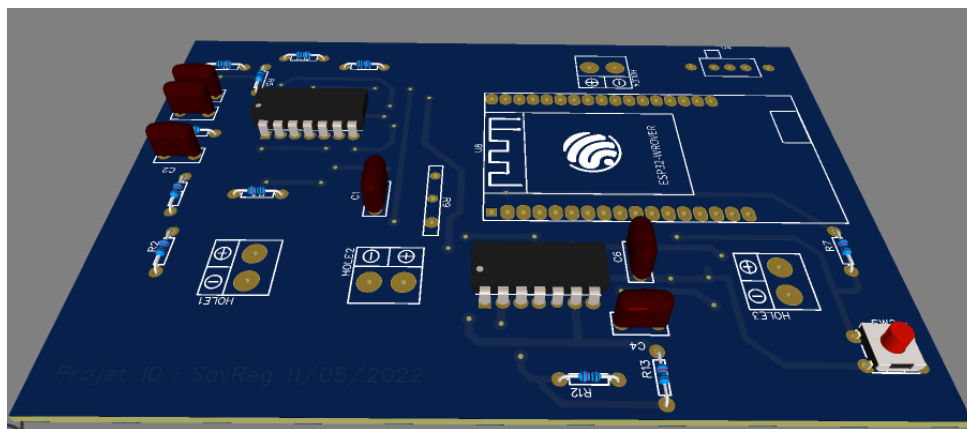


SAVreg P010

Engineering Project 2021-2022

Rapport Final



Capai Baptiste
Gauthier Bonneau
Matheus Morais
João Guilherme Cintas
Ouassim El Hasri
Oumaima Araib

Remerciements :

Nous souhaitons remercier Marc Flores pour son accompagnement et son aide bienveillante tout au long du projet, ainsi que pour son savoir qui nous a permis de découvrir le domaine de la régulation de tension.

Nous souhaitons remercier le personnel du FabLab, pour son aide précieuse et son expertise toujours pertinente.

Nous souhaitons également remercier Mireille Jacomino et Jean-Pierre Payre pour leurs précieux conseils lors des différentes soutenances.

Enfin, nous souhaitons remercier l'Ecole l'ENSE3 pour nous avoir donné l'opportunité de réaliser ce projet.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| 1) INTRODUCTION | 4 |
| 2) PARTIE TECHNIQUE..... | 7 |
| <i>a) Conception de la boucle de régulation sur Simulink.....</i> | <i>7</i> |
| <i>b) Équations de récurrence et loi de commande.....</i> | <i>9</i> |
| <i>c) Conception de la partie Hardware.....</i> | <i>10</i> |
| <i>d) Développement de la carte du circuit intégré.</i> | <i>15</i> |
| <i>e) Description du codage.....</i> | <i>18</i> |
| 2) GESTION DE PROJET | 21 |
| <i>a) Introduction.....</i> | <i>21</i> |
| <i>b) Les objectifs.....</i> | <i>21</i> |
| <i>c) Création de l'emploi du temps.....</i> | <i>24</i> |
| <i>d) La finance.....</i> | <i>25</i> |
| 3) AMÉLIORATIONS POSSIBLES | 28 |
| 4) CONCLUSION | 29 |

1) Introduction

Les générateurs d'EDF Hydro sont principalement des machines synchrones à excitation bobinée. Chaque générateur possède son propre régulateur automatique de tension (AVR) qui pilote son système d'excitation. En cas de panne, EDF dispose de systèmes d'excitation de secours afin de faire fonctionner le groupe électrogène pendant la réparation du système d'origine (ou en attendant une remise à neuf avec un nouveau système). EDF exploite environ 1300 générateurs hydrauliques. Seuls 300 sont des systèmes de grande taille (environ 30 MW). Pour les plus petits, il est dommage d'utiliser un grand et puissant système d'excitation de secours n'utilisant que 5 % de sa capacité nominale, sachant que pendant ce temps le système de secours ne serait pas disponible pour les grands générateurs. Par conséquent, l'objectif du projet est de réaliser un régulateur de tension numérique simplifié qui utiliserait une source de courant continu qui appartient déjà à EDF, cette source est un système d'excitation d'une unité de production d'énergie hydraulique réelle. Et, pour développer le régulateur a été suggéré d'utiliser comme base un contrôleur PI.

Voici le schéma de principe de l'alimentation de la centrale sur laquelle nous travaillerons :

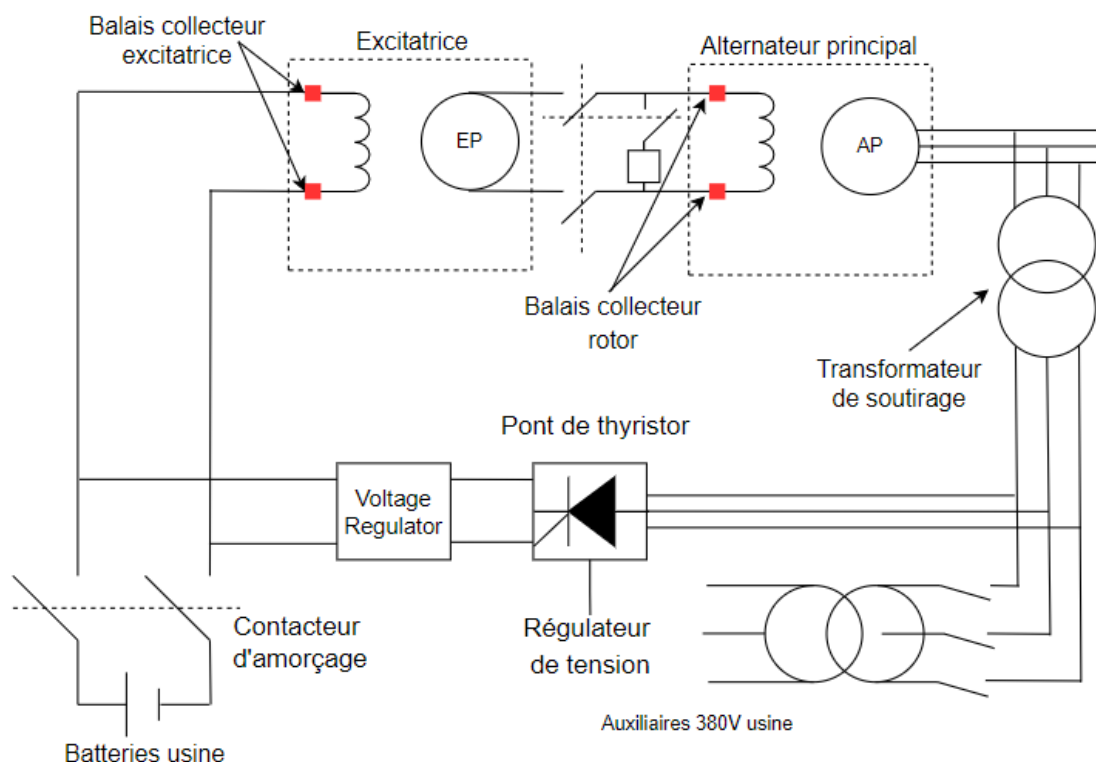


Figure 1 - Schéma type centrale hydraulique

Dans cette centrale, le moteur est auto-alimenté grâce à une excitatrice elle-même alimentée par le transformateur de soutirage à la sortie de l'alternateur. La tension de l'alternateur est régulée grâce au pont de thyristor qui renvoie une tension continue à l'excitatrice.

L'objectif de notre projet est de créer un dispositif low-cost permettant de remplacer le régulateur de tension d'origine de la centrale de production en cas de panne, afin d'éviter de déconnecter le groupe de production du réseau et ainsi d'éviter des pertes financières considérables. Ce régulateur sera composé de deux modes, un mode automatique permettant de réguler la tension en stationnaire et un mode manuel permettant le démarrage de la turbine puis son raccordement au réseau. D'autre part, le mode manuel peut être utilisé lors de la présence de défauts sur la machine, et d'ainsi alimenter progressivement l'alternateur.

Ci-dessous voici la schématisation de notre problème.

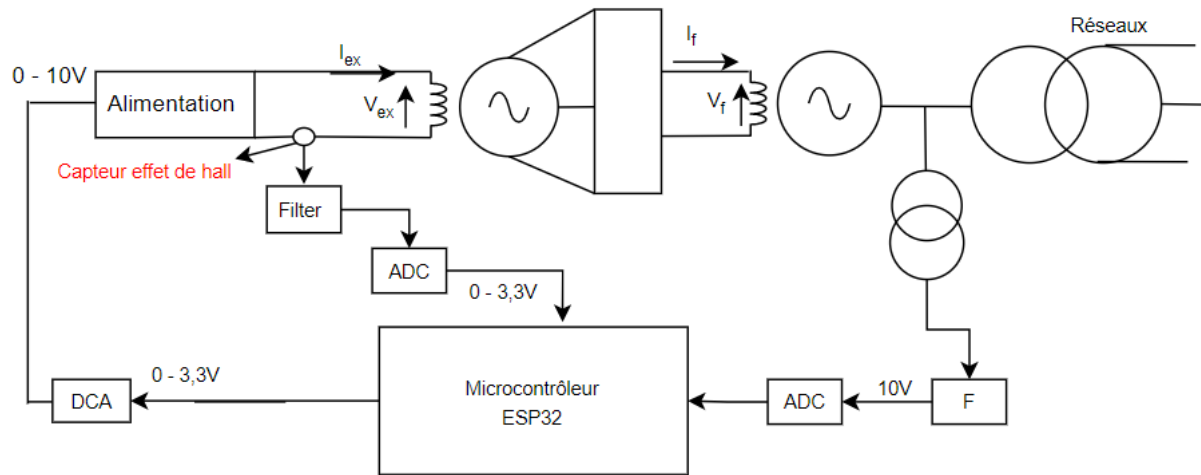


Figure 2 - Schéma du système avec composants électroniques

Ce régulateur se compose d'une carte microcontrôleur ESP32 et d'un circuit imprimé dans lequel on trouve les autres composants qui permet d'adapter les signaux d'entrées et de sorties de la carte (AOP et filtres passe bas).

Le service EDF hydro nous a fourni un générateur de tension, qui va être commandé par la carte ESP32 et une carte EF (carte qui mesure des tensions entre 0 et 10V) permettant d'obtenir la valeur de mesure de la tension à la sortie de l'alternateur.

La régulation sera réalisée par un bloc PI et un régulateur à avance retard de phase.

2) Partie technique

a) Conception de la boucle de régulation sur Simulink

Dans un premier temps nous dimensionnons le correcteur dont nous avons besoin pour asservir notre système. Nous réalisons ces simulations sur Matlab.

Une fois que nous avons dimensionné notre correcteur en continu, nous allons le discrétiser et utiliser la loi de commande qu'on va implémenter dans le code de la carte esp32 afin d'avoir un système asservi. Le cahier des charges pour notre correcteur nous impose un $tr_{5\%}=0.5s$ et une erreur statique nulle.

Les fonctions de transfert de l'excitatrice et de l'alternateur nous sont données par notre contact de chez EDF. Ainsi, on réalise la boucle de régulation du système {Alimentation+Excitatrice+Alternateur} avec un régulateur PI avance retard de phase.

$$correcteur = k_p * \frac{\tau_i * s + 1}{\tau_i * s} * \frac{\tau_1 * s + 1}{\tau_2 * s + 1}$$

On détermine les paramètres τ_i et τ_1 de régulateur avec méthode de compensation des pôles

$$\tau_i = 1 \text{ et } \tau_1 = 5$$

On détermine τ_2 et k_p pour avoir une constante de temps $\tau_{des} = 0.1$

$$\tau_2 = \frac{\tau_{des}^2 * K_1 * K_2 * k_p}{\tau_i}$$

$$k_p = \frac{\tau_i}{2K_1K_2\tau_{des}}$$

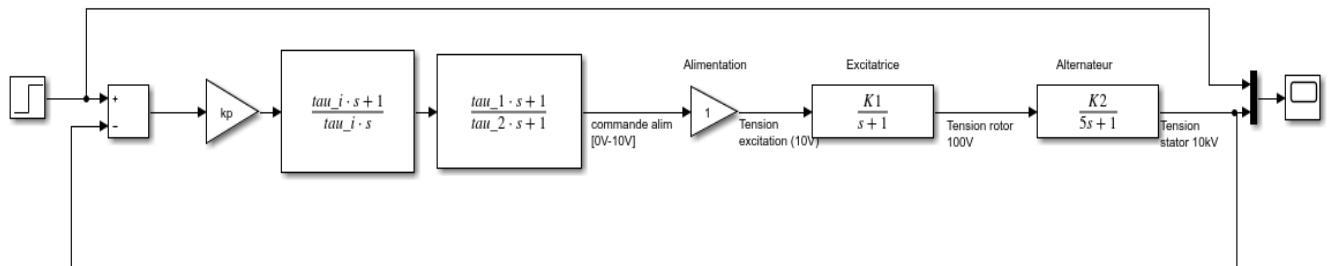


Figure 3 - Simulation en continue

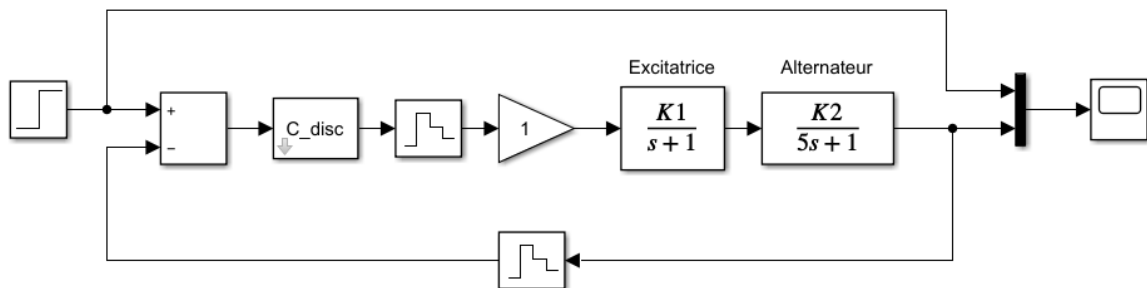


Figure 4 - Simulation en discret

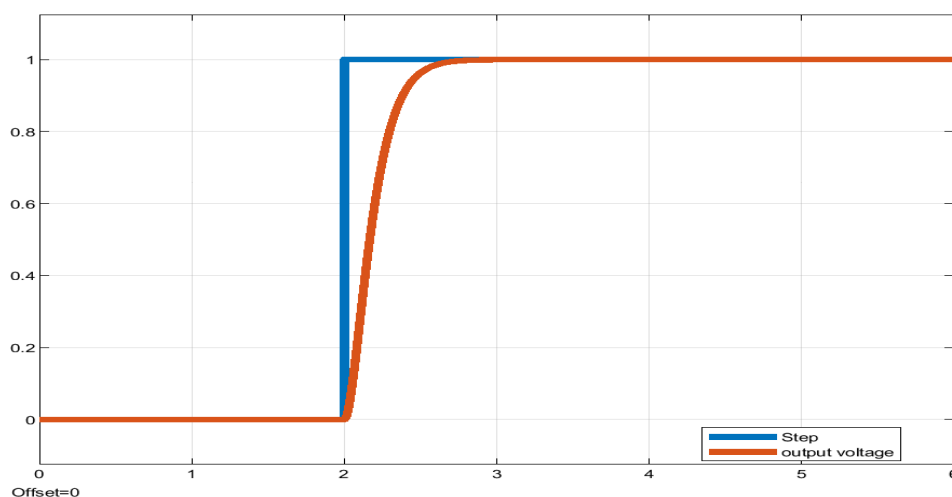


Figure 5 - Résultat de simulation

On trouve une réponse du système qui suit bien la consigne et avec un temps de réponse désiré de $0.4s < 0.5s$ et une erreur statique nulle.

b) Équations de récurrence et loi de commande

On discrétise la fonction de transfert du correcteur avec la méthode de Tustin avec une période d'échantillonnage $T_e=0.005s$, ce qui donne :

$$C_{disc} = \frac{\alpha + \beta z^{-1} + \gamma z^{-2}}{\alpha_1 + \beta_1 z^{-1} + \gamma_1 z^{-2}}$$

Avec $\alpha = 477.6$ et $\beta = -952.4$ et $\gamma = 474.8$

$\alpha_1 = 1$ et $\beta_1 = -1.905$ et $\gamma_1 = 0.9048$

$$\begin{aligned}
 u(z) &= [y_{ref}(z) - y(z)] * \frac{\alpha + \beta z^{-1} + \gamma z^{-2}}{\alpha_1 + \beta_1 z^{-1} + \gamma_1 z^{-2}} \\
 u(z) &= \frac{\alpha + \beta z^{-1} + \gamma z^{-2}}{\alpha_1 + \beta_1 z^{-1} + \gamma_1 z^{-2}} * y_{ref} - \frac{\alpha + \beta z^{-1} + \gamma z^{-2}}{\alpha_1 + \beta_1 z^{-1} + \gamma_1 z^{-2}} * y(z) \\
 u(z) &= \frac{(\alpha + \beta z^{-1} + \gamma z^{-2}) * y_{ref}(z) - (\alpha + \beta z^{-1} + \gamma z^{-2}) * y(z)}{\alpha_1 + \beta_1 z^{-1} + \gamma_1 z^{-2}} \\
 u(z)(\alpha_1 + \beta_1 z^{-1} + \gamma_1 z^{-2}) &= (\alpha + \beta z^{-1} + \gamma z^{-2})y_{ref}(z) - (\alpha + \beta z^{-1} + \gamma z^{-2})y(z) \\
 \alpha_1 u_k + \beta_1 u_{k-1} + \gamma_1 u_{k-2} &= \alpha y_{ref} + \beta y_{ref\,k-1} + \gamma y_{ref\,k-2} - \alpha y_k - \beta y_{k-1} - \gamma y_{k-2} \\
 \alpha_1 u_k &= \alpha y_{ref} + \beta y_{ref\,k-1} + \gamma y_{ref\,k-2} - \alpha y_k - \beta y_{k-1} - \gamma y_{k-2} - \beta_1 u_{k-1} - \gamma_1 u_{k-2} \\
 commande &= \frac{1}{\alpha_1} (\alpha * consigne + \beta * ckm1 + gama * ckm2 - \alpha * mesure - \beta * ykm1 \\
 &\quad - gama * ykm2 - \beta_1 * ukm1 - gamal * ukm2)
 \end{aligned}$$

Ainsi nous connaissons la forme temporelle de la commande que l'on doit appliquer à notre alimentation.

c) Conception de la partie Hardware

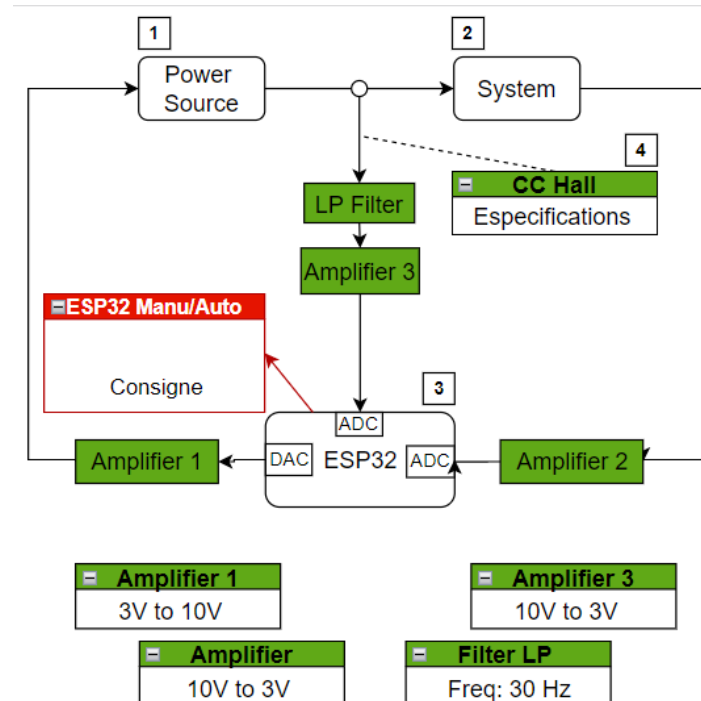


Figure 6 - Schéma explicatif de la boucle de régulation

Nous cherchons à réaliser la régulation des tensions qui entrent dans la carte microcontrôleur ESP 32, en effet cette carte peut être alimentée par une tension maximale de 3.3V, il faut ainsi faire en sorte que toutes les tensions en entrée de la carte soient continues et bien conditionnées. Nous avons 2 entrées sur notre carte et une sortie. La première entrée est une tension allant de 0 à 10V, image de la tension réseau. La seconde entrée est une tension de 0 à 4V, tension image du courant mesuré par le capteur à effet Hall. La sortie est une tension variant de 0 à 3.3 V qu'il va falloir rehausser de 0 à 10V. Nous devons ainsi dimensionner nos ampli-op et aussi le filtre passe bas en sortie de mesure du capteur à effet Hall.

a) Développement du Filtre passe bas

Le signal à l'entrée de l'amplificateur 3 doit être filtré avec un filtre passe bas pour diminuer l'amplitude des signaux d'une fréquence supérieur à la fréquence de coupure $f_c = 30 \text{ Hz}$.

Nous utilisons un filtre analogique sous la forme suivante :

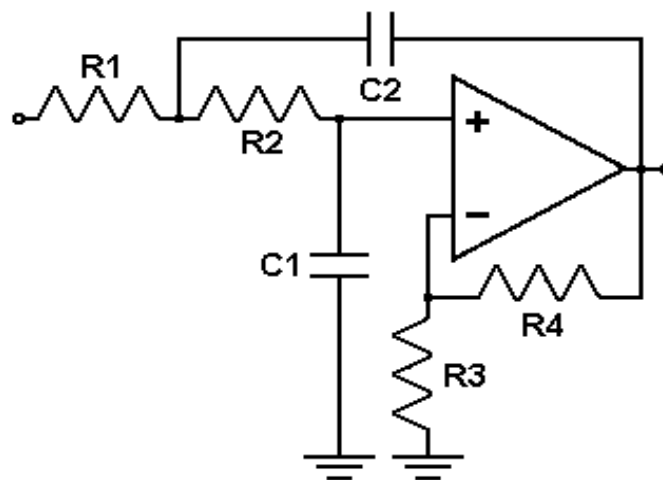


Figure 7 - Schéma électrique du filtre passe-bas

On détermine les résistances R_1 et R_2 et R_3 et R_4 , les capacités C_1 et C_2 à partir des formules suivantes de f_c et du gain G .

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$G = \frac{R_3}{R_4} + 1$$

$$f_c = 30 \text{ Hz}$$

$$C_1 = 2.2 \mu$$

$$C_2 = 1 \mu$$

$$R_1 = R_2 = 3500 \Omega$$

b) Abaisseur de tension

Dans cette partie nous avons besoin d'abaisser la tension stator U_s à la sortie de l'alternateur car cette tension correspond à une valeur de l'ordre de 10V et l'entrée analogique sur l'ESP 32 ne doit pas dépasser une tension de 3.3V.

Donc on utilise un amplificateur inverseur de la forme suivante :

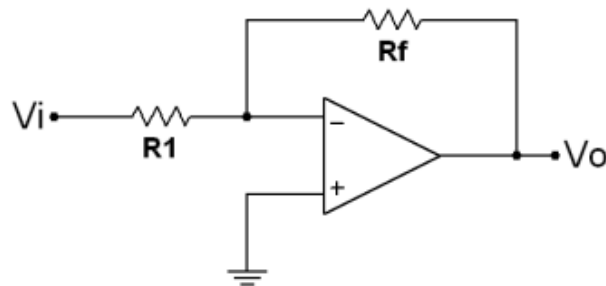


Figure 8 - Schéma électrique de l'abaisseur de tension

On calcule R_f et R_1 avec la formule suivante: (pour $V_i=10V$ et $V_f=3V$)

$$V_o = -\frac{R_f}{R_i} V_i$$

$$3 = -\frac{R_f}{R_i} 10$$

$$0.3R_i = -R_f$$

$$R_f = -0.3 * 1000 = 300$$

c) Amplificateur de tension

Sachant que les sorties analogiques de l'esp 32 ne dépassent pas 3.3V, on a besoin d'amplifier cette tension car la commande d'alimentation est de l'ordre de [0-10V]

Donc on utilise un amplificateur non inverseur avec la configuration suivante :

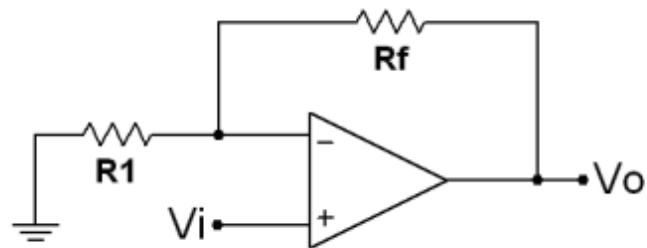


Figure 9 - Schéma électrique de l'amplificateur de tension

On calcule R_1 et R_f en sorte d'avoir un gain amplificateur, qui va amplifier notre tension de $V_i=3V$ à une tension de $10V$.

$$\begin{aligned}
 V_o &= \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) V_i \\
 10 &= \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) 3 \\
 \frac{10}{3} &= 1 + \frac{R_f}{R_i} \\
 \frac{10}{3} - 1 &= \frac{R_f}{R_i} \\
 \frac{7}{3} &= \frac{R_f}{R_i} \\
 R_f &= \frac{7}{3} R_i = \frac{7}{3} * 900 = 2100
 \end{aligned}$$

d) Tests des montages en simulation

La figure correspond au schéma de simulation du filtre passe bas analogique :

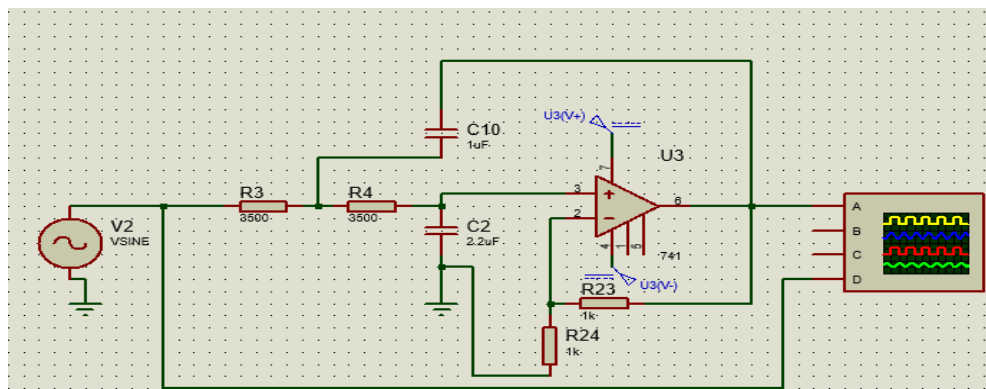


Figure 10 - Schéma électrique du filtre passe-bas en simulation

La simulation donne le résultat suivant pour une fréquence de coupure de 30Hz :

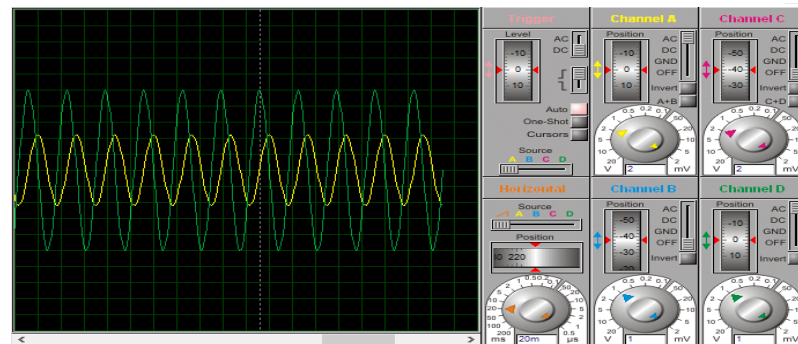


Figure 11 - Résultats du filtre passe-bas en simulation

Le signal en vert correspond au signal d'entrée et le signal en jaune correspond au signal de sortie (signal filtrée). On vérifie le fonctionnement du filtre car nous avons une atténuation de l'amplitude de signal pour une fréquence supérieure à f_c .

Nous avons le montage suivant (Abaisseur de tension) :

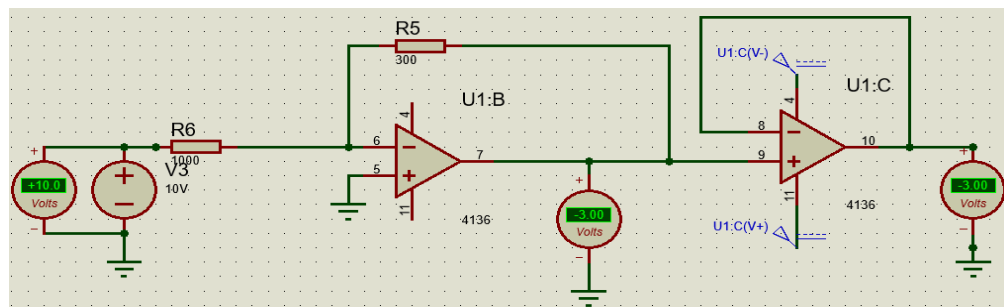


Figure 12 - Schéma électrique de l'abaisseur en simulation

Donc on retrouve les bonnes valeurs de tensions d'entrée et de sortie.

La simulation du montage amplificateur nous donne le résultat suivant :

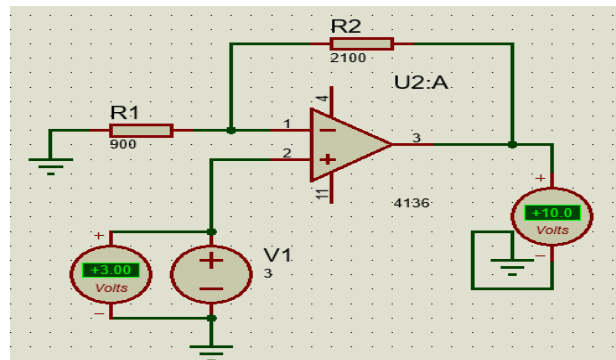


Figure 13 - Schéma électrique du montage amplificateur en simulation

Enfin, on vérifie le fonctionnement des montages aop que l'on va ensuite utiliser pour faire la carte du circuit intégré.

d) Développement de la carte du circuit intégré.

Nous utilisons le logiciel EasyEDA pour le développement de tous les schémas afin de développer le circuit imprimé.

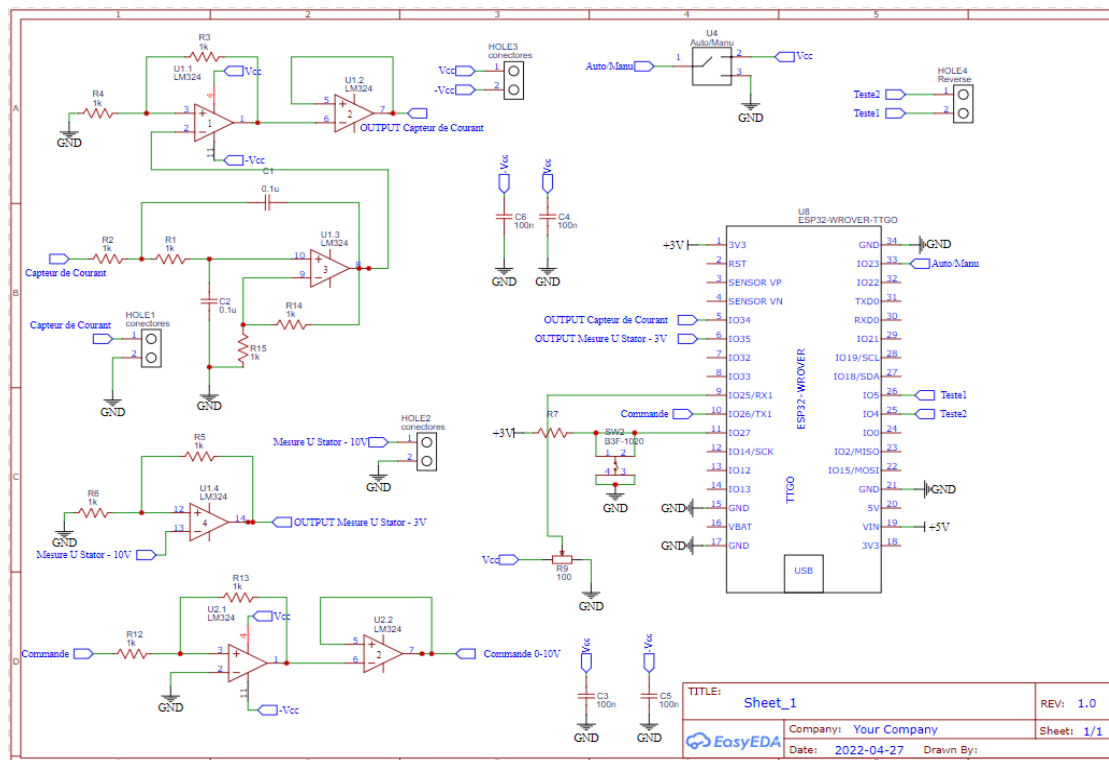


Figure 14 - Schéma électrique complet EasyEDA

Comme nous avons analysé toutes les valeurs théoriques dans le logiciel Proteus Simulation, nous avons ensuite commencé à développer le PCB. Pour cela, nous avons utilisé quelques artifices de la plateforme et l'un d'eux était l'implémentation de la carte esp32 dans le logiciel lui-même et la possibilité d'organiser tout le schéma en fonction de la partie théorique déjà testée. Pour le capteur à effet hall, nous pouvons vérifier qu'un filtre a été conçu en série avec un abaisseur de tension, étant conçu en tenant compte du fait que la carte a une tension d'entrée maximale de 3,3 V.

En plus, il est également possible de mettre en évidence l'utilisation de condensateurs de couplage pour les entrées de tension du système.

Une autre fonctionnalité intéressante de ce logiciel est la prévisualisation du modèle PCB en 3D, facilitant ainsi l'assemblage proprement dit et analysant certaines caractéristiques logistiques et fonctionnalités du prototype.

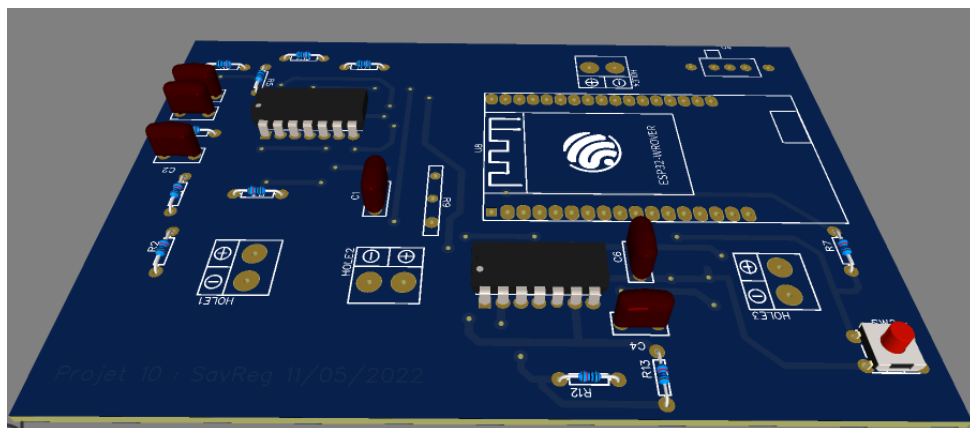


Figure 15 - Simulation du circuit sur le EasyEDA

Certaines parties du développement de la carte physique seront présentées ci-dessous, malheureusement, faute de temps, et d'une erreur d'impression nous n'avons pas pu la terminer.

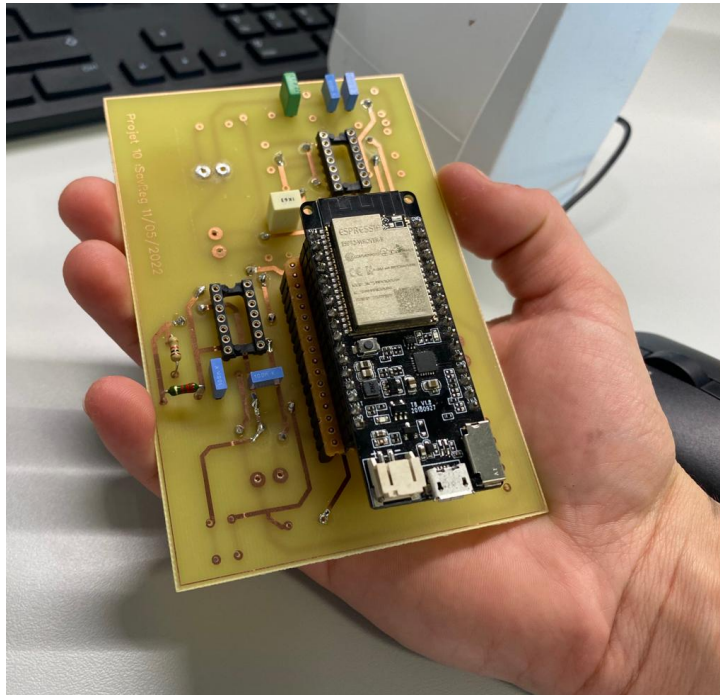


Figure 16 - Circuit imprimé (haut)

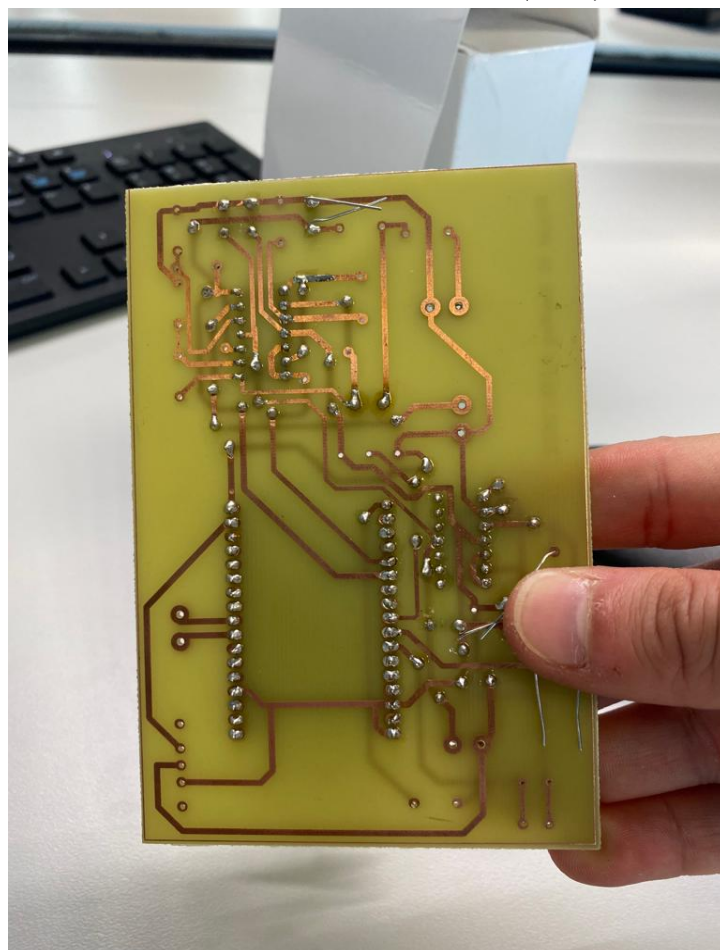


Figure 17 - Circuit imprimé (en bas)

e) Description du codage

La conception de *Software* est l'une des parties principales de tout projet. Il est responsable du traitement des données dans les différentes parties d'un projet depuis **l'acquisition**, le **prétraitement**, le **traitement** et la **livraison** des données traitées. Un point important pour la conception d'un projet de *Software* est la définition des outils utilisés pour la conception du code, cela peut rendre le code plus facile à lire et à comprendre par les parties qui n'ont pas participé à l'élaboration du code. Pour le projet SavReg, l'environnement Visual Studio Code a été utilisé pour concevoir le code à l'aide de l'outil Arduino dans l'environnement lui-même. Et pour charger le code sur la carte, nous avons utilisé l'environnement de développement Arduino IDE.

Dans notre cas, la partie **acquisition** et **prétraitement** comprend les étapes initiales nécessaires pour rendre les données disponibles au microcontrôleur, en tenant compte de l'ordre de grandeur physique en fonctionnement à tension. Nous devons recevoir et envoyer des données comprises entre 0V et 10V, mais le microcontrôleur utilisé ne peut recevoir et envoyer que des valeurs de tension comprises entre 0 V et 3,3 V, donc la commande d'amplitude des signaux est nécessaire. Pour cela, après réduction de la plage de tension de 0-10 V à 0-3 V effectuée par le Hardware (décrit dans le chapitre **Partie technique** 4 de ce même document), la transformation de tension de 0-3,3 V à la plage de 0- 1023. Nous faisons cette transformation car nous utilisons un port analogique avec un convertisseur analogique-numérique (convertisseur AN) du microcontrôleur ESP32 pour l'acquisition de données. Le port analogique fonctionne comme suit : il lit les valeurs de tension du port 0-3.3 V et les convertit dans la plage 0-1023 qui peut être traitée au sein du processeur. Une fois la conversion terminée, nous devons reconvertir ces valeurs en code pour un meilleur fonctionnement dans la plage 0-10 V.

Un autre point important concernant l'acquisition des données est la façon dont les données seront capturées. Il s'agit de la fréquence d'échantillonnage des données, nous avons utilisé $T_e=20$ ms.

La fréquence d'échantillonnage a été configurée comme suit, nous avons un processeur cadencé à 40 Mhz donc nous configurons un prescaler de 80 et configurons une minuterie pour effectuer des interruptions tous les 50000 cycles, avec cela nous avons une

interruption se produisant toutes les 20 ms et nous utilisons cette interruption pour capturer les valeurs.

La partie **traitement** concerne toutes les opérations effectuées sur les données déjà prétraitées et obtenues en phase d'acquisition. En général, il consiste à appliquer les données au PID développé en code. Pour le développement du PID, nous avons utilisé la programmation orientée objet appliquée aux équations de récurrence du contrôleur. La partie traitement concerne également le bon fonctionnement du code dans les deux étapes de fonctionnement du régulateur, qui comprend la partie **manuelle**, qui correspond à l'étape de mise en marche du système et la partie **automatique** qui servira effectivement au PID contrôleur développé (plus de détails dans le chapitre **Introduction**).

Enfin, une fois que le code fonctionne et que les bonnes opérations de code ont été définies, il est nécessaire de **livrer** les données traitées qui seront utilisées par les autres parties du projet, dans notre cas pour le système d'excitation. Pour cela, les données ont été reconverties de 0-10 V à 0-3 V et envoyées via un port analogique avec un convertisseur analogique numérique (convertisseur NA).

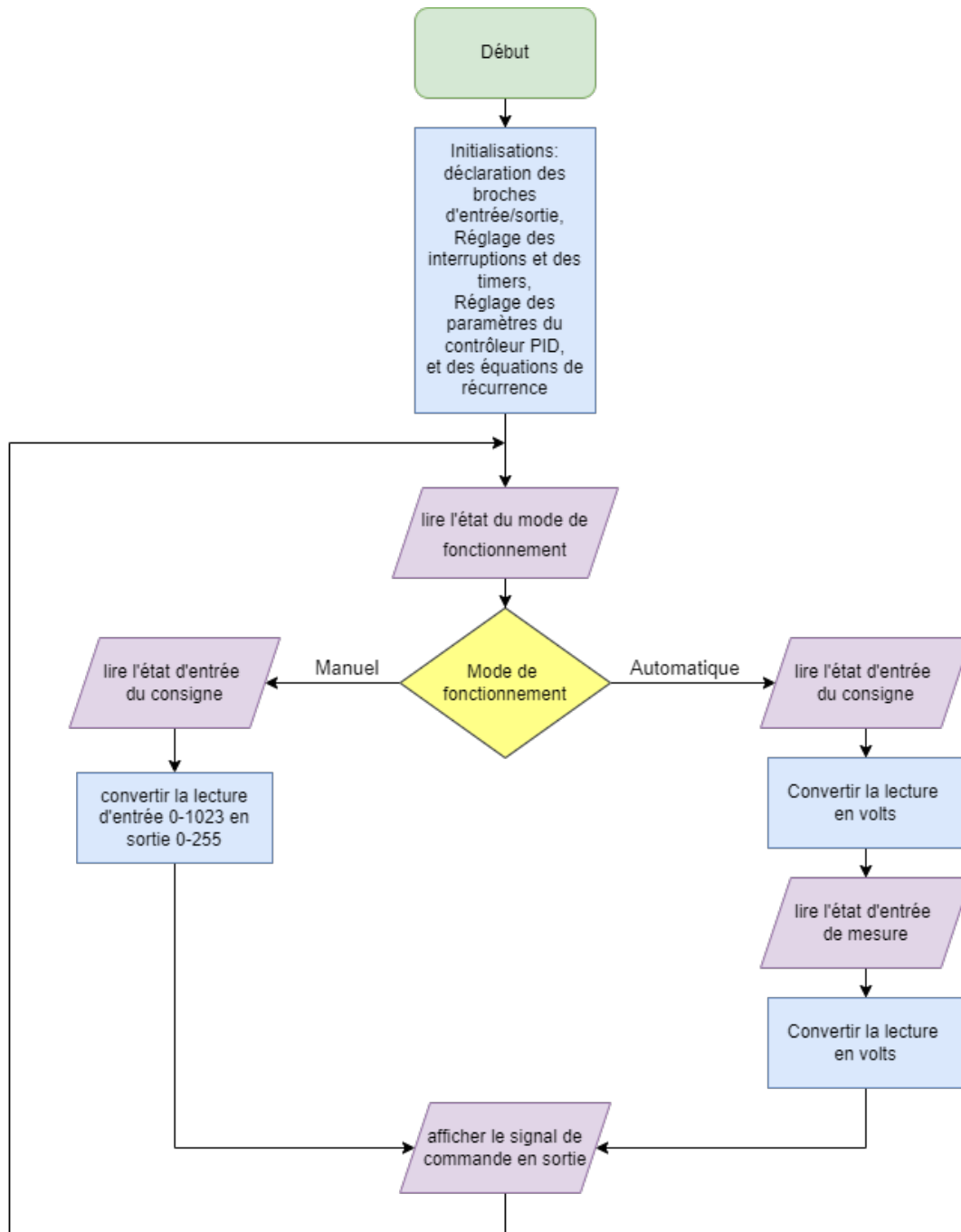


Figure 17 - Organigramme de programmation

2) Gestion de projet

a) Introduction

Dans le cadre d'un projet d'ingénierie, la part de gestion de projet occupe une place centrale. En effet, l'organisation, l'attribution des tâches, le planning, le budget et la définition des objectifs font partie intégrante du métier d'ingénieur. Nous avons donc dû apprendre pour la première fois à communiquer de manière professionnelle avec un interlocuteur dans une entreprise. Ensuite, nous avons défini nos objectifs ainsi que les deadlines associées. Enfin, nous avons rédigé un planning précis à partir des contraintes pédagogiques et techniques du projet.

b) Les objectifs

L'objectif final était de réaliser une carte low-cost. Cependant, au début du projet, nous avons tout d'abord eu une longue période de compréhension du sujet, de son contexte, de ses enjeux. Après avoir intégré tout cela nous avons commencé à préparer un planning avec les différentes étapes de la réalisation du projet.

Voici la liste des tâches que nous devons réaliser durant le projet.

1. Liste des tâches

1. Création du projet (A1) :

1. Rédiger un cahier des charges complet. (A11)
2. Lister les tâches à effectuer. (A12)
3. Répartition du travail et planification des tâches. (A13)

2. Modélisation du problème (B) :

1. Mode Manuel Régulation du courant rotor (B1)

- i. Création du modèle sous Matlab.
 - 1. Établir le but de la régulation.
 - 2. Concevoir le régulateur et choisir les paramètres à régler.
 - 3. Simulation et analyse.

2. Mode Automatique Régulation en tension stator (B2)

- i. Création du modèle sous Matlab.
 - 1. Établir le but de la régulation.
 - 2. Concevoir le régulateur et choisir les paramètres à régler
 - 3. Simulation et analyse

3. Prise en main du matériels (C1) :

- 1. Choix du microcontrôleur (C11)**
 - i. Recherche d'une référence disponible avec délai raisonnable compatible avec les entrées/sorties nécessaires + fréquence de fonctionnement
 - ii. Prise en main : contrôle entrées/sorties TOR et ANA, gestion du temps (horloge interne...)
- 2. Conception de l'électronique périphérique au microcontrôleur**
 - i. Filtrage et adaptation des signaux d'entrée-sortie : capacité nécessaire de mesurer du $[0 ; 15]$ V et d'avoir une sortie $[0-10]$ V (recours si nécessaire à des amplificateurs opérationnels...)
 - ii. Design de la carte électronique mère
- 3. Choix du capteur de courant à effet Hall (C12)**
 - i. Choix parmi les référence de chez LEM : gamme de mesure : $[0;80]$ A Sortie $[0;10]$ V
 - ii. Prise en main et test en labo

4. Implémentation des lois de commande / test en temps réel (D1)

- 1. Programmation du microcontrôleur (D11)**
- 2. Tester le programme et analyser les résultats (D11)**

- i. Sur composants analogiques (charge RL), sans l'alimentation de puissance
- ii. Sur simulateur temps-réel de EDF-DTG, sans l'alimentation de puissance
- iii. Sur charge réelle avec l'alimentation de puissance

5. Dans un second temps à faire : (E1)

- 1. Ordre de marche : séquence de démarrage et d'arrêt
- 2. Mesure U réseau et égalisation de tension avant couplage
- 3. Mesure P et Q
- 4. Limitation de I_{rotor}
- 5. Limitation de puissance réactive absorbée

Bilan :

Nous avons tout réalisé sur cette liste jusqu'au point 4)2) i).

Le test sur le vrai simulateur d'EDF n'a pas été possible en raison d'un défaut d'impression sur notre circuit imprimé et du peu de temps restant.

Enfin les tâches du point 5) étaient d'une importance secondaire c'est pourquoi elles n'ont pas été traitées.

c) Création de l'emploi du temps

Afin d'organiser au mieux notre travail nous avons réalisé un emploi du temps avec les dates limites de réalisation afin de respecter les deadlines pédagogiques et techniques.

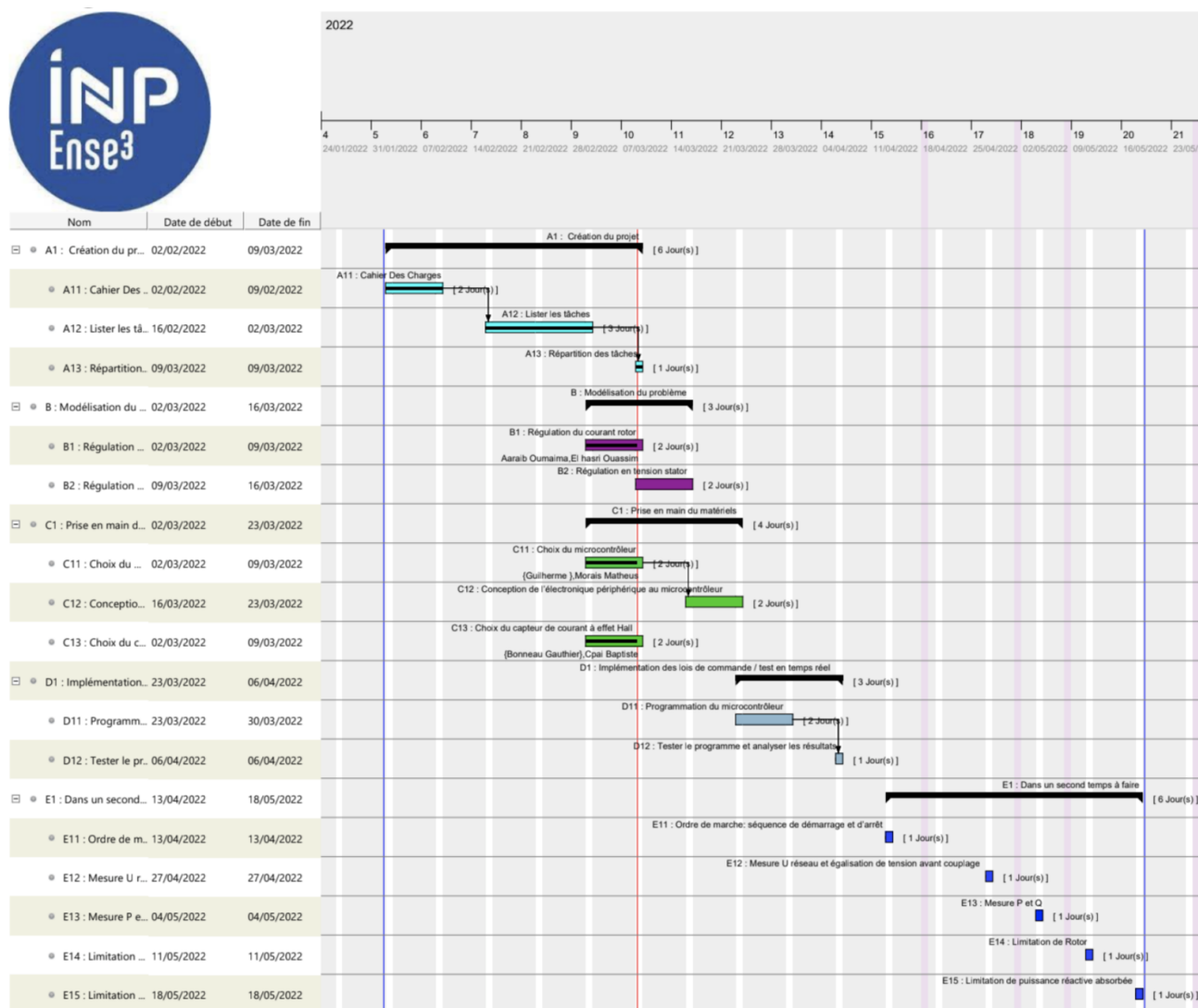


Figure 18 - Diagramme de GANTT

Grâce à ce diagramme, nous avons pu nous situer dans notre avancement par rapport aux dates limites de réalisation nécessaires à la bonne avancée du projet.

La réalisation de la liste des tâches comme indiqué précédemment a mis du temps à aboutir en raison du temps nécessaire à la compréhension totale du projet. C'est pourquoi nous avons dès le départ du projet pris du retard sur les dates que nous nous étions fixées.

C'est pourquoi, avec le recul, nous nous sommes rendu compte qu'il était indispensable de comprendre le projet dans sa globalité avant de se lancer dans la réalisation de celui-ci.

Par la suite, nous avons une phase très productive lors de la réalisation concrète du régulateur et de sa mise en œuvre. Nous avons réalisé la partie programmation de la carte, choix des composants et les tests en labo. Enfin nous avons fait le circuit imprimé sur le logiciel *EasyEDA* et réalisé l'impression.

d) La finance

Une des principales contraintes du projet était de faire un produit low-cost. En effet, le coût du système réel s'élève à plusieurs dizaines de milliers d'euros, c'est pourquoi l'objectif était de construire un projet à bas coût permettant de remplacer l'autre système durant le temps de son remplacement. Le coût de notre système ne devait pas dépasser les 1000€ en coût matériel.

a) Budget prévisionnel matériel

Suite à la réflexion sur la réalisation concrète et pratique du projet nous avons pu réaliser une liste de composants nécessaires pour la construction du système.

| BUDGET DU MATERIEL | |
|-----------------------------------|------------|
| MATERIEL | PRIX |
| Microcontrôleur esp 32 | 20€ |
| Amplificateur opérationnel(3 aop) | 20€ |
| Capteur de courant à effet hall | 20€ |
| Resistances | 5€ |
| Capacités | 5€ |
| Alimentation | 10€ |
| Total | 80€ |

Figure 19 - Budget matériel prévisionnel

Nous avons alors fait le calcul de ce budget matériel prévisionnel.
Ce budget respecte la limite imposée par le cahier des charges.

b) Budget final matériel

A la fin de notre projet nous avons un coût matériel total de 87,63€ TTC.
Ces dépenses sont cohérentes avec le budget estimé au début du projet.

| Produits | Cout TTC |
|------------------------|----------------|
| Tirage circuit imprimé | 11,02 € |
| MCNP35V225M5X11 | 0,35 € |
| MCNP35V105M5X11 | 0,35 € |
| LM324D | 1,12 € |
| 410-377 | 23,65 € |
| LTS 25-NP | 14,37 € |
| MAX5033A USA+ | 2,92 € |
| ACM12US | 16,05 € |
| frais de port | 17,8 |
| Total | 87,63 € |

Figure 20 - Budget final matériel

c) Budget rémunération ingénieurs

Dans la réalité, le développement d'un système comme celui-ci possède non seulement un coût matériel mais aussi un coût humain important.

Nous avons considéré qu'un ingénieur développant un système comme celui-ci serait rémunéré 25€/heure. Donc, nous avons eu 15 séances de 8 heures dédiées à ce projet donc nous avons établi un coût de recherche et développement de 18000€.

| BUDGET (Payment par jour) | | | |
|---------------------------|----------------------|----------------------------------|-------------------|
| | nb heures de travail | payement par heure(25E/personne) | payement par jour |
| 2-févr. | 8 | 150 | 1200 |
| 9-févr. | 8 | 150 | 1200 |
| 16-févr. | 8 | 150 | 1200 |
| 2-mars | 8 | 150 | 1200 |
| 9-mars | 8 | 150 | 1200 |
| 16 mars | 8 | 150 | 1200 |
| 23 mars | 8 | 150 | 1200 |
| 30 mars | 8 | 150 | 1200 |
| 6 avril | 8 | 150 | 1200 |
| 13 avril | 8 | 150 | 1200 |
| 27 avril | 8 | 150 | 1200 |
| 4 mai | 8 | 150 | 1200 |
| 11 mai | 8 | 150 | 1200 |
| 18 mai | 8 | 150 | 1200 |
| 25 mai | 8 | 150 | 1200 |
| | | SOMME 1 | 18000 |

Figure 21 - Budget rémunération ingénieurs

d) Coût total

Le coût total pour le système matériel + R&D est de 18087.63€.

On peut donc remarquer que le coût matériel est négligeable face au coût de la recherche et du développement des ingénieurs pour ce projet.

e) Bilan budget

La partie finance et gestion du budget pour un projet est primordiale. Elle permet de définir le cadre et les possibilités qui nous sont allouées ainsi que la faisabilité du projet.

D'autre part, nous a permis de découvrir la législation concernant les marchés publics ainsi que le système d'attribution d'un contrat suite à la mise en concurrence de 3 fournisseurs.

3) Améliorations possibles

On peut citer comme modifications possibles et activités futures, par exemple :

- La modification du processeur utilisé, pour le projet nous avons utilisé une carte de développement ESP32-WROVER-B TTGO, une carte avec plus de ressources que nécessaire pour notre régulateur, comme le WIFI, Bluetooth, entre autres. Aussi, comme ce régulateur est destiné à être utilisé dans un environnement industriel, d'autres cartes peuvent être plus robustes et fiables pour cet environnement.
- Avec la modification du contrôleur, le code doit également être modifié, les opérations restent les mêmes avec l'introduction éventuelle d'améliorations mais avec la modification éventuelle du langage de programmation et de la syntaxe.
- Comme nous n'avons pas finalisé la conception physique de la carte, une activité future possible serait d'imprimer un circuit imprimé et de souder les composants nécessaires sur la carte.
- Avec la carte, des tests peuvent être effectués pour analyser les performances du produit développé.

4) Conclusion

Grace à ce projet, nous avons pu mettre en pratique les connaissances théoriques vues lors de notre formation, et nous avons pu améliorer nos compétences en termes de travail d'équipe, d'organisation et de gestion de projet.

Cela a également été l'occasion de découvrir le fonctionnement d'un régulateur de tension et d'être confrontés au milieu industriel. Malheureusement, en raison de certains problèmes rencontrés au cours du projet, nous n'avons pas pu concevoir physiquement le contrôleur et avec lui effectuer les tests nécessaires dans le laboratoire EDF pour analyser les performances du produit développé. Malgré cela, nous avons pu mettre en place une réelle démarche de réflexion et de conception qui nous a permis d'appréhender les différentes étapes d'un projet d'ingénierie, de la gestion de projet et de la technique, en passant par l'aspect financier jusqu'au côté management.