

Automatisation d'un banc d'essais de moteurs électriques

BULTOT GEOFFREY

Institut Supérieur Industriel de Bruxelles
gbultot@etu.he2b.be

Résumé

Ce projet de bureaux d'étude réalisé pour et avec le département mécanique de l'ISIB consiste en l'automation d'un banc d'essais de moteurs électriques faible puissance (300W). Le but de l'étude est de rendre commandable un banc d'essais de moteurs à l'aide d'un écran tactile de manière à l'automatiser. Cet article développe les fonctionnalités qui y ont été ajoutées et leurs méthodes de mise en oeuvre du design de l'électronique de puissance à la programmation logicielle en passant par des études plus critiques concernant l'instrumentation d'un capteur très sensible. A l'heure actuelle, le système est fonctionnel mais nécessite certaines améliorations qui n'ont pas été réalisables cette année.

I. INTRODUCTION

Le banc possède différents éléments fixes à automatiser. En effet, on y retrouve un frein électromécanique à courant de Foucault permettant de créer un couple résistant, une jauge de contrainte servant à mesurer la force exercée sur le frein et donc le couple résistant mais également un encodeur rotatif qui permet de mesurer la vitesse grâce à la fréquence qu'il génère et pour finir, le moteur testé. Les mesures étaient auparavant effectuées avec un datalogger pour la jauge de contrainte et la fréquence de l'encodeur rotatif était mesurée avec un oscilloscope. Le but de ce projet est de s'affranchir de ces appareils de mesures encombrants et contraignants en automatisant le système. L'étude du système consistera alors à remplacer ces appareils et à créer l'électronique de puissance du frein et du moteur mais également l'instrumentation de la jauge de contrainte en tenant compte de certaines contraintes de CEM.

Mots-clés : Banc d'essais - Banc de test - Automatisation - Moteurs électriques - Hacheur - Frein courant Foucault - Jauge de contrainte - Instrumentation - Electronique de puissance - Kivy - IHM - Raspberry Pi.

Lien git du projet :
<https://github.com/GeoffreyBultot/MotorTestBench-PBE>

II. PARTIES DU PROJET

L'étude est divisée en différents points précis détaillés ci-après. Pour chaque point, les spécificités sont abordées et les détails techniques importants sont mentionnés.

I. Électronique

I.1 Mesure de couple

La mesure du couple moteur est effectuée à l'aide d'une jauge de contrainte qui mesure la force exercée sur le frein et avec le bras de levier, le couple résistant. Cette jauge est alimentée en 12V et fonctionne entre 0 et 50N avec une résolution de 2mV/V d'alimentation, ce qui nous donne une mesure de de 24mV pour 50N et -24mV pour -50N (le banc permettant de fonctionner dans les deux sens de rotation, dans un sens le frein tire sur la jauge et dans l'autre, il pousse.). Il était important de pouvoir garder la mesure négative parce qu'une contrainte du client était de pouvoir mesurer le couple moteur dans les deux sens

de rotation.

La solution apportée pour la mesure négative est d'utiliser un amplificateur d'instrumentation à référence variable. Les mesures pouvant être effectuées entre 0 et 3,3V, la référence est placée à 1,65V grâce à un pont diviseur et un montage à AOP suiveur. La mesure sur le convertisseur analogique digital est alors effectuée entre la tension de référence (1,65V) et la tension en sortie de l'amplificateur de manière à pouvoir s'affranchir de l'impact des tolérances des résistances du pont diviseur.

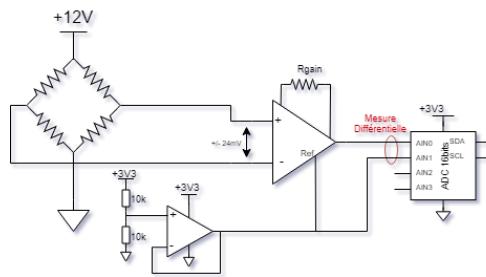


Figure 1 – Instrumentation du capteur de force

I.2 Division des masses

Comme vu au point I.1, le signal émit par jauge de contrainte est extrêmement faible et par conséquent, très fragile. Cependant, les moteurs lors de leur fonctionnement introduisaient énormément de bruit analogique, notamment au niveau de la masse, ce qui avait pour effet de fausser les mesures effectuées sur la jauge de contrainte.

Pour palier à ce problème, la masse de la jauge de contrainte a été isolée de celle des moteurs et du frein de manière à s'affranchir de ces défauts.

Sur la première masse, on retrouvera les hacheurs, les mesures courant/tension, la communication avec l'interface et pour finir, la régulation numérique réalisée par un microcontrôleur STM32f103c8t6 alors que sur la deuxième, nous retrouverons l'instrumentation de la jauge de contrainte, l'encodeur rotatif et un microcontrôleur ATMega328P permettant d'envoyer les informations au microcontrôleur principal

au travers d'une isolation galvanique réalisée avec deux optocoupleurs.

I.3 Alimentation moteur/frein

Le frein à courant de Foucault et le moteur doivent tous deux être alimentés indépendamment et de façon variable. Pour une raison de budget, l'alimentation DC générale vient d'un site internet chinois. On passe ensuite une conversion DC/DC pour faire varier la tension du moteur et celle du frein. La topologie de convertisseur utilisée est un hacheur série "high side" à mosfet canal P (figure 2). Elle est la même pour les deux hacheurs. Cependant, le mosfet utilisé n'est pas le même pour les deux hacheurs, le frein demandant beaucoup moins de puissance.

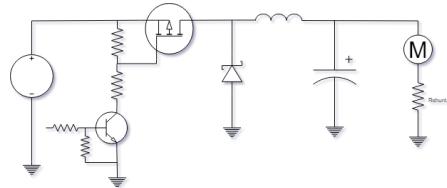


Figure 2 – Hacheur conversion DC/DC

Le Mosfet du convertisseur est piloté à l'aide d'un transistor faible puissance commandé lui-même par le microcontrôleur. Les résistances entre l'alimentation et le transistor sont dimensionnées pour une tension VGS de -10V, ce qui permet une excellente saturation.

Le hacheur fonctionne à une fréquence de 11,43 kHz. Cette fréquence est relativement basse pour limiter la dissipation dans les mosfets et pour pouvoir être générée sans peine par le microcontrôleur tout en gardant une bonne résolution de commande. Cependant, cette fréquence se situe dans la gamme de fréquence audible par l'homme et par conséquent, on l'entend dans les bobines. Cet inconvénient acoustique peut être négligé parce que le projet est destiné à fonctionner dans un laboratoire de mécanique bruyant et le banc faisant beaucoup de bruit, un léger sifflement n'est pas un problème.

Après le mosfet, on retrouve une diode Schottky destinée à protéger le système en amont et un filtre LC passif destiné à lisser la tension en sortie du convertisseur.

I.4 Mesures de courant

Les mesures de courant sur le moteur et le frein électromécanique se font grâce à un shunt de $0,05 \Omega$, l'installation étant dimensionnée pour des courants de 10A, ce shunt accepte jusqu'à 5W.

Les mesures sont alors effectuées grâce à un montage à amplificateur opérationnel rail-to-rail monté en amplificateur non-inverseur (figure 3, aop du bas) dont le gain est donné par l'équation 1. Les résistances sont dimensionnées de manière à ce que la sortie soit dans la gamme de tension [0 , 3.3V] admissible par l'adc du microcontrôleur utilisé.

$$U_s = 1 + \frac{R_4}{R_3} * U_{shunt} \quad (1)$$

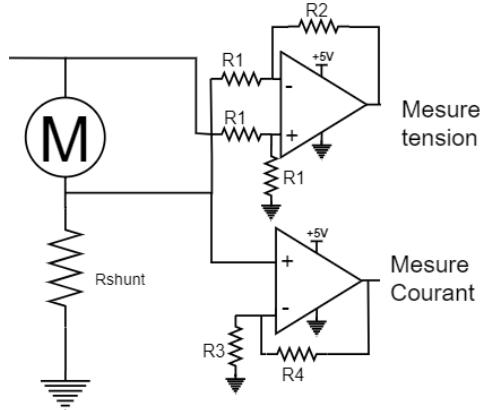


Figure 3 – schéma mesures tension et courants

Les valeurs calculées des résistances et des autres composants sont disponibles en annexe F.

A l'heure actuelle, la mesure est lissée numériquement en utilisant une moyenne, ce qui n'est pas des plus efficaces en termes de précision mais un filtre analogique doit être

ajouté pour lisser le signal et obtenir la valeur moyenne de ce dernier.

I.5 Mesures de tension

Les mesures de la tension du moteur et celle du frein sont, quant à elles, effectuées à leurs bornes sur une plage de 0 à 130V. Cette tension est, ici, trop élevée pour un convertisseur analogique digital de microcontrôleur. La tension est alors abaissée à l'aide d'un amplificateur rail-to-rail monté en amplificateur différentiel non-inverseur (figure 3, aop du haut) dont le gain est donné par l'équation 2. Les résistances sont dimensionnées pour que V_s soit dans la gamme [0 , 3.3] V en sortie :

$$U_s = (V_p - V_n) * \frac{R_2}{R_1} \quad (2)$$

II. Informatique

La partie informatique est subdivisée en deux grandes parties : Une concerne l'informatique embarquée l'autre, le côté interface utilisateur.

II.1 Informatique embarquée

Pour les besoins analogiques mentionnés au point I.2, les masses de certains éléments ont dû être séparées. Dès lors, l'informatique embarquée se compose de deux micro-contrôleurs dialoguant entre eux grâce à une liaison UART passant par une isolation galvanique à base d'optocoupleurs.

Le premier, un STM32f103C8T6 permet de gérer la régulation numérique des différents paramètres lors des essais ainsi que l'acquisition des tensions et courants des moteurs et du frein électromécanique mais également la communication avec l'interface utilisateur.

Le deuxième micro-contrôleur est un AT-Mega328P et permet l'acquisition de la mesure de vitesse au travers d'un encodeur rotatif et la mesure du couple moteur au travers d'un convertisseur analogique-digital mesurant le signal amplifié de la jauge de contrainte.

La programmation des microcontrôleurs a été réalisée sur base d'événements. En effet, il ne faut en aucun cas que le code bloque dans une boucle ou attende des informations. Dès lors, chaque action effectuée par le microcontrôleur est dictée par le logiciel de l'interface graphique et le reste du temps, il ne fait rien d'autre que les tâches de régulation et de traitement d'erreur.

La communication avec l'interface graphique et l'interprétation des informations est réalisée selon le principe des TM¹ et des TC². Le but est de différencier de manière claire un envoi d'une commande d'une demande de mesure. Dès lors, des tables contenant les ID sont créées de chaque côté et il suffirait d'agrandir les tables et d'ajouter un pointeur de fonction pour ajouter une commande. Cette méthode montre toute son efficacité lorsque le code devient complexe et qu'il ne faut faire qu'une modification mineure à ce dernier pour ajouter une fonctionnalité.

II.2 Interface utilisateur

L'interface utilisateur est réalisée sous Kivy, un framework python grâce à une Raspberry Pi 3 model B et un écran tactile 7".

Cette interface est composée de plusieurs modes et fonctionnalités :

L'interface de configuration permet de créer des fichiers contenant les informations des moteurs mais également des scénarios de test.

Le mode manuel permet de gérer les moteurs et le couple appliqué de manière manuelle, en utilisant des curseurs.

Le mode automatique permet, en utilisant les fichiers de scénarios, de lancer des essais de manière automatique. Le logiciel capture les différentes informations sur les moteurs et les stocke dans un fichier, ce qui permet de tracer les courbes caractéristique des moteurs.

1. télémétrie
2. télécommande

III. Mécanique

La mécanique du projet n'est constituée que d'assemblages pour réaliser les boîtiers 3D. Néanmoins, il s'avère essentiel de dimensionner les composants de manière à ce qu'ils concordent avec la forme du banc d'essais pré existant.

Deux boîtiers existent. Le premier contient l'électronique avec les alimentations et par conséquent, les ventilations adéquates alors que le deuxième ne regroupe que la partie interface avec la raspberry pi et l'écran tactile. Ces deux boîtiers ainsi que les assemblages sont présentés en annexe E.

III. MATÉRIEL ET MÉTHODES

I. Matériel

Le matériel général est disponible ci-dessous. Cette liste n'inclue pas les composants électroniques utilisés.

- Raspberry Pi 3 model B
- Ecran 7" tactile (800 x 480)
- Oscilloscopes
- Alimentations de laboratoire 5V et 12V
- Alimentation DC 120V - 800W
- Imprimante 3D
- Graveuse laser trotec
- Tachymètre
- Banc d'essais
- ULINK2
- Câbles USB 2 (B, mini A et micro B)

II. Logiciels

- Python 3.7.6
- Kivy V1.11
- Debian
- IDE Arduino
- Keil uVision V5.26.2
- STM32CubeMX version 5.5.0
- Eagle PCB
- SolidWorks 2019
- Excel
- Multisim et PSpice

— WinScp et MobaXtern

III. Méthode

L'étude du système a été réalisée grâce à une méthode agile de gestion de projet. Bien que généralement utilisée en équipe, cette organisation permettait de pouvoir découper le projet en différentes parties indépendantes et par conséquent, de proposer un minimum viable pour chacune d'entre elles. Le but étant d'avoir vite des résultats pour pouvoir tester les différentes parties entre-elles.

III.1 Hardware

Dans une premier temps, l'électronique de la commande des moteurs et du frein électromécanique ont été réalisées grâce à énormément de simulations et d'essais pratiques pour trouver la meilleure architecture de conversion DC/DC dans des limites de coûts raisonnables.

Par la suite, l'instrumentation de la jauge de contrainte a été réalisée grâce à beaucoup de recherches sur le sujet de manière à trouver le meilleur compromis entre précision d'amplification et coût de fabrication.

III.2 Software

En ce qui concerne l'informatique embarquée, le logiciel a été réalisé en découplant le code en différentes tâches indépendantes classées par ordre de priorité. Cette classification a permis un très bon déroulement de la programmation en s'assurant de coder les couches basses avant d'intégrer les couches plus haut niveau.

Pour ce qui est de l'interface graphique, elle a d'abord fonctionné sans interface, pour faciliter la communication. Ensuite, j'ai ajouté petit à petit les nouvelles pages et fonctionnalités en venant les greffer et en encapsulant les informations de manière à créer une interface évolutive composée d'une multitude d'éléments in-

dépendants. Chaque nouvelle fonctionnalité a d'abord été pensée au niveau fonctionnel avant d'être intégrée graphiquement, ce qui a permis un développement plus rapide et plus axé sur les performances du code plus bas niveau.

IV. RÉSULTATS

A ce stade de l'étude, l'interface utilisateur est complète, fluide et permet de générer des courbes moteurs d'une qualité suffisante pour être exploitées (annexe G). Toutes les mesures sont fonctionnelles mais le filtrage pour limiter les oscillations sur la mesure des tensions et courants n'est pas encore réalisé à l'heure actuelle. L'instrumentation de la jauge de contrainte, qui était le point sensible du système, est fonctionnelle avec un potentiomètre (en interne, la jauge n'est qu'un pont de wheatstone) mais n'a pas pu être essayée en conditions réelles.

La figure 4 ci-dessous montre la version finale du banc d'essais avec l'électronique intégrée.

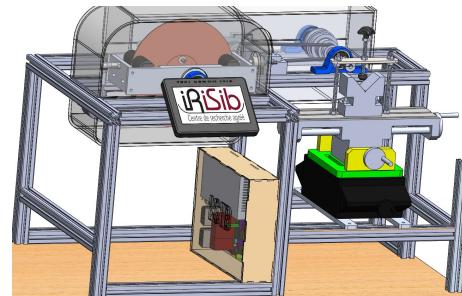


Figure 4 – Banc d'essais final

V. CONCLUSION

Cette étude consistait en l'automatisation d'un banc d'essais de moteurs faible puissance. Il fallait alors réaliser l'électronique de puissance des moteurs et d'un frein électromécanique ainsi que l'électronique d'acquisition des différents signaux relatifs aux informations à récupérer telles que les puissances, le couple et la vitesse.

En raison de la situation sanitaire actuelle, l'étude n'a pas pu aboutir complètement et certains aspects sont encore à finaliser, notamment l'ajout de filtres sur les signaux de mesures et les essais sur les hacheurs de commande des moteurs en raison d'un manque de composants. Toutes les parties manquantes à l'aboutissement du projet sont disponibles en annexe H.

L'intérêt de l'étude est de rendre l'utilisation du banc d'essais de la section mécanique de l'ISIB beaucoup plus simple. Le but premier était de pouvoir tracer des courbes moteurs en s'affranchissant d'appareils de mesure encombrants et long à mettre en place. Ce but a alors été atteint parce que le projet dispose d'une interface fonctionnelle et simple d'utilisation permettant de générer les courbes des moteurs comme montré en annexe G.

RÉFÉRENCES

- [1] [kivy.org]. *Manual installation (On Raspbian Jessie/Stretch).*
<https://kivy.org/doc/stable/installation/installation-rpi.html>
- [2] [STmicroelectronics] (Novembre 2018). *STM32CubeMX for STM32 configuration and initialization C code generation : UM1718 Rev 27.*
<http://www.audentia-gestion.fr/STMicroelectronics/PDF/en.DM00104712.pdf>
- [3] [STmicroelectronics] (août 2015). *STM32F103x8.*
<https://4donline.ihs.com/images/VipMasterIC/IC/SGST/SGST-S-A0001117293/SGST-S-A0001117293-1.pdf?hkey=52A5661711E402568146F3353EA87419>
- [4] [mrichardson23] (15 octobre 2015). *Using Kivy with the official Raspberry Pi Touch Display.*
<https://github.com/mrichardson23/rpi-kivy-screen>
- [5] [techweb] (27 avril 2017). *Basic Operation of Step-Down Converters.*
https://techweb.rohm.com/knowledge/dcdc/dcdc_pwm/dc_dc_pwm02/2200
- [6] [electrical4u] (Juin 2019). *Buck Converter | Step Down Chopper.*
<https://www.electrical4u.com/buck-converter-step-down-chopper/>
- [7] [Lewis Loflin]. *Programming ADS1115 4-Channel I2C ADC with Arduino.*
<http://www.bristolwatch.com/arduino2/ard0.htm>
- [8] [Lewis Loflin]. *Solar Panel Battery Charge Controller Switching Circuit.*
<http://www.bristolwatch.com/solar2.htm>
- [9] [AN2834 Application note] (Novembre 2019). *How to get the best ADC accuracy in STM32 microcontrollers.*
https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/group0/3f/4c/a4/82/bd/63/4e/92/CD00211314/files/CD00211314.pdf/jcr:content/translations/en.CD00211314.pdf
- [10] [icones8.fr].
<https://icones8.fr/icons>
- [11] [RealWorld Graphics].
<http://www.rw-designer.com/>
- [12] [Stackoverflow].
<https://stackoverflow.com/>

TABLE DES MATIÈRES

I Introduction	1
II Parties du projet	1
I Électronique	1
I.1 Mesure de couple	1
I.2 Division des masses	2
I.3 Alimentation moteur/frein	2
I.4 Mesures de courant	3
I.5 Mesures de tension	3
II Informatique	3
II.1 Informatique embarquée	3
II.2 Interface utilisateur	4
III Mécanique	4
III Matériel et méthodes	4
I Matériel	4
II Logiciels	4
III Méthode	5
III.1 Hardware	5
III.2 Software	5
IV Résultats	5
V Conclusion	5
Annexes	i
A Mode d'emploi	i
B Schéma bloc	ix
C PCB	x
D Schéma de câblage	xiv
E Assemblage modèles 3D	xv
F Dimensionnement composants	xix
G Fichier généré par l'application	xx
H Reste à faire	xxii
I Notice expérimentale de Thomas Jourdan	xxiv

TABLE DES FIGURES

1	Instrumentation du capteur de force	2
2	Hacheur conversion DC/DC	2
3	schéma mesures tension et courants	3
4	Banc d'essais final	5
5	Ecran mode manuel	iii
6	Mode manuel : Chargement d'un fichier moteur	iii
7	Mode manuel : Fichier moteur chargé	iii
8	Mode automatique	iv
9	Mode automatique : Chargement script	iv
10	Mode automatique : script chargé	iv
11	Mode automatique : script démarré	iv
12	Menu : création de fichiers	v
13	Menu "Settings"	v
14	Configuration : Edition de fichier	vi
15	Configuration : Sélection du fichier	vi
16	Edition d'un fichier moteur	vi
17	Création de script : Description des boutons	vii
18	Création de script : choix du moteur	vii
19	Création de script : Fichier moteur sélectionné	vii
20	Création de script : Tests disponibles	viii
21	Schéma bloc	ix
22	Composants pour l'assemblage de l'écran	xv
23	Assemblage de l'écran	xv
24	Composants du boîtier général	xvi
25	Boîtier général assemblé	xvi
26	Composants pour l'assemblage du boîtier général	xvii
27	Etapes d'assemblage du boîtier général	xvii
28	Assemblage final	xviii
29	Fichier généré par l'application	xx
30	Courbe générée à partir du fichier	xxi

Annexes

A. MODE D'EMPLOI

ATTENTION : ce système génère des tensions et courants pouvant être fatal pour l'homme. Il est impératif de ne jamais toucher aux composants qui composent le système sans une étude préalable de celui-ci.

Pour des raisons pratiques, les données présentées dans les captures d'écran de l'application sont purement arbitraires et ne constituent en rien des mesures réellement effectuées.

Prérequis

Matériel

Le matériel nécessaire à l'utilisation du système est :

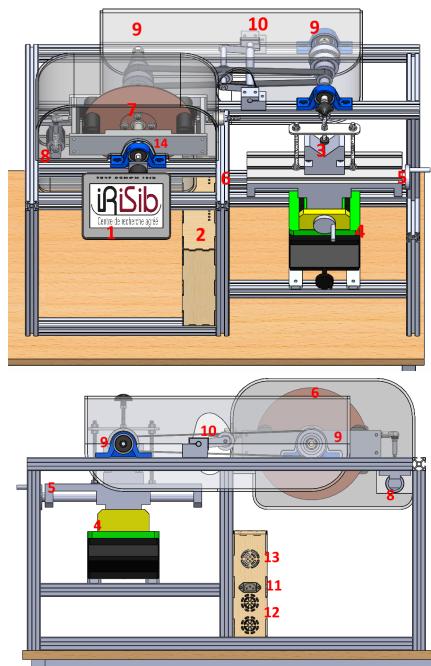
- Un moteur DC à aimant permanent
- Le banc d'essais
- L'interface tactile
- Le boîtier contenant l'électronique

Logiciels

- Python 3.7.6 avec le framework Kivy V1.11
- Excel

Composition

Le banc d'essais est composé des éléments suivants :



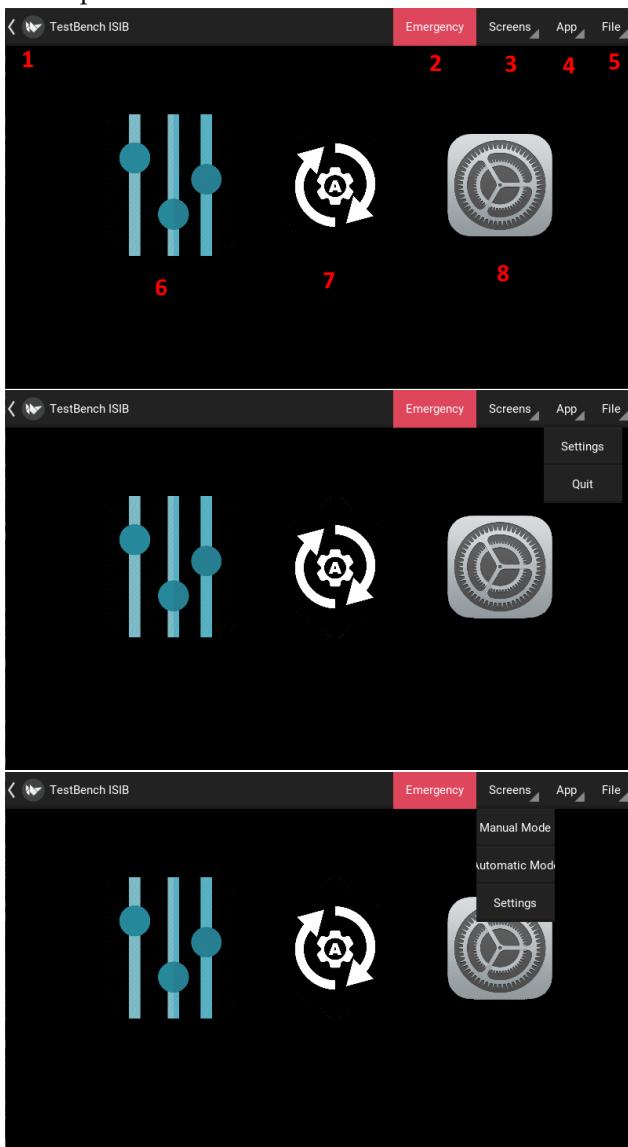
1. Écran tactile
2. Boîtier général
3. Emplacement moteur
4. Réglage axe Y
5. Réglage axe X
6. Branchement moteur
7. Frein électromécanique
8. Jauge de contrainte
9. Pignons de courroie
10. Tendeur de courroie
11. Prise secteur
12. Ventilation électronique
13. Ventilation alimentation
14. Compte tour

Démarrage

1. Brancher la prise secteur au boîtier général
2. Brancher le moteur aux connecteurs prévus à cet effet
3. Allumer le boîtier général
4. S'assurer que le bouton d'arrêt d'urgence n'est pas enclenché
5. Démarrer le logiciel "TestBenchIsib.py" situé dans pi/Documents/
6. Calibrer le banc d'essais selon le mode d'emploi de Thomas Jourdan (annexe I)

Écran d'accueil

L'écran d'accueil permet d'accéder à toutes les fonctionnalités de l'interface de manière simple.
Description des boutons :



1. Retour : Permet de revenir à l'écran d'accueil à partir de n'importe quel autre écran
2. Arrêt d'urgence : Arrête le moteur et relâche le frein (il sera remplacé par un bouton physique)
3. Screens : Permet un accès direct à n'importe lequel des 3 écrans sans devoir passer par l'écran d'accueil
4. App : Contient un menu pour la configuration de l'app (sera retiré après développement final) et un bouton pour fermer l'application.
5. Unused - utilisation future
6. Accès au mode manuel (cfr point A)
7. Accès au mode script / automatique (cfr point A)
8. Accès aux paramétrages des fichiers de données (cfr point A)

Mode Manuel

Le mode manuel est utilisé pour faire des essais à un point donné sans tracer de courbe. Il permet notamment de déterminer certains paramètres non fournis par la documentation du moteur comme la vitesse maximale ou le couple maximum.

Aucune action n'est possible si le fichier correspondant au moteur n'est pas chargé.

Pour charger un fichier de configuration moteur, on clique sur le bouton **Load**. Une popup s'ouvre, il suffit de le sélectionner et de cliquer sur **Load** (figure 6).

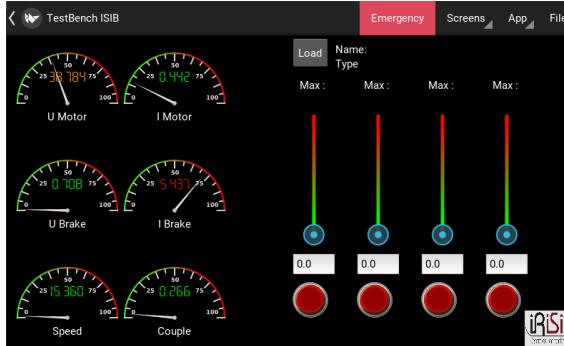


Figure 5 – Ecran mode manuel

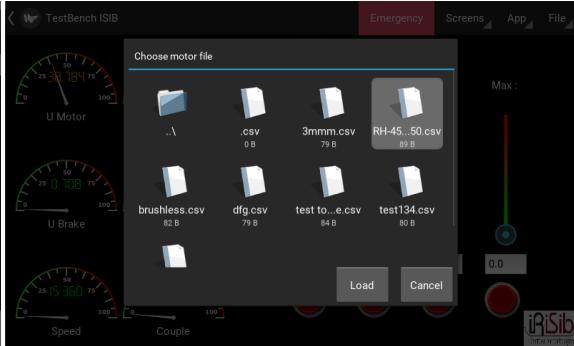


Figure 6 – Mode manuel : Chargement d'un fichier moteur

Une fois le fichier chargé, les valeurs des curseurs sont mises à jour comme le montre la figure 7 :

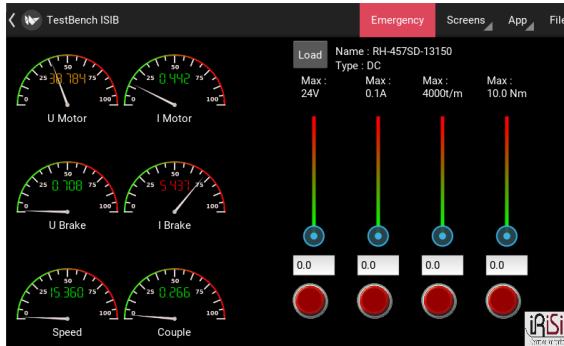


Figure 7 – Mode manuel : Fichier moteur chargé

Mode Script/Automatique

Le mode script permet d'effectuer des essais préalablement définis et de générer les données nécessaires au tracement des courbes correspondantes aux caractéristiques du moteur.

Le démarrage du mode automatique démarre avec le lancement d'un script. Pour ce faire, il faut en charger un à l'aide du bouton "Load" visible sur la figure 8. Une popup s'ouvre, il suffit de sélectionner le script à lancer et de cliquer sur **Load** (figure 6).

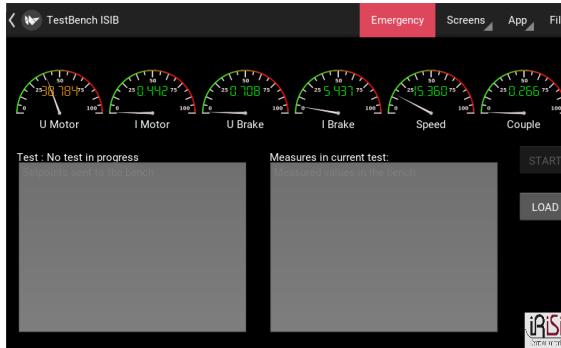


Figure 8 – Mode automatique

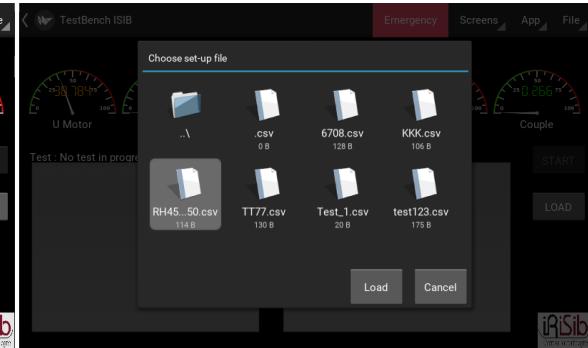


Figure 9 – Mode automatique : Chargement script

Une fois le fichier chargé, le bouton "START" est activé et on peut lancer le script. (figure 11)

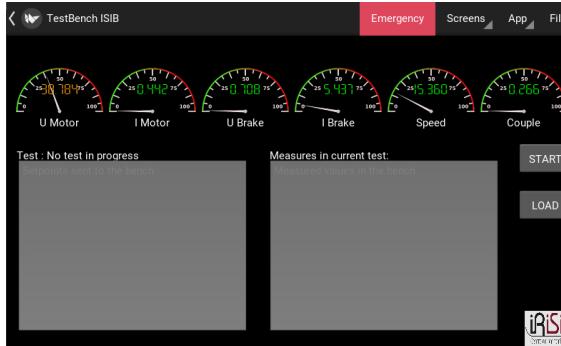


Figure 10 – Mode automatique : script chargé

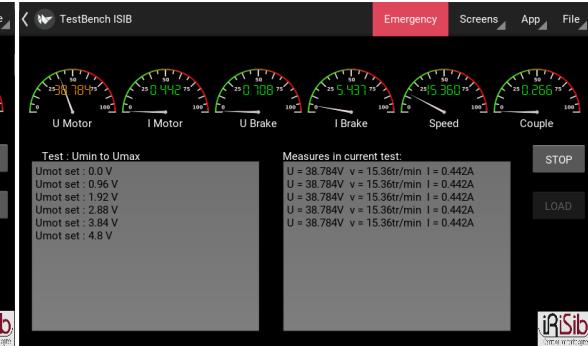


Figure 11 – Mode automatique : script démarré

Fichiers de données

Pour faire fonctionner le système, il est impératif de lui fournir des informations sur les valeurs maximales (absolute maximum rating) des moteurs mais également des fichiers contenant les scripts de tests pour tracer les courbes moteur. Ce menu, montré ci-dessous, est accessible depuis l'écran d'accueil.

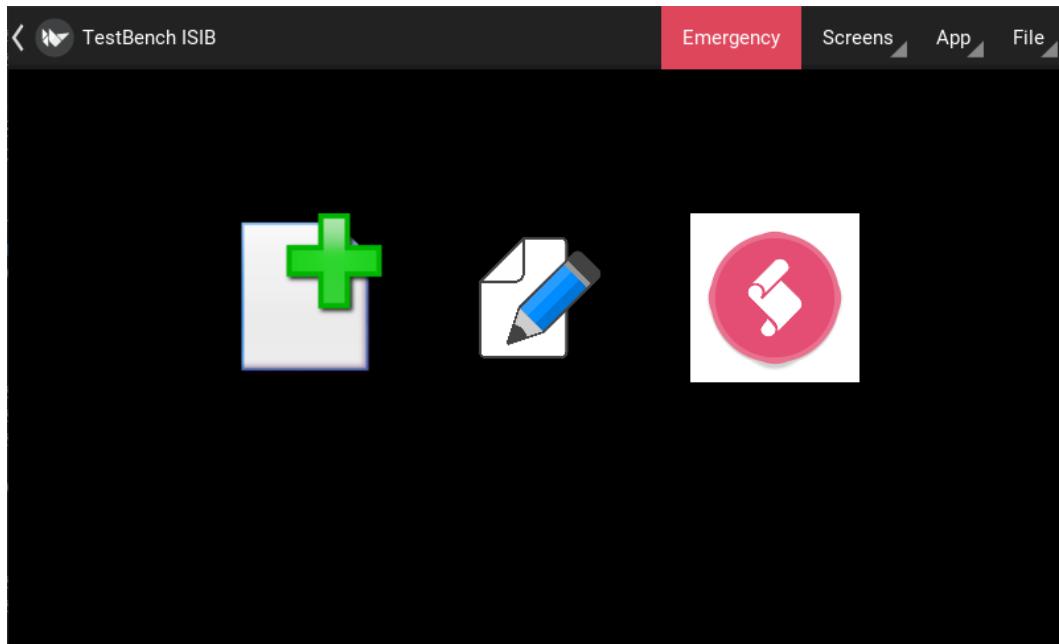
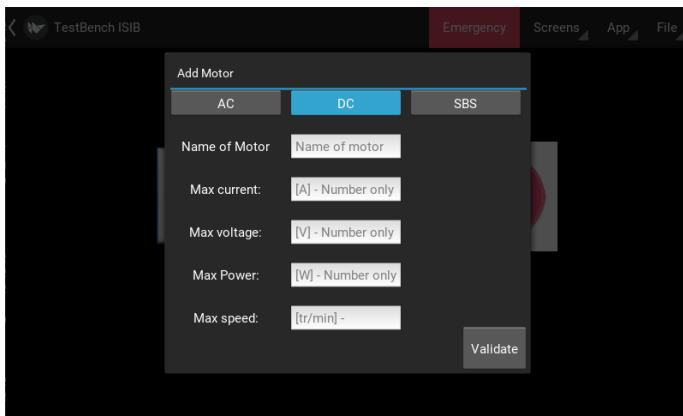


Figure 12 – Menu : création de fichiers

Création d'un fichier moteur

Le fichier moteur est celui qui contient les informations propres au moteur enregistrées dans la base de données. Comme montré à la figure 13, le fichier contient :



1. Le type de moteur
2. La référence/Nom du moteur
3. La tension maximale
4. Le courant maximum
5. La puissance maximale
6. Le couple maximum

Figure 13 – Menu "Settings"

Modification d'un fichier moteur

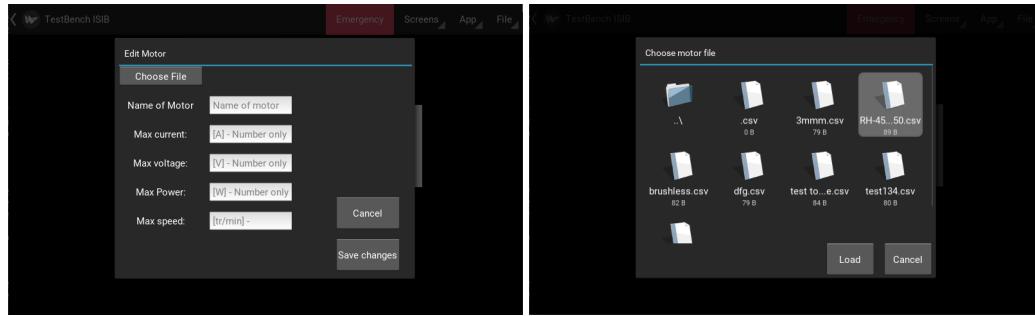


Figure 14 – Configuration : Edition de fichier

Figure 15 – Configuration : Sélection du fichier

Une fois le fichier moteur chargé, les informations correspondant à celui-ci sont affichées et on peut alors les modifier. Cliquez sur "Save" pour enregistrer les informations.

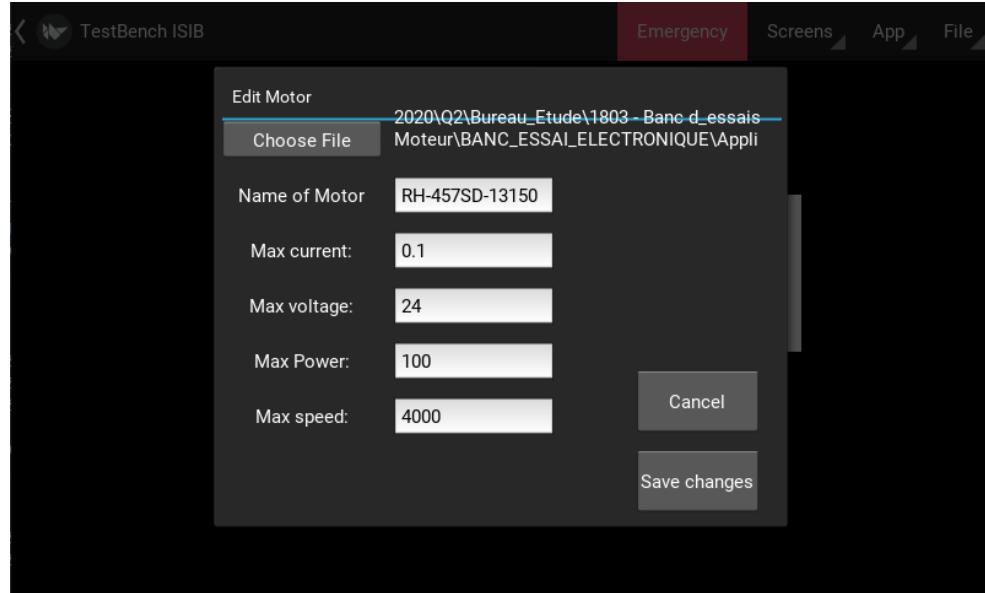


Figure 16 – Edition d'un fichier moteur

Création de scénarios de test

La création de scénarios de test est utile pour le mode automatique. Ce fichier permettra de dire à l'application quelle(s) courbe(s) elle doit tracer.

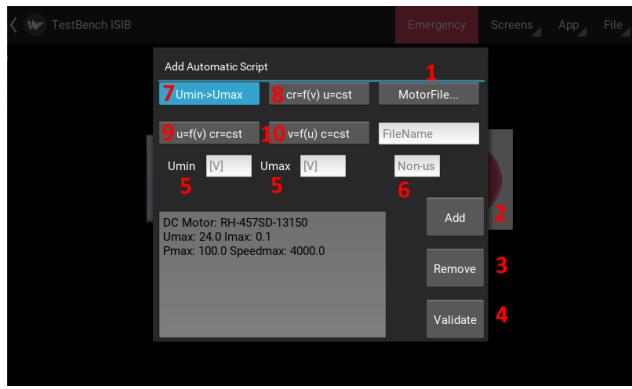


Figure 17 – Création de script : Description des boutons

1. Sélection d'un moteur
2. Ajout d'un test
3. Retire le dernier test créé
4. Enregistre le script
5. Range de valeurs du test
6. Valeur constante pendant le test
7. Test Umin -> Umax (aucune constante)
8. Couple en fonction de la vitesse @ Tension = constant
9. Tension en fonction de la vitesse @ couple = cst
10. Vitesse en fonction de la tension @ couple = cst

Au départ, la fenêtre centrale est vide. Il faut ouvrir le fichier de moteur sur lequel vous voulez effectuer les essais grâce au bouton "MotorFile...". Une fois le fichier ouvert, les informations concernant le moteur sont affichées et vous pouvez commencer à générer le script.

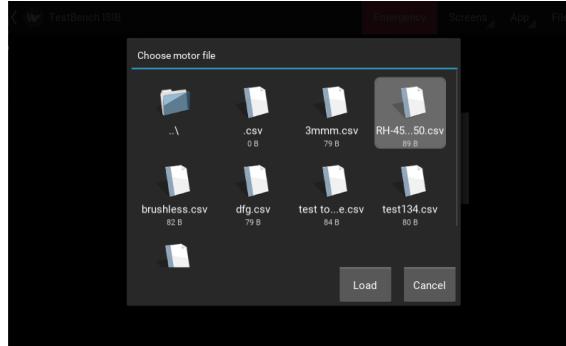


Figure 18 – Création de script : choix du moteur



Figure 19 – Création de script : Fichier moteur sélectionné

Vous pouvez maintenant créer les essais voulu grâce aux différents boutons décrits ci-dessous :

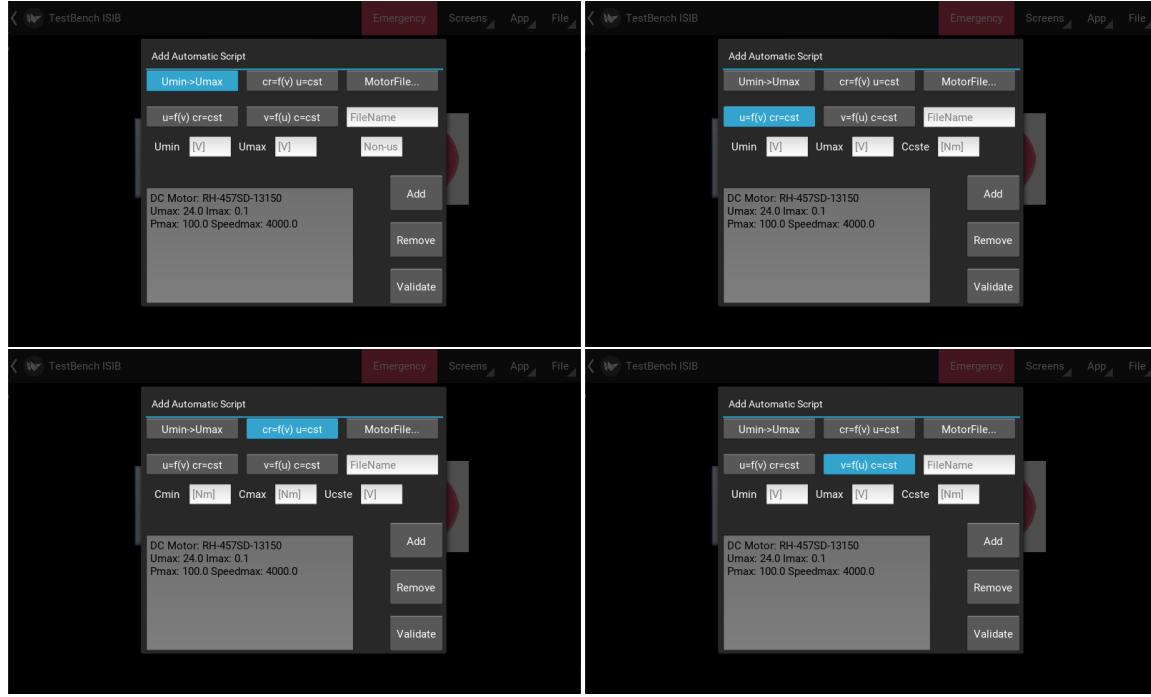


Figure 20 – *Création de script : Tests disponibles*

B. SCHÉMA BLOC

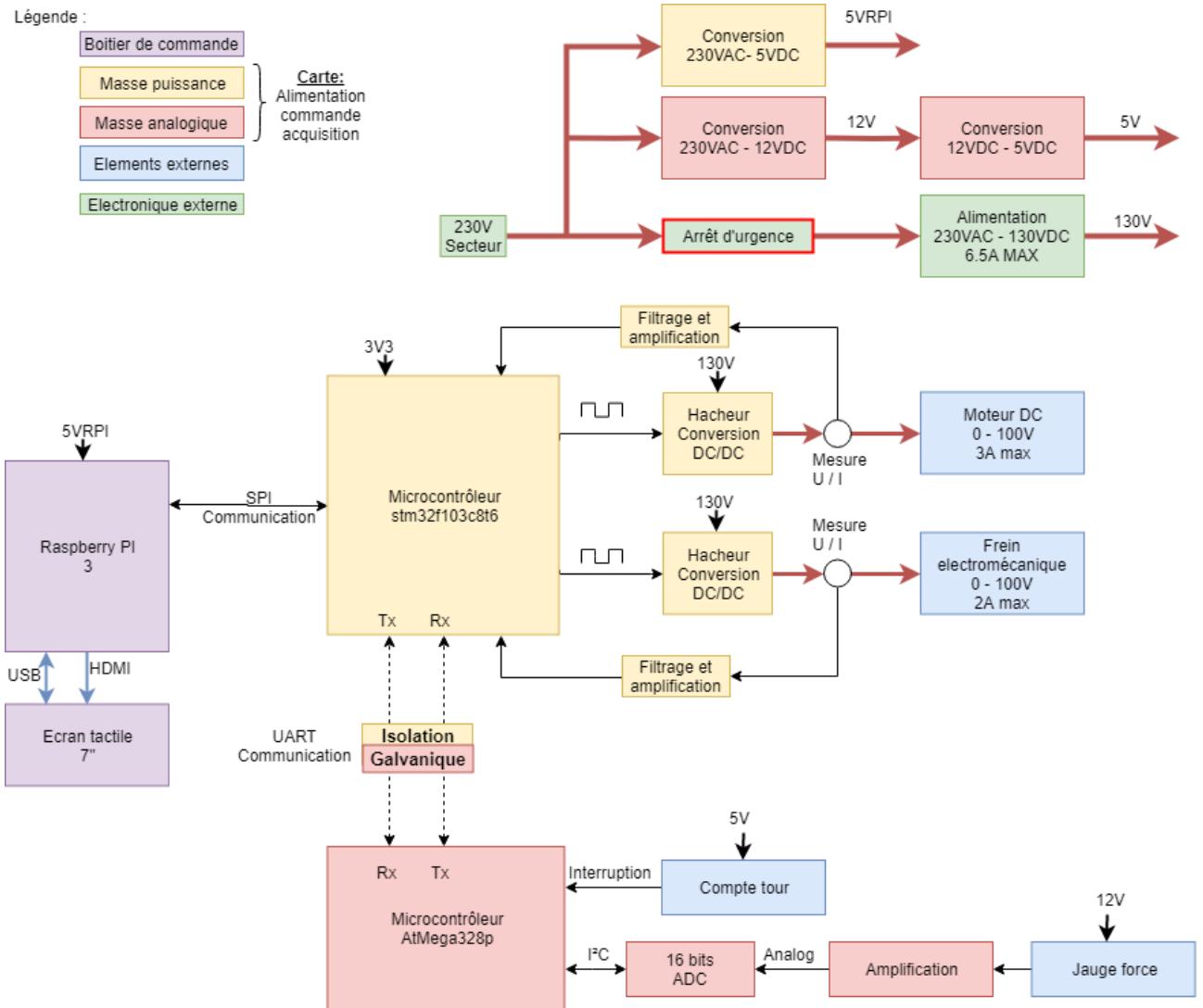
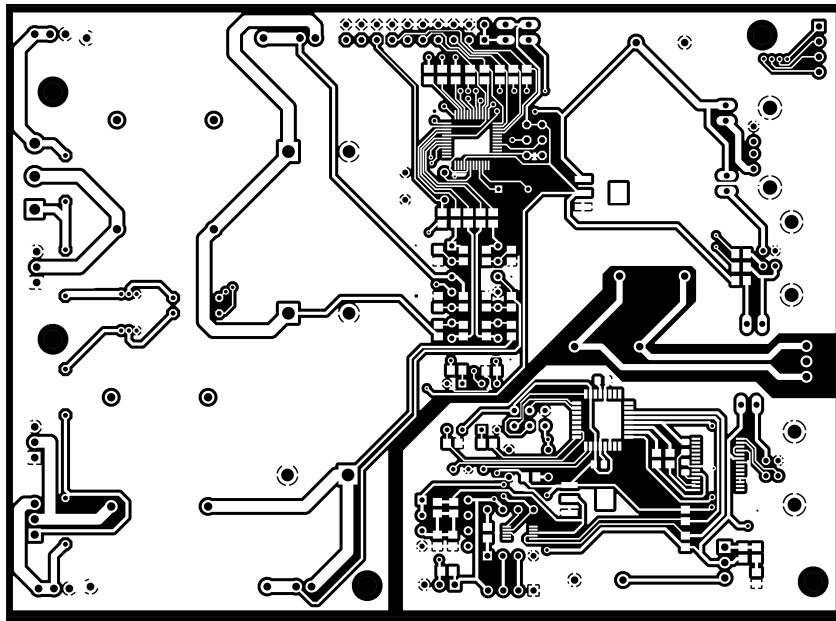


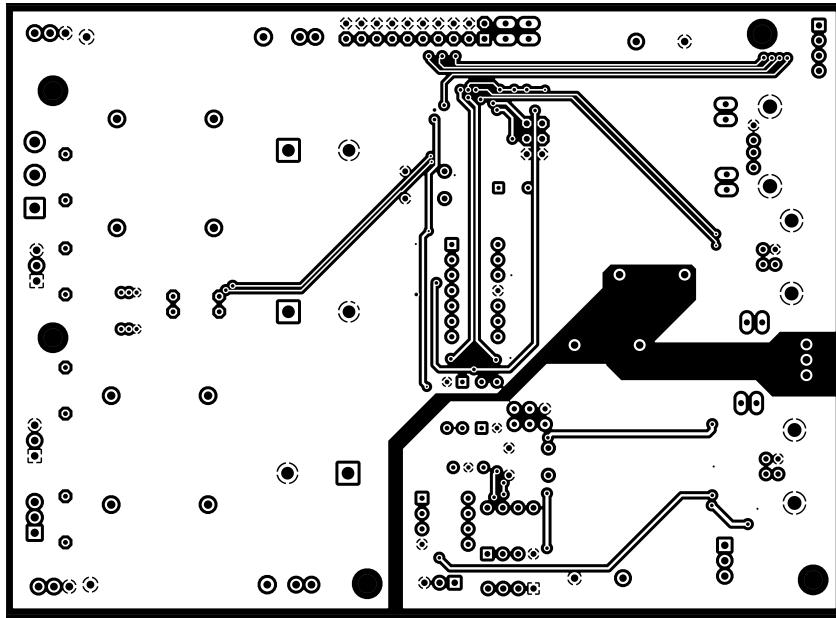
Figure 21 – Schéma bloc

C. PCB

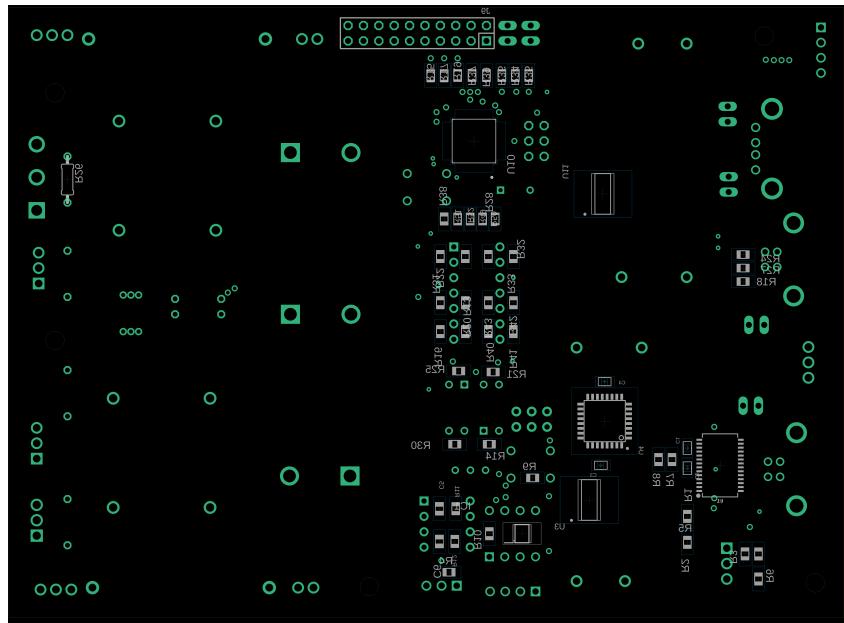
Les typons ci-dessous sont créés pour une gravure laser, les couleurs sont déjà inversées.
Attention : les images sont à 80% de leur taille réelle
Bottom



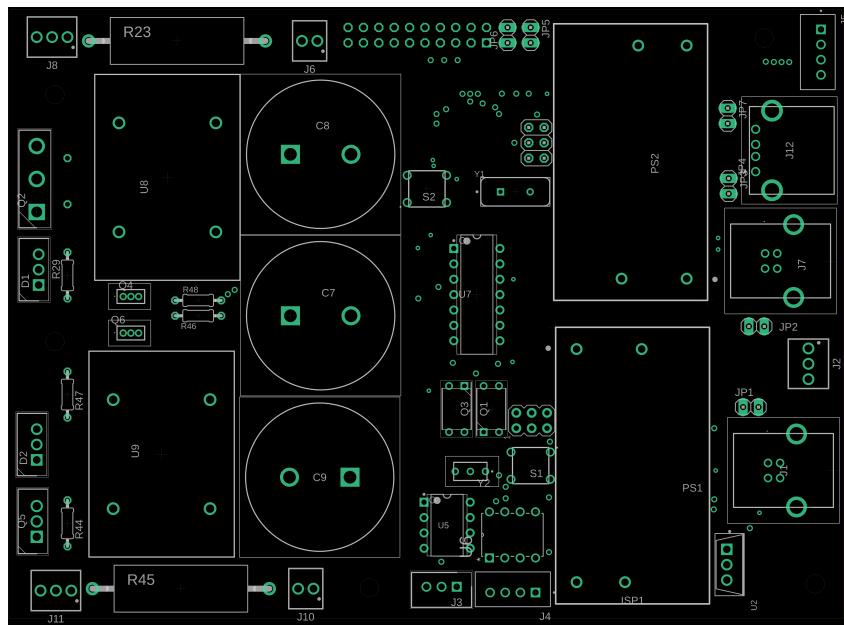
Top



Placement bottom

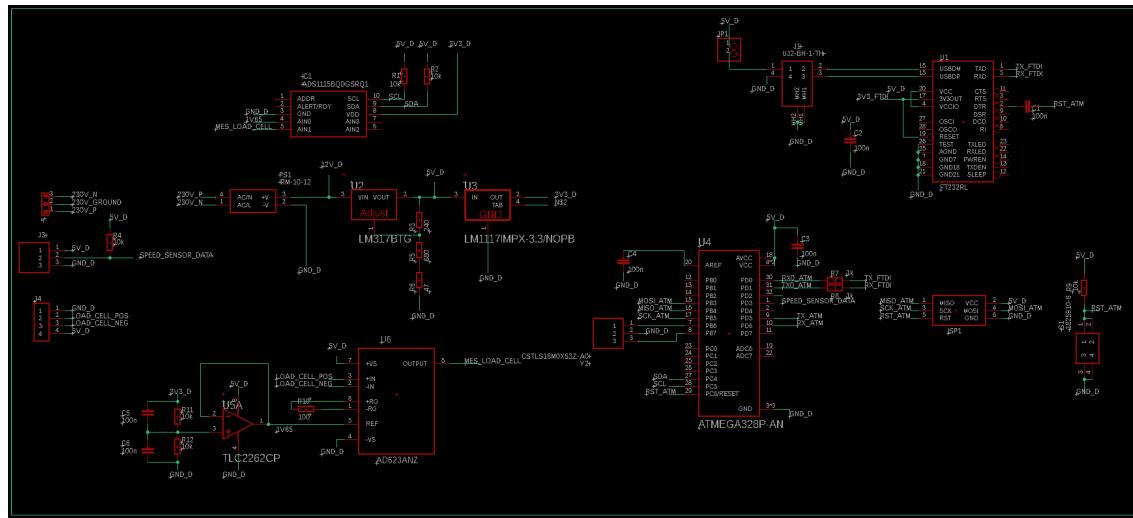


Placement top



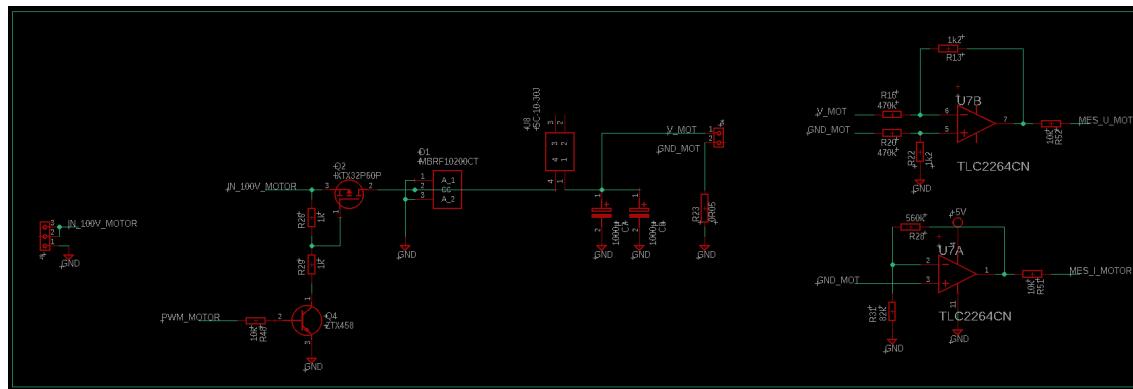
Schematics

Masse analogique

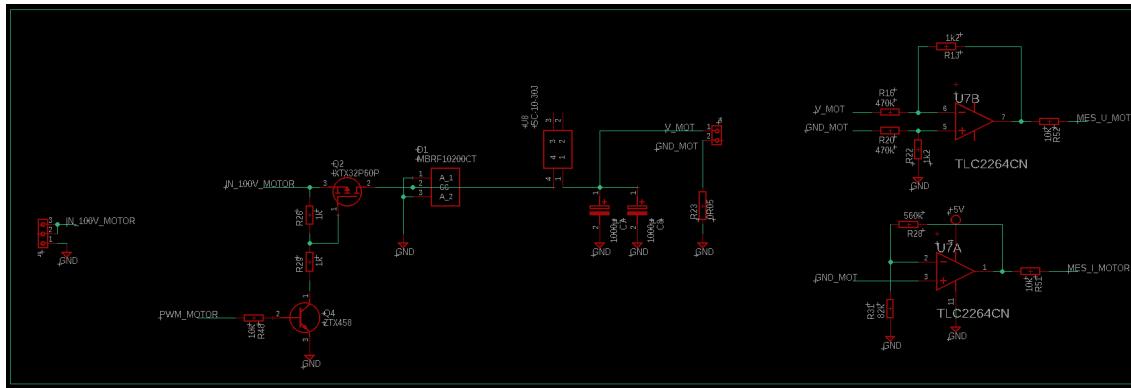


Masse puissance

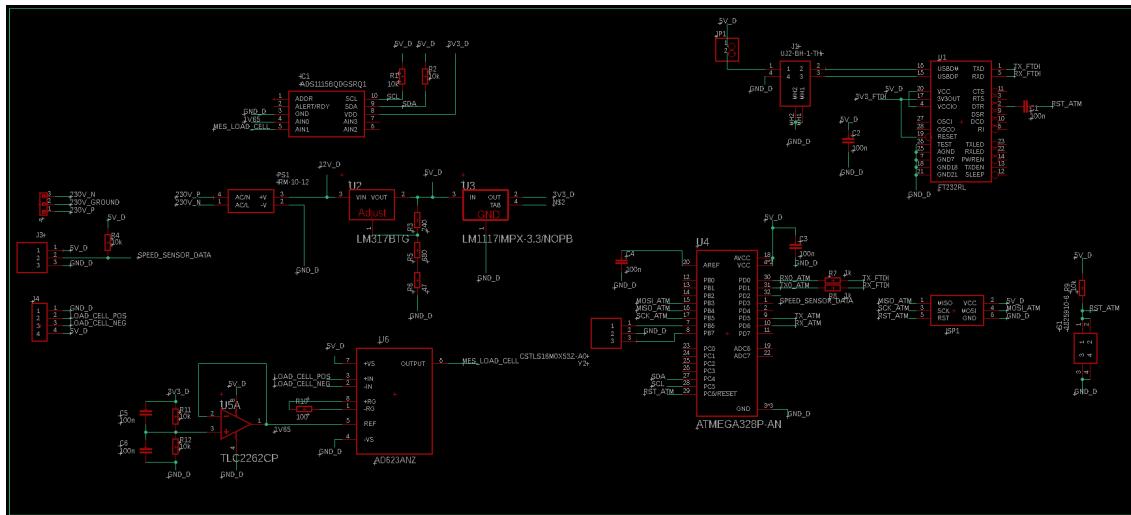
Hacheur moteur



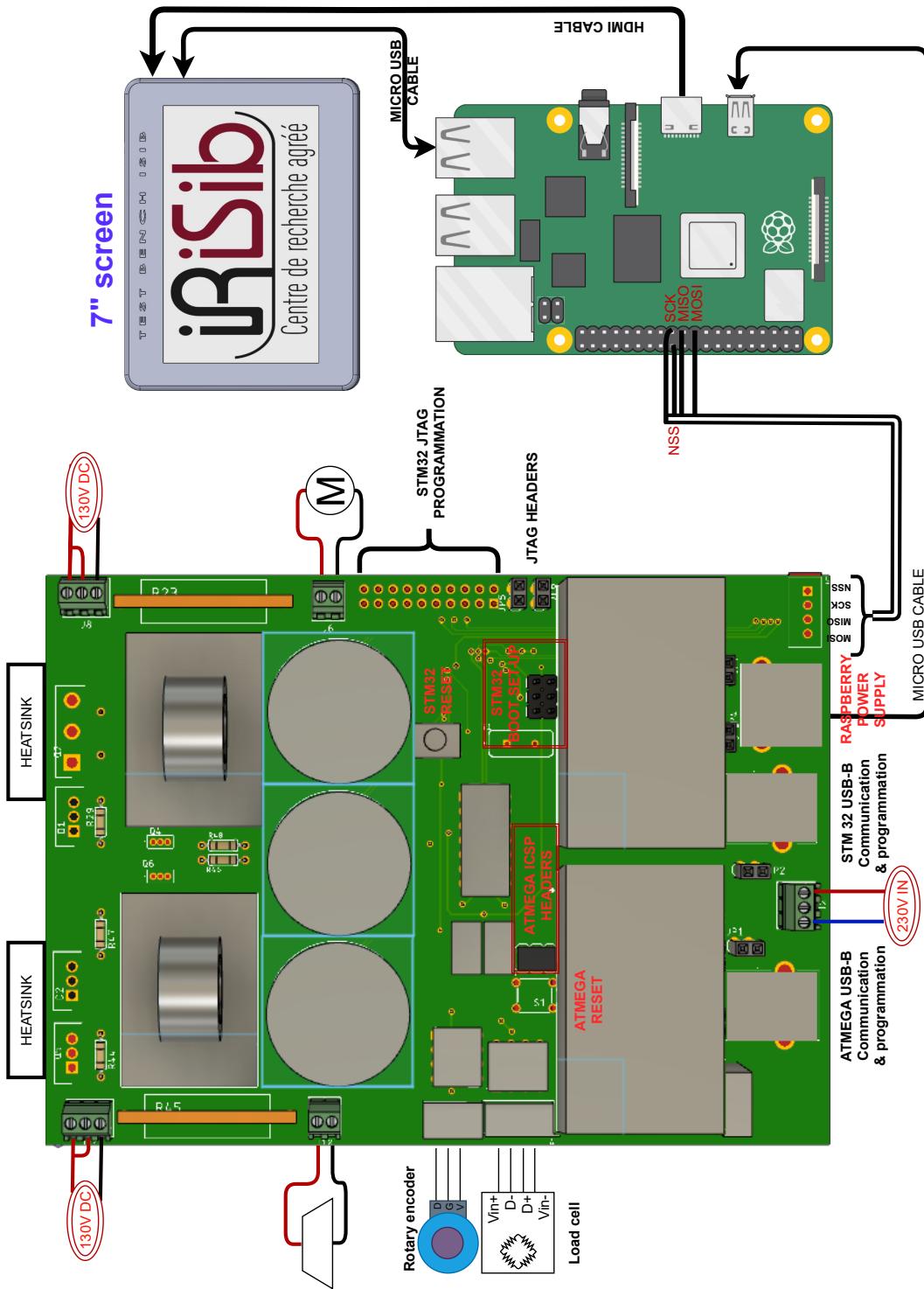
Hacheur frein



Microcontrôleur et connecteurs



D. SCHÉMA DE CÂBLAGE



E. ASSEMBLAGE MODÈLES 3D

Assemblage boîtier écran :

Le boîtier de l'écran se compose de 3 pièces imprimables en 3D :

1. Le boîtier de l'écran
2. La face arrière du boîtier
3. Des attaches pour profilés alu 30x30mm

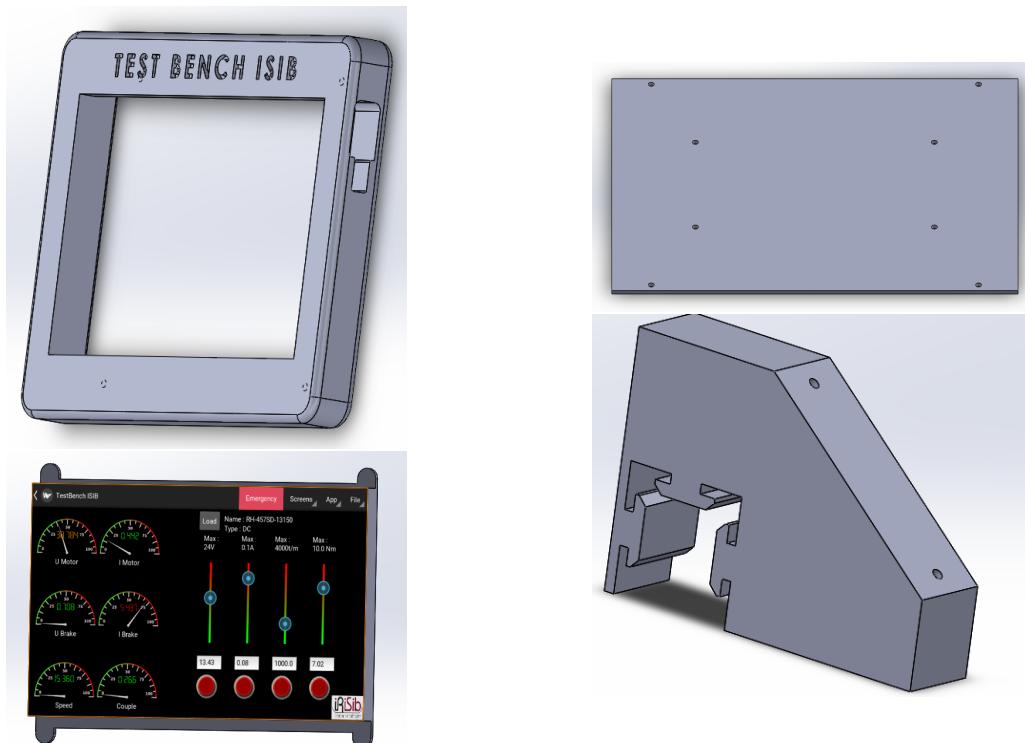


Figure 22 – Composants pour l'assemblage de l'écran

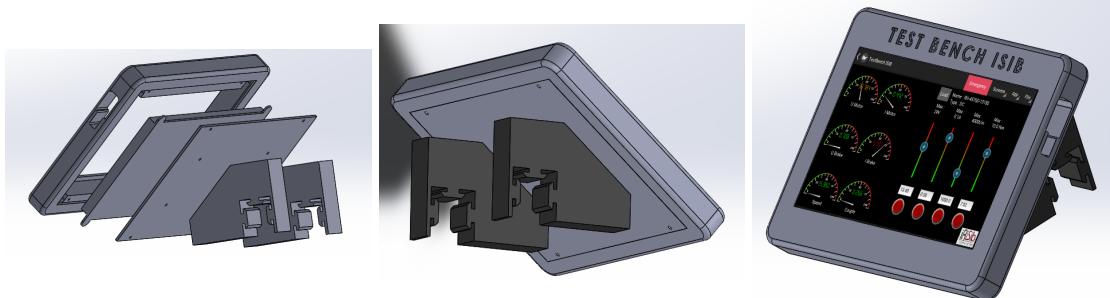


Figure 23 – Assemblage de l'écran

Assemblage boîtier général :

Assemblage du boîtier :

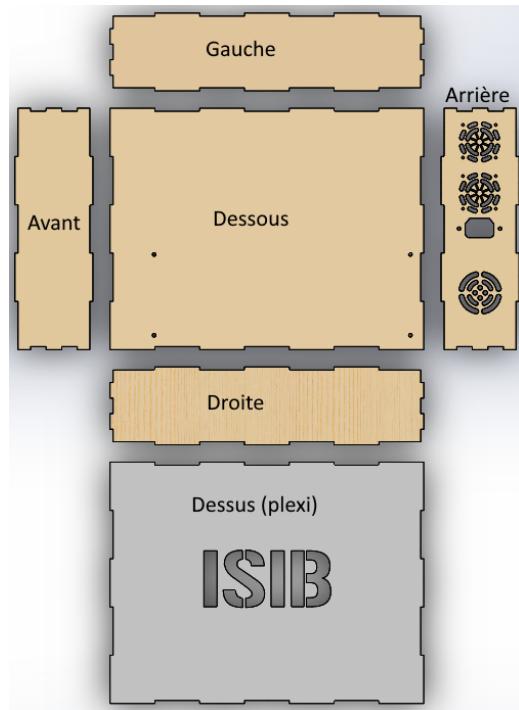


Figure 24 – Composants du boîtier général

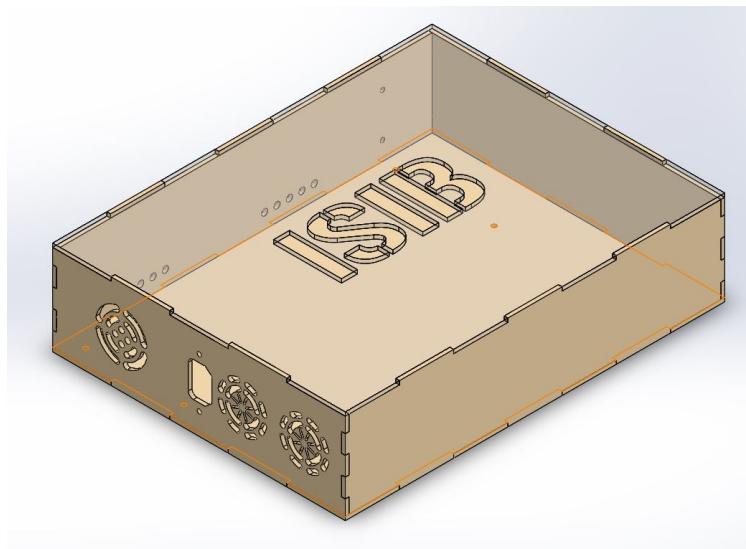


Figure 25 – Boîtier général assemblé

Ajout des composants :

Le boîtier général contenant l'électronique contient les éléments montrés à la figure 26, l'assemblage de ceux-ci est montré à la figure 27.

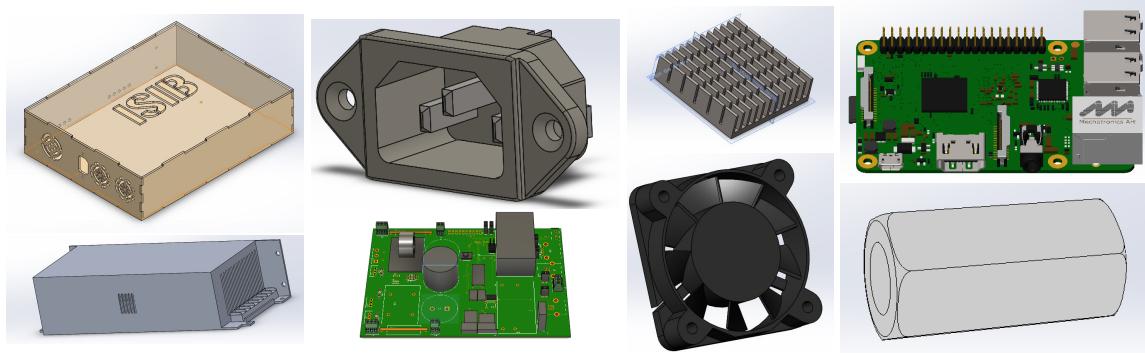


Figure 26 – Composants pour l'assemblage du boîtier général

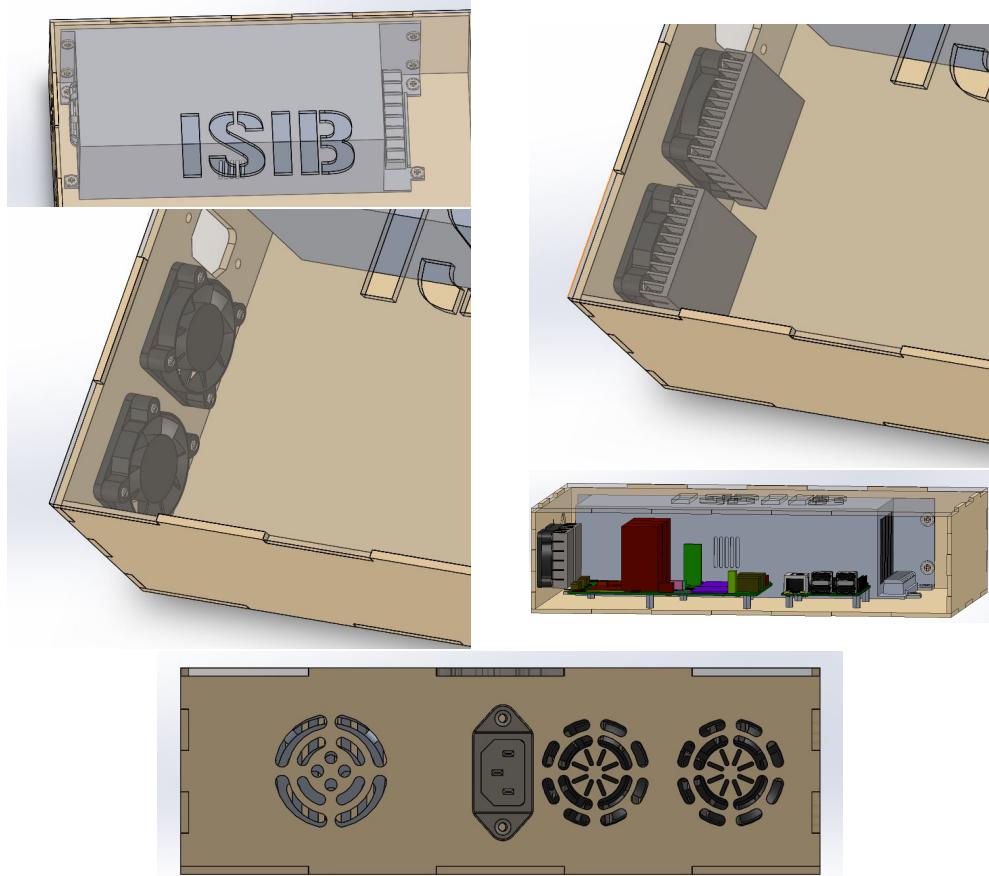


Figure 27 – Etapes d'assemblage du boîtier général

Boîtier final :

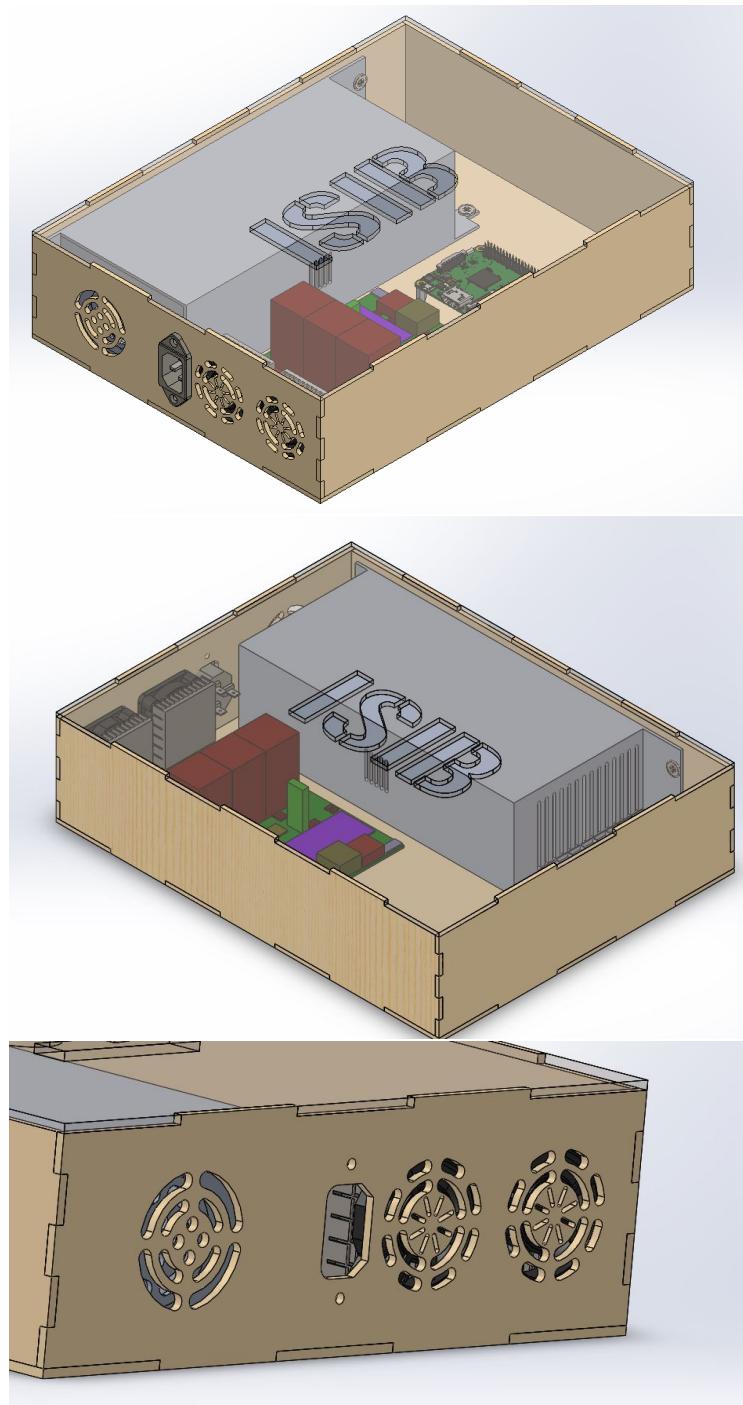


Figure 28 – Assemblage final

F. DIMENSIONNEMENT COMPOSANTS

Instrumentation tension moteur								mV/V
R1	R2	Umax	Gd=R2/R1	Plage	IMAX	PR1	PR2	
470000	12000	125	0,025531915	0 - 3,19148936170213	0,000259336	31,61mW	0,807mW	25,53191489
12000								
Instrumentation courant moteur								
Résistance shunt								
IMAX	Rshut	UshuntMAX	PMAX					
10	0,05	0,5	5					
R1	R2	Umax	Gd=1+R2/R1	Plage	IMAX	PR1	PR2	mV/A
82000	430000	0,5	6,243902439	0 - 3,1219512195122	9,76563E-07	0mW	0mW	312,195122
Instrumentation tension Frein								
R1	R2	Umax	Gd=R2/R1	Plage	IMAX	PR1	PR2	mV/V
470000	12000	125	0,025531915	0 - 3,19148936170213	0,000259336	31,61mW	0,807mW	25,53191489
Instrumentation courant Frein								
Résistance shunt								
IMAX	Rshut	UshuntMAX	PMAX					
2,083333333	0,05	0,10416667	0,217013889					
R1	R2	Umax	Gd=1+R2/R1	Plage	IMAX	PR1	PR2	mV/A
27000	820000	0,10416667	31,37037037	0 - 3,26774691358025	1,22983E-07	0mW	0mW	1568,518519
Instrumentation Jauge de contrainte								
Résistance de gain								
DesiratG	RG							
56	1818,182							
Pont diviseur tests jauge contrainte								
Ualim	UmaxR1	R1POT	R2					
5	0,025	100	20000					
Pont diviseur MOSFET P								
Ualim	UR2	R1	R2	(UR2 = VGS)				
130	10	10000	-9230,769231					
Dissipation MOSFET MOTEUR								
f	Ts	Ton	tc(ON)	tc(OFF)	Vd	Io	Von	RDS(on) RthJC Tamb
11600	8,62069E-05	8,53448E-05	0,000000037	0,000000095	130	10	3,5	0,35 1 1 25
Ps	Pon	PT	T°		T° calculs		TjMax DT	
0,99528	34,65	35,64528	60,64528		121,2906		50 71,29056	
Dissipation MOSFET FREIN								
f	Ts	Ton	tc(ON)	tc(OFF)	Vd	Io	Von	RDS(on) RthJC Tamb
11600	8,62069E-05	8,53448E-05	0,00000002	0,000000052	130	3	3	1 1 1 25
Ps	Pon	PT	T°		T° calculs		TjMax DT	
0,162864	8,91	9,072864	34,072864		68,14573		50 18,14573	
Max Nm	Max voulu	Valim	mV/N	Vload@MaxVoulu	Vload@MAXN	VmaxMeas	VmaxOut	Vref Gain nbits
50	50	12	0,24	12	0,024	3,3	3	1,65 56,25 16
ResolADC [µv] RealResol[µv] ErrorMes[µv]: Couple minimum mesurable:								
50,35477226	0,895195951	1,790391903						0,000346888

G. FICHIER GÉNÉRÉ PAR L'APPLICATION

Le fichier généré ci-dessous provient d'un essais sur un moteur RH-457SD-13150 et contient 3 parties :

- Les informations sur le moteur testé
- Le listing des scénarios de test
- Les informations pour chaque essais

Dans le cas de ce fichier, il n'y a qu'un seul essai. La création d'une rampe de 0V à 24V à vide et on mesure la vitesse du moteur. (en raison des mesures de confinement, il n'était pas possible d'accéder au capteur de vitesse pour les essais.)

=====Motor Informations=====			
Name			RH-457SD-13150
Type			DC
UMotorMax			24
IMotorMax			0,6
PMotorMax			100
SpeedMax			4000
=====Scenarios Informations=====			
From To cste			
U_MIN_TO_U_MAX 0V 24V 0			
=====			
test: Umin =0,0 to Umax 23,9			
Setting U [V] v[tr/min] I[A]			
U0 0,151 0 0,001			
Set U =0,96V 0,985 0 0,02			
Set U =1,92V 1,97 0 0,03			
Set U =2,88V 2,992 0 0,034			
Set U =3,84V 3,825 0 0,038			
Set U =4,8V 4,886 0 0,039			
Set U =5,76V 5,833 0 0,039			
=====			
Set U = 6,72V	6,742	0	0,04
Set U = 7,68V	7,689	0	0,041
Set U = 8,64V	8,711	0	0,046
Set U = 9,6V	9,582	0	0,046
Set U = 10,56V	10,567	0	0,046
Set U = 11,52V	11,59	0	0,047
Set U = 12,48V	12,537	0	0,049
Set U = 13,44V	13,446	0	0,055
Set U = 14,4V	14,506	0	0,055
Set U = 15,36V	15,339	0	0,056
Set U = 16,32V	16,362	0	0,058
Set U = 17,28V	17,271	0	0,058
Set U = 18,24V	18,294	0	0,059
Set U = 19,2V	19,241	0	0,062
Set U = 20,16V	20,225	0	0,062
Set U = 21,12V	21,134	0	0,063
Set U = 22,08V	22,081	0	0,064
Set U = 23,04V	23,066	0	0,064
Set U = 24V	24,051	0	0,066
=====			

Figure 29 – Fichier généré par l'application

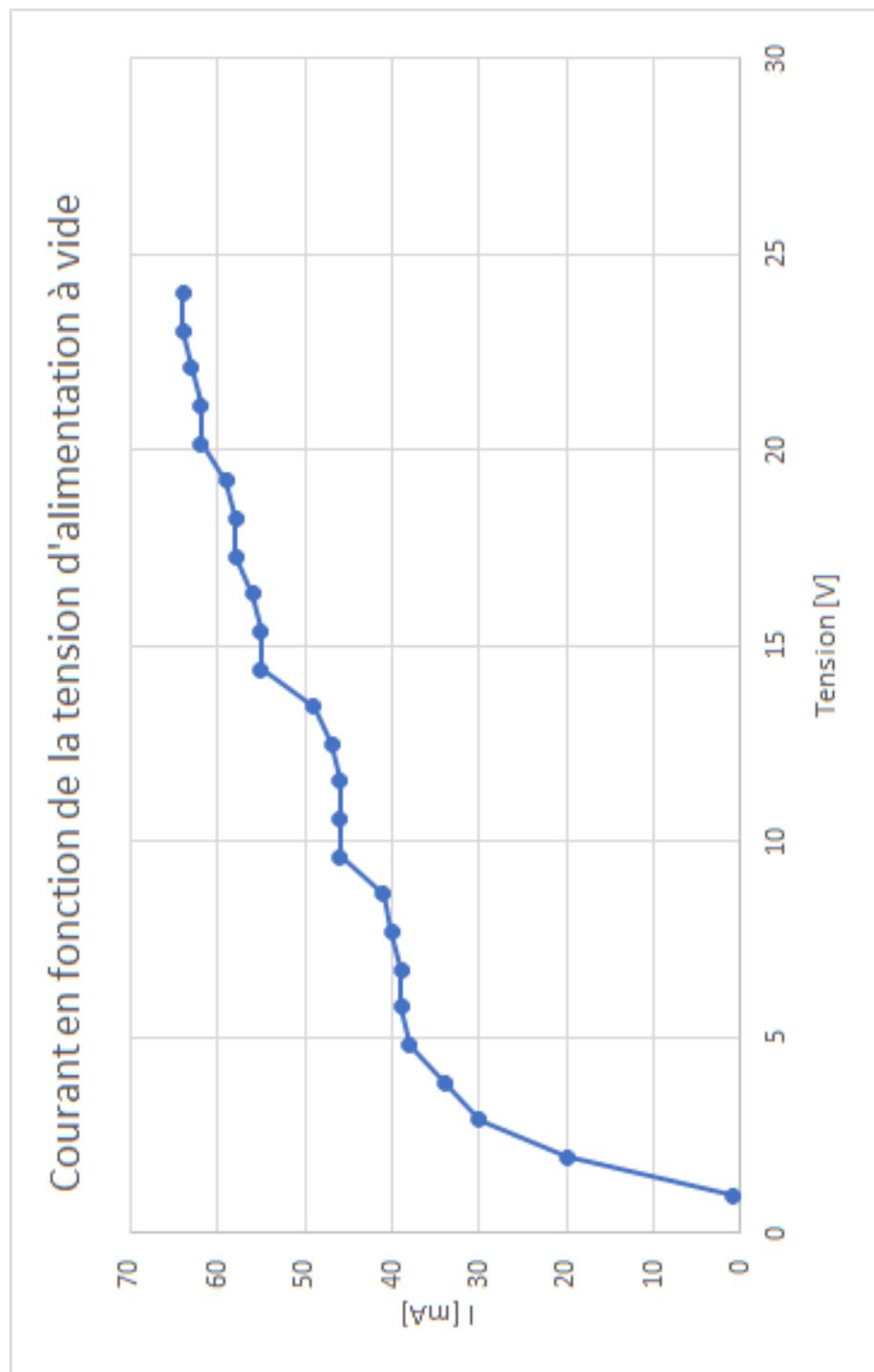


Figure 30 – Courbe générée à partir du fichier

H. RESTE À FAIRE

En raison des mesures de confinement, certaines parties hardware du projet n'ont pas pu être validées ou testées par manque de matériel. Au niveau software, certaines parties (surtout au niveau régulation) n'ont pas pu être validées parce que le banc d'essais n'était pas accessible.

Hardware

Jauge de contrainte

Faire les essais avec le hardware complet sur la jauge de contrainte (traction et compression).

Hacheurs moteurs/frein

Valider le design hardware des hacheurs. En basse tension et avec des composants qui ne sont pas ceux prévu pour le projet, ils fonctionnent parfaitement. Cela étant, il faut les valider avec les composants commandés (qui sont arrivés pendant le confinement à l'école).

Ajouter une porte AND au niveau de la commande des hacheurs pour ajouter une sécurité supplémentaire.

Moteurs AC + Sens de rotation

Étudier la possibilité d'utiliser le banc avec des moteurs AC (utilisation d'un onduleur). Cette feature dépend entièrement du budget restant pour le projet.

Voir s'il est vraiment intéressant de changer le sens de rotation avec l'interface graphique ("nice to have" demandée par le client) alors qu'il suffit d'inverser deux fils.

Mesure courant/tension

Les mesures courant/tension fonctionnent très bien. Cependant, des oscillations sont présentes sur les mesures des moteurs (celles du frein n'ont pas été testées). Il faut donc filtrer la sortie. Deux solution sont possibles : l'utilisation d'un filtre actif intégrateur ou un simple filtre actif avec une fréquence de coupure de minimum un dixième de la fréquence de hachage du hacheur.

La meilleure solution réside dans le filtrage actif qui permet une meilleure adaptation des impédances et par conséquent, une bien meilleure mesure. (des

AOP TL2264 ont été commandés en supplément pour filtrer les signaux mais pendant le confinement, je ne disposais pas des condensateurs nécessaires).

Software

Interface utilisateur

Valider les fonctionnalités de l'interface avec M. Haerlingen.

Informatique embarquée

Valider la régulation avec des essais réels (sur le banc).

I. NOTICE EXPÉRIMENTALE DE THOMAS JOURDAN



Conception et réalisation d'un banc d'essai de moteurs électriques de faible puissance

Notice expérimentale

Première version du banc d'essai

5 juillet 2019

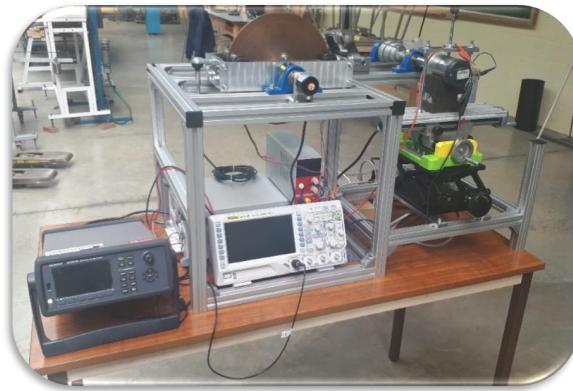


Table des matières

Chapitre 1.	Réglages	2
1.1	Réglages du banc d'essai.....	2
1.2	Tension de courroie	3
Chapitre 2.	Câblage.....	4
Chapitre 3.	Essais de moteurs	5
3.1	Détermination du rapport de transmission	5
3.2	Couple par accélération	5
3.3	Couple par freinage	6
Chapitre 4.	Calculs	7
4.1	Calcul du couple moteur <i>CM</i>	7
4.2	Mesure du couple de freinage <i>CF</i>	7
4.3	Mesure de la vitesse de rotation	8
4.4	Tableau des moments d'inertie.....	8



INSA de Lyon / Département GM, 27 avenue Jean CAPELLE - 69621 Villeurbanne – <http://gm.insa-lyon.fr/>



Chapitre 1. Réglages

1.1 Réglages du banc d'essai

Afin d'assurer le bon fonctionnement du banc d'essai, plusieurs ajustements et réglages doivent être effectués.

1.1.1 Arbres moteur et frein

Les points à vérifier/régler sont :

- L'entraxe entre les deux arbres doit être compris entre 419 et 420 mm. Attention à ne pas dépasser cette dernière sous peine de ne pas pouvoir changer de rapport de transmission ou d'engendrer d'importants dommages à la courroie, aux poulies ainsi qu'aux arbres.
- Régler le parallélisme des deux axes, ajuster à l'aide de la position des paliers auto-aligneurs. Si une modification de hauteur d'un palier est nécessaire, alors ajuster au moyen de la structure en profilés (un certain mouvement est possible grâce aux équerres de fixation) ou au moyen de cales. Il est possible de faire tourner les arbres afin d'observer si la courroie a tendance à se décaler au cours du mouvement.
- Régler la position des poulies, d'un arbre par rapport à l'autre, pour permettre un bon fonctionnement de la transmission. Il est possible de faire tourner les arbres afin d'observer si la courroie a tendance à se décaler au cours du mouvement.

1.1.2 Jauge d'effort

Dans l'optique de limiter les efforts parasites pour ainsi obtenir une mesure la plus juste possible, les points suivants sont à vérifier/régler :

- Le châssis du frein à courant de Foucault doit être équilibré. Cet équilibrage doit être effectué avec la rotule ainsi que sa tige filetée et ses écrous et rondelles associés. Ce réglage s'effectue au moyen de la masse et des écrous la tige filetée M8 située à l'opposé de la rotule.
- La position de la jauge par rapport à la rotule doit être réglée. Le trou de fixation de la tige filetée doit être aligné avec la tige filetée de liaison. Cette tige doit être alignée avec la verticale pour effectuer ce réglage. Il est possible d'ajuster la position de la jauge selon deux directions, au moyen des rainures présentes sur son support ainsi qu'à l'aide du profilé sur lequel est fixé le support. La tige filetée de liaison entre la rotule et la jauge d'effort doit coulisser librement dans le trou de passage de la jauge lorsque la tige est solidaire de la rotule.
- Vérification de l'erreur statique de la jauge, frein désaccouplé. Pour cela, retirer la tige filetée et récupérer la valeur renvoyée par la jauge d'effort. Il s'agit ici d'une mesure de l'effort lié au poids propre de sa flèche combinée à une erreur statique.
- Réglage de l'horizontalité du châssis frein. Afin de transmettre correctement l'effort (dans la direction optimale) du frein jusqu'à la jauge, l'angle effectué par la tige filetée par rapport à la partie fixe de la rotule doit être de 90°. Pour effectuer ce réglage, il est possible de positionner un niveau à bulle sur le châssis mobile et d'ajuster au moyen des écrous présents sur la tige filetée au niveau de la jauge.
- Vérification de l'erreur statique de la jauge, frein accouplé. Lorsque tous les points précédents sont respectés, il est important d'effectuer une nouvelle mesure de l'erreur statique de la jauge, cependant avec cette fois-ci le système de transmission d'effort (tige filetée et rotule) accouplé à la jauge. C'est cette mesure qui sera prise en compte lors des essais moteur. L'écart relevé par rapport à la mesure précédente (désaccouplée) permet notamment d'observer l'erreur d'équilibrage du châssis. Afin d'obtenir des mesures les plus cohérentes possible, **relever cette valeur avant chaque essai moteur**. Une variation de l'environnement tel que la température ambiante peut modifier la valeur mesurée à vide.

1.1.3 Tables de positionnement

Dans le but de ne pas engendrer d'efforts parasites sur le moteur et ainsi entraîner une mesure erronée, il est nécessaire de régler tout le système de positionnement moteur.

- Table Z : la position de cette table ne requiert pas une grande précision. Néanmoins, le plan milieu de celle-ci doit être aligné au mieux avec l'arbre moteur sur lequel viens s'accoupler le moteur à tester.
- Table XY : cette table doit être réglée avec précision. Il est nécessaire que la course en Y (50 mm) soit colinéaire avec l'arbre moteur et que la course en X (180 mm) soit perpendiculaire à l'arbre moteur. Pour régler au mieux cette table, l'usage d'un comparateur est recommandé.
- « V » : lorsque la table XY est bien positionnée, il faut alors ajuster la position du « V ». C'est-à-dire qu'il faut que celui-ci soit parallèle à l'arbre moteur. Pour ce faire, positionner un comparateur sur une face externe du « V » et déplacer le « V » à l'aide l'axe Y de la table.

1.2 Tension de courroie

La tension de la courroie est ici réglée à la main. Néanmoins il est possible d'observer qu'une surtension entraîne d'importantes pertes mécaniques (une diminution de régime de rotation notable est observables sur de petits moteurs). Une sous-tension quant à elle peut entraîner des sauts de dent lorsque le couple à transmettre devient important. Ainsi, plusieurs tests de tension peuvent être effectués, la tension théorique de 7,5 kg s'avère bien trop importante et engendrant trop de pertes pour des moteurs de cette taille.

Par la suite il est possible d'utiliser deux méthodes de vérification de tension (une fois celle-ci déterminée à la suite de tests) :

- Mesure du débattement vertical statique du brin de courroie opposé au tendeur
- Mesure de la fréquence de vibration du brin de courroie opposé au tendeur

La première étant la méthode est la plus facile à mettre en œuvre.

Chapitre 2. Câblage

Sans l'usage de microcontrôleur, il est possible d'obtenir les caractéristiques moteur à l'aide des composants et du schéma ci-dessous (figure 1):

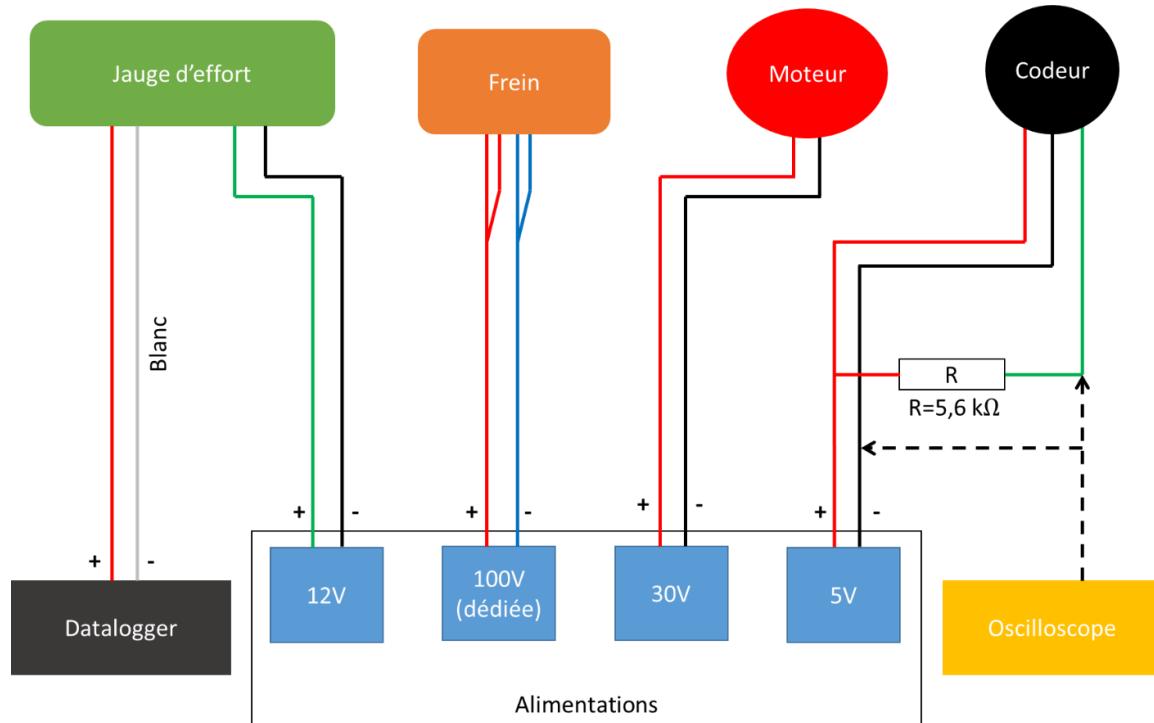


Figure 1 : Schéma électrique expérimental

Chapitre 3. Essais de moteurs

Les essais de moteurs se décomposent en 3 phases :

- Détermination du rapport de transmission
- Accélération du moteur
- Freinage du moteur

3.1 Détermination du rapport de transmission

La première phase a pour but de déterminer le rapport de transmission en accord avec le frein à courant de Foucault et le moteur à tester. Pour cela, placer un rapport de 1 et mettre sous tension le moteur, atteindre la vitesse de rotation maximale possible, sans dépasser la vitesse de 1500 tr/min au niveau du frein à courant de Foucault. Si cette vitesse maximale est comprise entre 800 et 1500 tr/min au niveau du frein à courant de Foucault (plage optimale de couple), alors le rapport de transmission est adéquat, pour la tension de courroie voir §1.2. Dans le cas contraire, modifier le rapport en cohérence. Le frein à courant de Foucault ne devant jamais dépasser la vitesse limite fixée à 1500 tr/min. Les vitesses et couple moteur possible sont visibles sur le graphique ci-dessous (Figure 2):

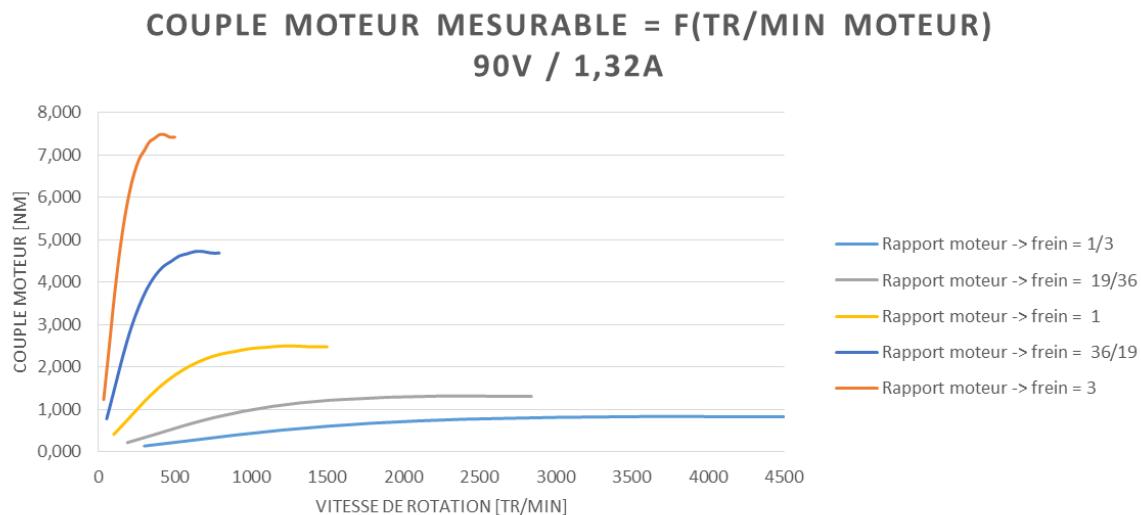


Figure 2 : Couple moteur mesurable en fonction de la vitesse de rotation et du rapport de transmission

3.2 Couple par accélération

La seconde phase est une accélération du moteur à pleine tension et courant (il est important d'avoir correctement sélectionné le rapport de transmission sous peine d'endommager le disque en cuivre). Cette phase permet principalement de déterminer le couple de démarrage du moteur mais aussi d'obtenir une première courbe de couple/vitesse. Le frein à courant de Foucault ne permettant pas de mesurer les couples de démarriages.

Le couple moteur est fonction de l'accélération angulaire ainsi que des moments d'inertie, voir §4. Le couple de freinage n'est cependant pas totalement nul, un couple résiduel subsiste lorsque le frein n'est pas en fonctionnement. La mesure de l'accélération angulaire est effectuée au moyen du codeur.

Cette mesure ne peut pas être faite au moyen de l'oscilloscope, l'utilisation du microcontrôleur afin d'obtenir l'accélération angulaire et la vitesse de rotation est requise.

3.3 Couple par freinage

La dernière phase est la phase de test en elle-même, celle-ci permet une deuxième vérification de la seconde phase et une mesure précise du couple moteur dans sa plage nominale. Il s'agit ici de porter le moteur à sa vitesse maximale puis d'augmenter progressivement le couple résistant du frein en relevant les valeurs de couple, vitesse au niveau du frein et de tension et courant apportés au moteur. La vitesse du moteur devant alors chuter, permettant de balayer toute la plage de régime du moteur. La seconde phase de test permettant d'assurer une mesure de couple pour les faibles vitesses de rotation du moteur lorsque celui-ci possède un couple moteur supérieur au frein à courant de Foucault à bas régime de rotation.

Il est important de relever la valeur d'effort à vide mesurée par la jauge avant d'effectuer le test.

Le **couple moteur** est donné par la formule présente au §4.

Le **rendement** est donné par :

$$\eta_{moteur} = \frac{P_{mécanique\,utile}}{P_{électrique\,absorbée}}$$

Avec :

$$P_{mécanique\,utile} = C_M \cdot \omega_M$$

$$P_{électrique\,absorbée} = U_M \cdot I_M$$

A effectuer à chaque régime de rotation pour en obtenir une courbe et ainsi déterminer la plage de régime optimale du moteur.

Chapitre 4. Calculs

Voir tableau Excel « Tests_moteur » pour exemple.

4.1 Calcul du couple moteur C_M

Afin d'effectuer une mesure de couple par accélération angulaire ou par freinage, il est nécessaire de connaître les moments d'inertie mis en jeu ainsi que les différentes formules utiles.

On définit J_F comme étant le moment d'inertie totale de l'ensemble de l'arbre frein (Arbre, poulies, disque et visserie). Et J_M comme étant le moment d'inertie totale de l'ensemble de l'arbre moteur (Arbre, poulies, accouplement et visserie).

Un tableau récapitulatif des moments d'inertie est disponible au §4.4.

Le couple moteur nécessaire C_M se définit par :

$$C_M = \left(J_M + \frac{J_F}{\eta \cdot k^2} \right) \cdot \frac{d\omega_M}{dt} + \frac{C_F}{\eta \cdot k}$$

Avec :

- η : Rendement du système de transmission

Ne connaissant pas précisément les pertes liées au système de tension, au système de transmission ainsi qu'aux paliers, η sera à déterminer par approximation (test de plusieurs moteurs connus), pour chaque vitesse de rotation du disque et de rapport de transmission.

- k : Rapport de transmission $\frac{\omega_M}{\omega_F}$ (ce référer au tableau ci-dessous)

Poulie arbre moteur	Poulie arbre frein	k
Z14	Z42	3
Z19	Z36	36/19
Z28	Z28	1
Z36	Z19	19/36
Z42	Z14	1/3

- ω_M : Vitesse de rotation de l'arbre moteur

- C_F : Couple de freinage, attention, lorsque le frein est désactivé un léger couple subsiste

Le couple de freinage C_F est donné par : $C_F = F \cdot 0,186$

Avec F : force mesurée par la jauge d'effort.

4.2 Mesure du couple de freinage C_F

Le couple de freinage est mesuré à l'aide de la jauge d'effort (Figure 3).



Figure 3 : Jauge d'effort en flexion 50N

La capacité de cette jauge est de 50N, pour une alimentation entre 10 et 15V avec une mesure de 2mV/V. Ainsi pour une alimentation de 12V, $24\text{mV} = 50\text{N}$.

A chaque test, il est nécessaire de récupérer la valeur initiale du capteur, sur le datalogger, banc arrêté.

Le couple de freinage mesuré est alors donné par :

$$C_F = \left| (Valeur_{initial} - Valeur_{mesuré}) \times \left(\frac{50}{12 \times 2} \right) \right| \times 0,186$$

Avec $Valeur_{initial}$ et $Valeur_{mesuré}$ en mV

4.3 Mesure de la vitesse de rotation

Le codeur utilisé (Figure 5), permet une acquisition de 600 points par rotation. Cette caractéristique est notamment importante afin de pouvoir calculer avec précision l'accélération angulaire de l'arbre (lors de l'utilisation d'un microcontrôleur) et ainsi obtenir le couple moteur nécessaire à cette accélération.

Le signal obtenu à l'aide de l'oscilloscope et du pull-up résistor (nécessaire pour l'utilisation de l'oscilloscope) est de type carré.

La vitesse de rotation du disque est donnée par :

$$N_{frein} = \frac{f}{10}$$

Avec f : Fréquence du signal carré

Ainsi, la vitesse de rotation du moteur est donnée par :

$$N_{moteur} = N_{frein} \times k$$



Figure 4 : Codeur Taiss

4.4 Tableau des moments d'inertie

Sous-système	Pièces en rotation	Masse réelle (g)	Moment d'Inertie (g.mm ²) par rapport à l'axe de l'arbre concerné	Total
Frein	Disque cuivre	1012.4	7933599.7	$J_F = 8328111.7$
	Arbre frein	670.0	124482.3	
	Accouplement codeur	6	110	
	4x Vis CHC M6x20			
	8x rondelles M6	55.9	52313.4	
	4x Ecrou M6			
	Rondelle M12 aluminium Ø12-19-2.5	1.3	82.1	
	Ecrou M12	15.2	1198.3	
	Poulie Z14	14.5	1246.1	
	Poulie Z19	33.6	4862.6	
	Poulie Z28	80.9	22231.9	
	Poulie Z36	145.8	65847.1	
Moteur	Poulie Z42	219.8	122138.2	$J_M = 233052.6$
	Arbre moteur + douille	232.4	4254.7 + 1035.6	
	Accouplement moteur	108.3	10183.1	
	Rondelle M12 aluminium Ø12-19-1	0.5	31.6	
	Ecrou M12	15.2	1198.3	
	Poulie Z14	14.7	1263.2	
	Poulie Z19	33.4	4833.6	
	Poulie Z28	80.7	22176.9	
	Poulie Z36	146.0	65937.4	
	Poulie Z42	219.8	122138.2	