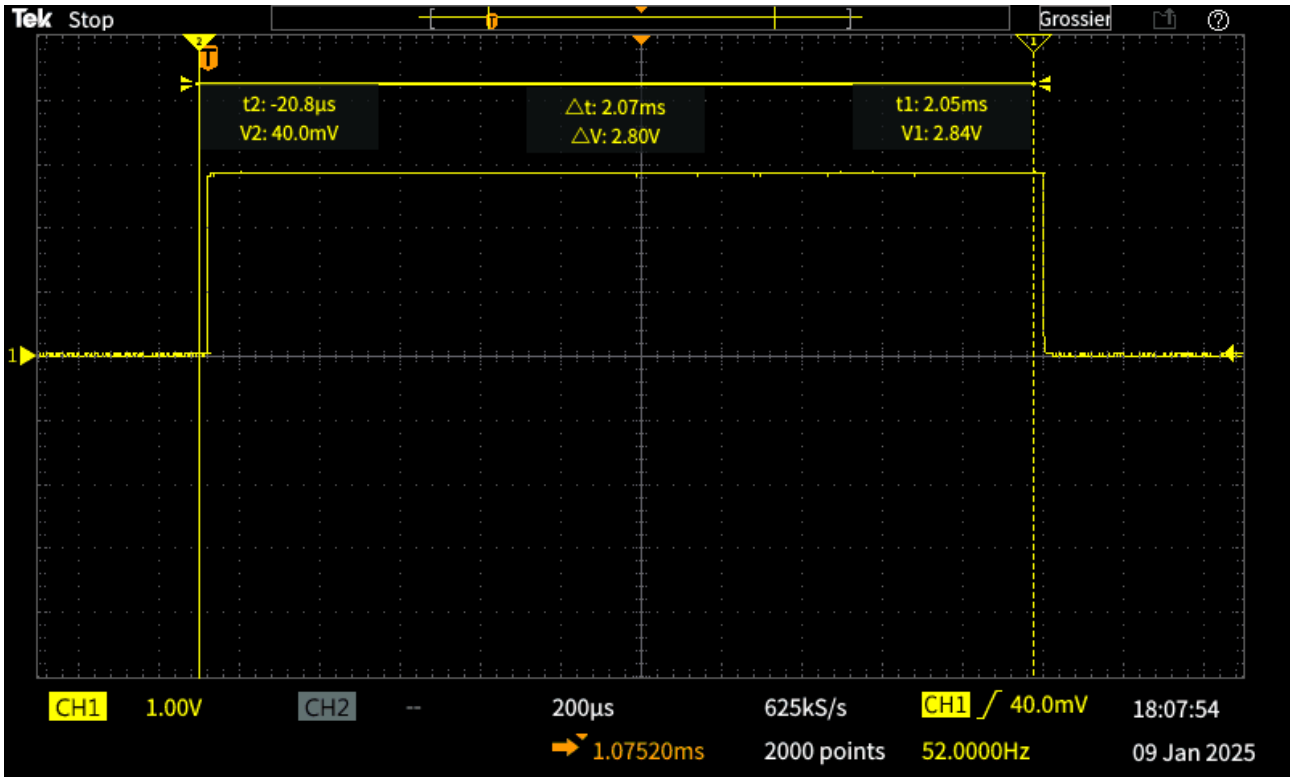
Mesure du flanc minimum (+/-3ms / 50Hz/ +180°)



Signal maximum (+180°)



Mesure du flanc maximum normal (+/-2ms / 50Hz/ 180°)

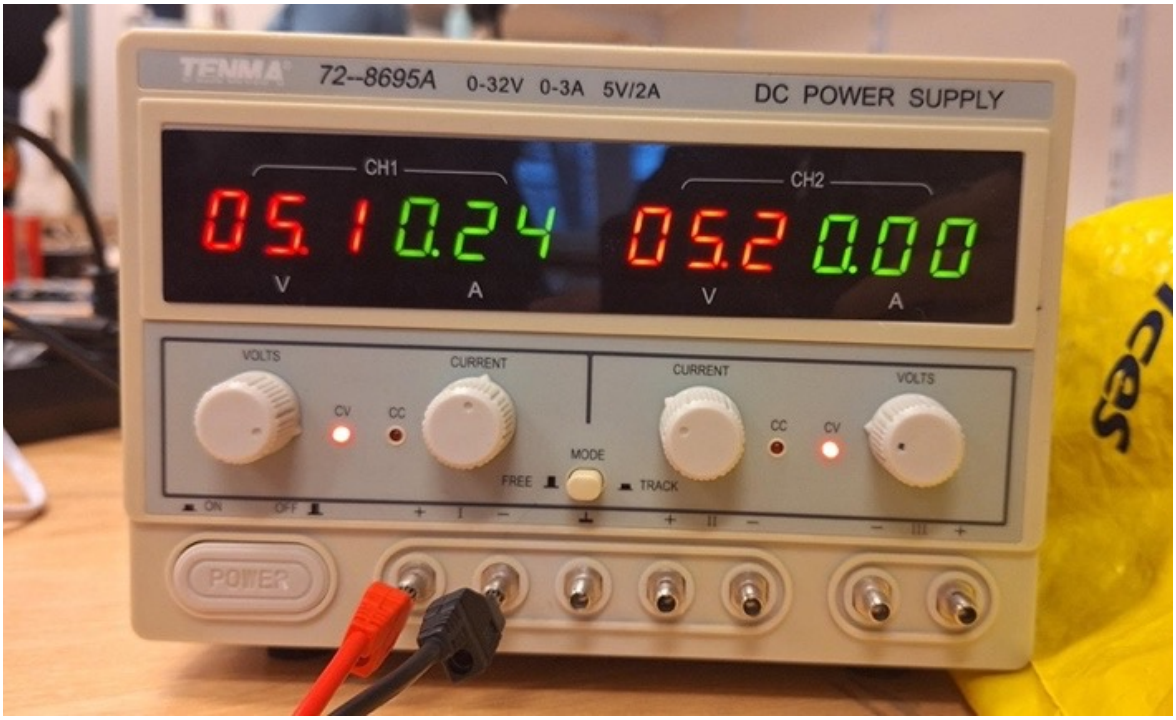


Surcharge

Le servomoteur est un instrument qui peut, dans certains cas, consommer un niveau élevé de courant, ce qui peut causer des dangers pour le reste du circuit électrique, tels qu'un manque de courant, un court-jus, un blocage des servomoteurs et autres.Généralement, quand le servomoteur est en repos, il consomme très peu (Voir exemple 1), quand il est en mouvement, son courant varie de 0.2A à 0.5A (Voir exemple 2/3) et finalement, quand il est bloqué ou qu'il y a une force qui s'exerce sur le servomoteur, il peut consommer entre 0.5A à 1A (Voir exemple 4).

Example 1

Example 2



Example 3

Example 4

5.6 Capteur de Courant

Les capteurs de courant sont couramment utilisés dans les systèmes de détection ou de sécurité, car ils offrent une solution simple, fiable et efficace pour protéger un circuit contre les surcharges ou les courts-circuits.

Structure

Dans mon cas, l'ACS712 est un capteur de courant complètement analogique qui peut supporter le courant alternatif (AC) et le courant continu (DC). Il sort une tension par rapport au champ magnétique du courant mesuré à l'aide d'un IC hall ; le courant passant dans le fil en cuivre génère un petit champ magnétique qui permet au IC hall de fournir une tension proportionnelle.

Les mesures de l'ACS712 sont faites à partir d'une tension de référence qui est égale à la moitié de la tension d'entrée, et de là les mesures sont faites. Dans mon cas, j'utilise l'ACS712-05 qui prend des mesures jusqu'à 5A avec une sensibilité de 185mV/A, ce qui veut dire que pour chaque ampère 185mV est ajouté à la tension de référence interne.

Exemple :

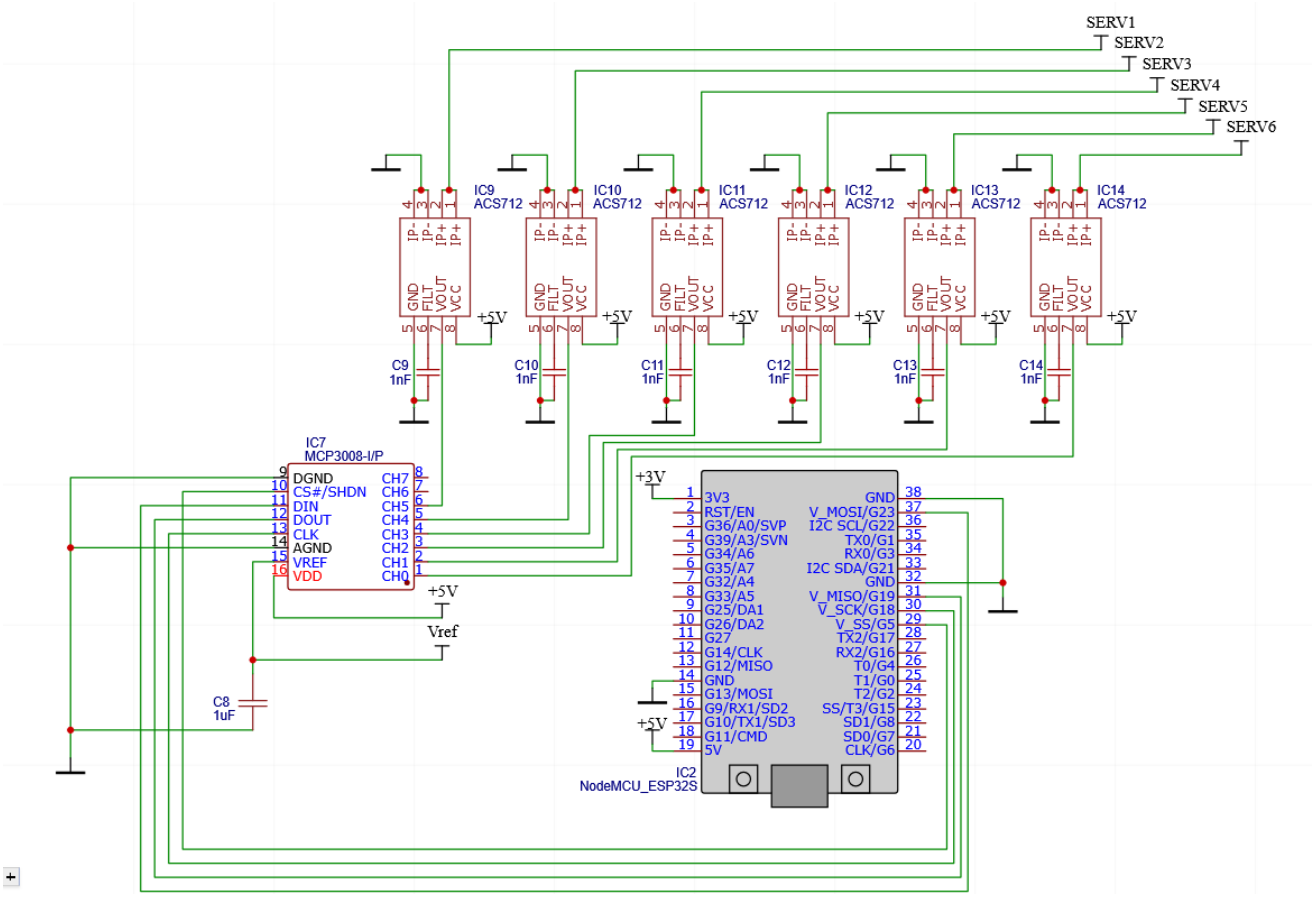
Uin = 5V
Imes = 3A
Sens = 185 mV

Uout = ((Uin/2) + (Sens * Imes))
= ((5/2) + (185m * 3))
= 2.5V+0.555V
=3.055V

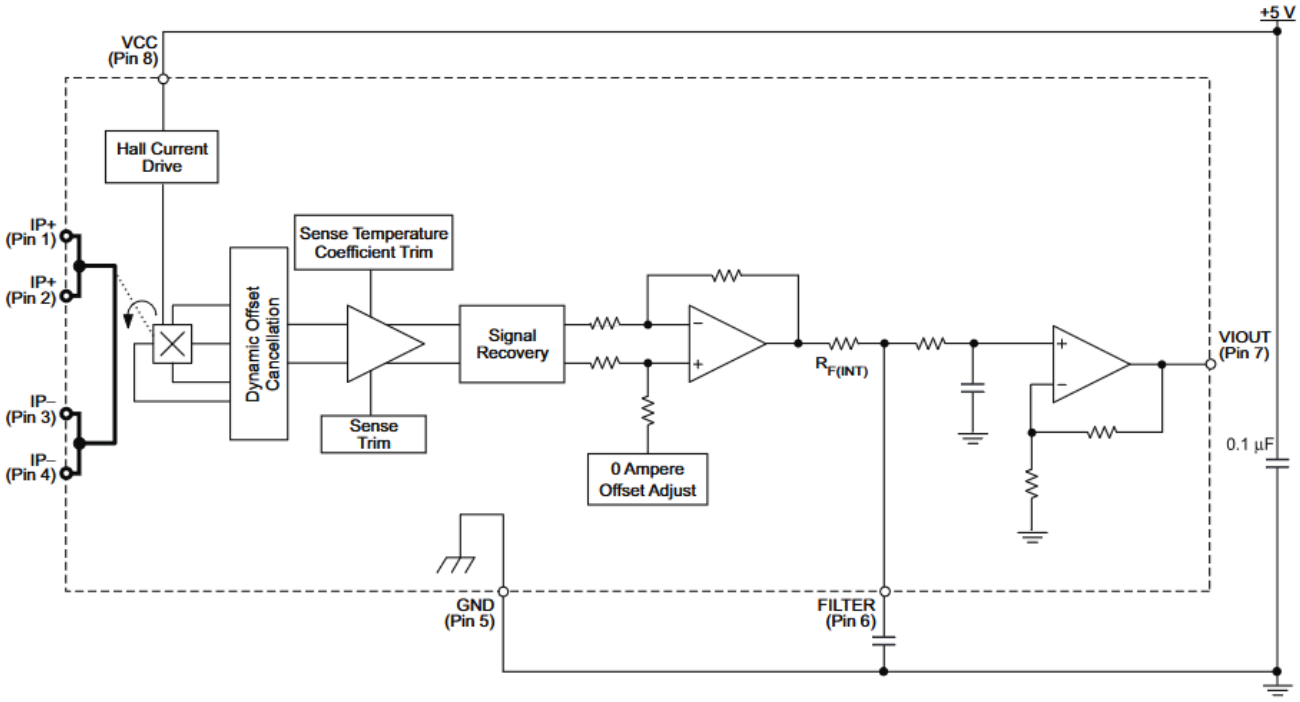
Part Number	Packing [1]	T_A (°C)	Current Sensing Range, I_P (A)	Sensitivity, Sens (Typ) (mV/A)
-S VARIANT [2]				
ACS712ELCTR-20A-S	Tape and reel, 3000 pieces/reel	–40 to 85	±20	100
ACS712ELCTR-30A-S	Tape and reel, 3000 pieces/reel	–40 to 85	±30	66
-T VARIANT [3]				
ACS712ELCTR-05B-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	–40 to 85	±5	185
ACS712ELCTR-20A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	–40 to 85	±20	100
ACS712ELCTR-30A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	–40 to 85	±30	66

Source: *ACS712-Datasheet.ashx*

Schema de fonctionnement



Schema Bloc



Source: *https://www.allegromicro.com/~/media/Files/Datasheets/ACS712-Datasheet.ashx*

Explication

- Hall Current Drive (Générateur de courant pour capteur Hall) : Alimente l'élément Hall en courant pour qu'il puisse générer une tension proportionnelle au champ magnétique (et donc au courant mesuré).

- Dynamic Offset Cancelation (Annulation dynamique de l'offset) : Corrige automatiquement les décalages (offsets) qui apparaissent dans le capteur à cause de la température, des variations de fabrication ou du vieillissement. Permet une mesure plus précise.

- Sense Temperature Coefficient Trim (Réglage du coefficient de température) : Compense les variations du signal dues à la température, pour que le capteur reste précis même quand la température change.

- Sense Trim (Ajustement de sensibilité) : Calibrage de la sensibilité du capteur en usine pour s'assurer qu'il répond exactement comme prévu à un certain champ magnétique.

- Signal Recovery (Récupération du signal) : Traite et nettoie le signal issu du capteur Hall pour le rendre plus lisible par les étages suivants (amplification, filtrage, etc.).

- 0 Ampere Offset Adjust (Ajustement de l'offset à 0 ampère) : Corrige la sortie du capteur pour qu'il donne une tension stable (ex. 2.5 V) quand aucun courant ne circule dans le fil.

- AOP différentiel (Amplificateur opérationnel différentiel) : Amplifie la différence de potentiel générée par l'effet Hall, tout en rejetant les parasites communs. Il donne un signal clair et amplifié.

- AOP non inverseur (Amplificateur non inverseur) : Amplifie encore le signal de sortie pour l'adapter au niveau de tension final (souvent 0 à 5 V). Il stabilise et met en forme le signal en sortie.

Code de test (librairie)

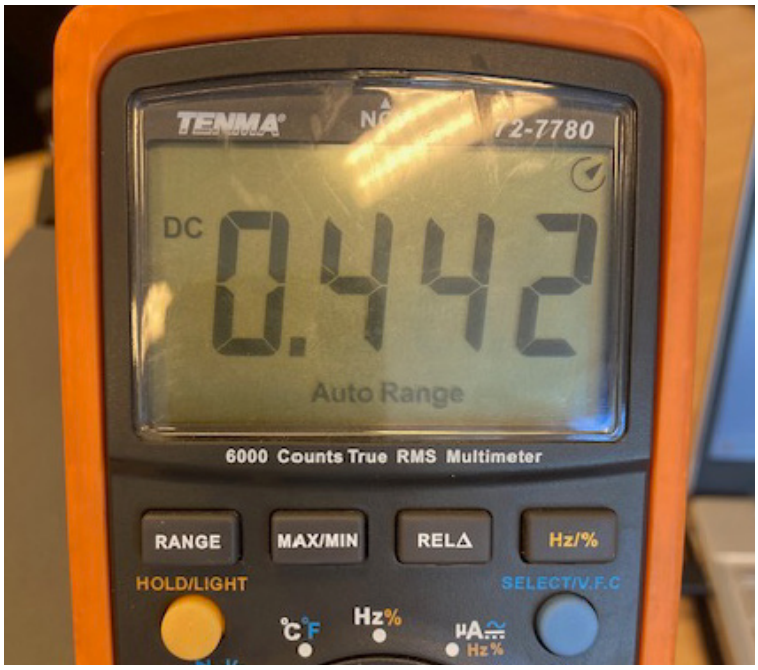
```
//
//    FILE: ACS712_20_DC.ino
//  AUTHOR: Rob Tillaart
// PURPOSE: demo to measure mA DC
//     URL: https://github.com/RobTillaart/ACS712
//
//  use with Arduino Serial Plotter

#include "ACS712.h"

//  Arduino UNO has 5.0 volt with a max ADC value of 1023 steps
//  ACS712 5A  uses 185 mV per A
//  ACS712 20A uses 100 mV per A
//  ACS712 30A uses  66 mV per A

ACS712  ACS(A0, 5.0, 1023, 100);
//  ESP 32 example (might requires resistors to step down the logic voltage)
//  ACS712  ACS(25, 3.3, 4095, 185);

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial);
  Serial.println(__FILE__);
  Serial.print("ACS712_LIB_VERSION: ");
  Serial.println(ACS712_LIB_VERSION);

  ACS.autoMidPoint();
  //  Serial.println(ACS.getMidPoint());
}

void loop()
{
  int mA = ACS.mA_DC();
  Serial.println(mA);
  delay(100);
}

//  -- END OF FILE --
```

P.S. Ce code n'est pas compatible avec une ADC externe et nécessite un module pour fonctionner, mais dans le cas où une ADC externe comme celui du MCP3008 est utilisé, un code n'est pas besoin pour un fonctionnement complet car c'est un système analogique et fonctionne indépendamment du microcontrôleur.

Liens a mon GitHub : https://github.com/RocketJGB/TFE_JGB_2025

Mesures

Dans ce cas, on peut voir la variation d'une tension par rapport au courant d'entrée et comment il réagit avec une résistance de 330 ohm et 1V d'alimentation. Avec la loi d'ohm, on peut déterminer un courant de : Uin / R = 1/ 330 = 0.00303A/3.03mA



```
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
Channel : 0      ADC_B = 1023    ADC_A = 328     Voltage = 1.603128 V    Voltage = 2.500000 V    Angle = 79 °
Channel : 1      ADC_B = 1023    ADC_A = 192     Voltage = 0.938416 V    Voltage = 2.500000 V    Angle = 11 °
Channel : 2      ADC_B = 1023    ADC_A = 349     Voltage = 1.705767 V    Voltage = 2.500000 V    Angle = 89 °
Channel : 3      ADC_B = 1023    ADC_A = 0       Voltage = 0.000000 V    Voltage = 2.500000 V    Angle = -85 °
Channel : 4      ADC_B = 5       ADC_A = 0       Voltage = 0.000000 V    Voltage = 0.009775 V    Angle = -85 °
Channel : 5      ADC_B = 1023    ADC_A = 0       Voltage = 0.000000 V    Voltage = 2.500000 V    Angle = -85 °
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
Channel : 0      ADC_B = 1023    ADC_A = 328     Voltage = 1.603128 V    Voltage = 2.500000 V    Angle = 79 °
Channel : 1      ADC_B = 1023    ADC_A = 192     Voltage = 0.938416 V    Voltage = 2.500000 V    Angle = 11 °
Channel : 2      ADC_B = 1020    ADC_A = 349     Voltage = 1.705767 V    Voltage = 2.500000 V    Angle = 89 °
Channel : 3      ADC_B = 1023    ADC_A = 0       Voltage = 0.000000 V    Voltage = 2.500000 V    Angle = -85 °
Channel : 4      ADC_B = 5       ADC_A = 0       Voltage = 0.000000 V    Voltage = 0.009775 V    Angle = -85 °
Channel : 5      ADC_B = 1022    ADC_A = 0       Voltage = 0.000000 V    Voltage = 2.500000 V    Angle = -85 °
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
Channel : 0      ADC_B = 1023    ADC_A = 329     Voltage = 1.603128 V    Voltage = 2.500000 V    Angle = 79 °
Channel : 1      ADC_B = 1023    ADC_A = 192     Voltage = 0.938416 V    Voltage = 2.500000 V    Angle = 11 °
Channel : 2      ADC_B = 1023    ADC_A = 349     Voltage = 1.705767 V    Voltage = 2.500000 V    Angle = 89 °
Channel : 3      ADC_B = 1023    ADC_A = 0       Voltage = 0.000000 V    Voltage = 2.497556 V    Angle = -85 °
Channel : 4      ADC_B = 5       ADC_A = 0       Voltage = 0.000000 V    Voltage = 0.009775 V    Angle = -85 °
Channel : 5      ADC_B = 1023    ADC_A = 0       Voltage = 0.000000 V    Voltage = 2.500000 V    Angle = -85 °
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
Channel : 0      ADC_B = 1019    ADC_A = 328     Voltage = 1.603128 V    Voltage = 2.497556 V    Angle = 79 °
Channel : 1      ADC_B = 1023    ADC_A = 192     Voltage = 0.938416 V    Voltage = 2.500000 V    Angle = 11 °
Channel : 2      ADC_B = 1019    ADC_A = 349     Voltage = 1.705767 V    Voltage = 2.500000 V    Angle = 89 °
Channel : 3      ADC_B = 1023    ADC_A = 0       Voltage = 0.000000 V    Voltage = 2.500000 V    Angle = -85 °
```

Mais dans cette circonstance, on peut observer une erreur avec la tension de référence et comment cela limite mes mesures.

Voici les résultats reçus par mon ADC (MCP3008) qui est censé montrer la fluctuation de la tension par rapport à un niveau de 2.5V et une augmentation de 185mV pour chaque ampère (A) car j'utilise le ACS712-05A avec une sensibilité de 185mV/A et il est alimenté en 5V, mais une problématique se présente avec la tension de référence de mon ADC (MCP3008) qui est limitée à 2.5V également et du coup il n'est pas capable de dépasser ce seuil.

C'est bien pour ça qu'il affiche une tension continue de 2.5V car il est incapable de détecter la variation de courant au-delà de la tension de référence (Cette erreur est facilement réparable avec un simple diviseur de tension souder au recto du PCB).

Datasheet

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Supply Voltage	V_{CC}		8	V
Reverse Supply Voltage	V_{RCC}		–0.1	V
Output Voltage	V_{IOUT}		8	V
Reverse Output Voltage	V_{RIOUT}		–0.1	V
Output Current Source	$I_{IOUT(Source)}$		3	mA
Output Current Sink	$I_{IOUT(Sink)}$		10	mA
Overcurrent Transient Tolerance	I_P	1 pulse, 100 ms	100	A
Nominal Operating Ambient Temperature	T_A	Range E	–40 to 85	°C
Maximum Junction Temperature	T_J(max)		165	°C
Storage Temperature	T_{stg}		–65 to 170	°C

COMMON OPERATING CHARACTERISTICS [1]: Over full range of T_A, C_F = 1 nF, and V_{CC} = 5 V, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
ELECTRICAL CHARACTERISTICS						
Supply Voltage	V_{CC}		4.5	5.0	5.5	V
Supply Current	I_{CC}	V_{CC} = 5.0 V, output open	–	10	13	mA
Output Capacitance Load	C_{LOAD}	VIOUT to GND	–	–	10	nF
Output Resistive Load	R_{LOAD}	VIOUT to GND	4.7	–	–	kΩ
Primary Conductor Resistance	$R_{PRIMARY}$	T_A = 25°C	–	1.2	–	mΩ
Rise Time	t_r	$I_P = I_P$(max), T_A = 25°C, C_{OUT} = open	–	3.5	–	µs
Frequency Bandwidth	f	–3 dB, T_A = 25°C; I_P is 10 A peak-to-peak	–	80	–	kHz
Nonlinearity	E_{LIN}	Over full range of I_P	–	1.5	–	%
Symmetry	E_{SYM}	Over full range of I_P	98	100	102	%
Zero Current Output Voltage	$V_{IOUT(Q)}$	Bidirectional; I_P = 0 A, T_A = 25°C	–	V_{CC} × 0.5	–	V
Power-On Time	t_{PO}	Output reaches 90% of steady-state level, T_J = 25°C, 20 A present on leadframe	–	35	–	µs
Magnetic Coupling [2]			–	12	–	G/A
Internal Filter Resistance [3]	$R_{F(INT)}$			1.7		kΩ

Source: *ACS712-Datasheet.ashx*

Explication

- Supply Voltage (Tension d’alimentation) : Tension nécessaire au fonctionnement du composant.
- Supply Current (Courant d’alimentation) : Courant consommé par le composant pendant son fonctionnement.
- Output Capacitance Load (Charge capacitive en sortie) : Capacité maximale pouvant être connectée en sortie.
- Output Resistive Load (Charge résistive en sortie) : Résistance minimale pouvant être connectée en sortie.
- Primary Conductor Resistance (Résistance du conducteur principal) : Résistance électrique du chemin principal du courant.
- Rise Time / Frequency Bandwidth (Temps de montée / Bande passante en fréquence) : Temps de réponse du signal ou plage de fréquences traitées.
- Nonlinearity (Non-linéarité) : Écart entre la réponse réelle du composant et une réponse parfaitement linéaire.
- Symmetry (Symétrie) : Équilibre entre les parties positive et négative du signal de sortie.
- Zero Current Output Voltage (Tension de sortie à courant nul) : Tension présente en sortie lorsque le courant est nul.
- Power-On Time (Temps de mise en route) : Temps nécessaire au démarrage du composant après mise sous tension.
- Magnetic Coupling (Couplage magnétique) : Influence du champ magnétique entre l’entrée et la sortie du composant.
- Internal Filter Resistance (Résistance du filtre interne) : Résistance interne liée au filtre intégré au composant.
- Reverse Supply Voltage (Tension d’alimentation inversée) : Tension inverse maximale supportée sans dommage.
- Output Voltage Reverse (Tension inverse en sortie) : Tension maximale que la sortie peut subir en polarité inversée.
- Output Current Source (Courant source en sortie) : Courant maximal que la sortie peut fournir.
- Output Current Sink (Courant absorbé en sortie) : Courant maximal que la sortie peut absorber.
- Overcurrent Transient Tolerance (Tolérance aux surintensités transitoires) : Capacité du composant à résister à un courant trop fort pendant un court moment.
- Nominal Operating Ambient Temperature (Température ambiante de fonctionnement nominale) : Température normale d’utilisation du composant.
- Maximum Junction Temperature (Température maximale de jonction) : Température maximale supportée à l’intérieur du composant.
- Storage Temperature (Température de stockage) : Plage de température pour conserver le composant hors fonctionnement.

5.7 ADC/CAN

Une ADC (Analog-to-Digital Converter) ou CAN (Convertisseur Analog-to-Numérique) est un composant ou un circuit électronique qui convertit un signal analogique en signal numérique. Il est essentiel pour l'utilisation de dispositifs analogiques avec des appareils numériques.

Fonctionnement

l'ADC fonctionne en 3 étapes :

- Le signal analogique est tiré à des intervalles définis par la fréquence d'échantillonnage ; à chacun de ces intervalles, une mesure est prise et enregistrée.

- Suite à la première étape, la plage de tension mesurable par l'ADC est divisée en niveaux discrets en fonction de la résolution et la valeur mesurée va être comparée pour pouvoir définir son niveau.

- La dernière étape consiste à traduire en binaire, dès que l'on a identifié le niveau discret correspondant à la valeur analogique mesurée, on le convertit en un code numérique binaire.Il existe 4 types de ADC qui ont tous des caractéristiques différentes:

Il existe 4 types de ADC qui ont tous des caractéristiques différentes:

Type d'ADC	Résolution absolue	Précision relative	Vitesse de conversion	SNR (Signal-to-Noise Ratio)	Sample and Hold
SAR	Moyenne (8–16 bits)	Bonne	Moyenne	Moyenne	Oui
Flash	Faible (4–12 bits)	Moyenne	Très rapide	Faible à moyenne	Non
Delta-Sigma	Très élevée (16–32 bits)	Excellente	Lente	Très élevée	Oui
Pipeline	Élevée (8–16 bits)	Bonne	Rapide	Bien	Oui

SAR ADC

Le SAR ADC fonctionne en comparant une valeur de référence à la valeur mesurée, il va ensuite faire une approximation successive, qu'il va répéter par rapport au nombre de bits. Une fois tous les bits sont traités, le SAR ADC produit un code numérique qui représente la valeur du signal d'entrée analogique.

Sigma-Delta ADC

Le Sigma-Delta ADC est un convertisseur analogique-numérique qui utilise une méthode de suréchantillonnage et de filtrage afin d'obtenir une conversion de haute précision. Son fonctionnement est basé sur la création d'un signal numérique à partir d'un signal analogique en utilisant une modulation à delta-sigma.

Flash ADC

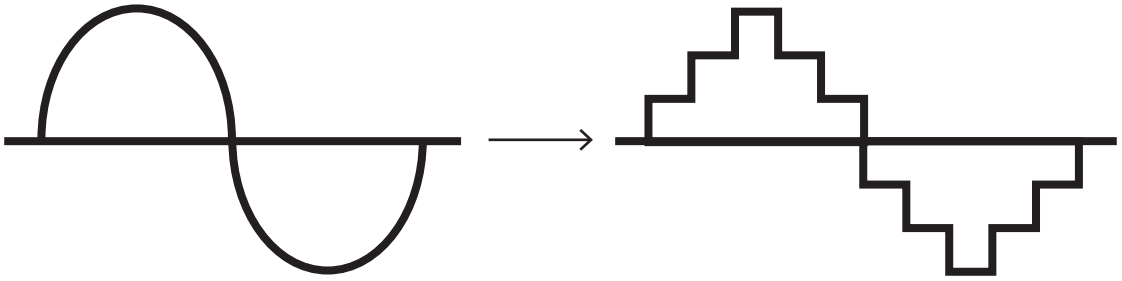
Le Flash ADC est un convertisseur analogique-numérique qui est réputé pour sa vitesse très élevée. Il emploie une architecture parallèle où plusieurs comparateurs sont utilisés en même temps pour comparer l'entrée analogique à une série de références.

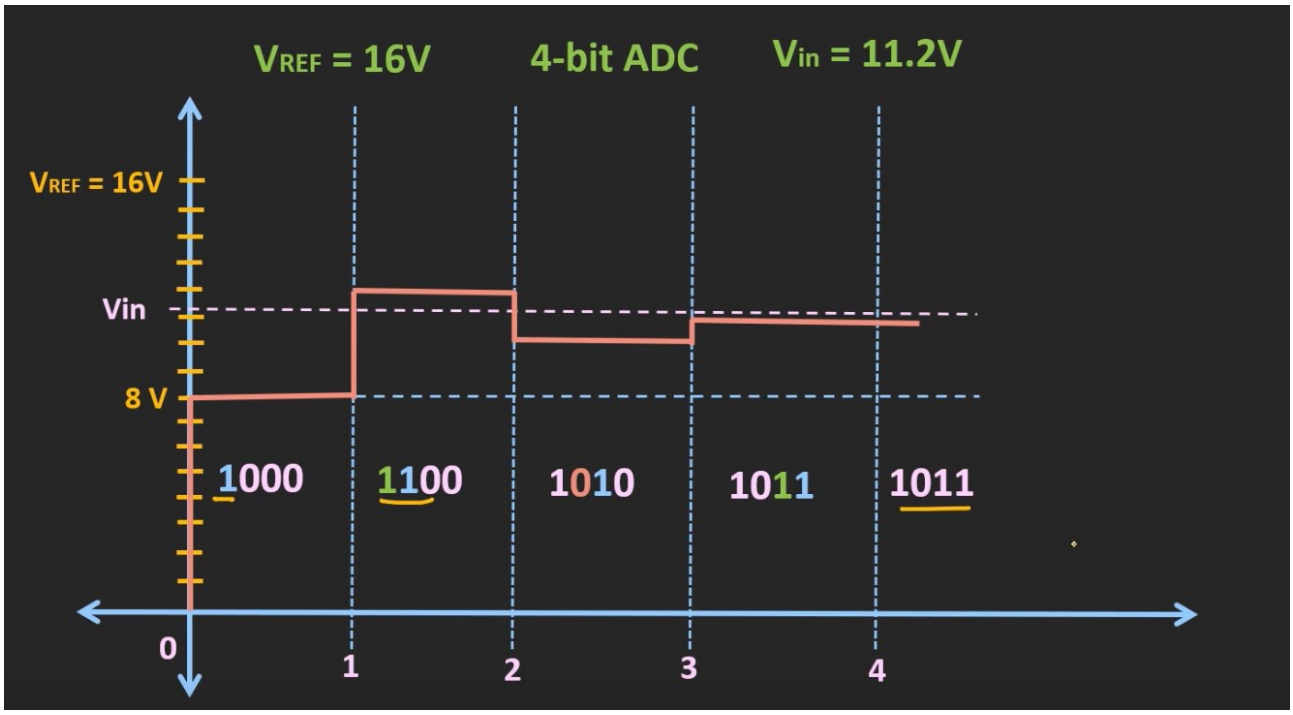
Pipeline ADC

Le Pipeline ADC est un type de convertisseur analogique-numérique qui combine des éléments de plusieurs architectures d'ADC pour offrir un compromis entre la vitesse, la résolution et la consommation d'énergie. Son principe repose sur l'utilisation d'une chaîne de plusieurs stages de conversion qui traitent le signal d'entrée de manière séquentielle, permettant ainsi une conversion rapide avec une haute résolution.

Sample and Hold

Malgré tout, un CAN/ADC est incapable de d'accepter des signaux alternatifs à son entrée, et donc pour combattre cet inconvénient, il utilise un système de "Sample and hold" qui lui permet de faire une mesure et de l'enregistrer jusqu'à la fin de l'opération. À chaque échantillon, une mesure est prise et stockée dans une mémoire RAM qui est ensuite vidée et traitée quand l'opération termine.

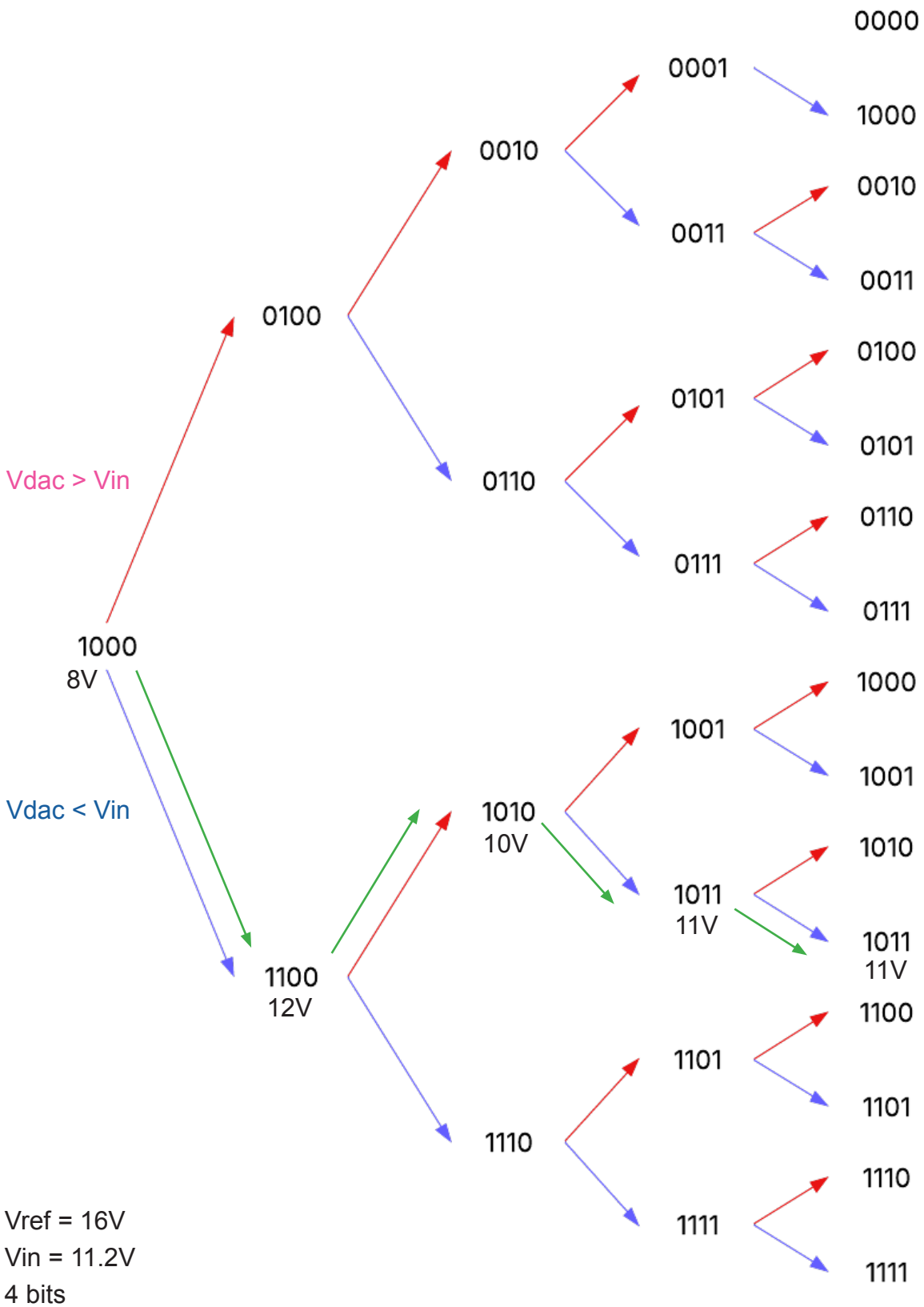




Le schéma représente le fonctionnement d'un ADC/CAN SAR (successives approximations). Ce type de convertisseur repose sur une méthode de recherche binaire pour déterminer progressivement la valeur numérique correspondant à une tension analogique d'entrée.

À chaque étape, le SAR fixe un bit à 1 en commençant avec le MSB et génère une tension via un convertisseur numérique-analogique (DAC). Cette tension est comparée à la tension d'entrée. Si la tension du DAC est inférieure à celle de l'entrée, le bit est conservé à 1 (flèches rouges) ; sinon, il est remis à 0 (flèches bleues). Ce processus se répète pour chaque bit, affinant la conversion à chaque étape. Le schéma en arbre illustre cette séquence de décisions, montrant comment l'ADC converge vers la valeur numérique la plus proche de la tension analogique.

Exemple



Vref = 16V
Vin = 11.2V
4 bits
16 niveaux

Caractéristique:

- Résolution absolue : Nombre de bits ou probabilité possible (%).
  Résolution absolue = 2n *100 (%) (n=nombre de Bits)

- Précision relative : Exactitude des résultats de conversion.
  Précision relative = Résolution absolue / Mesure * 100

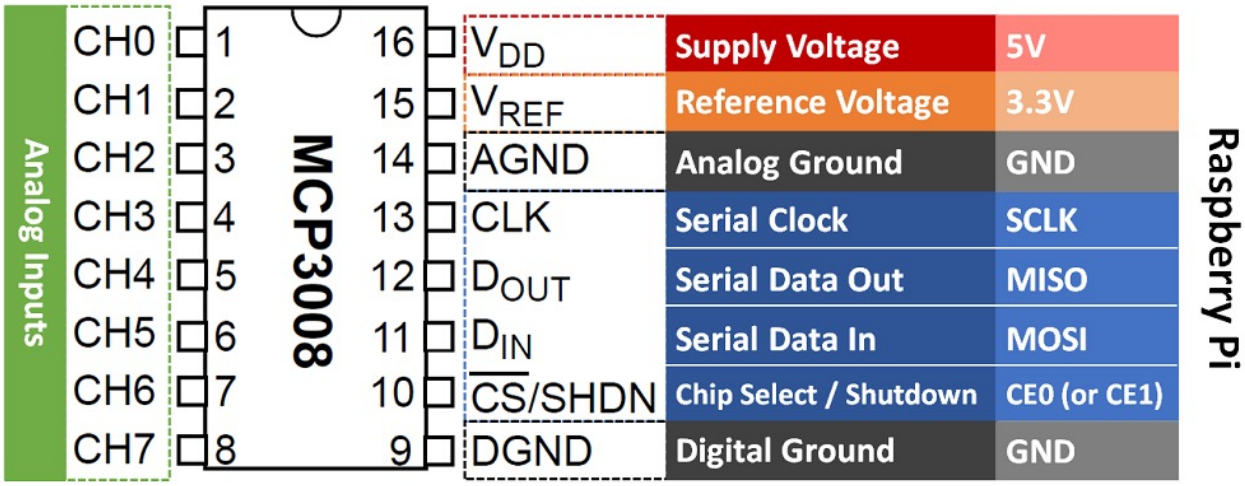
- Vitesse de conversion : Nombre d'échantillons convertis par seconde.

- Plage d'entrée : Intervalle de tensions analogiques couvert par l'ADC.

- SNR (Signal Ratio): Rapport entre le signal utile et le bruit.

- Sample and Hold : capture la valeur instantanée d'un signal analogique à un moment donné et la maintient constante jusqu'à la prochaine opération d'échantillonnage.

Rôle des signaux



Source: *https://thingsdaq.org/2022/01/24/mcp3008-with-raspberry-pi/*

VDD:	Tension d'alimentation (2.7V - 5.5V).
Vref:	Tension de référence (tension stable et précis).
AGND (Analog-Ground):	Point de référence zéro ou la masse.
MOSI (Master Out Slave In):	ligne de transmission du Master (maître) et réception du Slave (esclave) (Sortie du maître et entrée pour les esclaves).
MISO (Master In Slave Out):	ligne de transmission du Slave (esclave) et réception du Master (maître) (Sortie des esclaves et entrée pour le maître).
SCLK (Serial Clock):	L'horloge série générée par le maître qui détermine quand le signal passe ou pas, il synchronise les dispositifs entre elles. (Sortie du maître et entrée pour les esclaves).
SS (Slave Select) ou **CS** (Chip Select):	Cette ligne est utilisée par le maître pour sélectionner l'esclave (Sortie du maître et entrée pour les esclaves).
DGND (Digital-Ground):	Point de référence zéro ou la masse.
CH 0-7 (Channel 0-7):	Entrée analogique

Datasheet

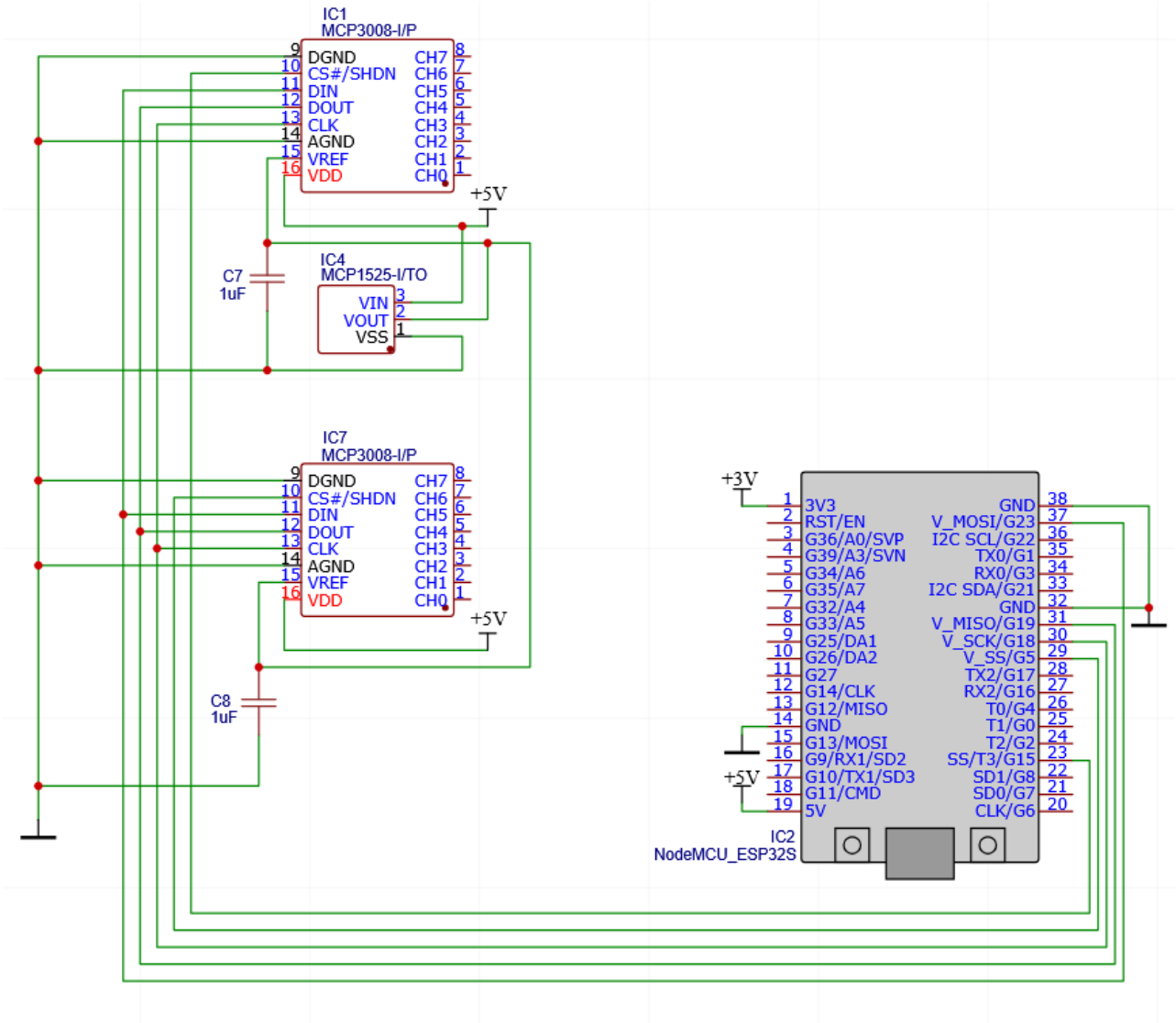
MCP3008

8-Channel 10-Bit A/D Converter with SPI Serial Interface

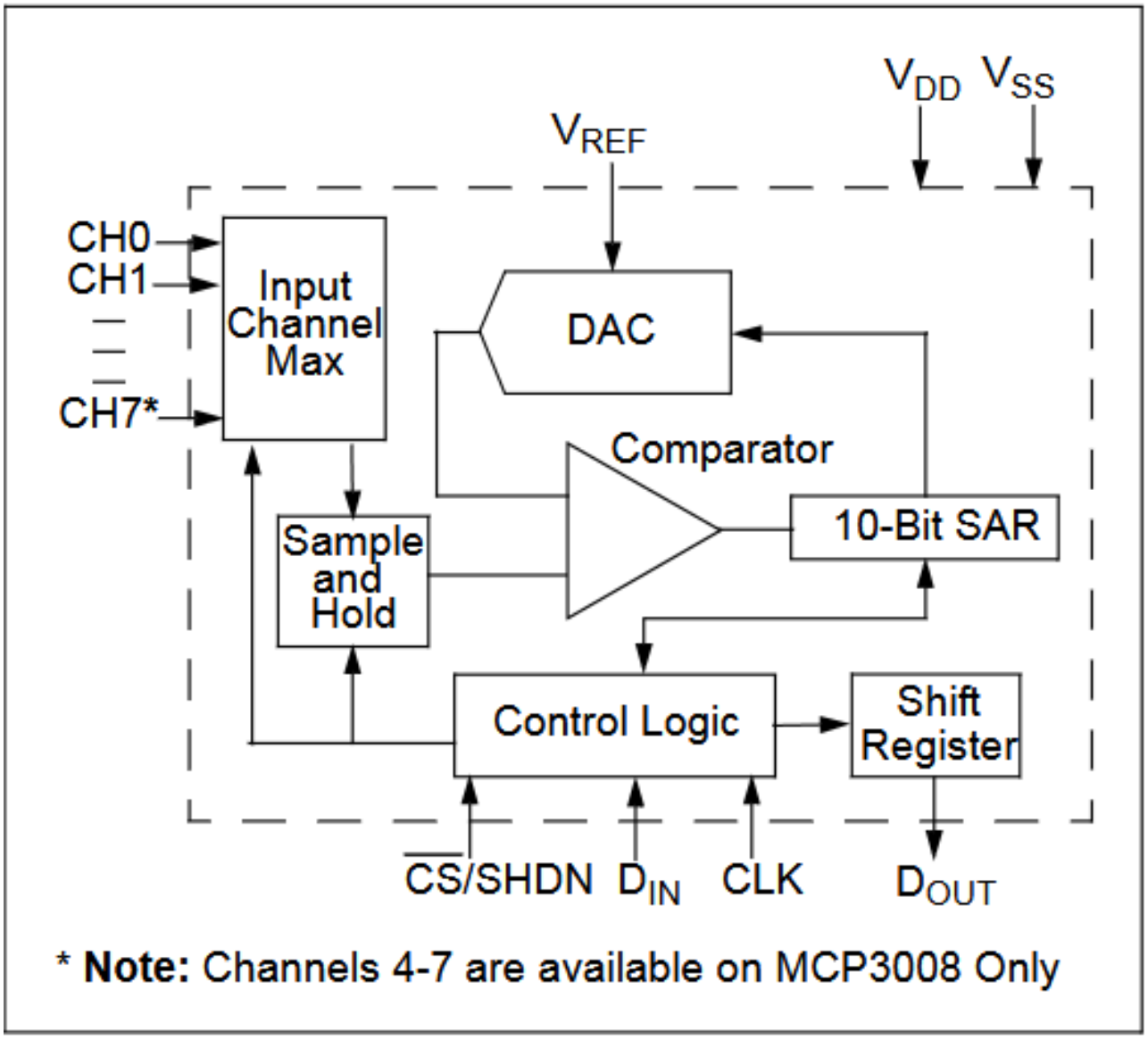
Spécifications

- Résolution 10 bits
- 1 LSB max DNL
- 1 LSB max INL
- 4 (MCP3004) ou 8 (MCP3008) canaux d’entrée
- Entrées analogiques programmables en tant que paires pseudo différentielles
- Prélever et conserver des échantillons sur puce
- Interface série SPI (modes 0,0 et 1,1)
- Alimentation simple : 2,7 V - 5,5 V
- Débit d’échantillonnage max. de 200 ksps à la VDD = 5 V
- Débit d’échantillonnage max. de 75 ksps à la VDD = 2,7 V
- Technologie CMOS basse consommation
- 5 courant de secours NA typique, 2 µA max.
- 500 µA max. courant actif à 5 V
- Température industrielle : -40 °C à +85 °C
- Disponible dans les formules PDIP, SOIC et TSSOP

Schema de fonctionnement



Schema Bloc


VDD
VSS
VREF
CH0
CH1
CH7*
Input Channel Max
DAC
Comparator
10-Bit SAR
Sample and Hold
Control Logic
Shift Register
CS/SHDN
DIN
CLK
DOUT
* Note: Channels 4-7 are available on MCP3008 Only

Explication

- Input Channel Max : Sélectionne l'un des canaux d'entrée analogique (CH0 à CH7). Sur le MCP3008, jusqu'à 8 canaux sont disponibles.

- Sample and Hold : Ce bloc prend un "échantillon" de la tension analogique sélectionnée et la garder (hold) pendant toute la durée de la conversion, pour garantir une mesure stable.

- DAC (Digital-to-Analog Converter) : Convertit la valeur binaire estimée par le registre SAR en une tension analogique à comparer avec la tension d'entrée.

- Comparator : Compare la tension analogique d'entrée à celle générée par le DAC. Le résultat est envoyé au SAR pour ajuster l'approximation.

- 10-Bit SAR (Successive Approximation Register) : Effectue la recherche binaire en fixant les bits un par un, selon les résultats du comparateur, afin de trouver la valeur numérique qui représente le plus précisément possible la tension d'entrée.

- Control Logic : Coordonne le fonctionnement des différents blocs internes, y compris le timing, la synchronisation avec les signaux externes et la gestion des données.

- Shift Register : Reçoit le résultat final de la conversion depuis le SAR, et le transfère en série vers l'extérieur via la broche DOUT.

Code de test (librairie)

Simple test

```
/**************************************************
Simple example of reading the MCP3008 analog input channels and printing them all out.

Author: Carter Nelson
License: Public Domain
**************************************************/

#include <Adafruit_MCP3008.h>

Adafruit_MCP3008 adc;

int count = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);

  Serial.println("MCP3008 simple test.");

  // Hardware SPI (specify CS, use any available digital)
  // Can use defaults if available, ex: UNO (SS=10) or Huzzah (SS=15)
  adc.begin();
  // Feather 32u4 (SS=17) or M0 (SS=16), defaults SS not broken out, must specify
  //adc.begin(10);

  // Software SPI (specify all, use any available digital)
  // (sck, mosi, miso, cs);
  //adc.begin(13, 11, 12, 10);
}

void loop() {
  for (int chan=0; chan<8; chan++) {
    Serial.print(adc.readADC(chan)); Serial.print("\t");
  }

  Serial.print("["); Serial.print(count); Serial.println("]");
  count++;

  delay(1000);
}
```

Liens a mon GitHub : https://github.com/RocketJGB/TFE_JGB_2025

Differencial

```
/**************************************************
Simple example of reading the MCP3008 analog input channels and printing them all out.

Author: Carter Nelson
License: Public Domain
**************************************************/

#include <Adafruit_MCP3008.h>

Adafruit_MCP3008 adc;

int count = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  Serial.println("MCP3008 simple test.");

  // Hardware SPI (specify CS, use any available digital)
  // Can use defaults if available
  // ex: UNO (SS=10) or Huzzah (SS=15)
  adc.begin();
  // Specify if needed or to override default
  // ex: Feather 32u4 (SS=17) or M0 (SS=16), default SS not broken out
  //adc.begin(10);

  // Software SPI (specify all, use any available digital)
  //          sck, mosi, miso, cs
  //adc.begin(13,    11,   12, 10);
}

void loop() {
  // 0: Return channel 0 minus channel 1
  // 1: Return channel 1 minus channel 0
  // 2: Return channel 2 minus channel 3
  // 3: Return channel 3 minus channel 2
  // 4: Return channel 4 minus channel 5
  // 5: Return channel 5 minus channel 4
  // 6: Return channel 6 minus channel 7
  // 7: Return channel 7 minus channel 6
  Serial.print(adc.readADCDifference(0));

  Serial.print("["); Serial.print(count); Serial.println("]");
  count++;

  delay(1000);
}
```

Mesures

Comme montré dans le code, je demande au MCP3008 (ADC) de faire une lecture des 8 channel pour ensuite les afficher dans le Serial Monitor. Comme on peut le constater en regardant le channel 2 qui est la ligne 2ème de gauche, il y a une variation des données. Dans ce cas, si les données sont exprimées en valeur brute(0V=0 / 5V = 1023), ce qui peut être converti en tension avec la formule: Vbrute * Vref / 1023 (V).

Augmentation de l'angle

min = 143 * 5 / 1023 = 0.69V

max = 674 * 5 / 1023 = 3.29V

11:09:14.096 -> 30	143	13	12	11	12	13	23	[26]
11:09:17.110 -> 24	143	11	11	10	11	12	20	[27]
11:09:20.107 -> 18	221	10	7	7	7	8	13	[28]
11:09:23.062 -> 5	314	2	3	3	2	2	4	[29]
11:09:26.096 -> 0	411	1	0	0	0	0	0	[30]
11:09:29.074 -> 0	481	0	0	0	0	0	0	[31]
11:09:32.070 -> 5	564	2	3	3	2	2	3	[32]
11:09:35.094 -> 9	674	4	4	4	4	4	6	[33]
11:09:38.103 -> 26	720	17	14	14	13	12	14	[34]
11:09:41.076 -> 22	674	9	9	9	9	10	16	[35]
11:09:44.092 -> 25	674	11	11	11	11	13	20	[36]
11:09:47.091 -> 28	674	12	12	11	12	13	21	[37]

Diminution de l'angle

min = 143 * 5 / 1023 = 0.69V

max = 674 * 5 / 1023 = 3.29V

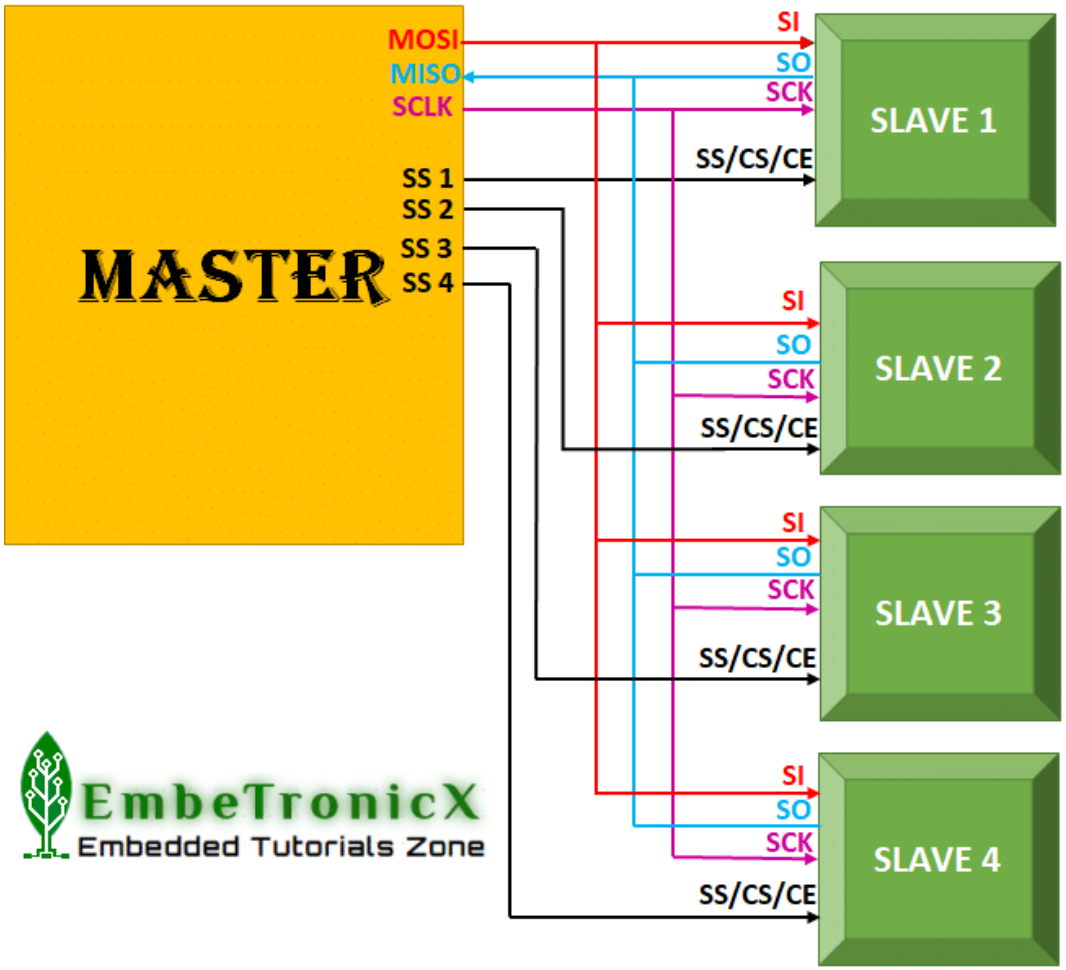
11:23:42.141 -> 15	673	6	7	6	6	7	11	[3]
11:23:43.080 -> 8	673	4	4	3	3	3	5	[4]
11:23:44.569 -> 3	673	2	2	2	1	0	1	[5]
11:23:47.159 -> 0	571	0	0	0	0	0	0	[6]
11:23:50.174 -> 0	501	0	0	0	0	0	0	[7]
11:23:53.158 -> 0	497	1	0	0	0	0	0	[8]
11:23:56.190 -> 1	501	1	1	1	1	0	1	[9]
11:23:59.156 -> 3	480	2	3	2	2	2	4	[10]
11:24:02.172 -> 7	485	3	4	3	4	3	7	[11]
11:24:05.167 -> 9	445	4	5	4	4	5	9	[12]
11:24:08.160 -> 12	266	5	6	6	5	6	11	[13]
11:24:11.178 -> 14	179	6	7	7	7	8	13	[14]
11:24:14.136 -> 15	174	7	8	7	8	8	14	[15]
11:24:17.162 -> 16	141	7	8	7	8	8	14	[16]
11:24:20.187 -> 15	141	7	7	7	7	8	13	[17]

5.8 SPI

Le SPI est un protocole ou bus de communication utilisé principalement dans l'échange rapide de données entre microcontrôleurs et périphériques tels que des capteurs, des mémoires flash, des DAC/ADC, etc.

Fonctionnement

Le SPI (Serial Peripheral Interface) est largement connu pour sa rapidité et c'est donc pour cette raison qu'il est principalement utilisé dans des systèmes qui nécessitent une transmission et lecture rapide de données. Il est capable de cette vitesse car il fonctionne en full duplex, ce qui signifie qu'il peut recevoir et envoyer en même temps car il utilise 4 lignes de communication et non 2 comme celle de l'I2C, ces 4 lignes étant MOSI (Master Out Slave In), MISO (Master In Slave Out), SCLK (Serial Clock) et SS (Slave Select).



Source: *SPI - Serial Peripheral Interface Protocol Basics*

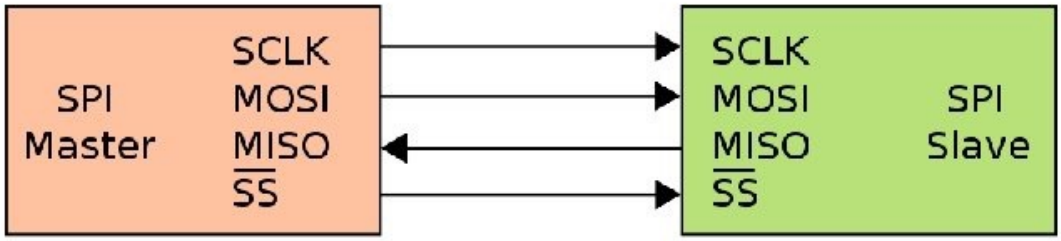
Le SPI est donc un protocole qui utilise un Master (maître) et Slave (esclave), ce qui implique que le signal est maintenu par le Master (maître), et inversement au I2C qui utilise des adresses signal. Le SPI utilise un CS (chip select) ou une adresse PIN pour pouvoir identifier les différents dispositifs. Avant tout, le protocole SPI porte quand même un désavantage tel qu'il ne peut pas fonctionner sur de longues distances et, à cause de sa vitesse élevée, il est moins fiable que d'autres bus de communication et donc il a plus de pertes.

Le mode de timing du SDI est défini par le CPOL (Clock Polarity) et le CPHA (Clock Phase), ce qui lui permet d'avoir 4 modes de vitesse.

Mode	CPOL	CPHA	Description
Mode 0	0	0	Échantillonnage sur le front montant, repos bas.
Mode 1	0	1	Échantillonnage sur le front descendant, repos bas.
Mode 2	1	0	Échantillonnage sur le front descendant, repos haut.
Mode 3	1	1	Échantillonnage sur le front montant, repos haut.

Source: *ChatGPT*

Rôle des signaux



Source: *SPI Serial Peripheral Interface SPI Serial Peripheral Interface*

MOSI (Master Out Slave In) : ligne de transmission du Master (maître) et réception du Slave (esclave) (Sortie du maître et entrée pour les esclaves).

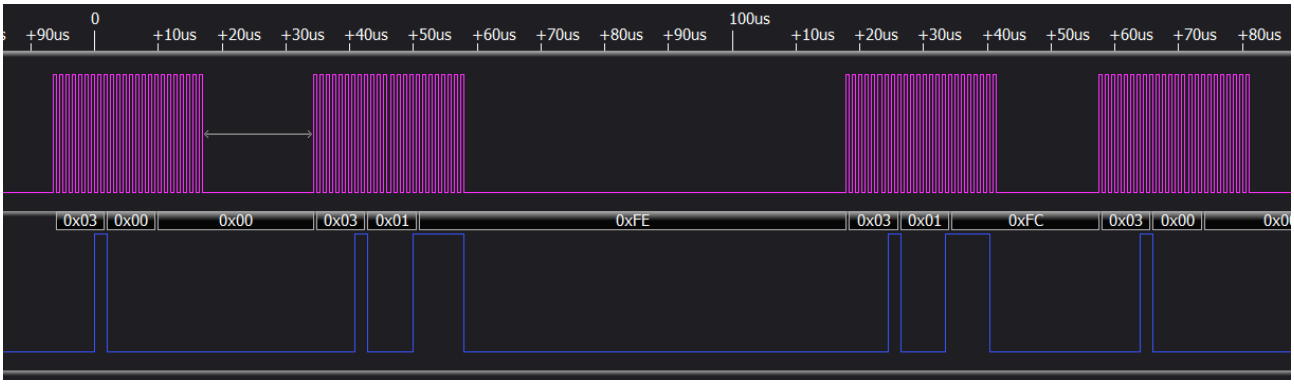
MISO (Master In Slave Out) : ligne de transmission du Slave (esclave) et réception du Master (maître) (Sortie des esclaves et entrée pour le maître).

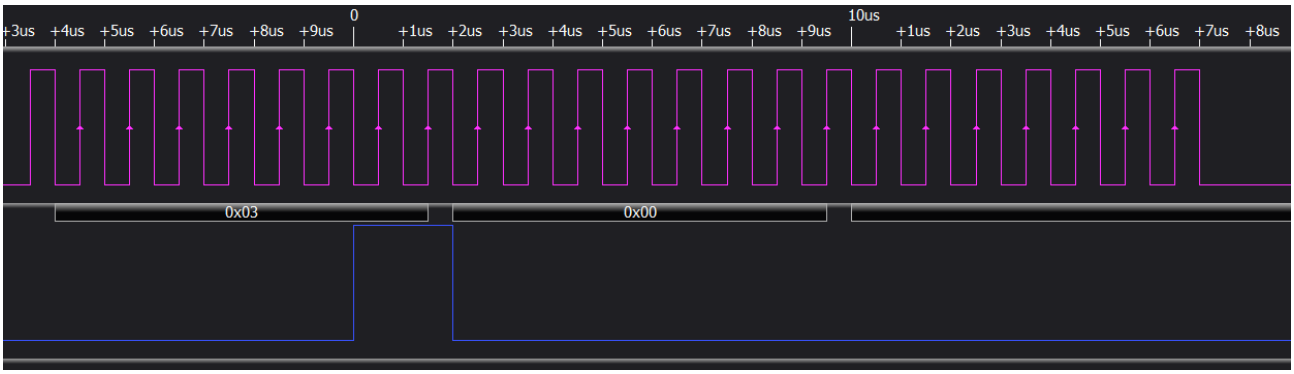
SCLK (Serial Clock) : L'horloge série générée par le maître qui détermine quand le signal passe ou pas, il synchronise les dispositifs entre elles. (Sortie du maître et entrée pour les esclaves).

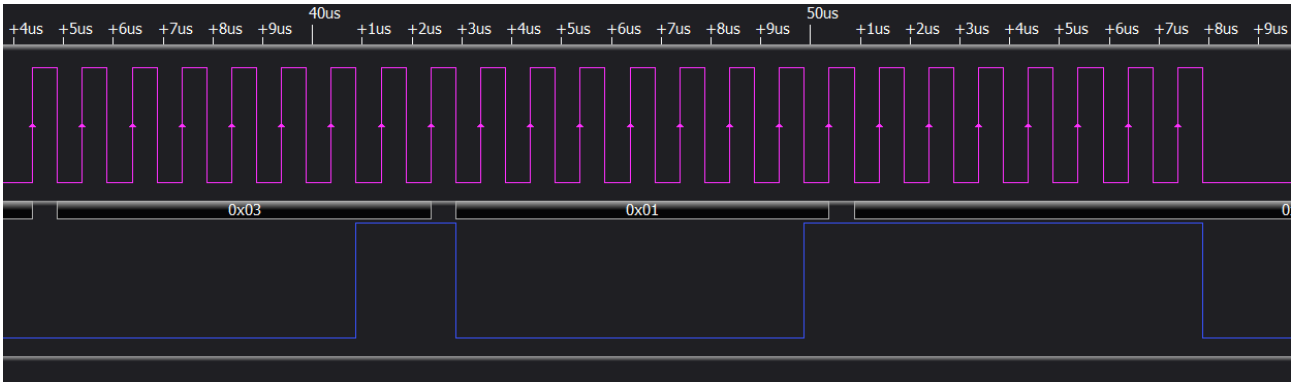
SS (Slave Select) ou CS (Chip Select) : Cette ligne est utilisée par le maître pour sélectionner l'esclave (Sortie du maître et entrée pour les esclaves).lignes de communication et non 2 comme celle de l'I2C, ces 4 lignes étant MOSI (Master Out Slave In), MISO (Master In Slave Out), SCLK (Serial Clock) et SS (Slave Select).

Mesures

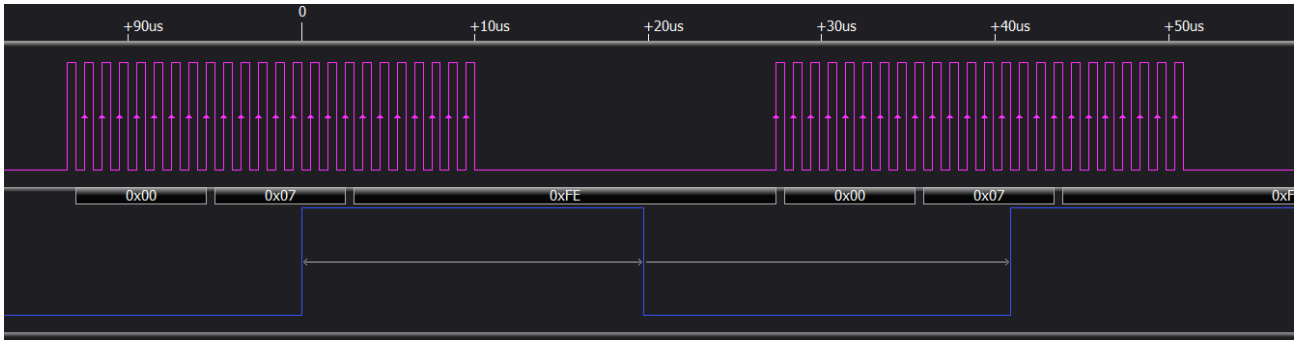
SCLK (Serial Clock) mosi (Master Out Slave In) (3.3V /1MHz /1us)

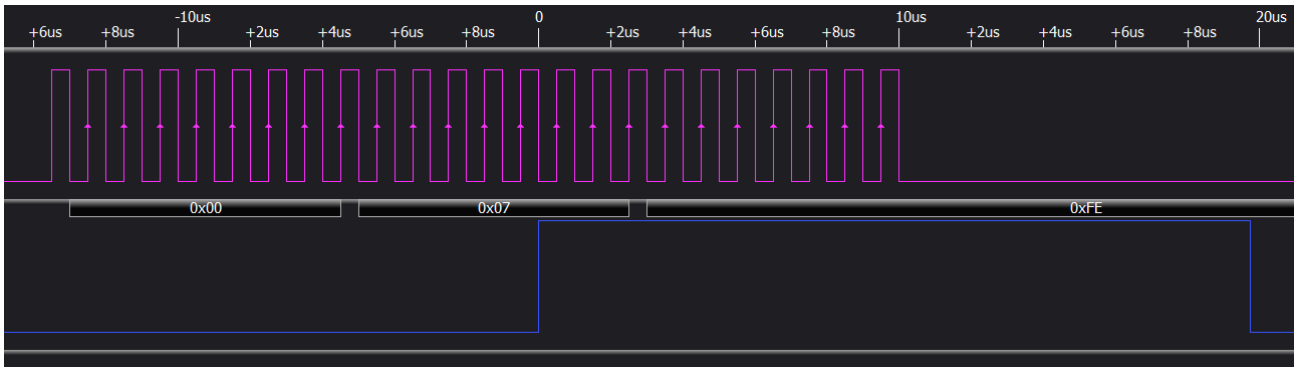






SCLK (Serial Clock) (3.3V) et MISO (Master In Slave Out) (1us / 1MHz)



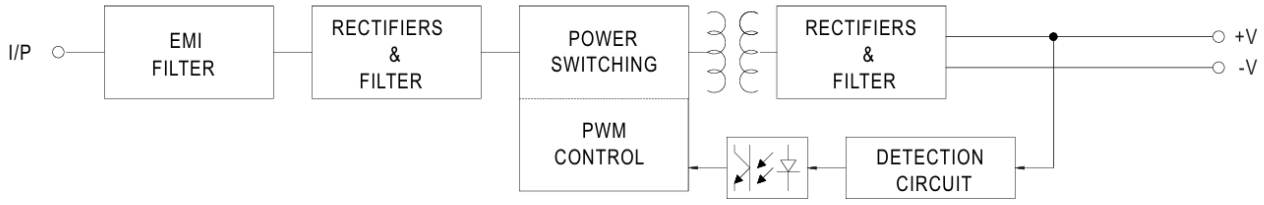


5.9 Module d’alimentation

Un module d’alimentation AC-DC permet de convertir une tension alternative (AC), généralement entre 80-300V, en un courant continu (DC).

Dans mon cas, l’IRM-30-5 est capable de supporter entre 85-305VAC et sort une tension de 5V accompagnée par un courant de 6A pour permettre une alimentation à mes servo-moteurs. L’IRM-30-5 fonctionne également en boucle fermer avec un système de sécurité.

Schema Bloc



Source: **IRM-30-20250110.cdr*

Explication

- EMI Filter (Filtre EMI) : Supprime et réduit toute perturbation électronique et bruit.

- Rectifiers & Filter (Redresseur et Filtre) : Le redresseur permet de convertir la tension alternative (AC) en tension continue (DC) et le filtre permet de purifier le signal DC converti, de toute imperfection provenant de l’alternative.

- Power switching (Commutation de puissance) : Alterne très vite entre un état haut et un état bas pour pouvoir transférer l’énergie nécessaire sans avoir de perte inutile comme dans les anciens systèmes.

- PWM Control (Contrôle PWM) : Fabrique un signal carré PWM pour pouvoir alterner la Commutation de puissance (power switch).

- Detection circuit (Cercuit de détection) : Mesure la sortie et assure une sortie stable et correcte, sinon il notifie la circuit de commande.

Datasheet

MODEL		IRM-30-5 □	IRM-30-12 □	IRM-30-15 □	IRM-30-24 □	IRM-30-48 □
OUTPUT	DC VOLTAGE	5V	12V	15V	24V	48V
	RATED CURRENT	6A	2.5A	2A	1.3A	0.63A
	CURRENT RANGE	0 ~ 6A	0 ~ 2.5A	0 ~ 2A	0 ~ 1.3A	0 ~ 0.63A
	RATED POWER	30W	30W	30W	31.2W	30.2W
	RIPPLE & NOISE (max.) Note.2	120mVp-p	150mVp-p	200mVp-p	240mVp-p	300mVp-p
	VOLTAGE TOLERANCE Note.3	±2.5%	±2.5%	±2.5%	±2.5%	±2.5%
	LINE REGULATION	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%
	LOAD REGULATION	±1.0%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%
	SETUP, RISE TIME	1000ms, 30ms/230VAC 1500ms, 30ms/115VAC at full load				
	HOLD UP TIME (Typ.)	40ms/230VAC 12ms/115VAC at full load				
INPUT	VOLTAGE RANGE	85 ~ 305VAC				
	FREQUENCY RANGE	47 ~ 440Hz				
	EFFICIENCY (Typ.)	83%	88%	88%	88.5%	90%
	AC CURRENT (Typ.)	0.75A/115VAC 0.5A/230VAC 0.375A/277VAC				
	INRUSH CURRENT (Typ.)	COLD START 25A/115VAC 45A/230VAC				
	LEAKAGE CURRENT	< 0.25mA/277VAC				

Source: **IRM-30-20250110.cdr*

Explication

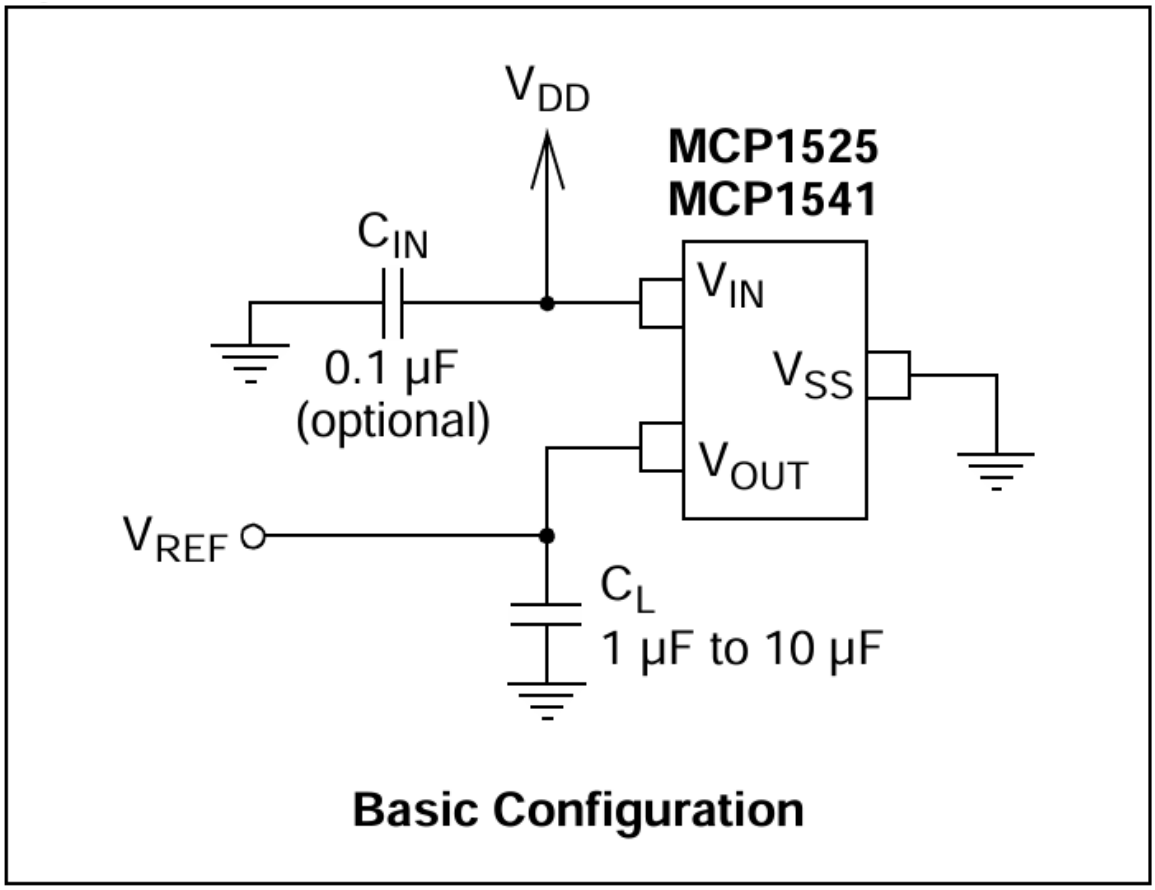
- DC voltage : Tension de sortie
- Rated Current: Courant de sortie
- Current range: Plage du courant de sortie
- Rated power: Puissance de sortie
- Ripple/Noise : Bruit de sortie
- Voltage tolérance : Pourcentage de variation minimum possible à la sortie
- Line regulation: Influence de variation à l’entrée sur la sortie
- Load regulation: Influence de variation entre le courant de sortie et la tension de sortie exprimée en %/mA
- Setup/Rise time: Temps d’activation et de chargement
- Hold up time: Temps minimum pour garder le signal stable
- Voltage range : Tension d’entrée
- Frequency range: Frequence d’entrée
- Efficiency : Pourcentage de la puissance utile sur la puissance d’entrée (affecte la chaleur)
- AC current: Courant d’entrée
- Inrush current: Pointe de courant au lancement
- Leakage current: Perte de courant négligeable

Tension de référence

Une référence de tension est principalement dans des systèmes qui nécessite une tension stable et sans perturbation pour pouvoir accomplir leurs tâches, dans mon cas je l'utilise pour faire mes mesures avec mes ADCs.

Également ma référence de tension, le MCP1525 utilise un design CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) pour ses circuits et un EPROM trimming (Erasable Programmable Read-Only Memory) pour pouvoir atteindre une très haute précision avec une sortie de 2.5V et 2mA approximative, et une entrée de 2.7V-5.5V.

Circuit d'application typique



Source: **21653C.book*

Le MCP1525 fournit une tension fixe et stable de 2,5V. Il fonctionne avec une tension d'entrée entre 2,7V et 5,5V, et ne nécessite aucun réglage. Un condensateur est utilisé pour filtrer le signal de toute imperfection. C'est une solution simple et fiable pour obtenir une tension de référence propre.

Explication

- Output Voltage : Tension de sortie fixe ou réglable selon le modèle.
- Output Voltage Drift : Variation lente de la tension de sortie due aux changements de température ou de temps.
- Long-Term Output Stability : Stabilité de la tension de sortie sur une longue période.
- Load Regulation : Variation de la tension de sortie en fonction du courant consommé.
- Output Voltage Hysteresis : Écart entre les seuils d'activation et de désactivation de la sortie.
- Maximum Load Current : Courant maximal que le régulateur peut fournir en continu.
- Dropout Voltage : Différence minimale entre la tension d'entrée et la tension de sortie pour un fonctionnement correct.
- Line Regulation : Influence des variations de la tension d'entrée sur la tension de sortie.
- Input Voltage : Plage de tension d'alimentation acceptée par le régulateur.
- Input Current : Courant absorbé par le régulateur, selon les conditions de charge.

Datasheet

Electrical Characteristics: Unless otherwise indicated, T_A = +25°C, V_{IN} = 5.0V, V_{SS} = GND, I_{OUT} = 0 mA and C_L = 1 µF.						
Parameter	**Sym**	**Min**	**Typ**	**Max**	**Units**	**Conditions**
Output						
Output Voltage, **MCP1525**	V_{OUT}	2.475	2.5	2.525	V	2.7V ≤ V_{IN} ≤ 5.5V
Output Voltage, **MCP1541**	V_{OUT}	4.055	4.096	4.137	V	4.3V ≤ V_{IN} ≤ 5.5V
Output Voltage Drift	TCV_{OUT}	—	27	50	ppm/°C	T_A = -40°C to 85°C **(Note 1)**
Long-Term Output Stability	V_{OUT}	—	2	—	ppm/hr	Exposed 1008 hrs @ +125°C (see Figure 1-1), measured @ +25°C
Load Regulation	$\Delta V_{OUT}/\Delta I_{OUT}$	—	0.5	1	mV/mA	I_{OUT} = 0 mA to -2 mA
	$\Delta V_{OUT}/\Delta I_{OUT}$	—	0.6	1	mV/mA	I_{OUT} = 0 mA to 2 mA
	$\Delta V_{OUT}/\Delta I_{OUT}$	—	—	1.3	mV/mA	I_{OUT} = 0 mA to -2 mA, T_A = -40°C to 85°C
	$\Delta V_{OUT}/\Delta I_{OUT}$	—	—	1.3	mV/mA	I_{OUT} = 0 mA to 2 mA, T_A = -40°C to 85°C
Output Voltage Hysteresis	V_{HYS}	—	115	—	ppm	**Note 2**
Maximum Load Current	I_{SC}	—	±8	—	mA	T_A = -40°C to 85°C, V_{IN} = 5.5V
Input-to-Output						
Dropout Voltage	V_{DROP}	—	137	—	mV	I_{OUT} = 2 mA
Line Regulation	$\Delta V_{OUT}/\Delta V_{IN}$	—	107	300	µV/V	V_{IN} = 2.7V to 5.5V for **MCP1525**, V_{IN} = 4.3V to 5.5V for **MCP1541**
	$\Delta V_{OUT}/\Delta V_{IN}$	—	—	350	µV/V	V_{IN} = 2.7V to 5.5V for **MCP1525**, V_{IN} = 4.3V to 5.5V for **MCP1541**, T_A = -40°C to 85°C
Input						
Input Voltage, MCP1525	V_{IN}	2.7	—	5.5	V	T_A = -40°C to 85°C
Input Voltage, MCP1541	V_{IN}	4.3	—	5.5	V	T_A = -40°C to 85°C
Input Current	I_{IN}	—	86	100	µA	No load
	I_{IN}	—	95	120	µA	No load, T_A = -40°C to 85°C

MCP1525, MCP1541 (TO-92-3)	**MCP1525, MCP1541** (SOT-23-3)	**Symbol**	**Description**
3	1	V_{IN}	Input Voltage (or Positive Power Supply)
2	2	V_{OUT}	Output Voltage (or Reference Voltage)
1	3	V_{SS}	Ground (or Negative Power Supply)

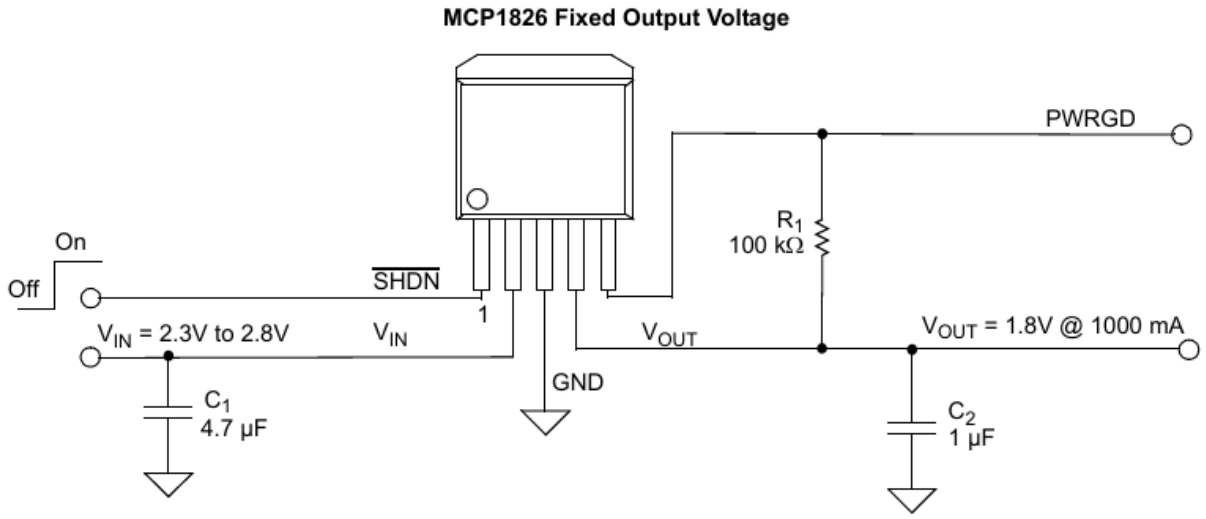
Source: **21653C.book*

Regulateur lineaire

Un régulateur de tension sert à convertir une tension d'entrée variable en une tension de sortie stable et précise, afin d'alimenter correctement les composants électroniques.

Le MCP1826 est un régulateur de tension linéaire qui convertit une tension d'entrée de 2,3V à 6V en une sortie stable de 3.3V, permettant d'alimenter des circuits électroniques avec un courant allant jusqu'à 1A. Le fait qu'il soit linéaire veut dire qu'il ajuste la tension d'entrée de manière proportionnelle et continue, donc il est plus fiable et garde une sortie stable.

Application

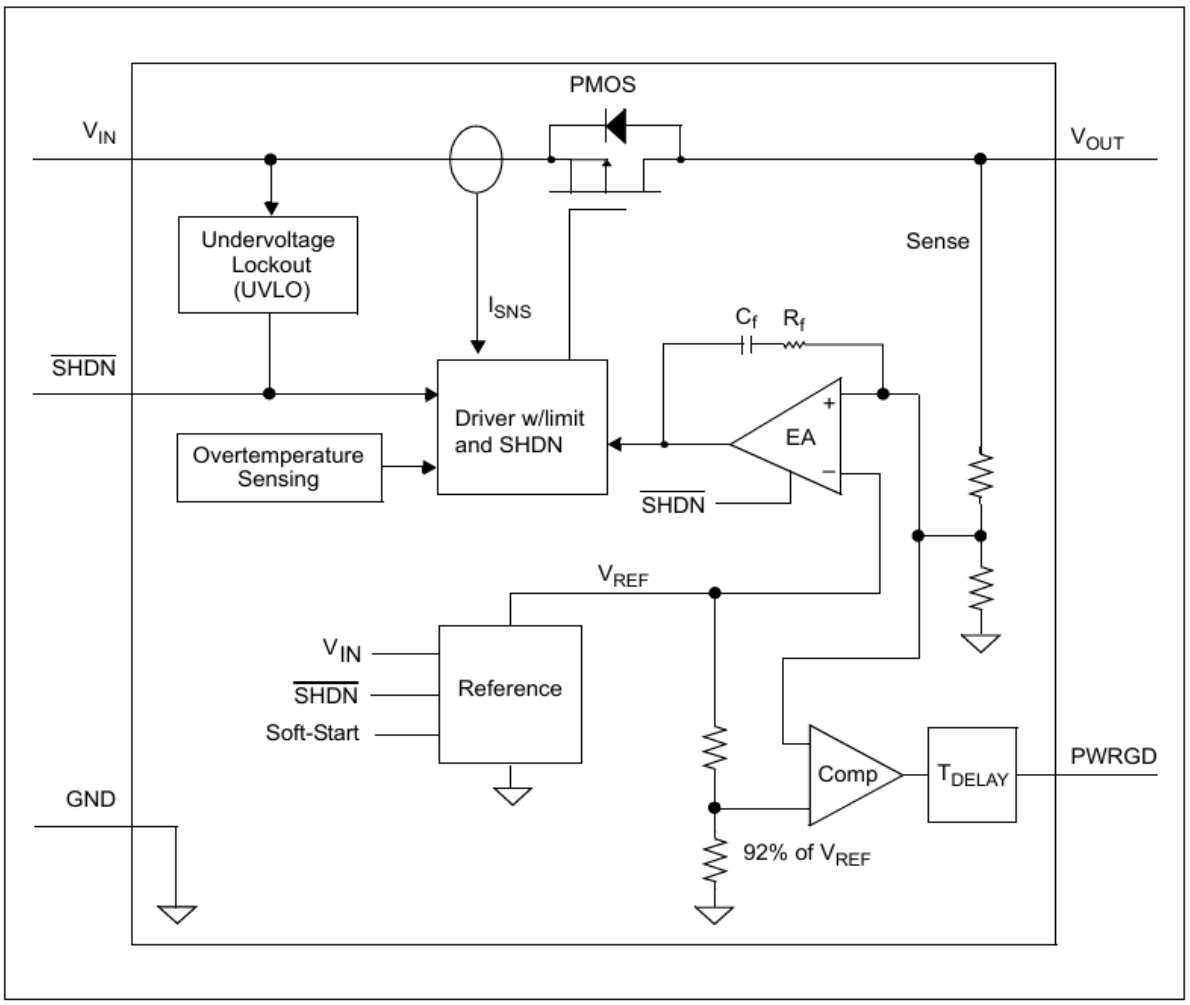


Source: *MCP1826/MCP1826S Data Sheet*

Ce circuit permet de fournir une tension de sortie stable de 3,3V à partir d'une tension d'entrée comprise entre 2,3V et 6V. La broche EN (Enable) permet d'activer ou désactiver le régulateur selon les besoins du système.

La broche PWRGD signale si la tension de sortie est correcte, à l'aide d'une résistance de pull-up connectée à Vout. Des condensateurs de découplage en entrée et en sortie assurent la stabilité et la filtration du signal. Ce montage fournit une alimentation propre, simple et fiable pour le circuits électroniques.

Schema Bloc



Source: *MCP1826/MCP1826S Data Sheet*

Explication

- Undervoltage lockout (UVLO/Verrouillage en cas de sous-tension) : Système de protection, si la tension d'entrée baisse sous un certain niveau, le UVLO bloque la sortie pour protéger le circuit.

- Driver w/limit and SHDN (Driver avec limitation/Shutdown) : Système de protection, s'il détecte un court-circuit ou une surcharge à la sortie, il coupe le courant de sortie pour protéger le circuit.

- Overtemperature sensing (Détection de surchauffe) : Système de protection : surveille la température interne, désactive ou redémarre le système pour protéger le composant.

- Reference (Référence de tension) : Produit une tension stable de référence pour permettre une mesure précise pour le comparateur.

- Error Amplifier (EA/Amplificateur d'erreur) : Compare la sortie avec la référence de tension et amplifie la différence et/ou l'erreur pour garder la sortie stable.

- Compensation (Comp) : Assure que le système de rétroaction (Mesure) reste stable par rapport aux variations dans la charge (load).

- Delay Time (Temps de retard) : Permet un délai au début et à la fin du lancement du système pour offrir un temps pour stabiliser la sortie.

Datasheet

Electrical Specifications: Unless otherwise noted, $V_{IN} = V_{OUT(MAX)} + V_{DROPOUT(MAX)}$, **Note 1**, V_R=1.8V for Adjustable Output, I_{OUT} = 1 mA, $C_{IN} = C_{OUT}$ = 4.7 µF (X7R Ceramic), T_A = +25°C. **Boldface** type applies for junction temperatures, T_J (**Note 7**) of **-40°C to +125°C**						
Parameters	**Sym.**	**Min.**	**Typ.**	**Max.**	**Units**	**Conditions**
Input Operating Voltage	V_{IN}	**2.3**		**6.0**	V	**Note 1**
Input Quiescent Current	I_q	—	120	**220**	µA	I_L = 0 mA, V_{OUT} = 0.8V to 5.0V
Input Quiescent Current for $\overline{SHDN}$ Mode	$I_{\overline{SHDN}}$	—	0.1	**3**	µA	$\overline{SHDN}$ = GND
Maximum Output Current	I_{OUT}	**1000**	—	—	mA	V_{IN} = 2.3V to 6.0V V_R = 0.8V to 5.0V, **Note 1**
Line Regulation	$\Delta V_{OUT}/(V_{OUT} \times \Delta V_{IN})$	—	±0.05	±0.**20**	%/V	(**Note 1**) ≤ V_{IN} ≤ 6V
Load Regulation	$\Delta V_{OUT}/V_{OUT}$	**-1.0**	±0.5	**1.0**	%	I_{OUT} = 1 mA to 1000 mA, (**Note 4**)
Output Short Circuit Current	I_{OUT_SC}	—	2.2	—	A	R_{LOAD} < 0.1Ω, Peak Current
Adjust Pin Characteristics (Adjustable Output Only)						
Adjust Pin Reference Voltage	V_{ADJ}	**0.402**	0.410	**0.418**	V	V_{IN} = 2.3V to V_{IN} = 6.0V, I_{OUT} = 1 mA
Adjust Pin Leakage Current	I_{ADJ}	-10	±0.01	+10	nA	V_{IN} = 6.0V, V_{ADJ} = 0V to 6V
Adjust Temperature Coefficient	TCV_{OUT}	—	40	—	ppm/°C	**Note 3**
Fixed-Output Characteristics (Fixed Output Only)						
Voltage Regulation	V_{OUT}	**V_R - 2.5%**	V_R ±0.5%	**V_R + 2.5%**	V	**Note 2**

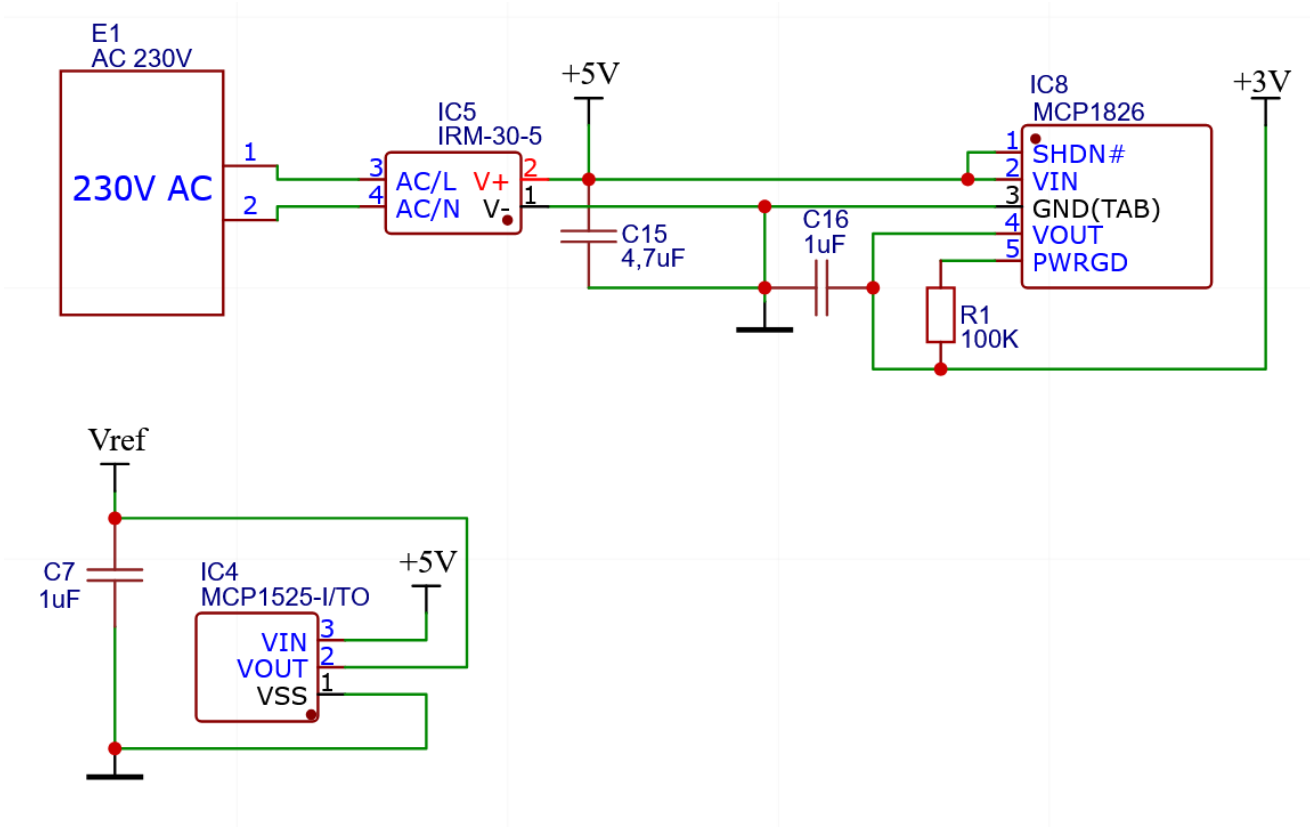
Explication:

- Input Operating Voltage : plage de tension d'entrée supportée par le régulateur.
- Input Quiescent Current : courant consommé par le régulateur sans charge.
- Input Quiescent Current in SHDN Mode : courant consommé quand le régulateur est désactivé.
- Maximum Output Current : courant maximal que le régulateur peut fournir.
- Line Regulation : variation de la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée.
- Load Regulation : variation de la tension de sortie selon le courant de charge.
- Output Short Circuit Current : courant limité en cas de court-circuit en sortie.

3-Pin Fixed Output	**5-Pin Fixed Output**	**Adjustable Output**	**Name**	**Description**
—	1	1	$\overline{SHDN}$	Shutdown Control Input (active-low)
1	2	2	V_{IN}	Input Voltage Supply
2	3	3	GND	Ground
3	4	4	V_{OUT}	Regulated Output Voltage
—	5	—	PWRGD	Power Good Output
—	—	5	ADJ	Voltage Adjust/Sense Input
Exposed Pad	Exposed Pad	Exposed Pad	EP	Exposed Pad of the Package (ground potential)

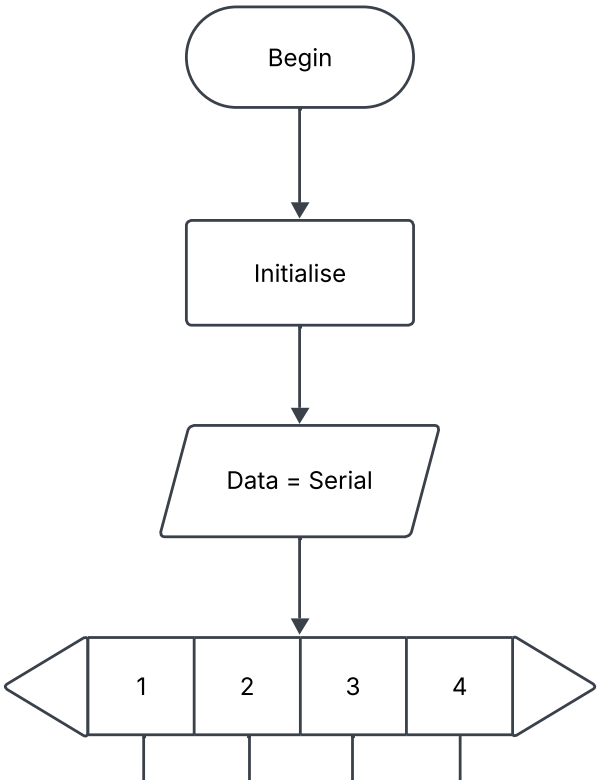
Source: *MCP1826/MCP1826S Data Sheet*

Schema de fonctionnement

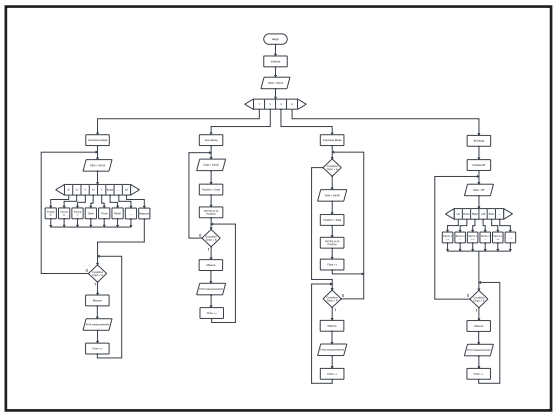


6. Ordinogramme

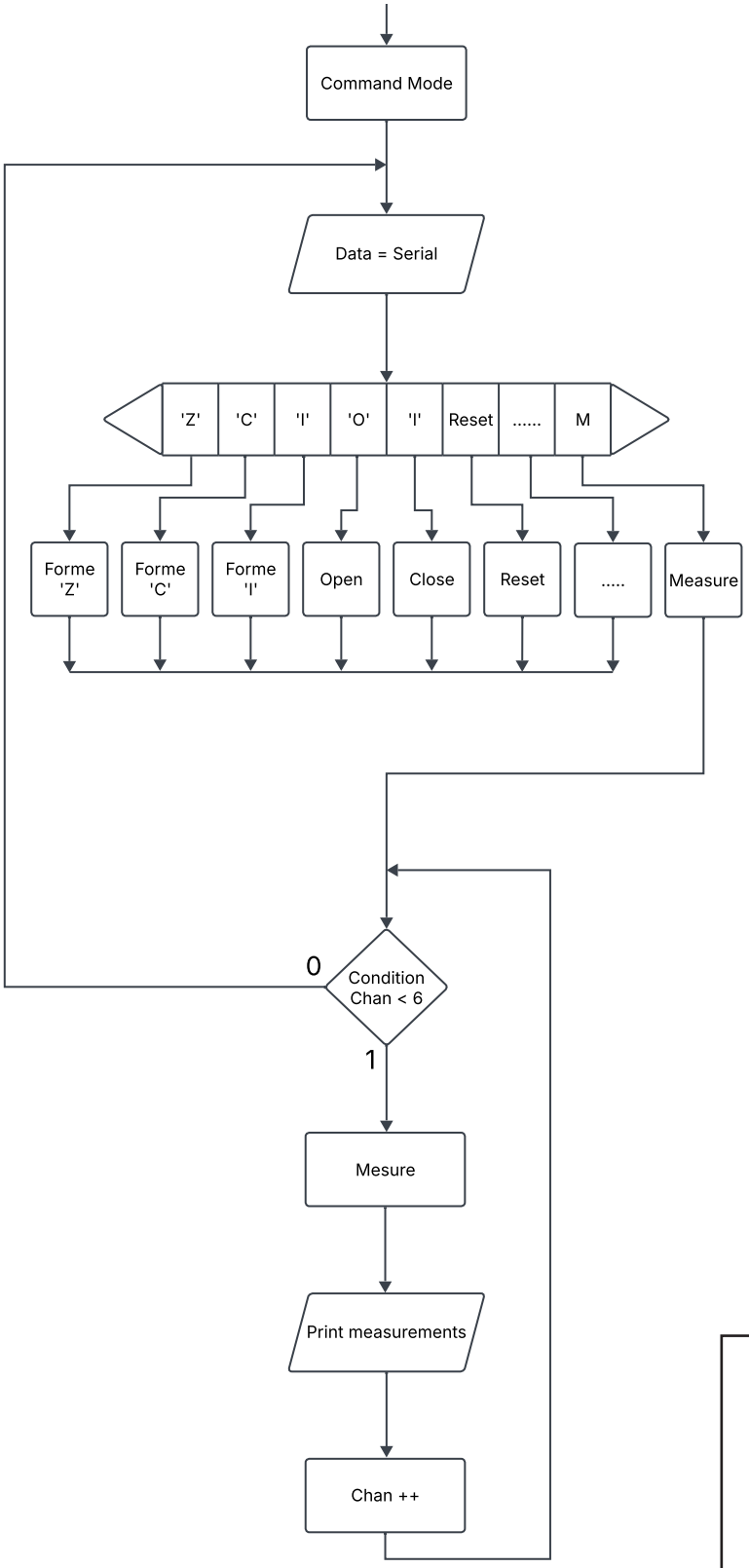
6.1 Setup

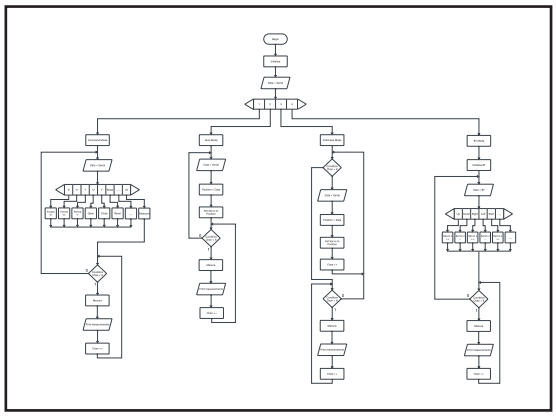


Ceci est le setup de mon code, l'ordinateur est sous-développeur mais pour plus d'informations sur comment et ce que je lance plus précisément, voici le lien à mon GitHub :
https://github.com/RocketJGB/TFE_JGB_2025

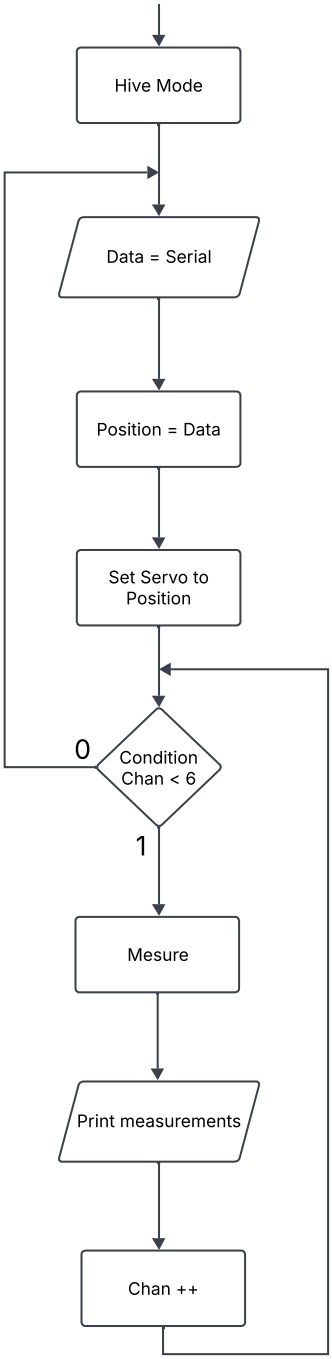


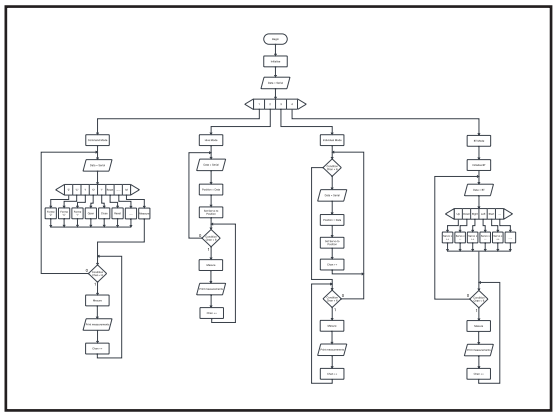
6.2 Mode 1 (command mode)



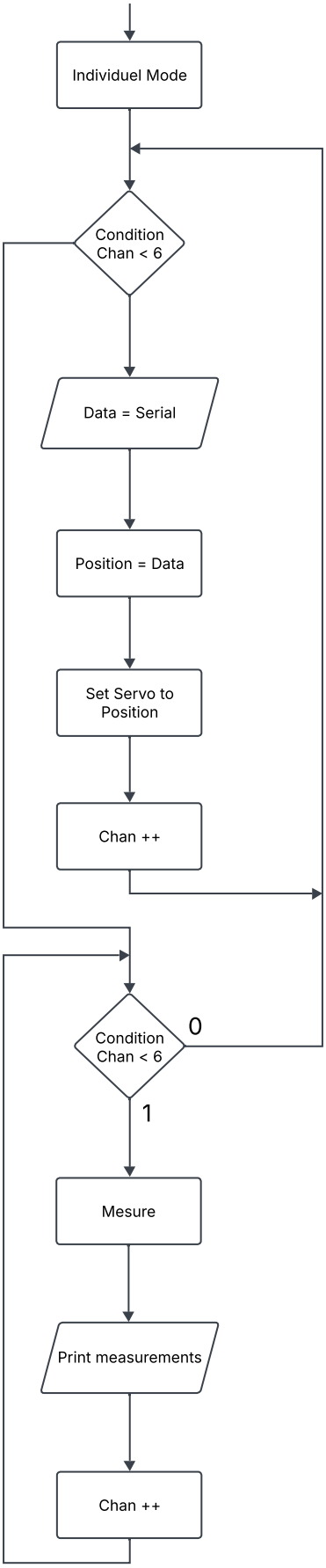


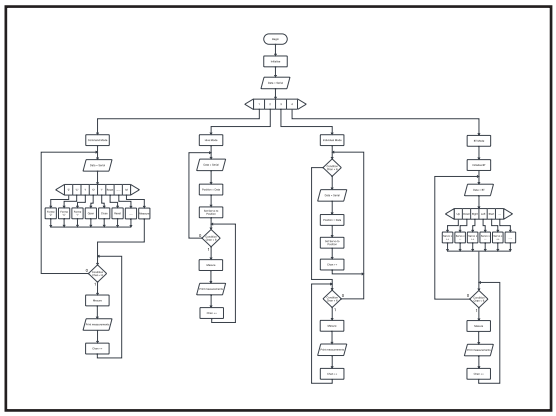
6.3 Mode 2 (hive mode)



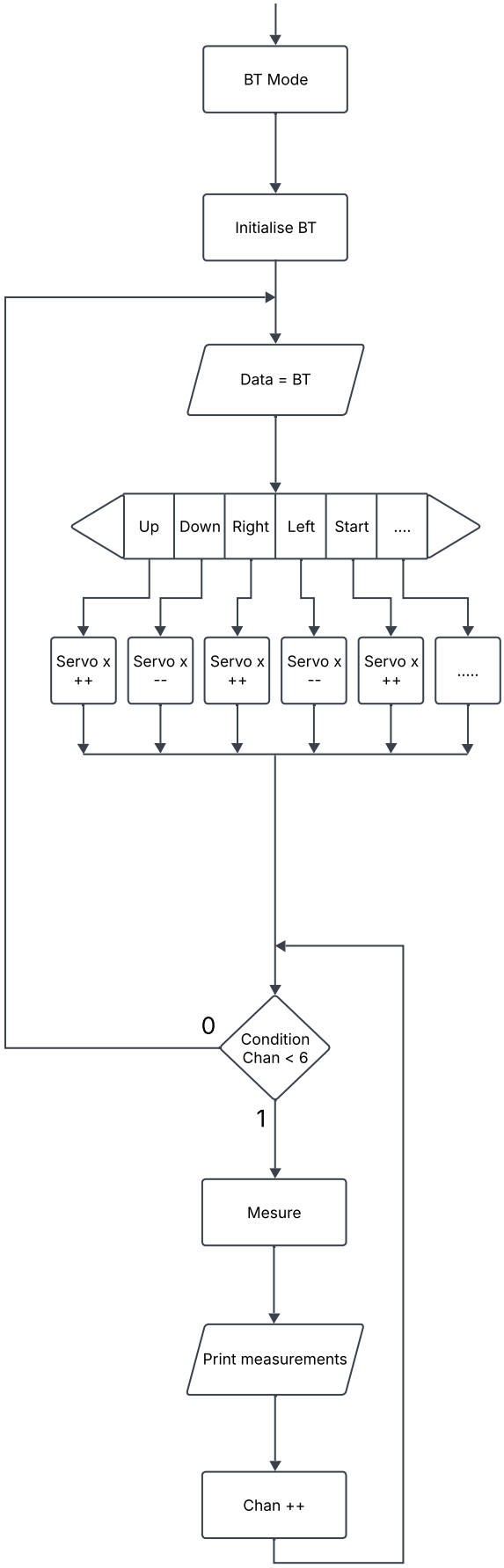


6.4 Mode 3 (individual mode)

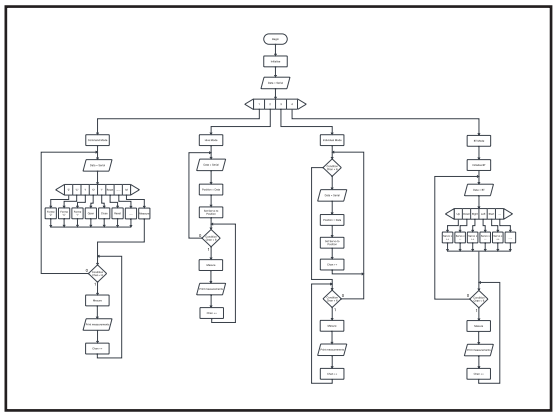




6.5 Mode 4 (Bluetooth)



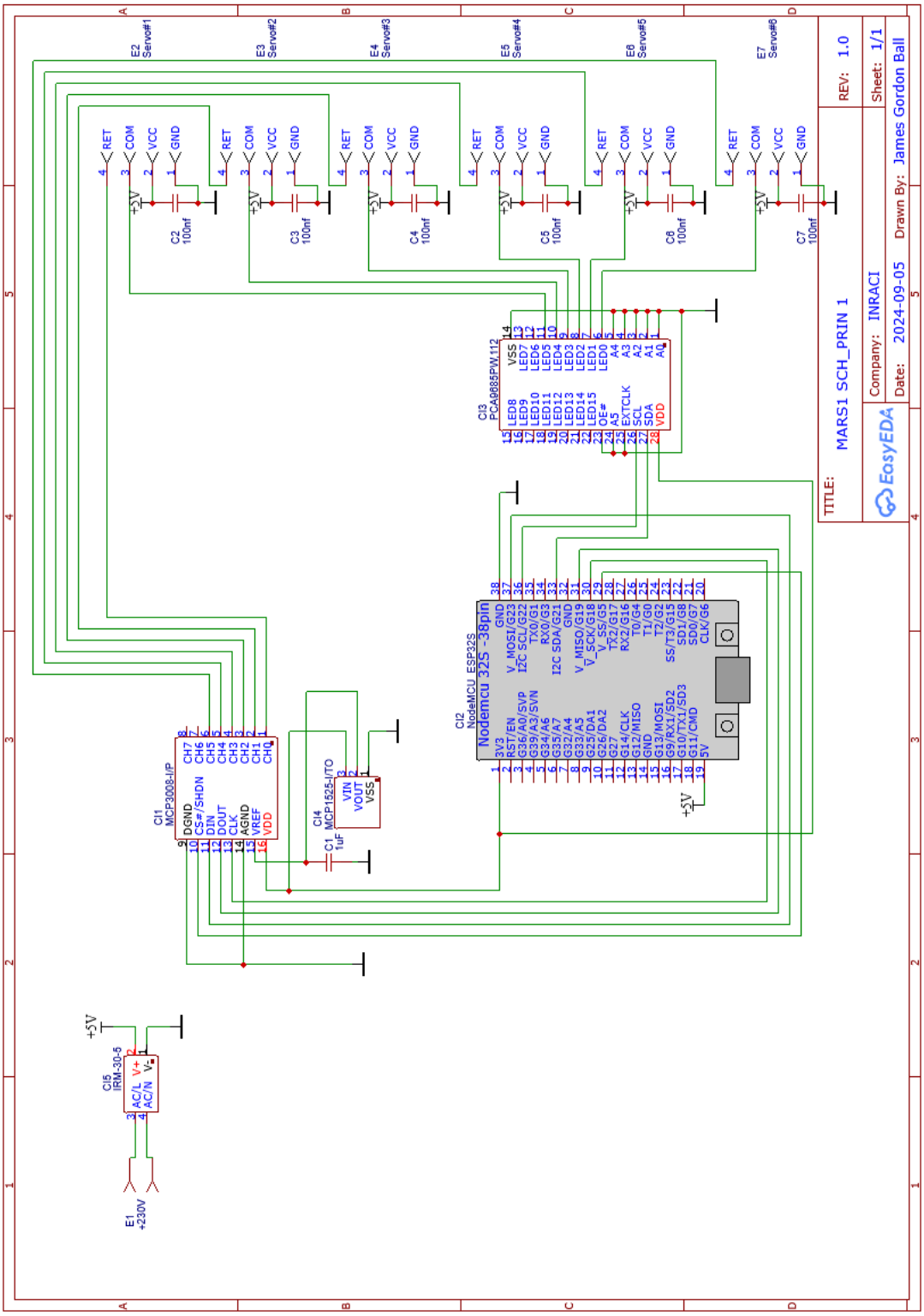
P.S. Cet ordinogramme représente juste un concept à quoi le code Bluetooth peut y ressembler et non une version finalisée car au moment de la création de ce document, le code BT n'est toujours pas terminé.



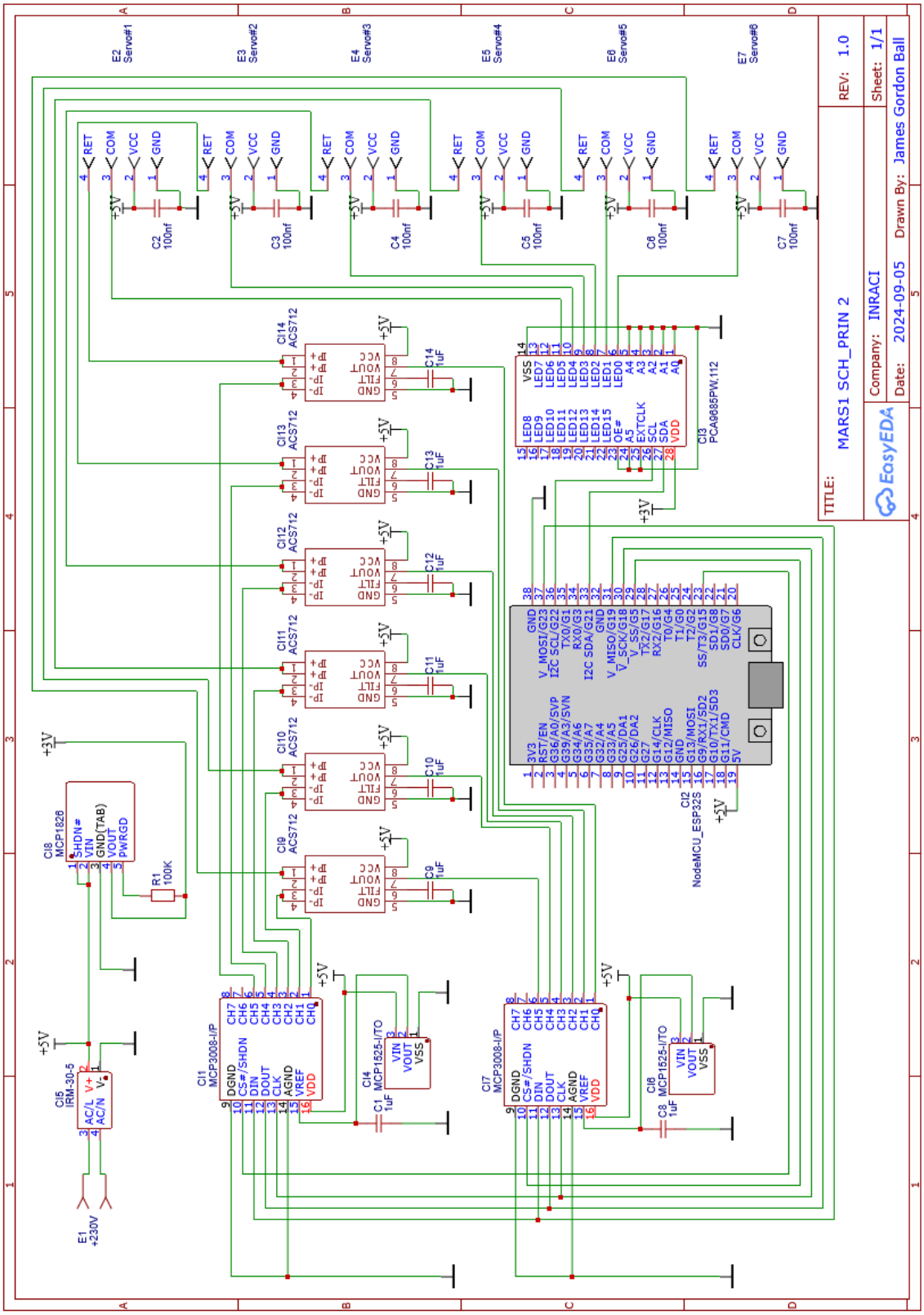
7. Fabrication

7.1 Schema de principe

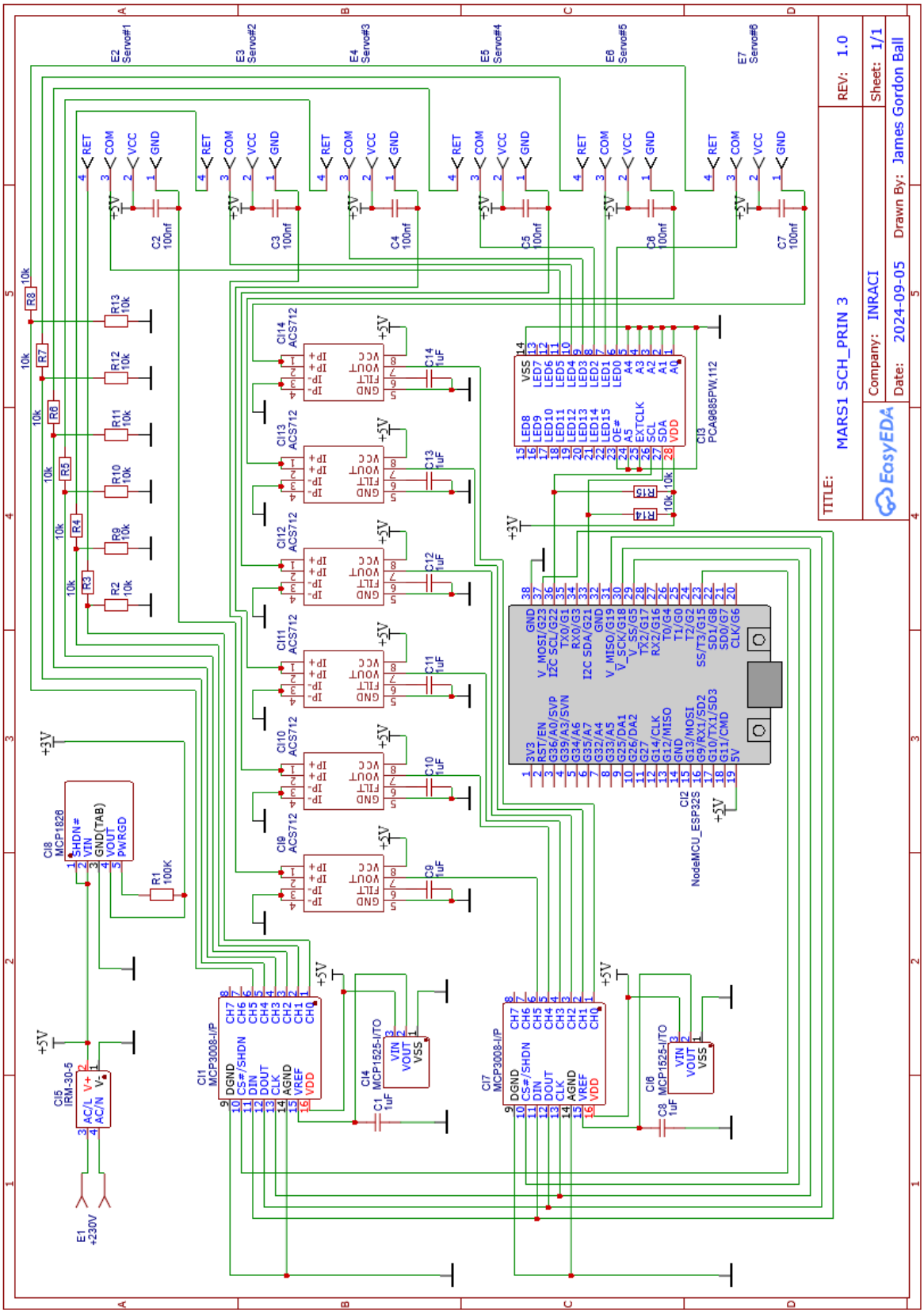
Suite à mes tests, j'ai pu avancer sur mon schéma de principe. Pour mon premier jet, j'ai simplement fait la partie servomoteur du PCB avec juste mon microcontrôleur (ESP32), driver-servo (PCA9685), ADC/CAN (MCP3008), tension de référence (MCP1525) et mon alim de base (IRM30-05).



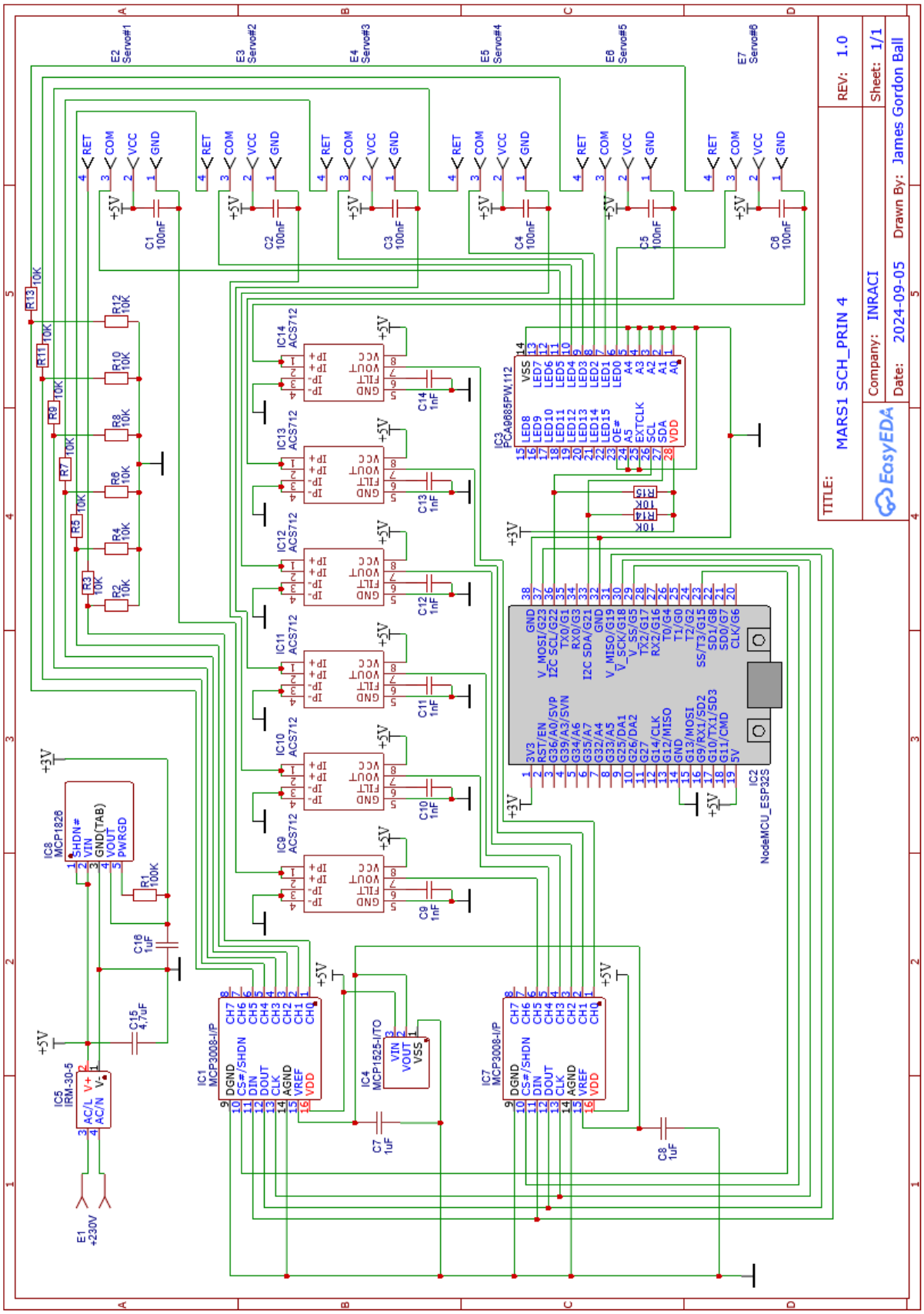
Ensuite j'ai ajouté mes capteurs de courant (ACS712) et un régulateur linéaire low drop (MCP1826) avec un ADC/CAN (MCP3008) en plus pour la réception des données venant des capteurs de courant, accompagné d'une 2ème référence de tension (MCP1525). Mais dans ce design, j'ai fait une grave erreur à cause de ma mauvaise compréhension des composants, j'ai relié le mauvais fil au capteur de courant



Par la suite, dans mon prochain dessin, j'ai réglé deux grosses erreurs, d'abord celle des capteurs de courant (ACS712) qui était reliée à la mauvaise sortie, mais également j'ai ajouté des diviseurs à la sortie du fil de données des servomoteurs pour compenser d'une mauvaise référence de tension.

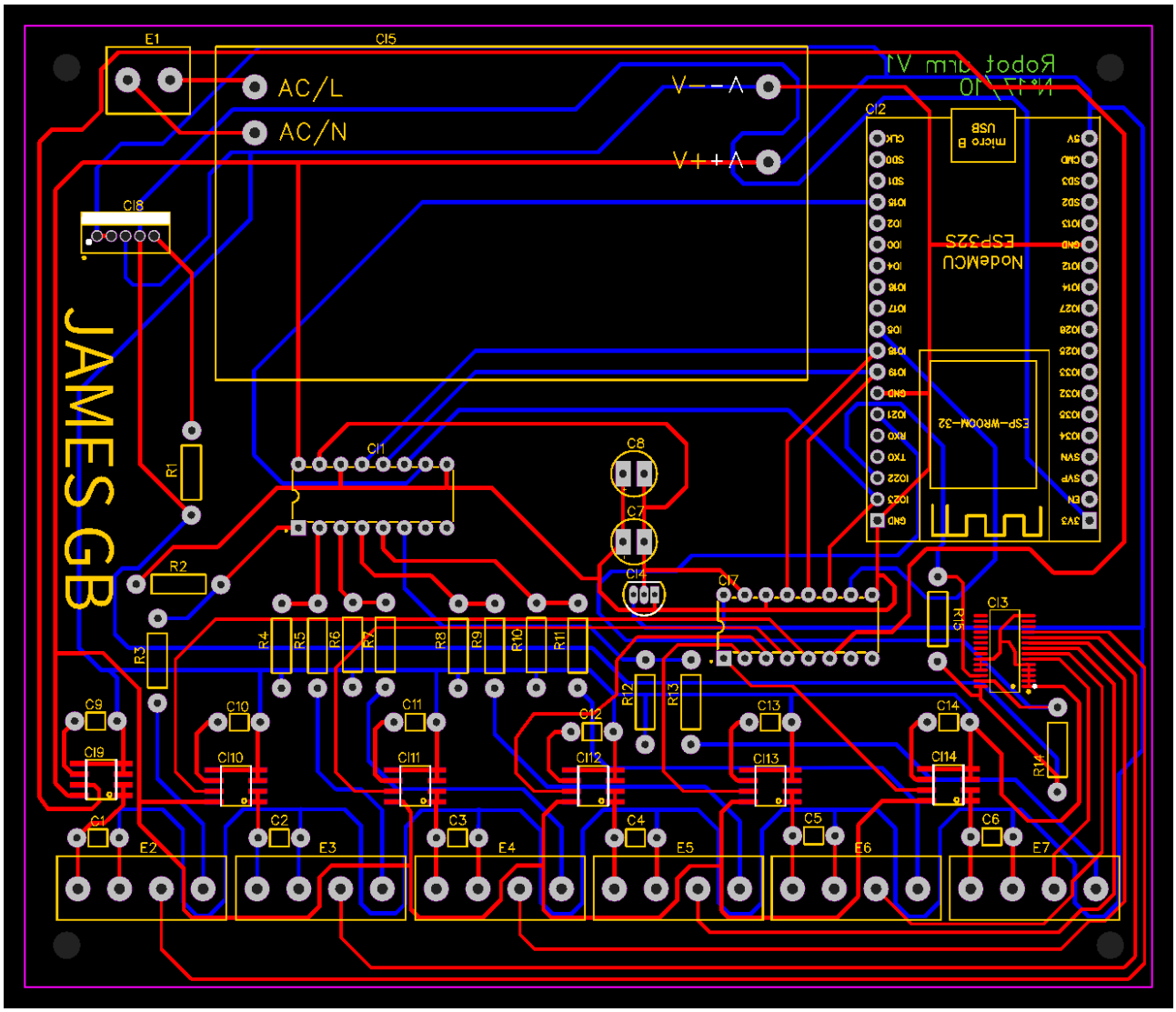


Finalement, dans la dernière version fonctionnelle, j'ai fortement simplifié le schéma mais aussi ajouté quelques petits détails comme des condensateurs de filtrage et autres.

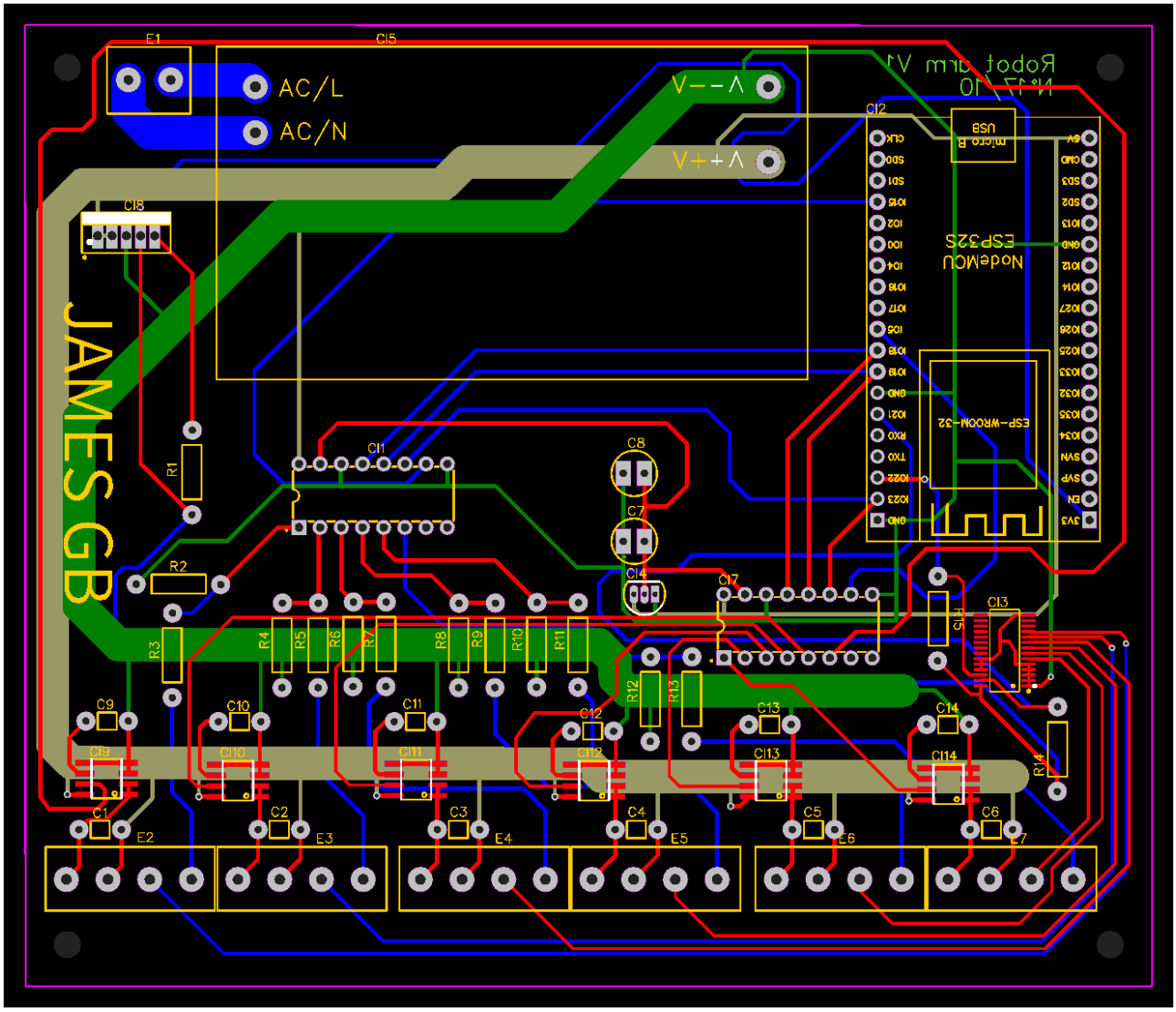


7.2 PCB

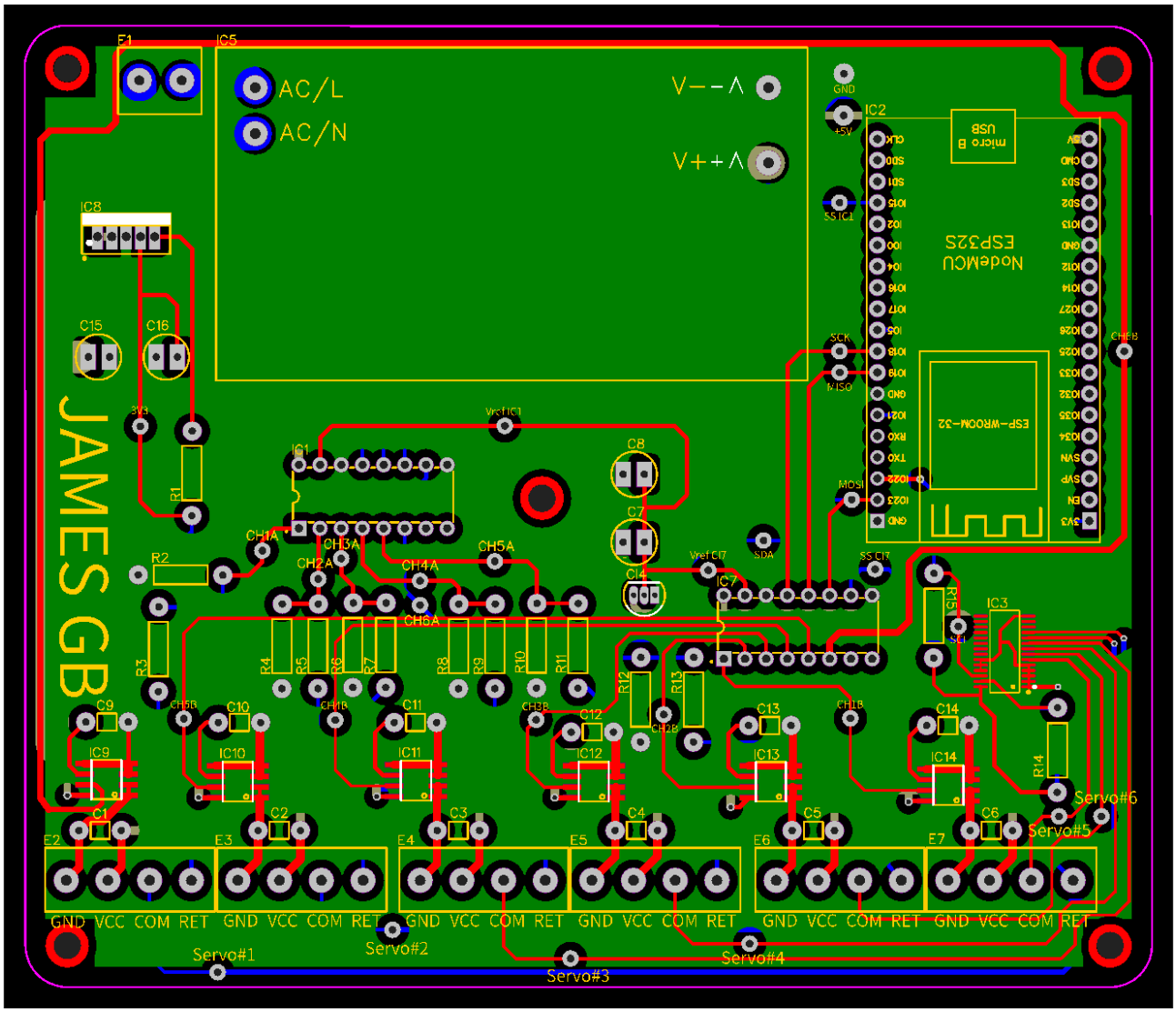
Suite à l'achèvement et la correction finale de mon schéma de principe, j'ai avancé sur le PCB qui a été réalisé en 3 parties. D'abord, j'ai vérifié toutes les connexions sans tenir compte de la largeur de mes pistes.



Ensuite, quand je me suis rendu compte de la largeur de mes pistes nécessaires en conséquence de mes hauts courants de 6A présents sur mon PCB, j'ai décidé par conseil de mon promoteur de faire un PCB à 4 couches au lieu des 2 couches par défaut.



Finalement, pour mon dernier PCB design et encore sur recommandation de mon promoteur, j'ai ajouté un plan de masse sur PCB en réparant quelques défauts visibles.

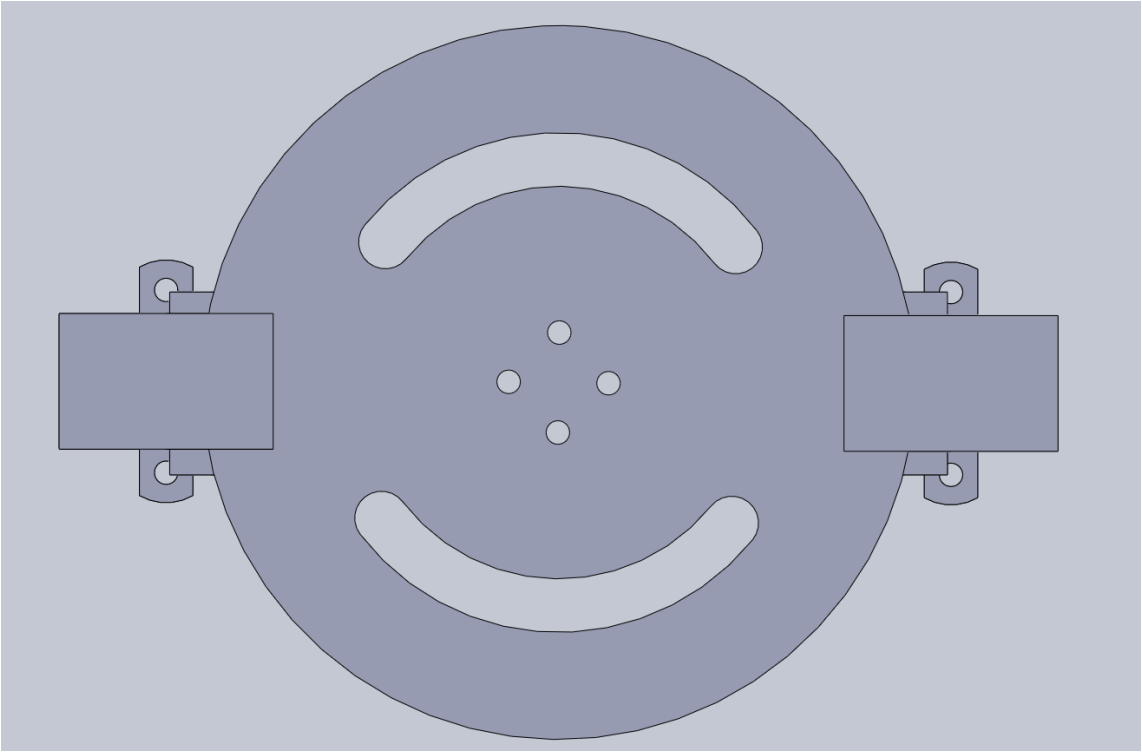


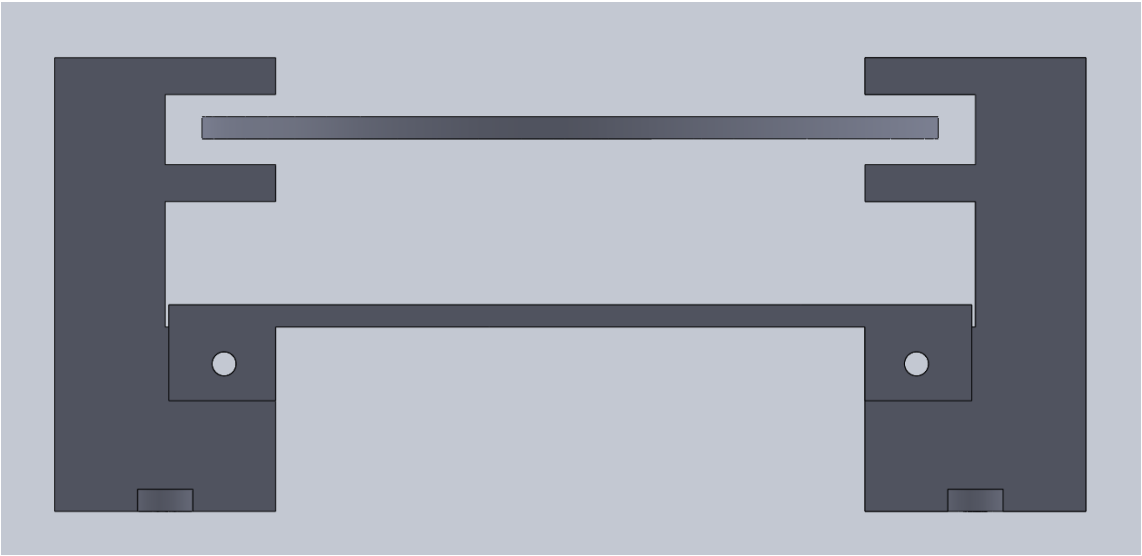
7.3 Mecanique

Pour l'aspect mécanique de mon projet, j'ai été obligé d'acheter le bras préfait pour des raisons de temps et simplicité, mais j'ai quand même eu l'opportunité de le modifier comme je le sentais nécessaire. Inversement, le boîtier a été complètement désigne, mais la décision.

D'abord, mon boîtier est constitué de 4 murs et 1 toit en plexi avec 4 palonniers de support, le choix de faire le boîtier principalement en plexi a été fait à la demande de mon promoteur.

Ensuite, la nouvelle base pour le bras est constituée de 4 supports en plastique et un slider ; il a pour but de partager le poids sur les supports et donc d'augmenter la torque du servomoteur.





8. Mise au point

Le long de mon projet, j'ai rencontré de nombreux problèmes dans chaque aspect de mon TFE qui ont nécessité une solution ou même une intervention de mon promoteur et des profs. Ces problèmes sont présents partout dans mon projet tels que ma mécanique, électronique, programme, mais également dans test et design. Voici une partie de mes grands problèmes que j'ai rencontrés en travaillant sur ce projet :

D'abord, pendant mes tests sur les servomoteurs, j'ai rencontré quelques problèmes tels que :

Problème : Mes premiers servomoteurs (MG996r) n'étaient pas assez puissants en torque, mais également n'étaient pas fiables et très fragiles à cause de leurs engrenages en plastique.

Solution : J'ai remplacé mes anciens servomoteurs avec une nouvelle version plus chère (TD-8120MG), qui m'offre plus de torque et plus de fiabilité avec un engrenage en métal.

Problème : Une autre problème qui était essentiel à mon projet était le fil de retour, permettant une tension de retour venant du potentiomètre me permettant de calculer l'angle.

Solution : J'ai ajouté, en soudant, une file sur chacun de mes servomoteurs donnant un accès direct au ADC.

Ensuite, lors de mes tests sur les drivers-moteurs, j'ai rencontré quelques problèmes tels que :

Problème : J'ai eu quelques difficultés avec la commande de ma bus I²C qui avait un signal faible à non existant, me bloquant dans mes tests et la commande des servomoteurs.

Solution : J'ai découvert une erreur dans la librairie de base qui déclarait les pins de ma communication I²C aux mauvais pins sur mon uC (microcontrôleur) et donc j'ai demandé à mon promoteur pour qu'ils puissent rectifier l'erreur dans la librairie de base. Mais également, il y avait un manque de résistance Pull-up que j'ai par la suite ajouté dans mon design du PCB.

De plus, l'une de mes plus grandes erreurs que j'ai pu retrouver pour mes ADC (MCP3008) était :

Problème : J'ai pris une mauvaise référence de tension (MCP1525) qui sort comme Vref 2.5V au lieu des 5V nécessaires pour la sortie de mes servomoteurs dans mon ADC (MCP3008).

Solution : Comme alternative, j'ai implémenté des diviseurs de tension pour chacun des channels ce qui veut dire qu'au lieu d'une variation de 0-5V à l'entrée de mes ADC, j'aurais une variation de 0-2.5V, que je pourrais ensuite rétablir à 0-5V dans mon code pour la valeur réelle.

Problème : J'ai récupéré une erreur similaire pour l'ADC qui s'occupe des capteurs de courant car le base line sortie de mes capteurs de courant (ACS712) est la moitié de la tension d'alimentation, ce qui dans ce cas est de 5V, ce qui veut indiquer que la sortie minimum de mes capteurs de courant est le maximum de l'entrée de mes ADC.

Solution : Car cette réalisation a été faite après la commande de mon PCB, j'ai fini par gratter au pisté pour ensuite souder deux résistances SMD, créant un diviseur de tension.

Par la suite, le design et la fabrication de mon PCB ont rencontré quelques impasses à travers sa conception :

Problème : À cause de mes courants élevés de 6 ampères nécessaires pour le fonctionnement de mes servomoteurs, j'ai dû faire des pistes très larges, ce qui occupe une grande partie de mon PCB.

Solution : J'ai décidé de faire un PCB à 4 couches pour me donner plus de liberté et d'espace, mais aussi de diviser les signaux et les isoler, permettant une protection des bruits externes. Mais également j'ai échangé le cuivre de 1oz. À 2oz. Qui supporte mieux les hautes courants.

Problème : J'avais aussi énormément de difficultés à brancher toutes les GND ensemble.

Solution : À l'assistance des 4 couches accessibles sur mon PCB, j'ai pu faire un plan de masse non seulement pour mieux dissiper la chaleur, mais aussi simplifier le routage.

Problème : À cause de la présence de composants SMD sur mon PCB, les capacités de test en cas de problèmes sont réduites.

Solution : J'ai ajouté des points de test pour simplifier la tâche en cas d'erreur ou de faute.

Après, j'ai pu observer quelques points négatifs dans ma mécanique tels que :

Problème : Lors de mes premiers essais, la base de mon bras robot n'était pas assez solide pour supporter les mouvements et les charges exercées par les servomoteurs. Elle manquait de force, ce qui entraînait des risques d'endommagement des servomoteurs.

Solution : Pour résoudre ce problème, j'ai complètement redesigné la base en y intégrant un système de fixation renforcé, composé de quatre palonniers solidement ancrés à un support rigide. Cette nouvelle structure m'a permis d'obtenir une base beaucoup plus stable et résistante, capable d'encaisser les efforts mécaniques du bras sans se déformer ni se desserrer.

Problème : La présence de la tension secteur 230V dans mon système représentait un risque électrique important, d'autant plus que le connecteur n'était initialement pas protégé, exposant ainsi les utilisateurs à un danger potentiel.

Solution : Pour sécuriser cette partie du circuit, j'ai conçu un boîtier sur mesure destiné à encapsuler le connecteur 230V. Ce boîtier assure une isolation électrique fiable et protège mécaniquement le connecteur, garantissant ainsi la sécurité de l'utilisateur et la conformité avec les bonnes pratiques en matière d'électronique.

Problème : Mon programme initial ne contenait aucun système de reset, ce qui posait des problèmes lors des tests ou des blocages, surtout en cas d'erreur ou de changement de mode si le bouton "reset" est inaccessible. De plus, il manquait un mécanisme de sécurité capable de détecter si l'un des servomoteurs était bloqué.

Solution : J'ai intégré plusieurs options de reset dans chaque mode de fonctionnement. En plus de cela, j'ai développé une fonction de sécurité qui surveille en continu l'état des servomoteurs. Si l'un d'eux reste bloqué pendant plus de 5 secondes, la carte reset automatiquement pour ne pas endommager les servomoteurs.

Problème : D'autant plus, mes angles mesurés et l'angle souhaité n'étaient pas compatibles entre eux car ils utilisaient deux formules différentes, ce qui posait problème pour mon delay automatique qui est censé faire une mesure des deux et ensuite les comparer pour savoir quand il peut passer à la prochaine tâche.

Solution : j'ai recalculé les formules pour être plus précis et les ai inversées pour permettre une concordance entre les deux mesures.

9. Conclusion

Ce projet m’a apporté bien plus qu’un simple bras robotisé, mais également un niveau bien plus haut que celui avec lequel j’ai commencé l’année.

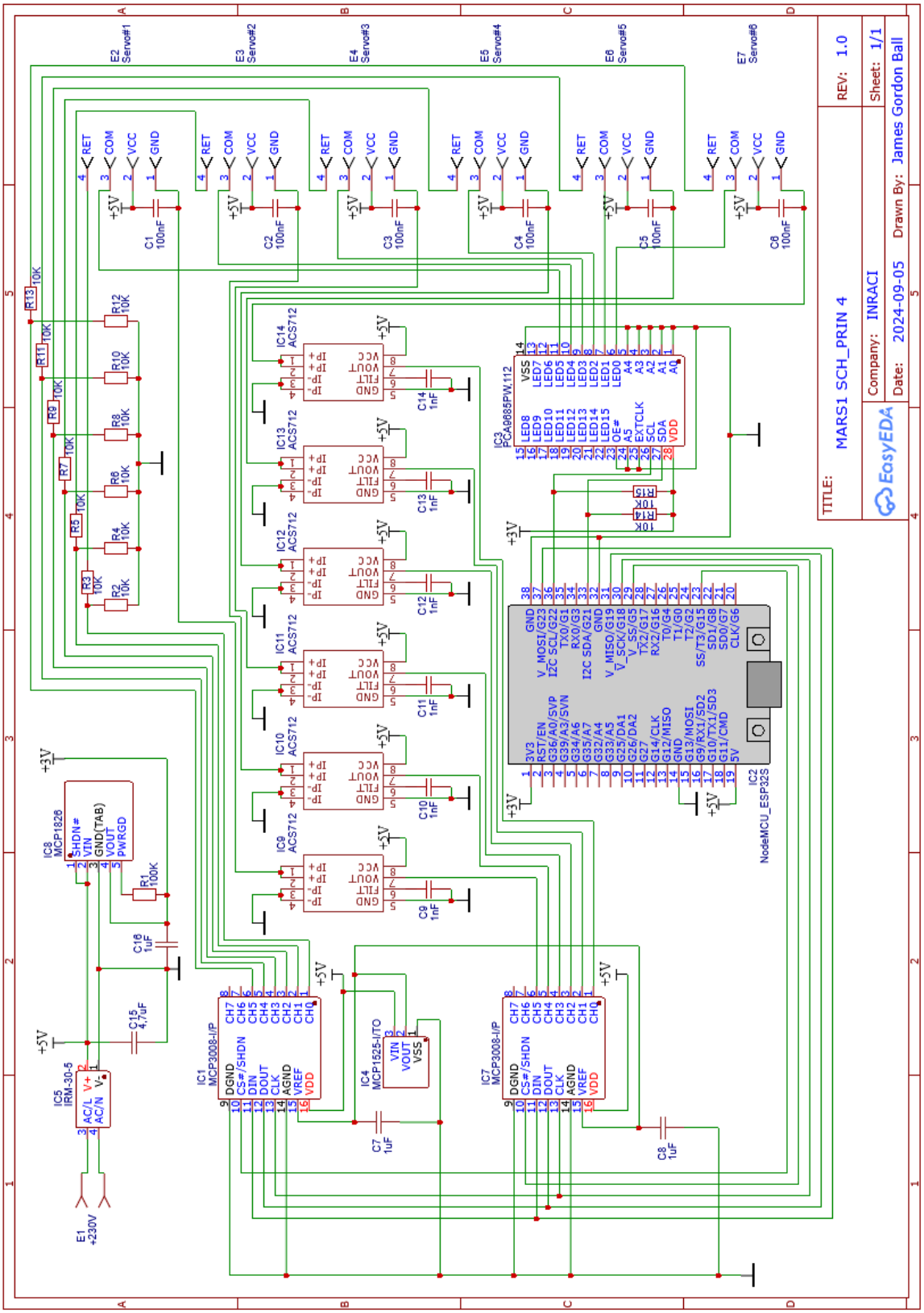
Même si je suis critique de mon projet et des décisions que j’ai dû prendre pour le compléter, je suis conscient du fait que l’état de mon projet est toujours en stage de développement et peut être fortement amélioré, mais maintenant que mon niveau a considérablement évolué, je suis également conscient de ce qui peut être amélioré et surtout comment le faire.

D’autant plus, je n’étais pas toujours motivé pour ce projet, surtout avec les nombreux problèmes que j’ai dû résoudre et tout le temps que j’ai mis dessus, mais j’avais une détermination de le perfectionner que malheureusement le temps ne m’a pas laissé accomplir. Avant tout, je suis fier de mon niveau actuel que j’ai pu obtenir en travaillant fort et long.

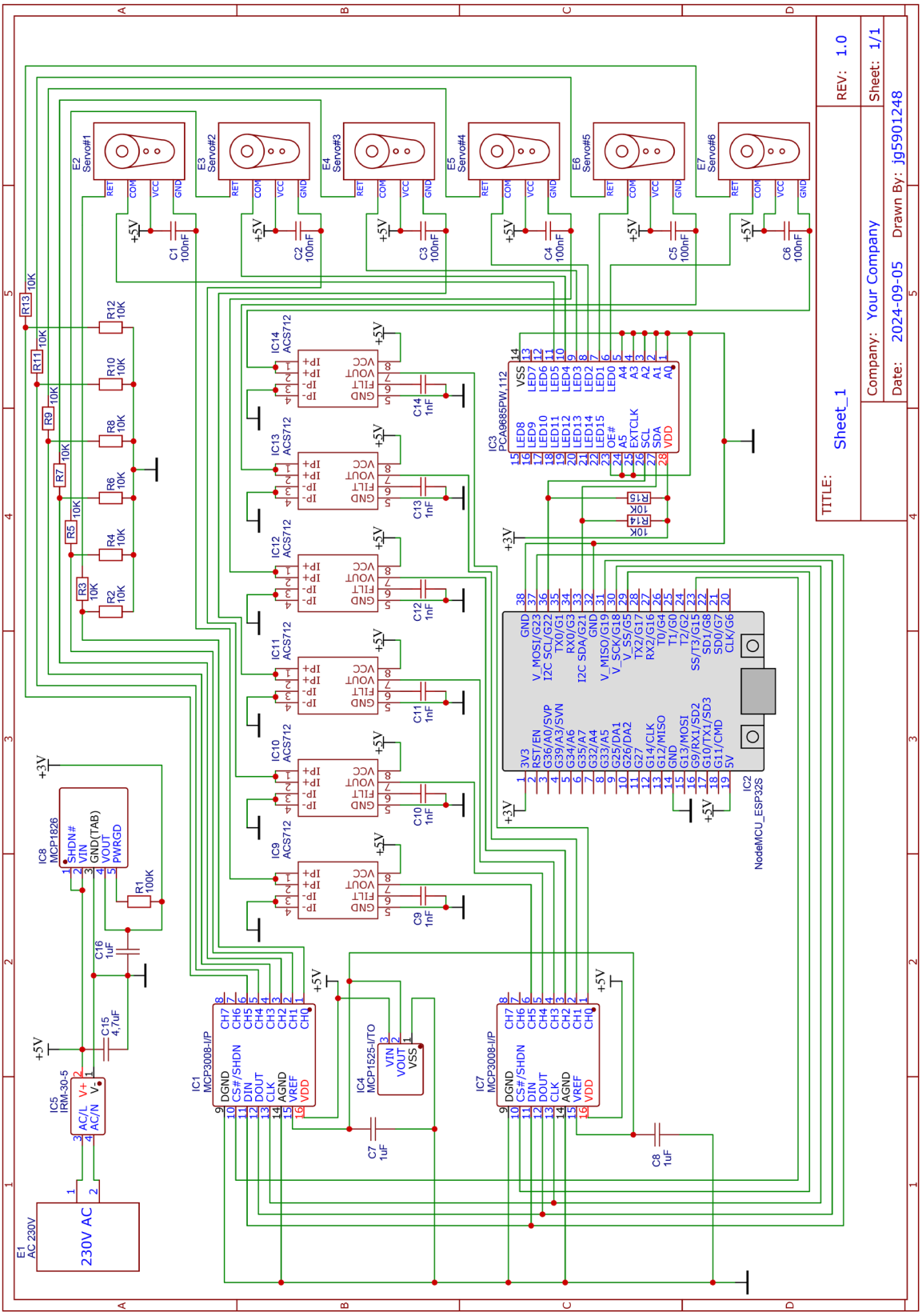
10. Annexes

10.1 Schema de principe

Schema de principe (avec bornier)

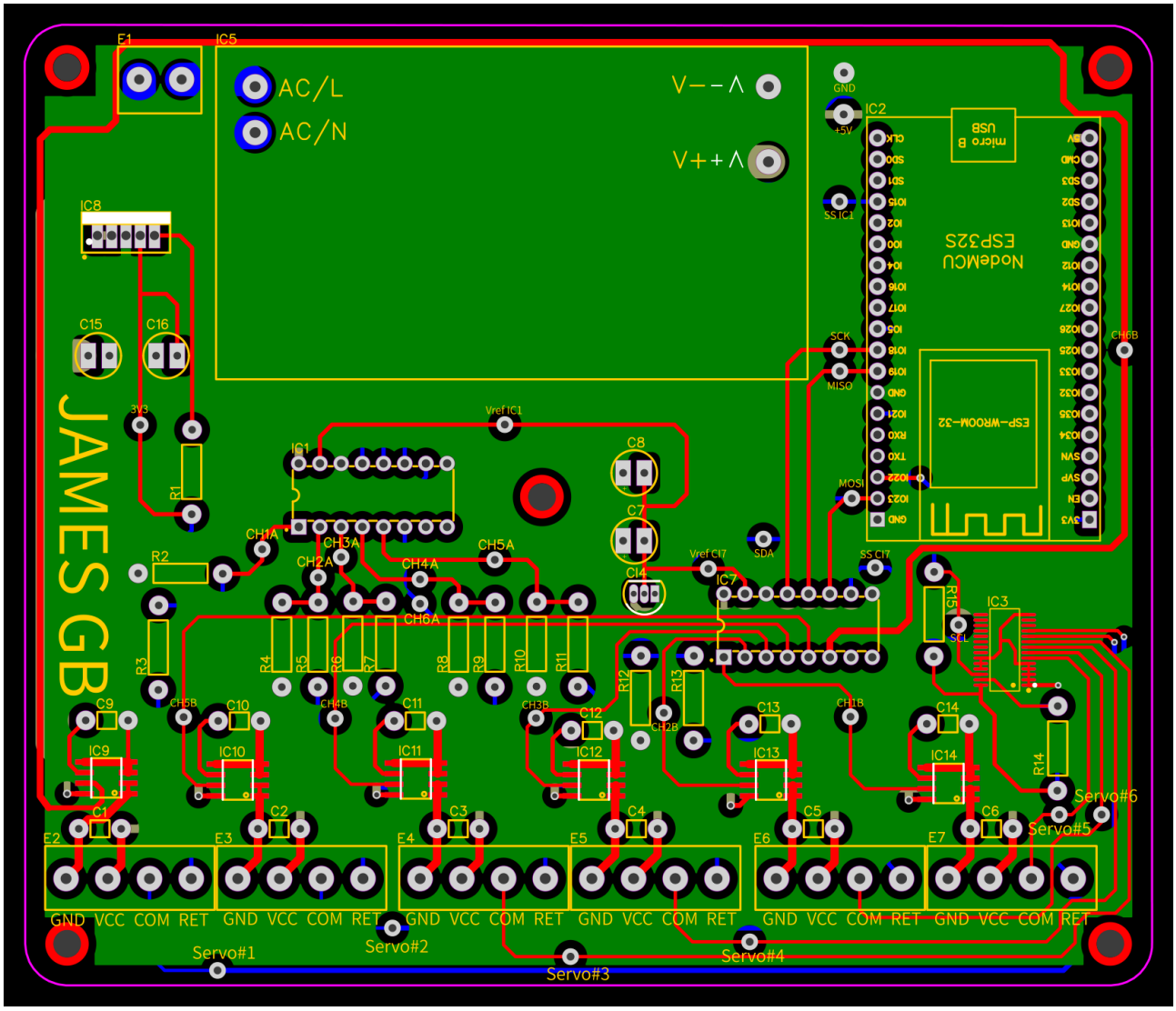


Schema de principe (sans bornier)

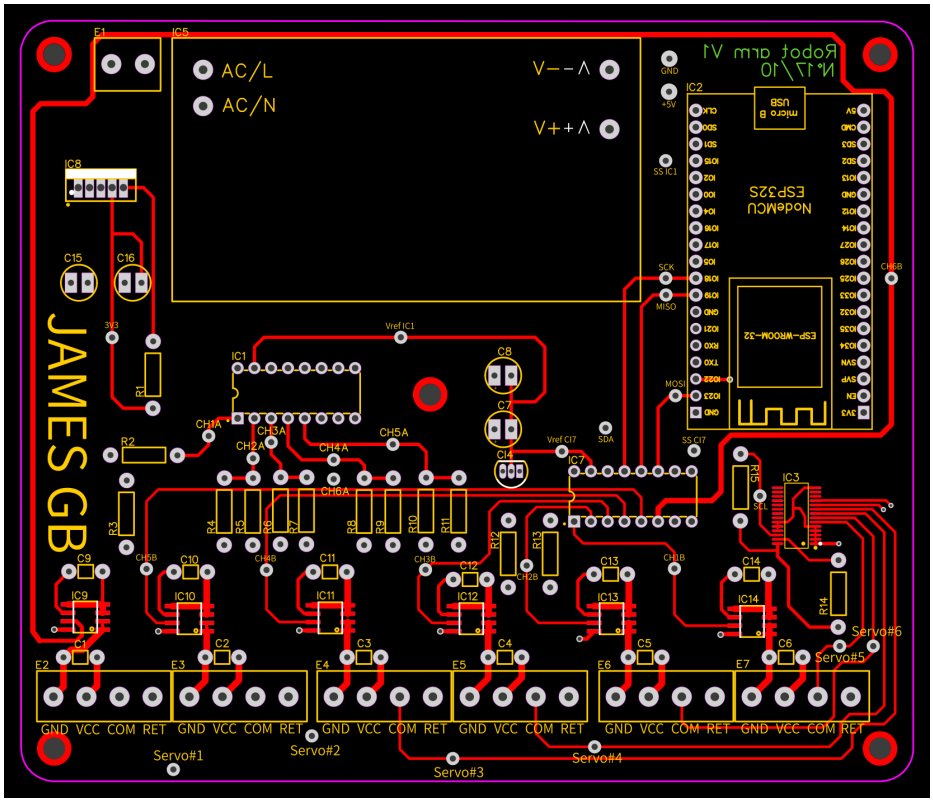


10.2 PCB

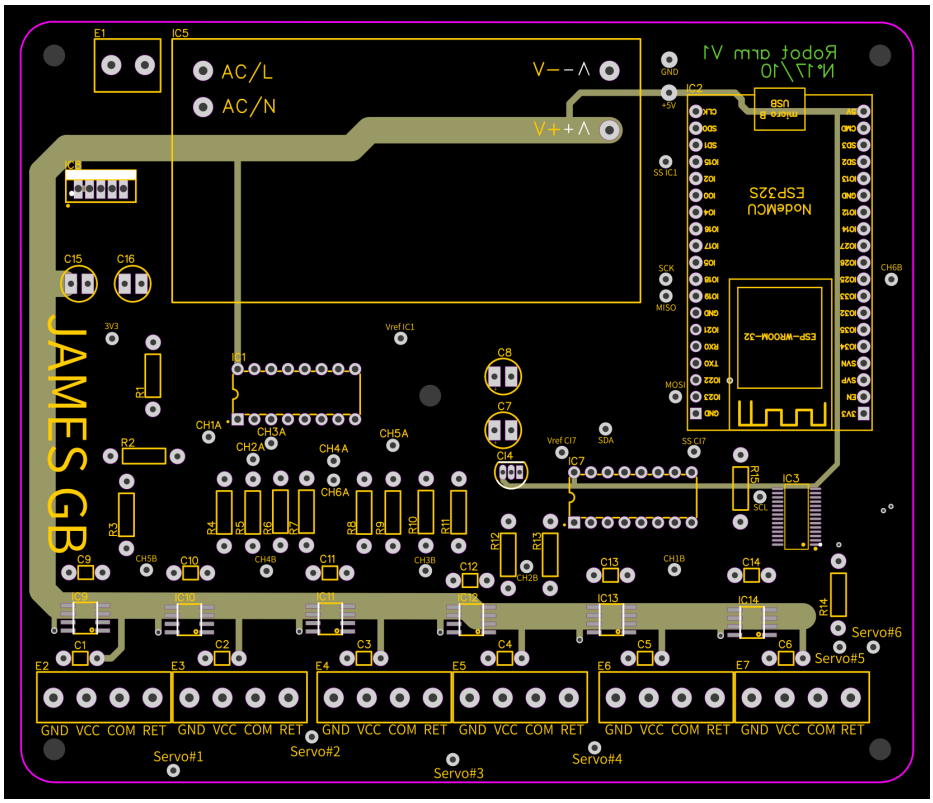
PCB (ful)



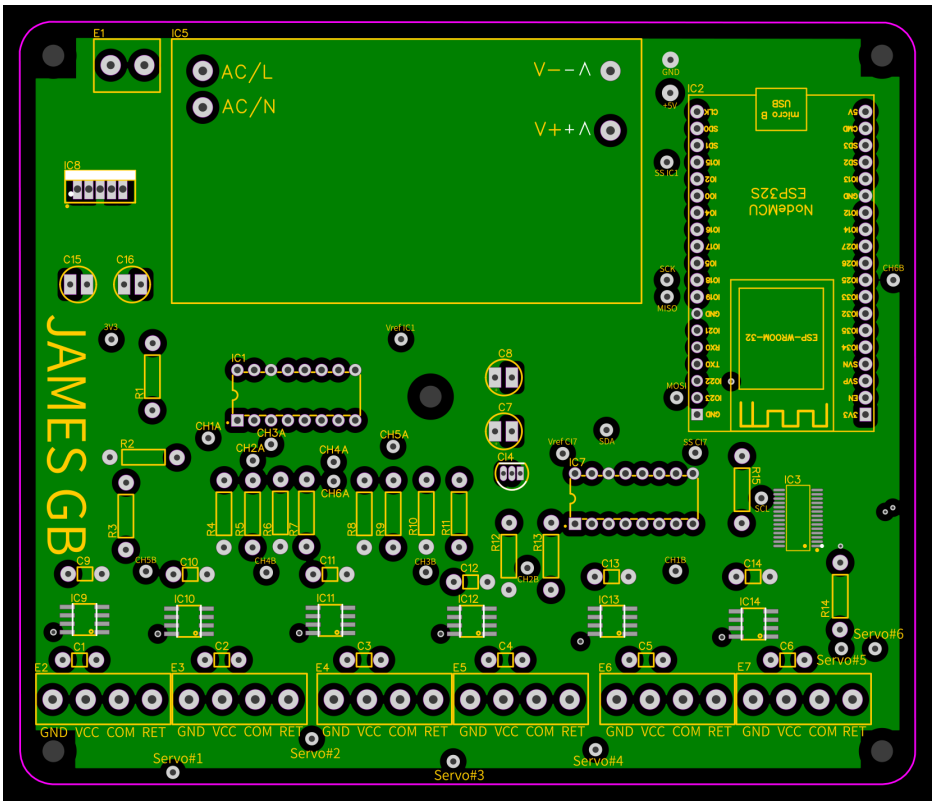
PCB (top layer)



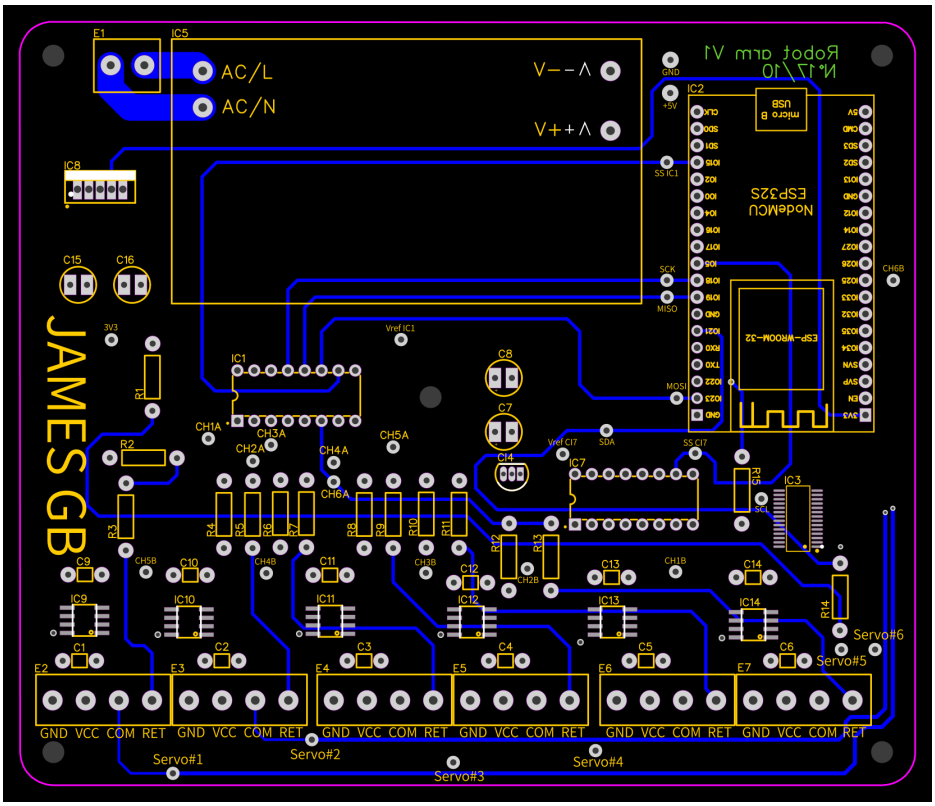
PCB (5V)



PCB (GND)

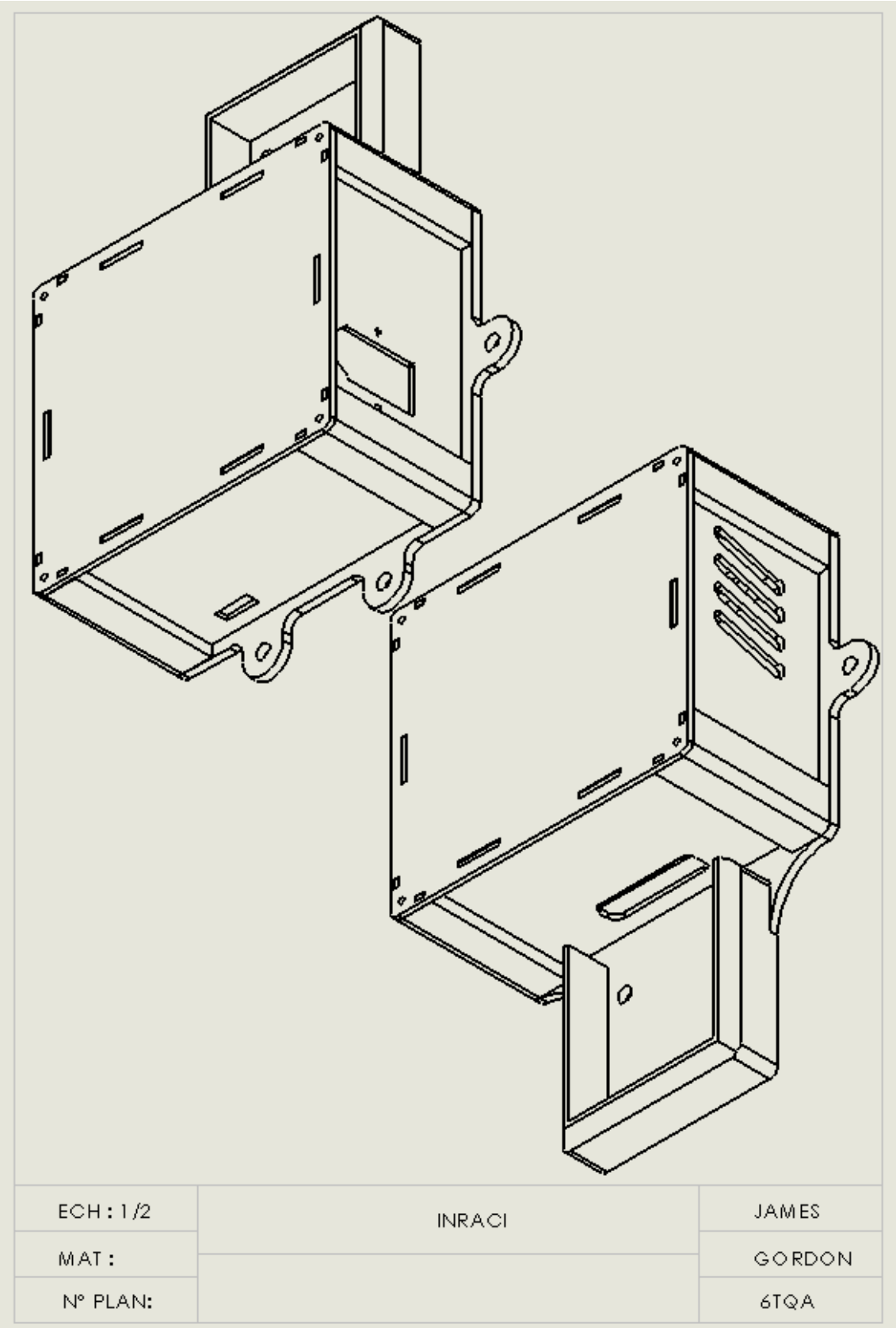


PCB (bottom layer)

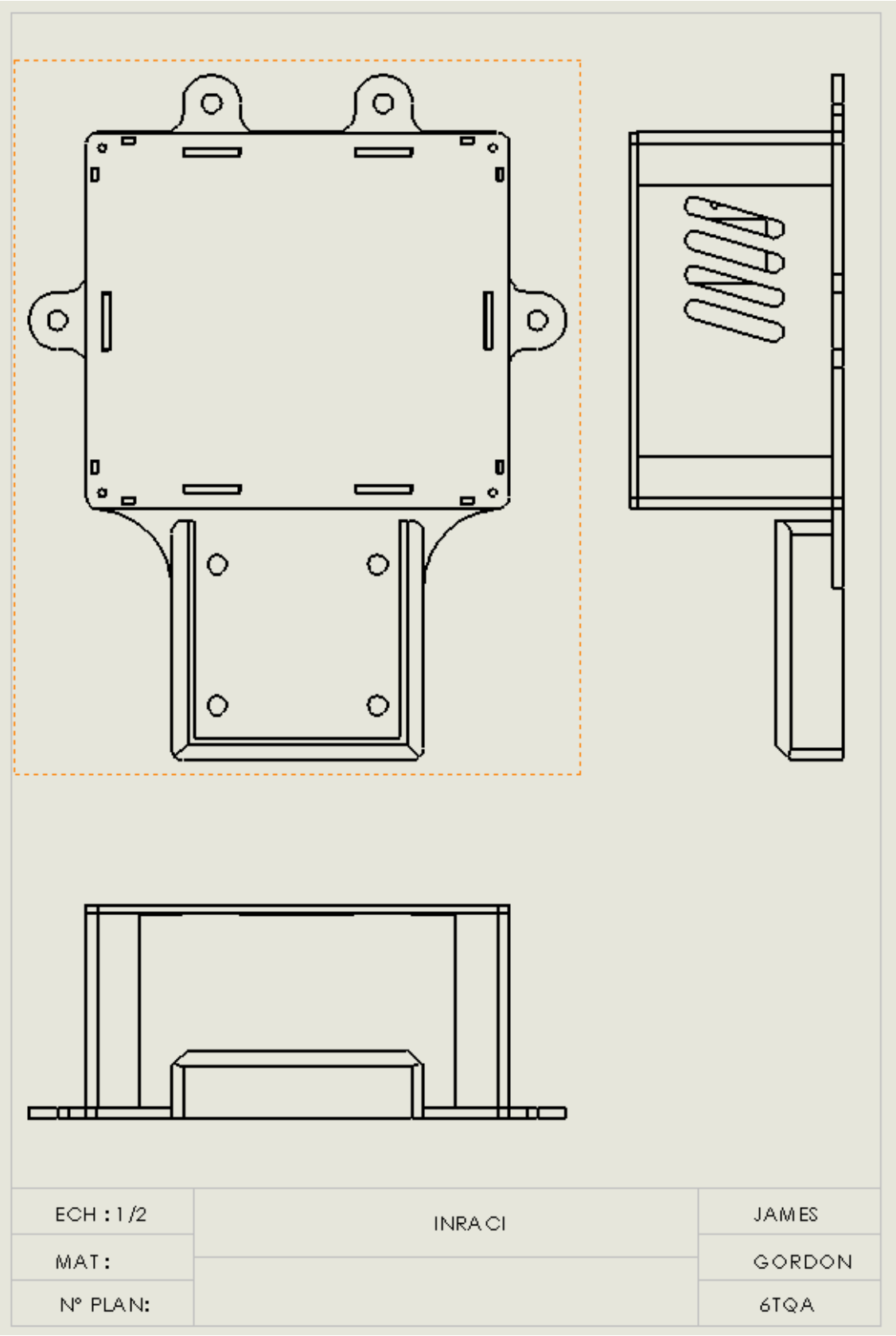


10.3 Dessins 3D

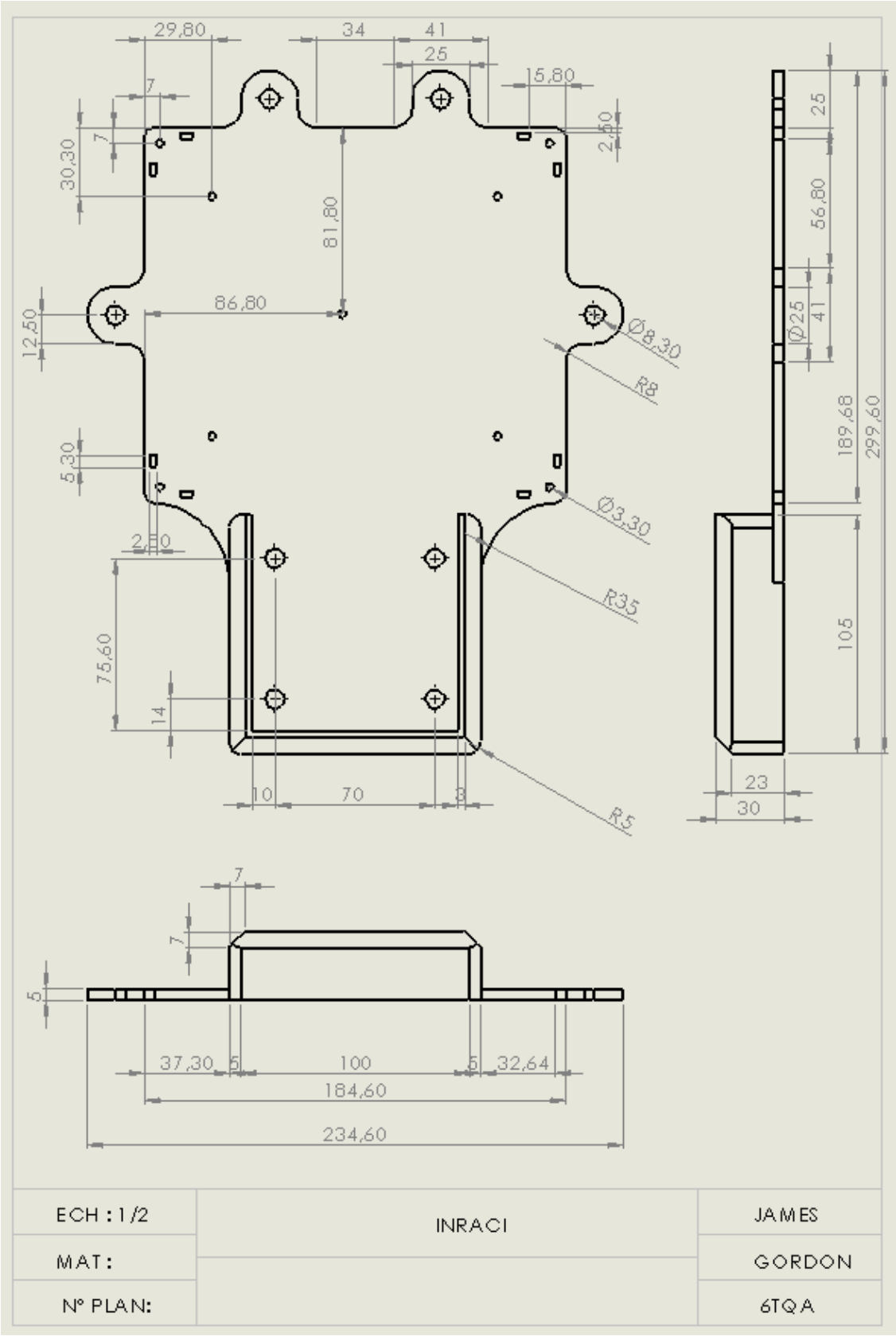
Vue 3D



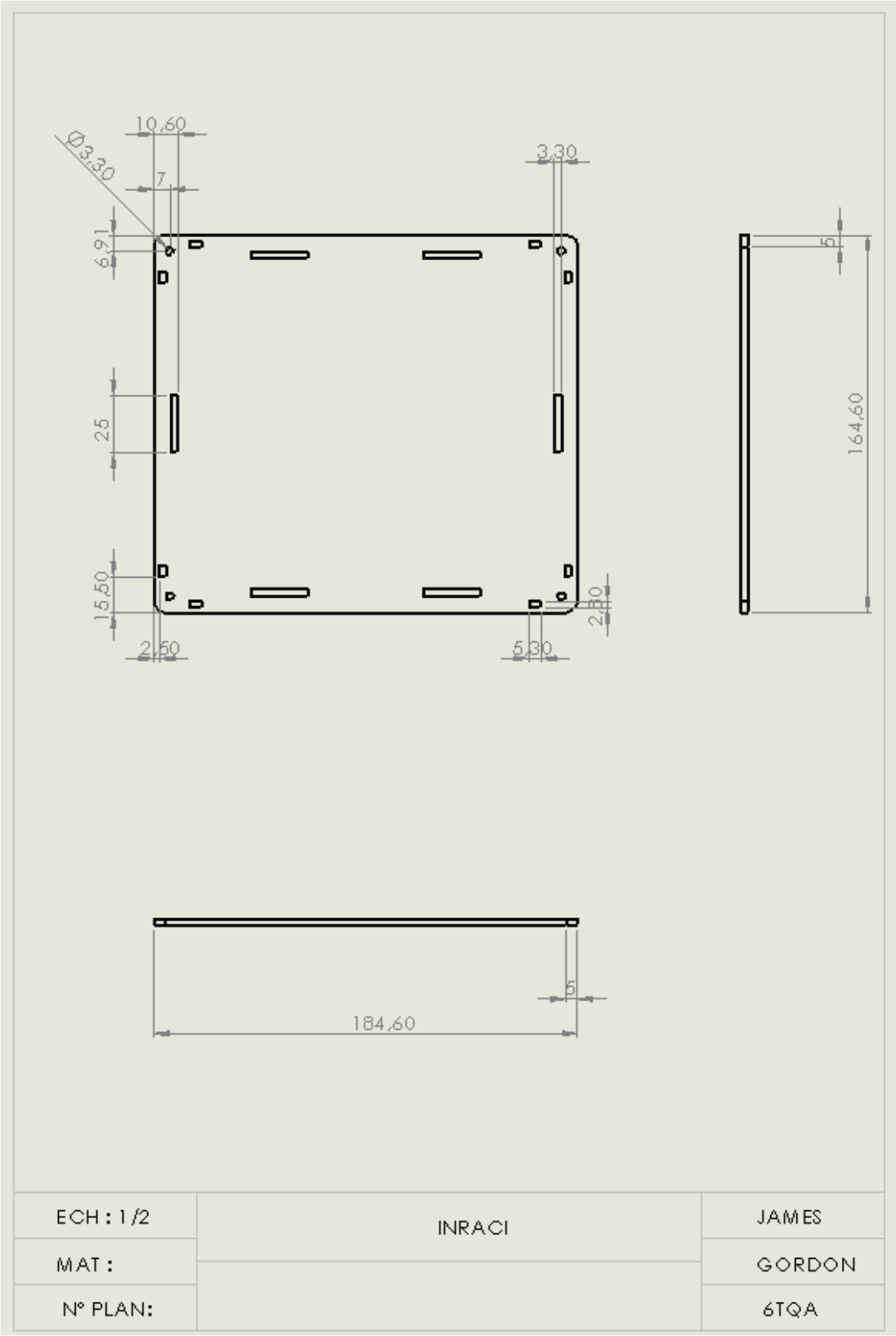
Boitier complet



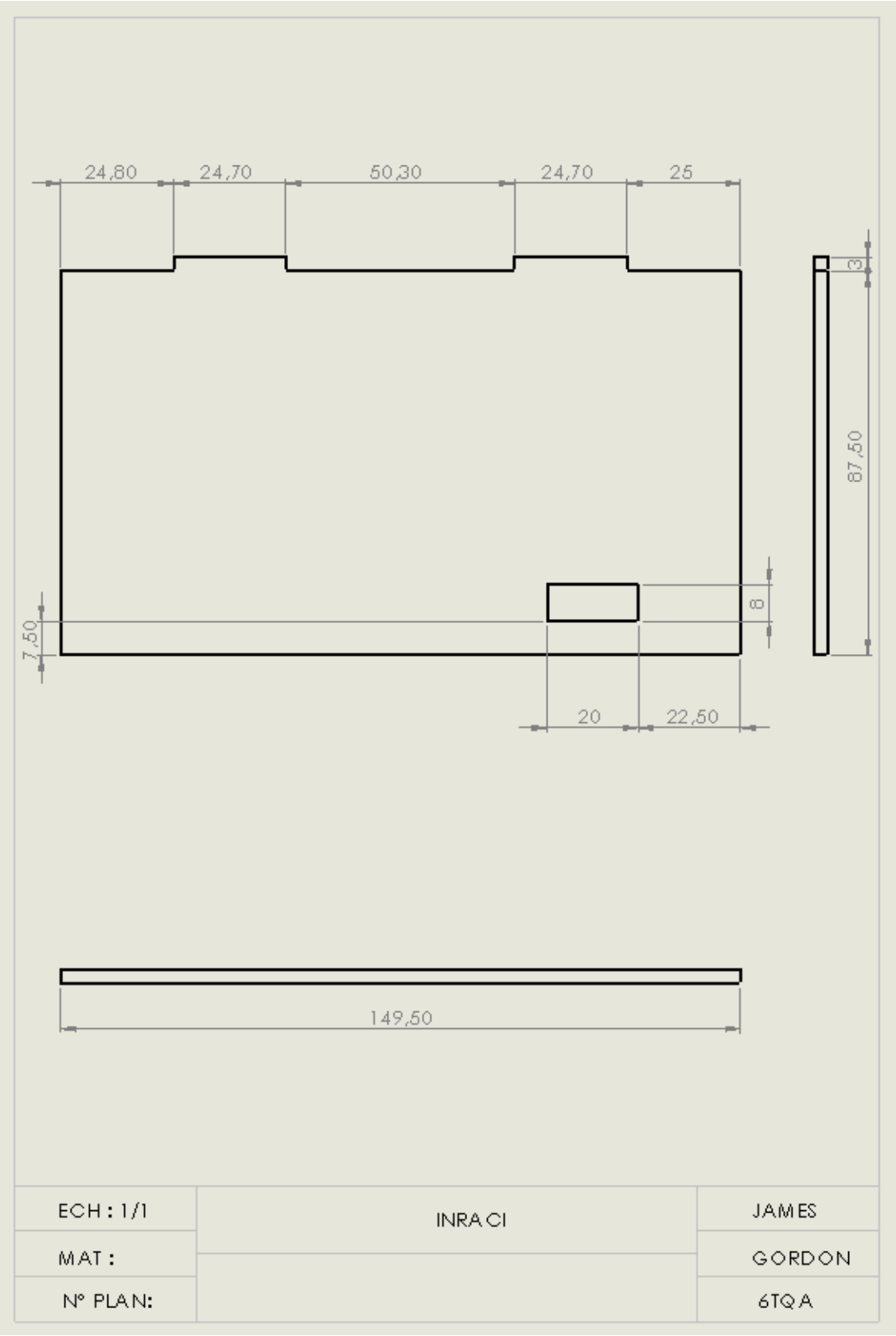
Base


29,80
34
41
25
15,80
7
7
30,30
2,50
81,80
86,80
12,50
Ø8,30
R8
5,30
Ø3,30
2,50
R35
75,60
14
10
70
3
R5
25
56,80
41
Ø25
189,68
299,60
105
23
30
7
7
5
37,30
5
100
5
32,64
184,60
234,60
ECH : 1/2
INRACI
JAMES
MAT :
GORDON
N° PLAN:
6TQA

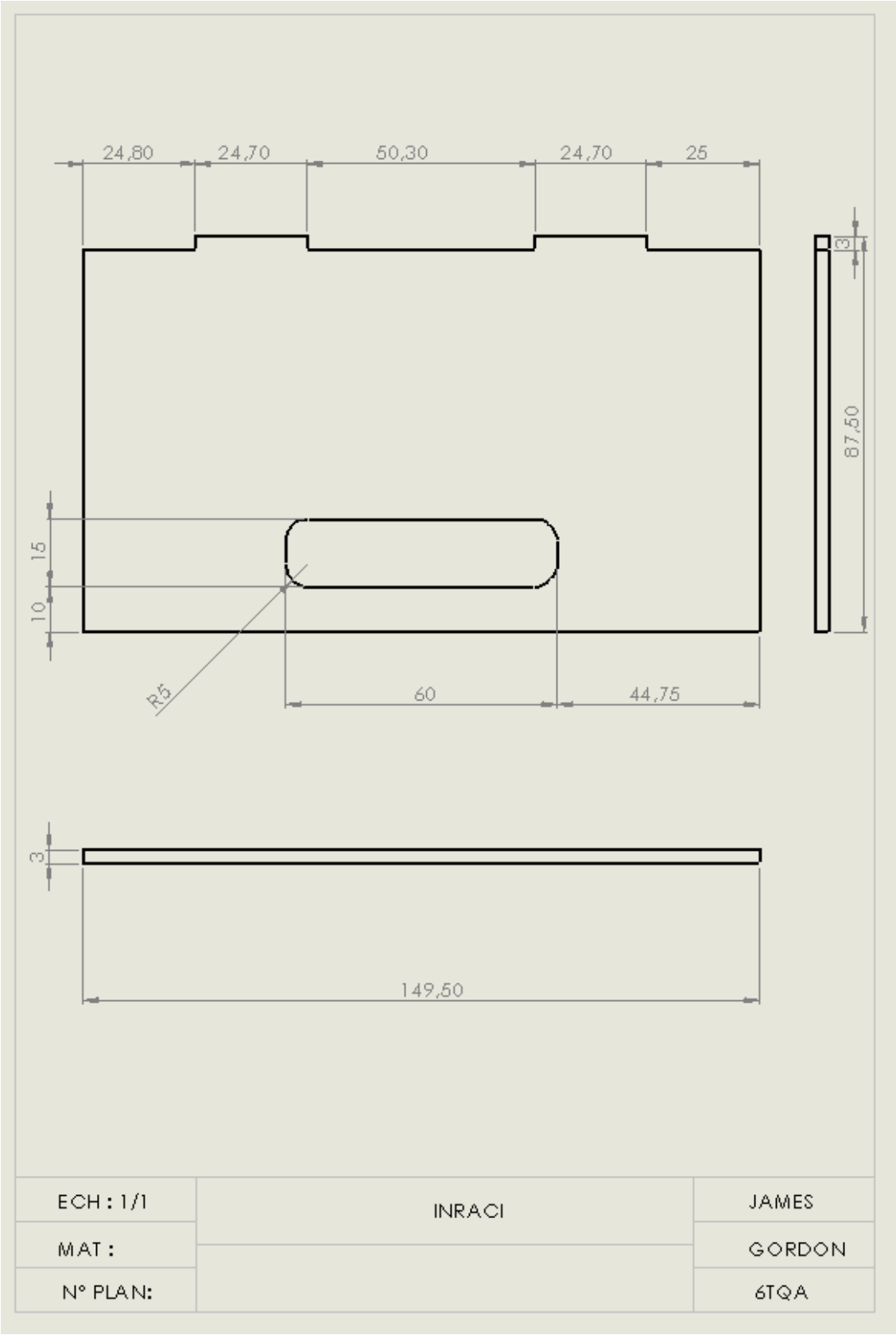
Toit


10,60
Ø3,30
7
3,30
6,91
25
15,50
2,50
5,30
2,80
5
164,60
5
184,60
ECH : 1/2
INRACI
JAMES
MAT :
GORDON
N° PLAN:
6TQA

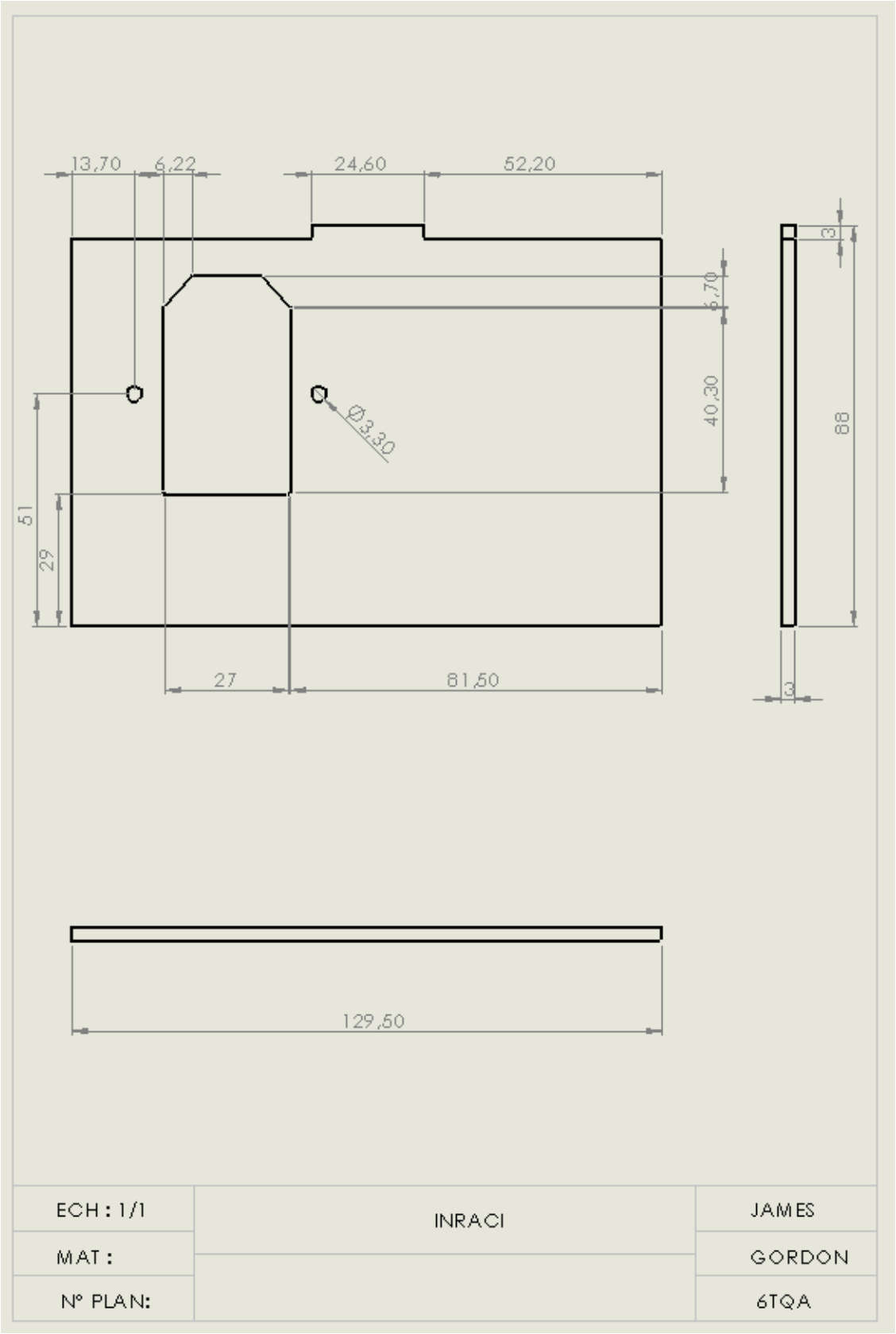
Arriere


24,80
24,70
50,30
24,70
25
3
87,50
8
7,50
20
22,50
149,50
ECH : 1/1
INRACI
JAMES
MAT :
GORDON
N° PLAN:
6TQA

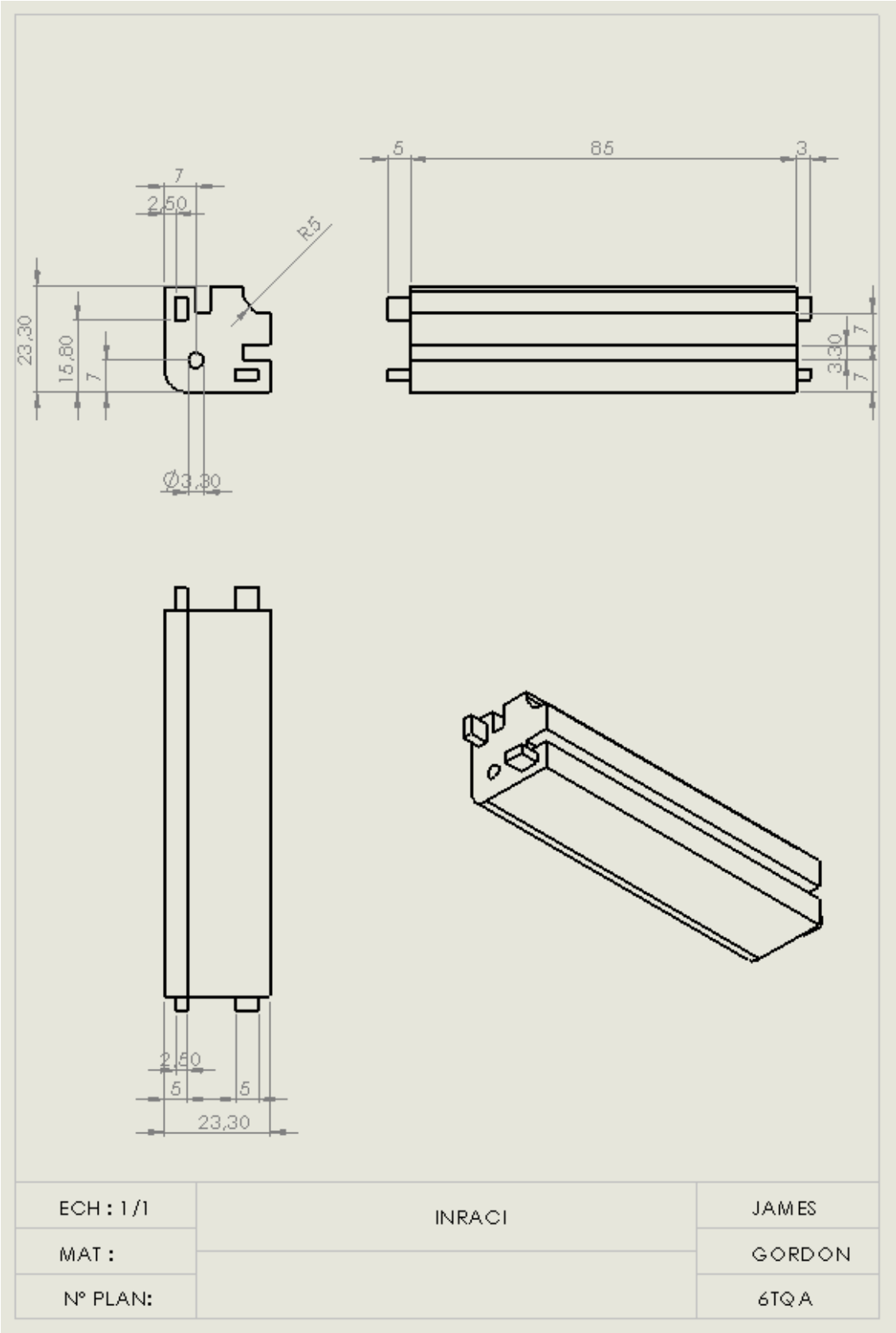
Face


24,80
24,70
50,30
24,70
25
3
87,50
15
10
R5
60
44,75
3
149,50
ECH : 1/1
INRACI
JAMES
MAT :
GORDON
N° PLAN:
6TQA

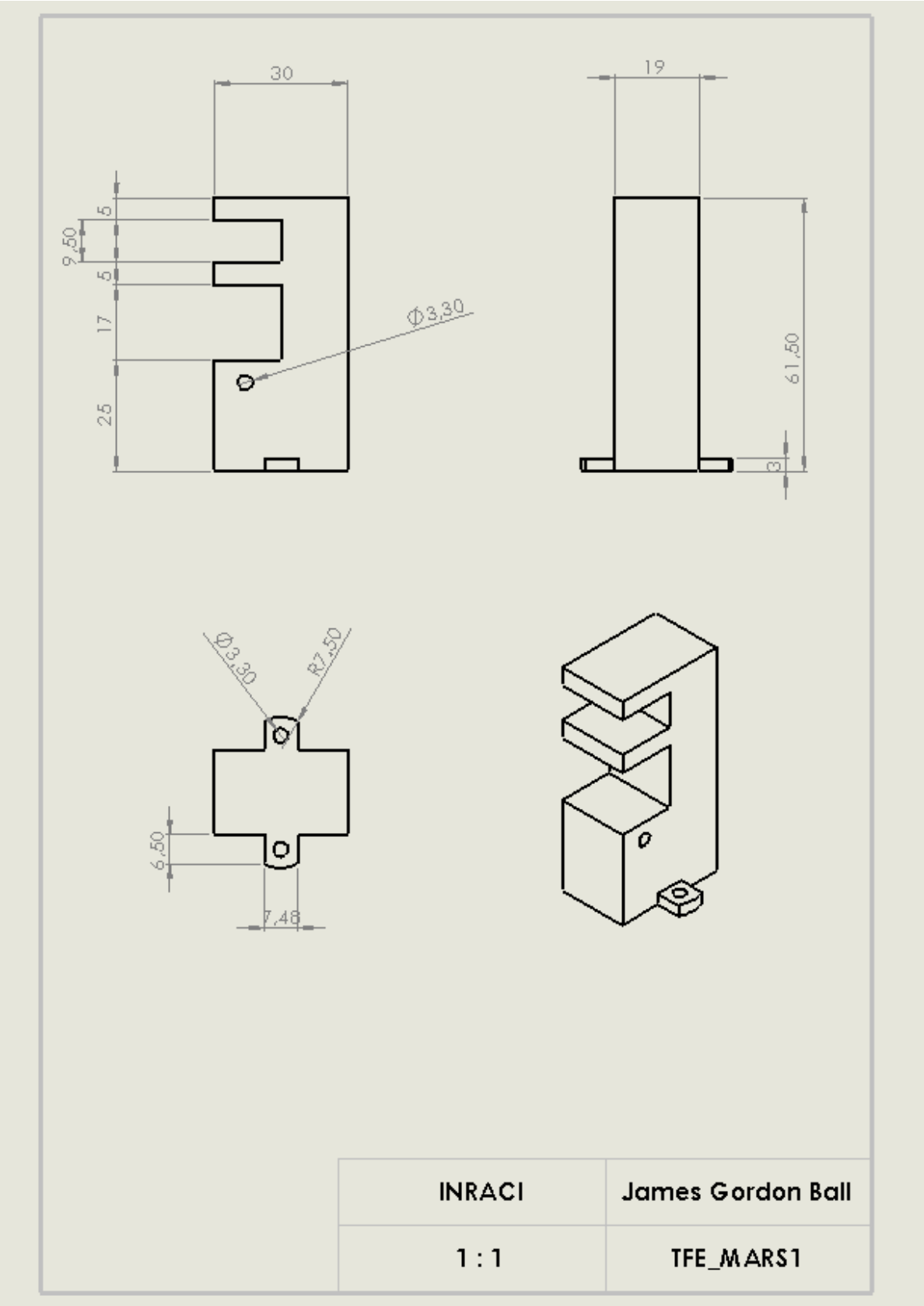
Cote de gauche



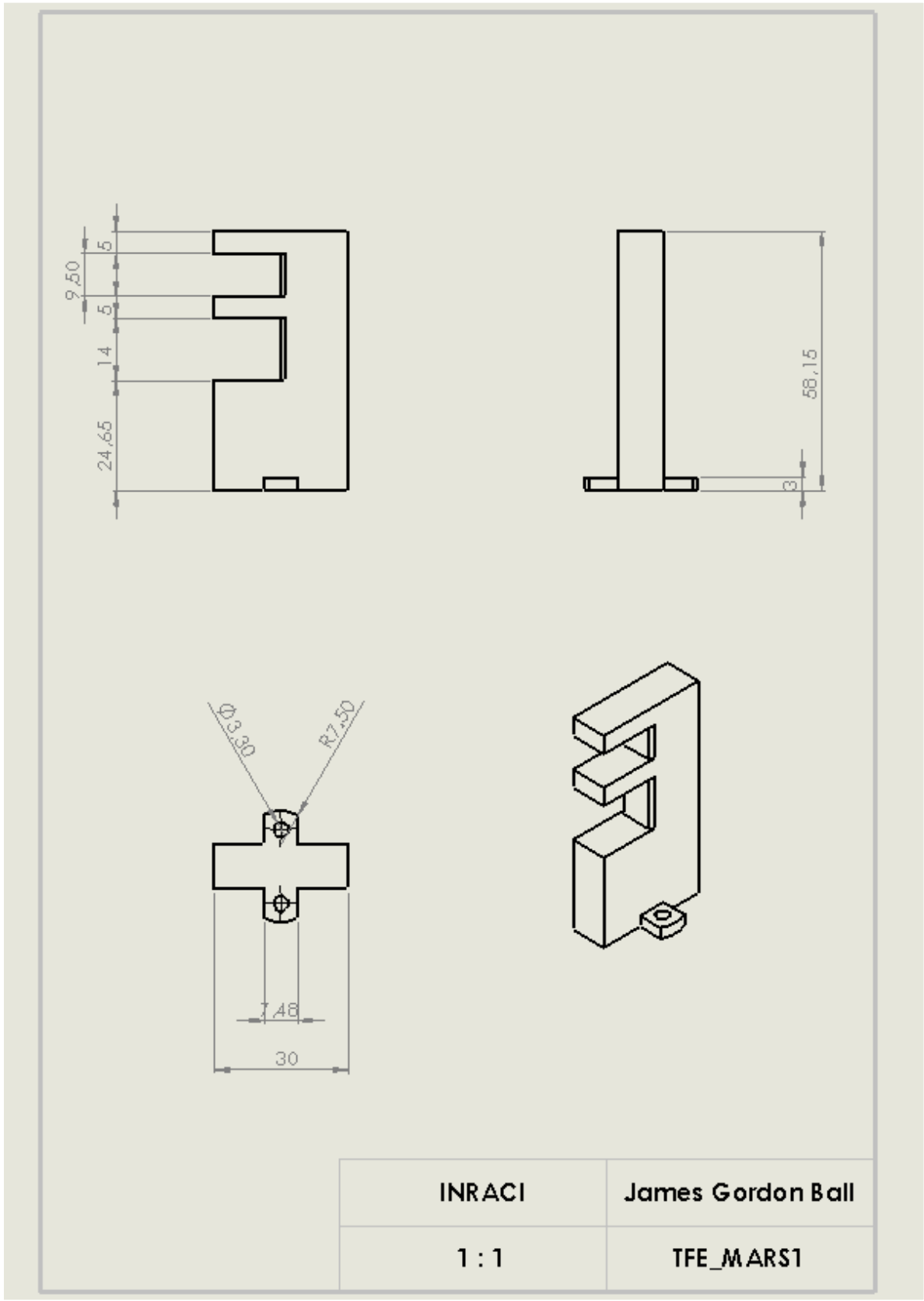
Fillet


7
2,50
R5
23,30
15,80
7
Ø3,30
5
85
3
7
3,30
7
2,50
5
5
23,30
ECH : 1/1
INRACI
JAMES
MAT :
GORDON
N° PLAN:
6TQA

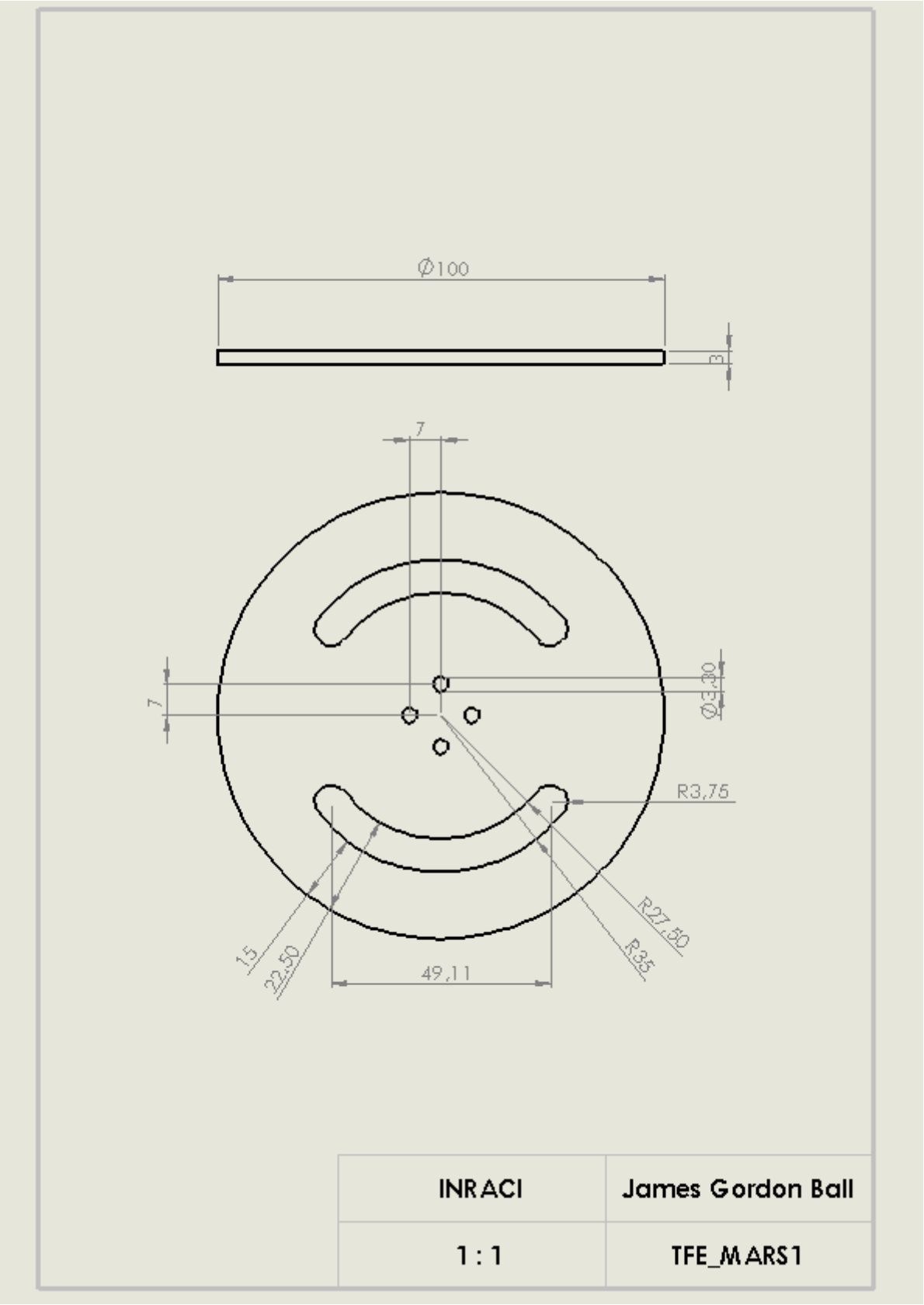
Support (grand)



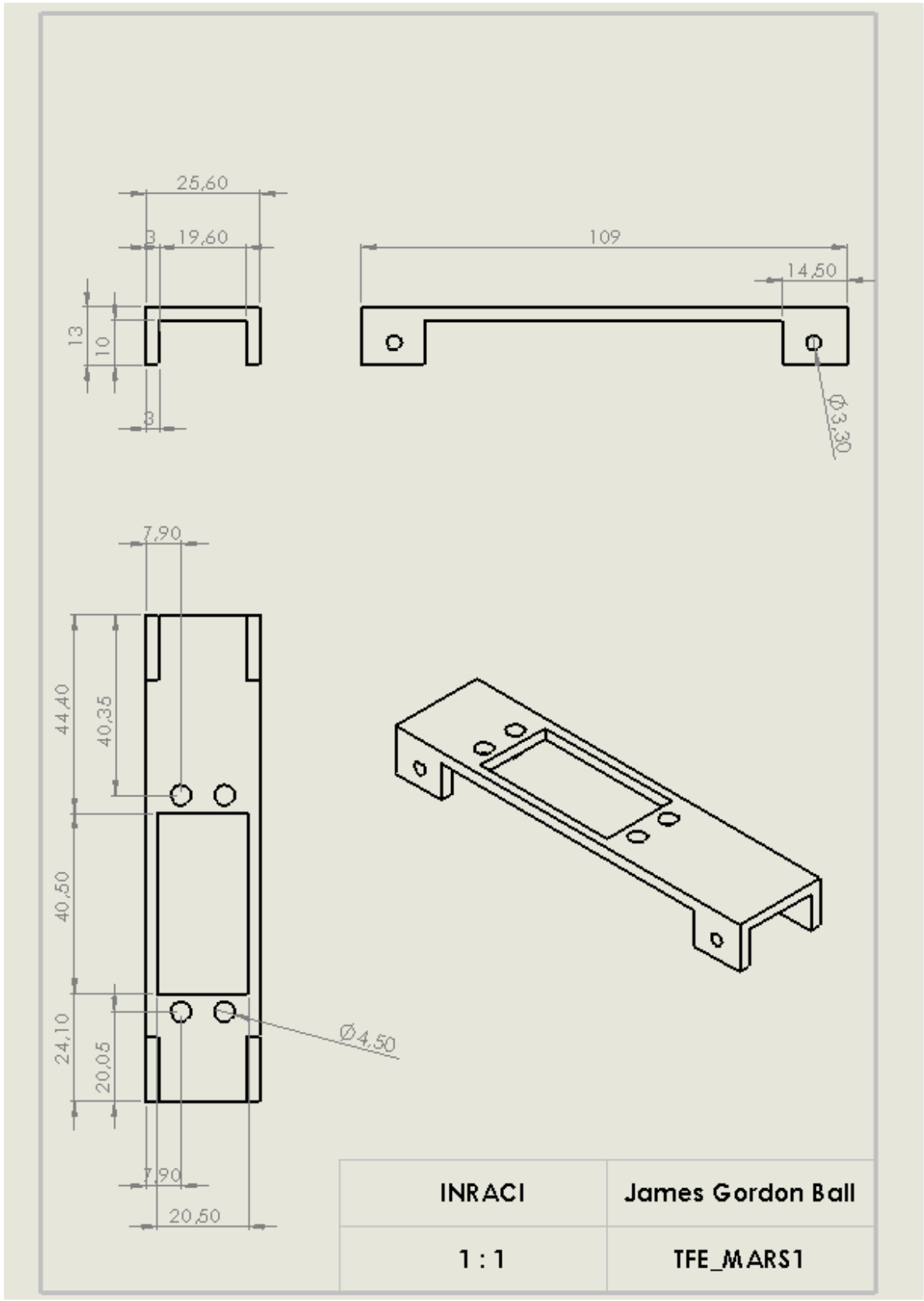
Support (petit)



Slider


Ø100
3
7
7
Ø3,30
R3,75
R27,50
R35
15
22,50
49,11
INRACI
James Gordon Ball
1 : 1
TFE_MARS1

Frame


25,60
3
19,60
13
10
3
109
14,50
Ø3,30
7,90
44,40
40,35
40,50
24,10
20,05
Ø4,50
7,90
20,50
INRACI
James Gordon Ball
1 : 1
TFE_MARS1

11. Datasheets

Servo driver:
https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/PCA9685.pdf

ESP32(uC):
https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf

Current Sensor:
https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf

Servo Moteur:
https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG996R_Tower-Pro.pdf

MCP3008:
2.7V 4-Channel/8-Channel 10-Bit A/D Converters with SPI Serial Interface (microchip.com)

PCA9685PW,112:
PCA9685 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I2C-bus LED controller (nxp.com)

IRM-30-5:
meanwellusa.com/upload/pdf/IRM-30/IRM-30-spec.pdf

MCP1525-I/TO:
21653C.book (microchip.com)

TD-8120MG (Nouveau servomoteur)
002172_Data Sheet of TD-8120MG Digital Servo Motor.pdf

ACS 712
https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/168326/ALLEGRO/ACS712.html

12. Liens

Projet de mon prédécesseur
2024_camera_Oswin/Dessin technique/Bouchon.SLDPRT at main · Oswin243/2024_camera_Oswin · GitHub

Application de schéma Bloc
https://lucid.app/lucidspark/5ead3247-214b-43e6-bb5d-5bc4e8373bb4/edit?beaconFlowId=5F1C51655A0B0B1E&invitationId=inv_d869cf1c-a5a8-4dd7-bab0-d282d6fb7d9d&page=0_0#

Vidéo d'assemblage
https://www.youtube.com/watch?v=bKY8MJDq3p0

Etude détailler servomoteur
An Introduction to the Servo Motor: How Servos work | Circuit Crush

Correcteur français
https://www.reverso.net/orthographe/correcteur-francais/

GitHub MCP3008
https://github.com/adafruit/Adafruit_MCP3008/blob/master/README.md

Vidéo PCA9685 (Driver-Servo)
https://www.youtube.com/watch?v=vvqUnWweFDs

Aide
ChatGPT

What is an H-Bridge? (20/05/25)
https://www.youtube.com/watch?v=3N_4VpzmKY0

Servo Motors, how do they work? (20/05/25)
https://www.youtube.com/watch?v=1WnGv-DPexc

Hall effect - Wikipedia (14/04/25)
https://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect

Qu'est-ce que la loi d'Ampère ? – Electricity – Magnetism (17/01/25)
https://www.electricity-magnetism.org/fr/quest-ce-que-la-loi-dampere/

Force de Lorentz : La Clé de l'Électromagnétisme (16/01/25)
https://objetsscientifiques.com/force-de-lorentz