



UNEXMIN

UNDERWATER EXPLORER
FOR FLOODED MINES

Rapport de stage assistant ingénieur

5/06/2017 – 4/08/2017

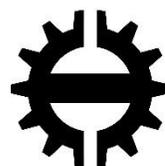
Tampere University of Technology

Laboratory of Mechanical Engineering and Industrial Systems

UNEXMIN Project



ENSTA
Bretagne
Ecole Nationale Supérieure de
Techniques Avancées Bretagne



TAMPERE
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

Table des matières



Rapport de stage assistant ingénieur	1
1. Remerciements :.....	5
2. Abstract :.....	6
3. Résumé :.....	7
4. Contexte du stage :.....	8

5. Thème du stage :	9
1. Le prototype UX-1 :	9
a. Points clefs du prototype :	9
b. Propulsion :	10
c. Capteurs :	10
2. Sujet d'étude :	11
a. Comportement du robot :	11
b. Objectif initial :	12
c. Résultat atteint :	12
3. Conception du banc d'essai :	13
1. Conception mécanique du système :	13
a. Première conception :	13
b. Conception retenue :	14
2. Conception électronique du système :	17
a. Système de commande et moteur :	17
b. Système de mesure :	18
3. Conclusion de l'étude :	20
4. Apport du stage dans le projet professionnel :	21
5. Conclusion :	22

1. Remerciements :

Je tiens tout d'abord à remercier le Pr. Kari Koskinen, directeur du Laboratoire de Mécanique et Systèmes industriels de l'Université Technologique de Tampere dans laquelle j'ai effectué mon stage, ainsi que Jussi Aaltonen, mon tuteur qui m'a supervisé dans ce projet et responsable du projet UNEXMIN au laboratoire, ainsi que Josse Villa, ingénieur de recherche du laboratoire responsable de la conception du robot.

Je souhaite également remercier le Pr. Luc Jaulin, mon tuteur à l'ENSTA Bretagne, qui m'a offert l'opportunité d'effectuer ce stage.

2. Abstract :

The Tampere University of Technology is a major university in Finland, and a top-class research center in Europe in various fields like mechanical engineering, automatics, electronics, chemistry or informatics.

This internship took place in the Mechanical Engineering and Industrial Systems Laboratory, about the UNEXMIN project. This project is an European project that aims to develop an autonomous underwater vehicle to explore and gather data in European flooded mines.

The project involves a consortium of a dozen of European research laboratories, each of them specialized in a different field, and working on a specific part of the project. The Tampere University on Technology is responsible for the mechanical design of the submarine, and its propulsion.

The internship was about the development of a test-bench in order to measure the drag coefficient of the submarine while it rotates on its pitch axis, involving mechanical and electronical engineering to realize the system. This coefficient is needed for the pitch control of the submarine, that is realized by a pendulum system, in order to minimize oscillations on this axis, that could lower the quality of the measurements.

3. Résumé :

Ce rapport présente le stage effectué de juin à août 2017 dans la Tampere University of Technology, au sein du laboratoire de mécanique et systèmes industriels dirigé par le Professeur Kari Koskinen.

Ce stage a porté sur le projet UNEXMIN, projet de recherche réalisé par un consortium d'une douzaine de laboratoires européens, qui vise à développer un système robotisé composé de trois sous-marins pour cartographier et effectuer des prélèvements géologiques et minéralogiques dans d'anciennes mines d'extraction, aujourd'hui abandonnées, et immergées.

Le stage a porté sur la conception d'un banc d'essai, permettant de mesurer un coefficient de traînée, correspondant au couple s'opposant à la rotation du sous-marin sur son axe de tangage, de manière à pouvoir régler précisément l'asservissement du système pendulaire contrôlant le tangage de l'engin.

4. Contexte du stage :

La Tampere University of Technology est un acteur important de l'enseignement supérieur et un institut de recherche majeur dans les domaines de l'architecture et de l'ingénierie, comportant des instituts de recherche dans des domaines variés comme l'ingénierie mécanique, l'automatique, l'électronique, la chimie, ou encore les technologies de l'information, avec un rayonnement national et international.

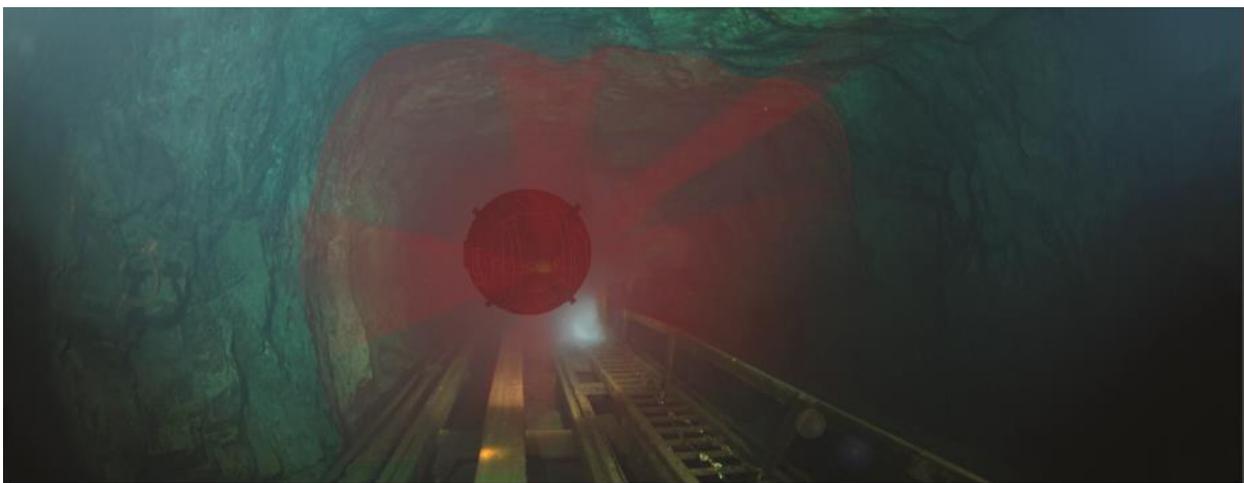
Le stage s'est déroulé dans le laboratoire d'ingénierie mécanique de l'université, dans le cadre du projet UNEXMIN. Ce projet européen vise au développement d'un sous-marin pour l'exploration autonome et la cartographie d'anciens sites miniers européens, aujourd'hui immergés.

Le système, composé de trois robots, UX-1a, UX-1b et UX-1c utilise des méthodes non invasives pour la cartographie tridimensionnelle des mines, ainsi que pour la récolte d'informations géologiques, minéralogiques.

L'objectif à terme de ce projet est la récolte d'informations géologiques et minières dans ces sites abandonnés, de manière à pouvoir, à moindre coût, récolter les informations nécessaires à d'éventuelles décisions stratégiques de réouverture de ces sites désaffectés, informations qui ne peuvent aujourd'hui être collectées sans coûts prohibitifs.

L'enjeu est majeur car il existe aujourd'hui en Europe près de 30 000 sites miniers fermés, et nombre d'entre eux contiennent encore de grandes quantités de minéraux essentiels, potentiellement exploitables grâce aux technologies d'extractions modernes.

Si l'enjeu est important, le défi technologique l'est tout autant, nécessitant un savoir-faire considérable, assuré par un consortium important de 13 universités et instituts de recherche européens.



5. Thème du stage :

1. Le prototype UX-1 :

Le projet UNEXMIN vise donc à réaliser trois prototypes fonctionnels, capables d'effectuer des missions de cartographie et des analyses géologiques et minéralogiques dans des mines immergées. Le Département d'Ingénierie Mécanique de l'Université de Technologie de Tampere est chargé de la conception mécanique du robot, ainsi que de sa réalisation.

L'architecture choisie pour les robots est une forme sphérique, permettant une maniabilité optimale, et de pénétrer dans des galeries même très étroites, le robot ne faisant que 600mm de diamètre, et lui permet également de pivoter sur place, ce qui est impossible pour une forme plus classique d'AUV, qui prennent souvent la forme d'une torpille.



Figure 1 : Vue d'ensemble du prototype UX-1

a. Points clefs du prototype :

- Profondeur maximale d'opération : 500m
- Forme sphérique
- Diamètre : 600mm
- Masse prévue : 112kg
- Consommation électrique : entre 150 et 300W
- Vitesse maximale : 1 – 2 km/h
- Autonomie : jusqu'à 5h
- Poussée des propulseurs : 2 – 5kgf
- Flottabilité neutre, régulée par un système de ballasts

b. Propulsion :

La propulsion du robot est assurée par huit propulseurs, disposés en croix de part et d'autre du sous-marin, permettant un déplacement sur les 3 axes en translation, ainsi que la rotation selon l'axe vertical, l'avant du sous-marin se situant au niveau du sonar multi-faisceau, en jaune sur la CAO ci-dessus.



Figure 2 : Prototype UX1 avec sa motorisation

De plus, le sous-marin est équipé d'un système de pendule, situé à l'intérieur de la coque sphérique de l'engin. Celui-ci permet de déplacer le centre de gravité du sous-marin, et ainsi, de contrôler le sous-marin sur l'axe de tangage (pitch).

C'est autour de cet élément qu'a porté le stage, nous y reviendrons plus tard dans ce rapport.

Le sous-marin comporte également un système de ballasts, permettant de contrôler sa flottabilité, et ainsi, son altitude.

c. Capteurs :

Pour réaliser les mesures demandées, le sous-marin est équipé d'un grand nombre de capteurs, permettant une localisation précise du robot, ainsi que la prise de mesures minéralogiques.

Le robot comporte embarque les capteurs suivants :

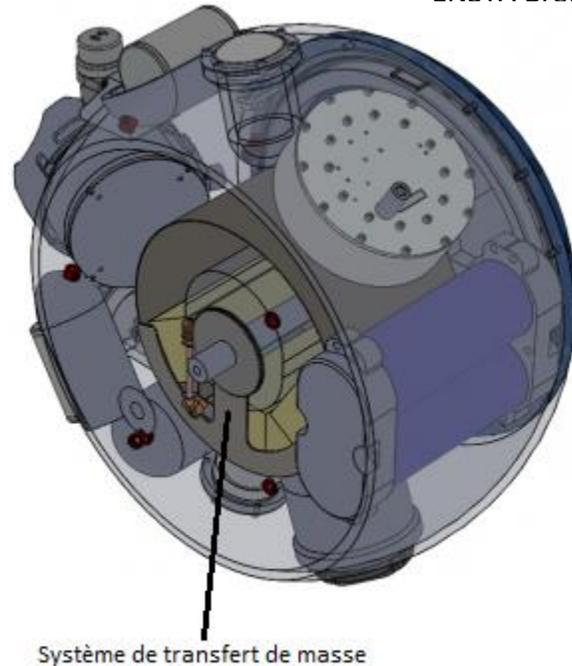
- Dispositif de prélèvement d'eau
- Capteur de conductivité et pH
- Profileur
- Unité de mesure des champs magnétiques
- Caméra UV
- Caméra multi-spectrale
- Caméras acoustiques
- Lidars

- Sonar multi-faisceau
- Centrale inertielle

2. Sujet d'étude :

Le prototype est, comme précisé précédemment, piloté sur son axe de tangage (pitch), par un système de transfert de masse pendulaire.

Ce système consiste en une masse, tournant autour de l'axe transversal du robot (axe de tangage) par un moteur électrique, actionnant une vis sans fin.



a. Comportement du robot :

Ce système déplaçant le centre de gravité du robot, celui-ci se comporte, pendant la phase de transition (après le déplacement de la masse), comme un pendule simple.

Un bilan des couples exercés sur le robot, projeté sur son axe de tangage (pitch), donne la relation suivante :

$$J\ddot{\varphi} = -C\dot{\varphi}^2 - mgr \sin(\varphi + \delta)$$

Avec :

- φ la position angulaire du sous-marin
- $\dot{\varphi}$ est la vitesse angulaire du sous-marin
- $\ddot{\varphi}$ est l'accélération angulaire du sous-marin
- J le moment d'inertie du sous-marin
- r est la distance entre le centroïde et le centre de gravité du pendule.
- m est la masse du pendule
- δ est l'angle cible.
- C une constante relative aux frottements fluides exercés sur le robot lors de sa rotation.

Le sujet d'étude porte sur ce dernier terme.

Le coefficient de frottements C a en effet été estimé par des simulations hydrodynamiques, mais la réalisation de l'asservissement demande un modèle précis du comportement en robot sur son axe de tangage, de manière à minimiser les oscillations de celui-ci, ainsi, une validation par des mesures expérimentales est nécessaire.

Le stage a ainsi porté sur l'élaboration d'un banc d'essai, permettant de faire des mesures de trainée en rotation du sous-marin sur cet axe (ainsi que sur les deux autres axes, si possible, de manière à compléter le modèle).

b. Objectif initial :

L'objectif initial, tout d'abord était la conception du banc d'essai, permettant de prendre des mesures de couple s'opposant à la rotation d'une maquette de sous-marin, imprimée en 3d à l'échelle 1/3 ; conception comprenant le design mécanique de la plate-forme, ainsi que le choix des capteurs et actionneurs utilisés.

La seconde partie devait consister à la réalisation du banc d'essai, comprenant l'usinage des différents composants, puis leur assemblage, ainsi que la réalisation de l'électronique de commande et de mesure du système, dans le but de réaliser les mesures dans l'idéal, avant la fin du stage.

c. Résultat atteint :

Le stage a finalement essentiellement porté sur la conception du système, ainsi que le test et la réalisation de l'électronique utilisée pour prendre les mesures.

Nous y reviendrons dans une seconde partie de ce rapport.

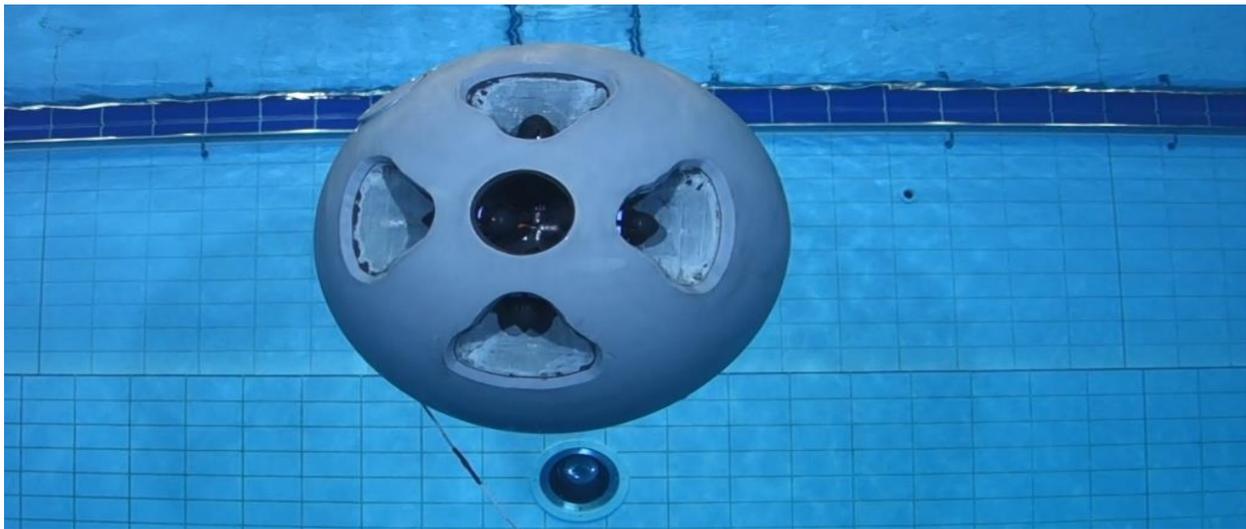


Figure 3 : Prototype réalisé pour tester la motorisation du robot

3. Conception du banc d'essai :

L'objectif était donc de prendre des mesures de la trainée du sous-marin en rotation autour de son axe de tangage, prises en utilisant une maquette de l'AUV, imprimée en 3d, puis en extrapolant les mesures pour le sous-marin de taille réelle.

1. Conception mécanique du système :

a. Première conception :

Une idée initiale était de mettre simplement en rotation le robot à l'aide d'un motoréducteur, et d'interposer un capteur de couple rotatif, ce qui permettait d'obtenir directement le couple désiré.

Cette idée a été abandonnée pour des raisons d'approvisionnement du capteur de couple, en effet, les mesures étant prises sur une maquette à échelle réduite, les couples mis en jeu sont très faibles, de l'ordre du centième de N.m

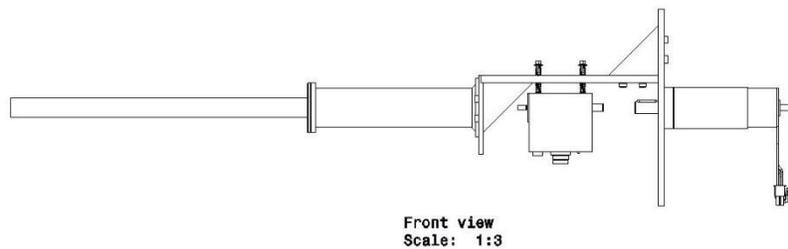


Figure 4 : Vue d'ensemble du système, accouplements non représentés

Ce principe avait l'intérêt, outre le fait de ne nécessiter que de très peu de pièces usinées, de ne pas introduire de couples parasites dans les mesures.

Le capteur de couple est ici placé en prise directe entre le motoréducteur et l'arbre portant la maquette, accouplé à l'aide d'accouplements flexibles, et maintenu en position par des vis munies de ressorts, permettant un certain jeu au capteur, et permettant ainsi d'éviter aux maximum les défauts d'alignement du système.

L'arbre sur lequel la maquette est attachée, sur la partie gauche de la vue ci-dessus, est maintenu par des roulements à billes, qui introduisent donc un couple résistant venant perturber la mesure, mais celui-ci est constant (pour une vitesse donnée), il peut donc être éliminé en réalisant une mesure « à vide », avec le sous-marin en dehors de l'eau.

Les couples parasites dus à une mauvaise coaxialité du système¹, induits par la torsion des accouplements flexibles situés de part et d'autre du capteur, peuvent également être éliminés de cette manière. De plus, leur fréquence est connue et identique à celle du moteur, une analyse spectrale peut donc permettre de les déterminer et de les éliminer.

On ne mesure donc que le couple exercé par la trainée du sous-marin, cependant, le point noir de ce principe est la nécessité d'utiliser un capteur rotatif de couple, possédant une pleine échelle très faible, donc non standard.

Aussi, cela implique l'achat d'un capteur très cher, de l'ordre de plusieurs milliers d'euros, pour une seule série de tests, car la probabilité qu'un tel capteur soit réutilisé est assez faible.

b. Conception retenue :

Suite au problème d'approvisionnement du capteur de couple, l'utilisation d'un capteur d'effort linéaire a été retenue. Ce type de capteur pose beaucoup moins de problèmes d'approvisionnements, car très utilisé, pour des applications diverses, y compris dans la plage de mesure en question ici (de l'ordre du centième de N.m, au plus²).

Ce capteur est de plus beaucoup moins cher à l'achat (quelques dizaines d'euros).

Ainsi, les mesures sont réalisées par un capteur linéaire d'effort, de type piézo-électrique, possédant une pleine échelle d'1kg.

Le point de mesure du capteur étant positionné à 60mm de l'axe de rotation, on obtient une pleine échelle en couple de 0.06N.m, ce qui correspond à l'ordre de grandeur recherché.

Ce modèle précis a été choisi principalement pour sa disponibilité quasi immédiate, étant disponible et en stock chez Farnell, ainsi que pour sa sortie soit analogique, ce qui permet de le lire très facilement via une baie d'acquisition analogique.



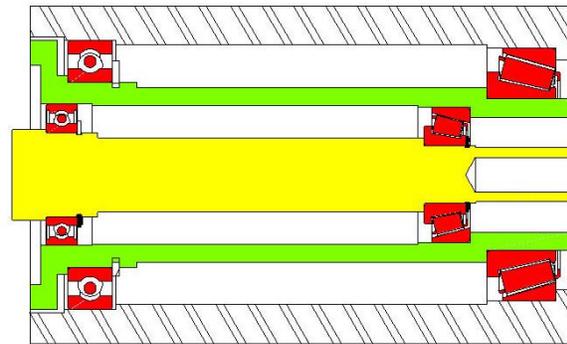
Figure 5 : Capteur d'effort choisi

¹ Coaxialité entre le moteur et l'arbre d'entrée du couplomètre d'une part, entre l'arbre de sortie du couplomètre et l'arbre supportant la maquette d'autre part.

² D'après des simulations numériques.

Le capteur d'efforts étant cette fois-ci linéaire, le système mécanique est plus compliqué, et demande un usinage beaucoup plus conséquent.

Ainsi, le système est composé de deux trains de roulements, le premier permettant la rotation de l'arbre (en jaune) par rapport au moteur, et ainsi, la rotation du sous-marin.



Section view A-A
Scale: 1:1

Le second train de roulements permet la rotation de l'ensemble par rapport au bâti, qui est bloquée par le capteur d'efforts.

Ainsi, en faisant le bilan des couples appliqués à l'ensemble « moteur + sous-marin + système intermédiaire³ » en régime permanent, on obtient :

$$C_{trainée} + C_{frottement_roulements} + C_{capteur_efforts} = 0$$

Où :

- $C_{trainée}$ correspond au couple résistant à la rotation du sous-marin dans l'eau
- $C_{frottement_roulements}$ correspond aux frottements dus aux roulements à billes extérieurs.
- $C_{capteur_efforts}$ correspond au couple créé par le capteur d'efforts qui bloque la rotation.

Ainsi, on peut mesurer le couple de trainée en rotation du sous-marin, aux frottements induits par les roulements près, qui sont ainsi supposés faibles devant le couple créé par la trainée en rotation du robot.

Ce système est conçu pour pouvoir être utilisé dans un bac d'eau, de dimensions 1m x 1m x 1m, disponible sur place à l'université. Ce bac permettra de faire des mesures sur la maquette imprimée en 3d du sous-marin.

Ce système est de plus capable d'effectuer des mesures avec le sous-marin final, pesant 120kg, mais devront être effectués en piscine, en effet, le sous-marin mesurant 600mm de diamètre, le bac de 1m³ est trop petit pour pouvoir négliger les effets hydrodynamiques liés à la géométrie du bassin.

Ils ne seront donc réalisés que pour valider l'extrapolation réalisée pour passer du coefficient mesuré sur la maquette, au coefficient réel du sous-marin final.

³ Composé de l'arbre soutenant le moteur (accouplée à la pièce jaune sur la vue en coupe page précédente), du train de roulements le plus intérieur, et de la cage intermédiaire (en vert sur la vue en coupe).

2. Conception électronique du système :

Une fois le système conçu, il est nécessaire de réaliser l'électronique de mesure et de commande du système.

a. Système de commande et moteur :

Il était initialement prévu de commander un moteur spécialement adapté au projet, mais pour des raisons de temps de livraison, nous avons dû nous rabattre sur un moteur disponible au laboratoire.



En effet, l'ordre de grandeur de la vitesse de rotation du sous-marin sous l'action du système pendulaire est de 0.2 rpm, ce qui est très faible, et très difficilement réalisable avec un motoréducteur classique.

Après des recherches chez différents fournisseurs, dont Maxon Motors, le couple moteur-réducteur possédant la vitesse de rotation la plus faible était donnée pour 5rpm, ce qui est faible, mais reste bien supérieure à la vitesse nécessaire pour les essais. De plus, cet ensemble coûtait près de 1000€, le réducteur étant un réducteur planétaire à trois étages, très cher.

Le moteur choisi est un moteur pas à pas industriel, qui devait probablement être à l'origine utilisé dans une machine-outil, ou un système automatisé industriel, car celui-ci était fourni avec rack de commande, comportant un automate industriel pilotant le variateur du moteur.

Cet automate n'a pas été utilisé, car celui-ci était d'une technologie datant des années 90, et difficilement programmable et interfaçable avec l'informatique actuelle.

La commande du moteur est donc effectuée en se branchant directement sur le variateur du moteur, et en lui fournissant les signaux adaptés de manière manuelle.

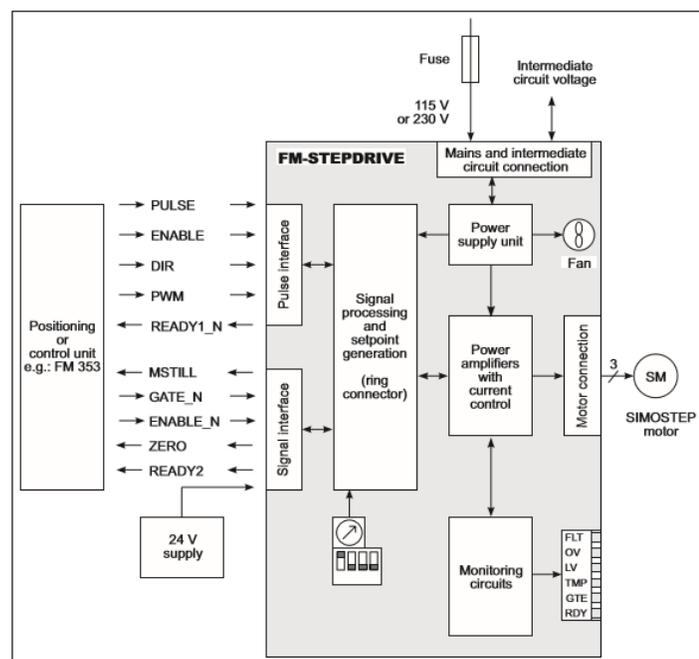


Figure 6 : Diagramme bloc du variateur du moteur

Le contrôleur nécessite les signaux suivants pour permettre le démarrage du moteur :

- PULSE, correspondant à un signal d'horloge, de forme créneaux, pour lequel chaque « tick » correspond à la rotation d'un pas pour le moteur. Le nombre de pas est réglable sur le contrôleur, et peut être défini à une valeur maximale de 10 000 pas par tour, ce qui permet une rotation, même très lente sans que des vibrations dues au changements de pas interviennent dans la rotation du moteur.
- ENABLE_N, active le contrôleur lorsque 24V sont fournis sur cette entrée
- GATE_N, active la prise en compte du signal PULSE du moteur lorsque 24V sont fournis sur cette entrée
- ENABLE, active le contrôleur lorsque 5V sont fournis sur cette entrée.

Les signaux ENABLE_N, GATE_N et ENABLE peuvent paraître redondants dans leur fonction, mais ils sont présents sur le contrôleur car celui-ci est conçu pour être utilisé par un automate, et sont nécessaires dans la gestion d'un arrêt d'urgence par l'automate. Le signal ENABLE permettrait, dans le cas où un automate industriel contrôlerait le moteur, d'arrêter la rotation du moteur via le système de commande, là où ENABLE_N et GATE_N permettraient d'arrêter la rotation via le système de puissance.

Dans notre cas, ENABLE permet de stopper la rotation du moteur via l'ordinateur relié à la baie d'acquisition.

ENABLE_N et GATE_N sont utilisés pour stopper la rotation du moteur via un interrupteur d'arrêt d'urgence physique.

b. Système de mesure :

L'électronique de mesure du système est très simple, le capteur étant analogique, et ne nécessite donc pas de bus, ou de cartes contrôleur évoluées.

Le capteur est donc simplement branché à une baie d'acquisition analogique, qui fournit une excitation de 5v au capteur, et lis le signal de sortie du capteur, qui permet de remonter à la force exercée sur le capteur via la formule suivante :

$$F_{\text{capteur}} = \frac{U_{\text{capteur}}}{U_{\text{excitation}}} * F_{\text{fullscale}}$$

Où :

- F_{capteur} correspond à la force exercée par sur le capteur d'efforts.
- U_{capteur} correspond à la tension lue par la baie d'acquisition aux bornes de sortie du capteur d'efforts
- $U_{\text{excitation}}$ correspond à la tension d'excitation appliquée au capteur.
- $F_{\text{fullscale}}$ est une caractéristique du capteur d'efforts, présente dans la datasheet, et correspond à la force maximale lisible par le capteur. Pour cette version du capteur, $F_{\text{fullscale}} = 9.81N$

Dans notre cas, on choisit $U_{\text{excitation}}$ aussi haute que possible en considérant la tension maximale admissible par le capteur d'efforts, de manière à optimiser la résolution de la mesure de tension effectuée par la baie d'acquisition. En effet, celle-ci possède une résolution fixe, pour une plage de tension fixe. Cela permet de plus d'augmenter la variation de tension observée, et donc de minimiser le rapport signal sur bruit, les tensions mesurées en sortie du capteur étant en effet très faibles, de l'ordre de quelques millivolts.

Ainsi, on remonte facilement à la mesure de couple recherchée, de la manière suivante :

$$C_{\text{trainee}} = ((F_{\text{capteur}} - F_{\text{zero}}) R_{\text{capteur}}$$

Où :

- C_{trainee} correspond au couple résistant s'opposant à la rotation du sous-marin dans l'eau.
- F_{capteur} est la force mesurée par le capteur d'efforts lors de la mesure avec le sous-marin dans l'eau.
- F_{zero} est la force mesurée par le capteur lors d'une mesure « a vide », avec le sous-marin hors de l'eau.
- R_{capteur} est la distance entre l'axe de rotation du sous-marin et le capteur d'efforts.

On effectue une mesure à vide, que l'on soustrait à la mesure effectuée avec le sous-marin dans l'eau, de manière à éliminer les éventuels offsets dus, par exemple, aux frottements des roulements ou à un offset dans la tension de sortie du capteur d'efforts.

Pour effectuer les mesures sur le robot à l'échelle 1, il est possible que le capteur d'efforts possède une plage de mesure trop faible, et devra potentiellement être remplacé par une version possédant une pleine échelle plus élevée.

3. Conclusion de l'étude :

Le système proposé permet ainsi de mesurer le coefficient de frottement en rotation du robot. L'objectif principal était de déterminer ce coefficient sur l'axe de tangage, nécessaire pour le contrôle du système pendulaire, mais des mesures seront effectuées sur tous les axes du robot, de manière à compléter le modèle dynamique.

4. Apport du stage dans le projet professionnel :

Ce stage m'a permis d'effectuer la conception d'un système simple dans son ensemble, associant de la conception mécanique et électronique dans un environnement international.

Il m'a permis d'acquérir des compétences en conception mécanique, en particulier le fait de prendre en compte les problématiques d'approvisionnement des composants dans la conception, problématiques qui ont été un point relativement bloquant dans le déroulement du projet.

Ce stage est ainsi assez complémentaire avec ma formation en spécialité robotique à l'ENSTA Bretagne, dans laquelle la conception de systèmes mécaniques et mécatroniques n'est que trop peu abordée à mon goût.

Dans le cadre de mon projet professionnel, cela m'a permis d'acquérir une expérience professionnelle en conception, ce qui me permettra potentiellement de candidater sur des postes dont la composante mécanique est plus importante que ceux qui sont prioritairement visés par la formation.

Ce stage m'a de plus permis de travailler au sein d'une équipe internationale, et cela me conforte dans l'idée de partir travailler à l'étranger, à court ou moyen terme.

5. Conclusion :

Ce stage dans le Laboratoire de Mécanique et Mécatronique de l'Université Technologique de Tampere m'a permis de participer à un projet européen d'ampleur, et de travailler à la conception d'un banc d'essai, alliant ainsi des problématiques d'ordre mécanique, mais aussi électronique, de mesure.

Il m'a de plus permis de découvrir la culture finnoise et un système de fonctionnement des laboratoires de recherche très différent du mode de fonctionnement français, en particulier pour ce qui est de l'approvisionnement en matériel, et du type de management.