

Une application originale de la régulation de systèmes : l'étalonnage du capteur de température d'un moteur électrique

Thierry LEQUEU¹, Jean-Marie SADOWNICZYK², Sébastien JACQUES³

Correspondance : thierry.lequeu@univ-tours.fr et sebastien.jacques@univ-tours.fr

(1) : Université de Tours – 60 rue du Plat d'Étain – 37020 Tours.

(2) : Université de Tours – IUT de Blois – 15 rue de la Chocolaterie – 41000 Blois.

(3) : École Polytechnique de l'Université de Tours – 64 avenue Jean Portalis, 37200 Tours.

RESUME : Le véhicule électrique représente aujourd'hui une application pédagogique pluridisciplinaire. C'est pourquoi il est utilisé comme illustration dans les études de cas utilisées dans de nombreux cours de formation, notamment dans les instituts universitaires de technologie et dans les écoles d'ingénieurs. Dans cet article, nous proposons une application originale de l'apprentissage par la pratique de la régulation de systèmes industriels autour de l'importance de l'étalonnage du capteur de température d'un moteur électrique. Cette étude peut par exemple s'insérer dans les travaux pratiques d'automatique de la spécialité « Mesures Physiques » d'un Bachelor Universitaire de Technologie. Pour illustrer ce sujet, le moteur synchrone triphasé ME1117 de la société Motenergy caractérisé ici est inséré dans une enceinte (i.e. un four) contrôlée en température par un régulateur à logique floue. L'objectif est de garantir que la température fournie par le capteur du moteur électrique correspond bien à la température du bobinage. Cette information est essentielle, notamment dans le cadre de compétitions éducatives pour des véhicules tels que les karts électriques, afin de s'assurer que les performances du moteur ne sont pas dégradées.

Mots-clés : moteurs électriques, régulation de température, dispositif pédagogique, transfert de savoir-faire, retour d'expérience.

1 INTRODUCTION

Le véhicule électrique suscite toujours autant d'intérêt dans les formations techniques et technologiques dans les Universités puisqu'il contribue à l'apprentissage de nombreux savoirs : la conception mécanique, les systèmes électroniques embarqués, la conversion et la gestion de l'énergie électrique, les machines électriques et les transferts thermiques associés etc. [1-3].

La performance d'une machine électrique est limitée par les températures maximales autorisées dans certaines zones critiques telles que le bobinage, les aimants permanents et les roulements [4]. Si les températures dans ces zones sont supérieures aux limites fonctionnelles, alors la durée de vie de la machine peut être considérablement réduite. En particulier, la température maximale qui peut être théoriquement supportée par un bobinage correspond à celle entraînant la destruction des isolants autour des conducteurs en cuivre, soit 155 °C dans le cas des isolants de la classe F [5]. Néanmoins, pour garantir une stabilité thermique de la machine, la température à ne pas dépasser est généralement de 120 °C.

Lors de la conception et de la fabrication d'un moteur électrique, le constructeur installe un capteur de température actif ou passif noyé dans le bobinage [6]. Il existe plusieurs technologies de capteurs permettant de mesurer la température :

- Des capteurs sur substrat en silicium ayant un coefficient de température positif et permettant de mesurer des températures comprises entre -40 °C et +300 °C. C'est le cas par exemple du capteur KTY84-150,

encapsulé dans un boîtier SOD68 (DO-34), qui a une résistance comprise entre 950 et 1 000 Ω.

- Des sondes de type PT1000 dont la résistance augmente avec la température d'une manière connue et répétable. Ce type de sonde présente une très bonne précision sur une large plage de température (i.e. de -200 à +700 °C).
- Des thermistances à coefficient de température négatif (CTN) dont la résistance diminue de manière uniforme lorsque la température augmente.

Le variateur de vitesse associé au moteur électrique doit alors mesurer l'information en provenance du capteur (i.e. la tension et/ou le courant) et être capable de fournir une estimation de la température la plus précise possible.

C'est là que nous nous proposons d'intervenir : comment vérifier que la chaîne de mesure est bien correcte et que la température affichée par le variateur correspond à celle du bobinage du moteur ?

Dans cet article, nous allons répondre à ces questions en proposant des travaux pratiques (TP) sur la régulation de température. Cette problématique peut s'intégrer dans les formations de BUT (Bachelor Universitaire de Technologie), notamment en Mesures Physiques. Ce type de TP peut être facilement mis en place lorsque les groupes d'étudiants ne sont pas trop nombreux (de 12 à 14 étudiants).

Cet article est scindé en plusieurs parties. Dans un premier temps, nous expliquerons le principe de la mesure. Puis, nous expliquerons ce protocole au

moteur électrique ME1117 de la société Motenergy. La partie 4 de cet article concernera la correction du capteur de température. Enfin, nous donnerons quelques conclusions et perspectives.

2 PRINCIPE DE LA MESURE

2.1 Utilisation d'un four

Pour connaître *a priori* la température de la sonde qui est dans le bobinage d'un moteur électrique, il faut s'assurer que la température de ce dernier est homogène et a une valeur connue. Pour cela, il est nécessaire de « plonger » le moteur dans une enceinte à température contrôlée et attendre la propagation du flux de température jusqu'à ce qu'il atteigne son régime permanent, c'est-à-dire lorsque la température est stabilisée.

C'est ici que nous proposons d'adapter un sujet de TP existant autour de la régulation d'un four [7]. Le four utilisé ici est un modèle de la société MOULINEX qui a une puissance nominale de 2 kW sous 240 V AC RMS. Sa capacité totale (de l'ordre de 19 litres) est suffisamment grande pour y insérer le moteur électrique que l'on souhaite étudier. Le four a été modifié pour que son fonctionnement soit davantage didactique. Comme le montre la Figure 1, son thermostat peut être déconnecté et un orifice a été créé afin de pouvoir insérer une sonde de type K dans l'enceinte. Un régulateur à logique floue, de type REX-D100 de la société TC S.A., pilote un relai statique pour contrôler l'alimentation électrique du four [8].



Figure 1. Banc expérimental de mesure : le moteur électrique est inséré dans un four MOULINEX 2 kW.

2.2 Caractéristiques du moteur et du variateur

Le moteur électrique étudié est de type ME1117 de la société Motenergy (cf. Figure 2) [9]. C'est un moteur synchrone triphasé, à aimants permanents, à quatre paires de pôles, avoir un stator en étoile et un entrefer axial. Ce moteur ne comporte pas de balai. Sa puissance permanente de sortie est de 7,5 kW sous une tension de batterie de 70 V DC et un courant dans la batterie de 120 A. La vitesse maximale du rotor est de

5 000 tr/min. Sa masse est de 10,2 kg. La carcasse a un diamètre de 201 mm pour une longueur de 146,5 mm. Ce moteur est équipé d'un capteur de température KTY84-130 et d'un codeur de position de type sin/cos.

Les variateurs triphasés de la famille GEN4 du constructeur SEVCON sont particulièrement bien adaptés pour piloter ce type de moteur. Ces variateurs sont prévus pour des basses tensions (48 V DC) et des forts courants (de 275 A à 650 A AC) [10].

Il est possible d'utiliser le moteur seul et de connecter un appareil de mesure sur le capteur de température afin de tracer la caractéristique du capteur. Comme l'objectif est de valider ou non l'interprétation de ce capteur par le variateur, le capteur du moteur est directement relié au variateur triphasé.

Le variateur est ici alimenté en 48 V DC et les informations concernant le capteur de température sont affichées sur un écran d'ordinateur via le logiciel SEVCON DVTC (cf. Figure 3) [11]. Afin d'en savoir plus sur la méthode de mesure, les paramètres ci-après sont affichés :

- la tension aux bornes du capteur ;
- la résistance équivalente calculée par le variateur ;
- la température estimée via une table implémentée dans le variateur.

La tension aux bornes du capteur est également mesurée avec un voltmètre METRIX MX 579.



Figure 2. Moteur synchrone 7,5 kW Motenergy ME1117 [9].

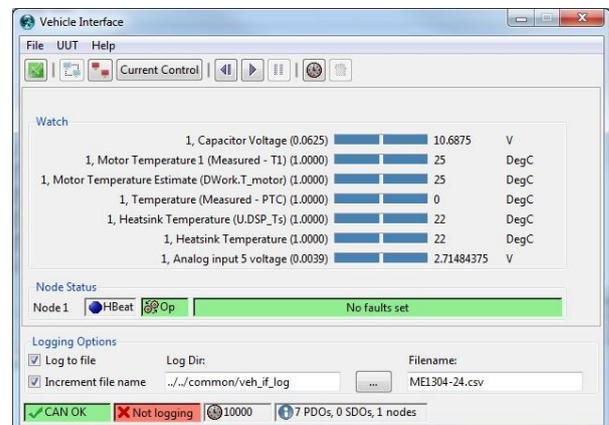


Figure 3. Copie d'écran du logiciel SEVCON DVTC, section « Vehicle Interface » [11].

2.3 Méthodologie de mesure

Afin de valider un point de mesure, il faut être sûr d'avoir atteint l'équilibre thermique du moteur. Dans ce cas, on peut garantir que la température du capteur est bien égale à celle du four.

Dans un premier temps, on vérifie que le régulateur de température remplit bien sa fonction en relevant l'évolution de la température de la sonde de type K en fonction du temps. On relève également les informations fournies par le variateur. Même si les valeurs ne sont pas correctes, on s'intéresse ici uniquement à leur évolution en fonction du temps. Comme le montre la Figure 3, les allures sont celles d'un système du premier ordre : il faut donc attendre « suffisamment longtemps » pour atteindre le régime permanent.

En fonction du moteur, la durée d'un palier de mesure varie entre 3 et 4 heures.

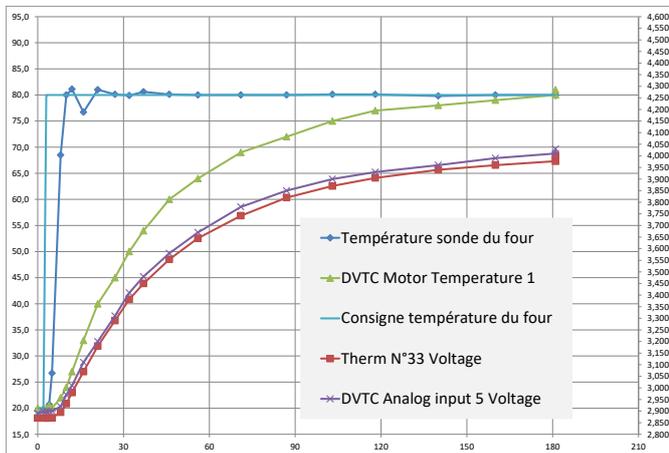


Figure 4. Evolutions des températures et des tensions des capteurs en fonction du temps.

2.4 Précautions et sécurité

Le four étant alimenté en 240 V AC, il faut utiliser du matériel isolé et prévu à cet effet avec un indice de protection IP2x.

Le four peut avoir des surfaces chaudes : il faut donc attendre le refroidissement complet avant d'y toucher.

Si les isolants du bobinage peuvent supporter 155 °C, ce n'est pas le cas pour les câbles à l'extérieur du moteur. On limite donc la température de la carcasse, des fils de puissances et des fils du capteur à 80 °C.

Comme le four n'a pas encore été totalement adapté à l'application proposée dans cet article, le passage des fils de mesure se fait par la porte frontale qui reste entre-ouverte. Afin de limiter les déperditions de chaleur par cette ouverture, un matériau thermiquement isolant a été utilisé pour « calfeutrer » la porte.

3 APPLICATION AU MOTEUR ME1117

3.1 Mode opératoire des mesures

3.1.1 Mesure à température ambiante

Le premier point de mesure correspond à l'équilibre de la température ambiante de l'atelier où se trouve le montage de mesure, soit environ 20 °C. Le matériel est donc installé la veille des mesures afin d'être sûr d'avoir atteint le régime permanent de température.

Ensuite, trois paliers de températures sont visés : +40 °C, +60 °C et +80 °C. Le premier palier permet d'estimer la durée du régime permanent de ce moteur.

3.1.2 Fonctionnement du régulateur

Au lancement des mesures, le four est à 19,4 °C : c'est la température stabilisée de l'atelier et du moteur.

Le premier palier demande une mise en chauffe vers 40 °C. Au vue de la puissance du four, la montée en température est très rapide. La température du four dépasse rapidement la consigne, mais la puissance est bien coupée. Ensuite, le régulateur stabilise la température du capteur du four autour de la consigne de 40 °C en envoyant de petites impulsions de puissance (i.e. quelques secondes toutes les 20-30 secondes).

Lors de ce premier palier, il faut attendre l'équilibre thermique du moteur en traçant l'évolution de la température mesurée par le variateur en fonction du temps. On estime ici une durée qui peut être supérieure à 240 minutes.

3.1.3 Apprentissage du régulateur

Lors des paliers vers 60 °C et 80 °C, on s'aperçoit que le régulateur a une réponse plus précise lors de la régulation de la température. Ainsi, le régulateur « a appris » et estime les constantes de temps thermiques. Il a donc ajusté la loi de régulation en conséquence.

L'écart entre la température du four et la température estimée par le variateur augmente en fonction de la température (cf. Figure 5).

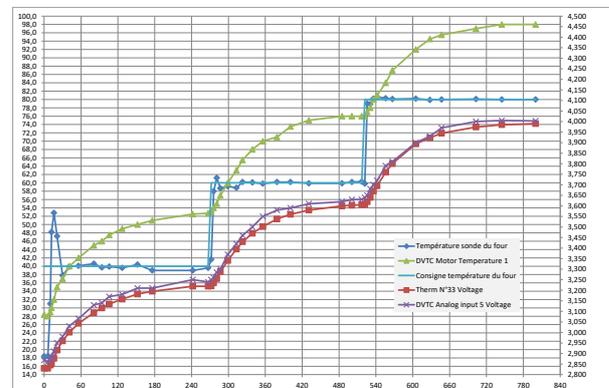


Figure 5. Evolutions des températures et des tensions des capteurs en fonction du temps.

3.2 Exploitation des mesures

3.2.1 Bilan des mesures

Lorsque que l'on estime que la température dans le moteur est stabilisée, on lance un enregistrement des variables à l'aide du logiciel SEVCON DVTC. Comme le montre le Tableau 1, les valeurs estimées par le variateur SEVCON GEN4 sont alors calculées par une moyenne des données du fichier de points.

Tableau 1. Exemple de bilan de mesures.

Température du four mesurée	19,4 °C	39,6 °C	60,3 °C	80,0 °C
Température estimée par le variateur GEN4	30,1 °C	52,7 °C	76,0 °C	98,0 °C
Différence des températures =	10,7 °C	13,1 °C	15,7 °C	18,0 °C
Résistance estimée par le variateur	627,4 Ω	739,8 Ω	865,3 Ω	995,1 Ω

3.2.2 Evolution de la résistance

Grâce au tracé de l'évolution de la résistance estimée par le variateur en fonction de la température réelle du capteur (cf. Figure 6), on détermine une loi polynomiale de variation de la forme :

$$R = a \cdot T^2 + b \cdot T + c \quad (1)$$

Comme cette loi est utilisée entre 20 °C et 80 °C pour extrapoler les températures entre -20 °C et +120 °C, la précision des coefficients du polynôme doit être très « bonne ». À partir des 3 coefficients (i.e. a , b , c), on calcule la nouvelle table de correspondance entre la résistance mesurée du capteur et la température à afficher (cf. Figure 7).

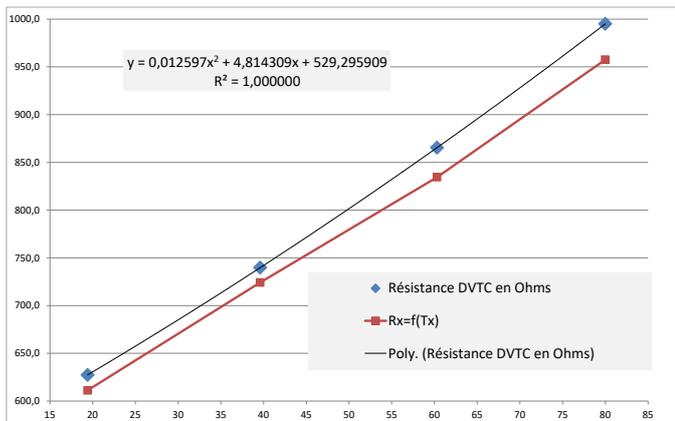


Figure 6. Evolutions de la résistance du capteur en fonction de la température.

a =	0,012597	0,013
b =	4,814309	4,814
c =	529,295909	529,296
Pour le GEN4 ME1117		
-20	438	438
0	529	529
20	631	631
40	742	743
60	864	865
80	995	998
100	1137	1141
120	1288	1294

Figure 7. Calculs des valeurs de la nouvelle table de correspondance.

3.2.3 Modèle équivalent du circuit de mesure

La Figure 8 donne le modèle équivalent du circuit de mesure. Pour mesurer précisément la valeur de la résistance du capteur de température, notée R_{capteur} , le variateur doit mesurer la valeur de la tension du capteur que l'on note V_{capteur} et connaître la résistance interne (R_i) du circuit de mesure. Si la tension d'alimentation E n'est pas bien régulée, il est possible d'en faire localement une mesure.

La valeur de la résistance du capteur est alors donnée par l'expression (2).

$$R_{\text{capteur}} = R_i \frac{V_{\text{capteur}}}{E - V_{\text{capteur}}} \quad (2)$$

La valeur théorique (valeur typique) de la résistance du capteur KTY84-130 est donnée dans la documentation technique du fabricant [12]. Les valeurs qui ne sont pas dans le tableau de la documentation sont obtenues par extrapolation linéaire à partir des valeurs de températures les plus proches (cf. (3)).

$$R(T) = R_{\text{inf}} + (T - T_{\text{inf}}) \frac{R_{\text{sup}} - R_{\text{inf}}}{T_{\text{sup}} - T_{\text{inf}}} \quad (3)$$

Comme le montre le Tableau 2, le variateur fait une mauvaise estimation (surestimation) de la résistance du capteur et fourni donc une valeur erronée de la température du bobinage du moteur. La table de correspondance interne au variateur entre la valeur estimée de la résistance et la température affichée est correcte pour un capteur KTY84-130.

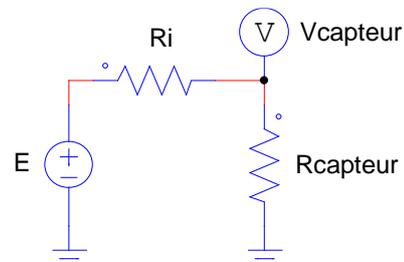


Figure 8. Schéma équivalent du circuit de mesure du variateur GEN4.

Tableau 2. Bilan des mesures de résistances du capteur de température KTY84-130.

Température mesurée du four	Résistance estimé par le variateur	Résistance du capteur KTY84-130	Erreur sur la résistance
19,4 °C	627,4 Ω	578,4 Ω	49,0 Ω
39,6 °C	739,8 Ω	670,2 Ω	69,6 Ω
60,3 °C	865,3 Ω	774,6 Ω	90,7 Ω
80,0 °C	995,1 Ω	882,0 Ω	113,1 Ω

4 CORRECTION DU CAPTEUR DE TEMPERATURE

4.1 Configuration initiale du variateur GEN4

Le logiciel SEVCON DVTC permet la configuration du capteur de température associé au moteur. La Figure 9 présente la configuration par défaut du variateur. La sonde de température est activée (i.e. le mode affiché est : « Mode = PTC ») et le type du capteur est KTY84.

Comme le montre la Figure 10, le couple du moteur est réduit à partir de 110 °C et le « Cutback Gain » vaut 0 pour 120 °C.

Figure 9. Configuration initiale du variateur SEVCON GEN4 pour le capteur de température.

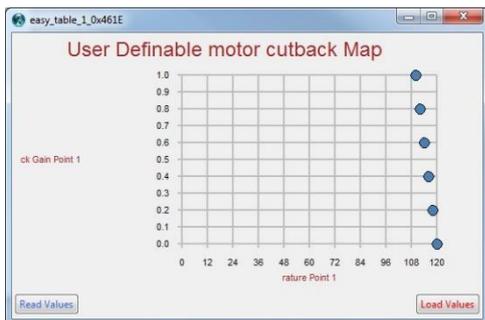


Figure 10. Configuration de la réduction de couple en fonction de la température dans le variateur SEVCON GEN4.

4.2 Modification de la table de correspondance

La fabrication des capteurs KTY83 et KTY84 étant arrêtée depuis 2015, la société SEVCON propose une note d'application pour implémenter un capteur de température différent [13].

Il faut tout d'abord désactiver le calcul interne en utilisant le type « User Defined » et mettre à 0 V les 2 seuils de tension (cf. Figure 11).

Comme le montre la Figure 12, il faut alors entrer les 8 points de la nouvelle table de correspondance présentée à la Figure 7.

Figure 11. Désactivation de la sonde de température KTY84 dans le variateur SEVCON GEN4.

User Definable Thermistor Map					
Resistance Point 1	496.0	Ohms	Temperature Point 1	-20.0	Degrees C
Resistance Point 2	545.0	Ohms	Temperature Point 2	0.0	Degrees C
Resistance Point 3	616.0	Ohms	Temperature Point 3	20.0	Degrees C
Resistance Point 4	708.0	Ohms	Temperature Point 4	40.0	Degrees C
Resistance Point 5	822.0	Ohms	Temperature Point 5	60.0	Degrees C
Resistance Point 6	956.0	Ohms	Temperature Point 6	80.0	Degrees C
Resistance Point 7	1111.0	Ohms	Temperature Point 7	100.0	Degrees C
Resistance Point 8	1288.0	Ohms	Temperature Point 8	120.0	Degrees C

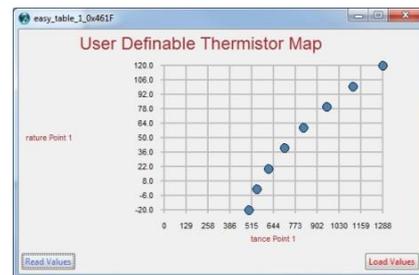


Figure 12. Paramétrage de la nouvelle table de correspondance.

4.3 Validation de la nouvelle table

Après refroidissement complet du moteur, une mesure de validation est lancée (cf. Figure 13). Le logiciel DVTC relève 21 °C au lieu des 20.2 °C mesurés dans le four : c'est la température ambiante de l'atelier et c'est également la température mesurée du dissipateur du GEN4.

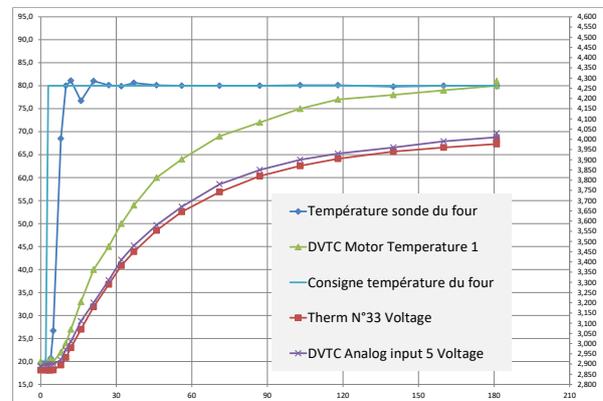


Figure 13. Validation des températures et des tensions des capteurs en fonction du temps.

La valeur finale de la température mesurée atteint ainsi la valeur de la température du four à +/- 1°C près.

5 CONCLUSIONS

Dans cet article, nous avons proposé une application originale de la régulation de systèmes industriels. Il s'agit en particulier de mettre en évidence l'importance de l'étalonnage du capteur de température d'un moteur électrique. Cet étalonnage est crucial pour que la température fournie par le capteur corresponde bien à la température du bobinage du moteur. Cette information est nécessaire pour éviter de dégrader les performances du moteur ou même de le détruire.

Le sujet proposé peut facilement être adapté aux travaux pratiques d'automatique actuellement proposés, comme par exemple dans la formation de BUT « Mesures Physiques ».

Nous avons appliqué cette étude à la caractérisation d'un moteur synchrone triphasé. Le retour d'expérience a en outre montré que le régulateur à logique floue « apprend vite » et régule bien la température du four. Néanmoins, plus la température augmente, plus la constante de temps thermique augmente. Il faut alors près de trois heures pour stabiliser la température dans le moteur. Les différentes mesures effectuées ont également montré que la nouvelle table est bien prise en compte et la température mesurée par le variateur SEVCON GEN4 correspond bien à la température du moteur à +/- 1 °C (+/- 2 °C maximum).

Il ne reste maintenant plus qu'à soumettre ce cas d'étude aux étudiants de BUT « Mesures Physiques » et analyser leur acquisition des connaissances et des compétences par un retour complet d'expérience qui sera discuté prochainement.

6 BIBLIOGRAPHIE

- [1] S. Jacques, T. Lequeu, V. Dewancker, « Une initiative pédagogique autour du kart électrique : le projet collectif intensif », J3eA, Vol. 15, No 7, 2016.
- [2] S. Jacques, "A Pedagogical Intensive Collaborative Electric Go-Kart Project", International Journal of Engineering Pedagogy, Vol. 7, No 4, 2017, pp. 117-134.
- [3] G. Hombal, V. Sushma, S. Koraddi, S. Angadi, A. B. Raju, "Enhancing the Student Learning Outcomes in Electric Drives and Control by Integrating the Core Courses Through PBL Approach", Journal of Engineering Education Transformations, Vol. 33, No 1, 2019.
- [4] Y. Xia, Y. Xu, M. Ai, J. Liu, "Temperature Calculation of an Induction Motor in the Starting Process", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 29, No 2, 2019.
- [5] V. Iosif, N. Takorabet, D. Roger, S. Duchesne, F. Meibody-Tabar, « Conception d'un prototype de machine Ultra-Haute Température (500° C) », Symposium de Génie Électrique, Grenoble, France, Juin 2016.
- [6] F. Badin, « Les véhicules hybrides : des composants au système », Éditions TECHNIP, Paris, France, 2013.
- [7] J.-M. Sadowniczyk, « TP4 automatique 2e année – Identification d'un processus et réglages d'un régulateur - Régulation de température d'un four », mars 2019, IUT de Blois, Département Mesures Physiques.
- [8] Régulateurs de températures REX-D100-D400-D700-D900, « Manuel d'utilisation et de configuration », IMDRE01-E2, Société TC S.A., <https://tcsa.fr/>, 59 pages.
- [9] Site web de la société Kit Elec Shop, « Moteur synchrone ME1117 PMSM brushless », visité le 26 décembre 2019, <https://www.kit-elec-shop.com/fr/moteurs-synchrones/2161-moteur-synchrone-me1117-pmsm-brushless.html>
- [10] Site web de la société SEVCON, « Low Voltage Controllers », visité le 26 décembre 2019, <http://www.sevcon.com/products/low-voltage-controllers/>
- [11] T. Lequeu, « AN-EK016-FR - Utilisation de DVTC pour les variateurs SEVCON GEN4 », 61 pages, version 7 du 29 septembre 2019, site : <https://www.e-kart.fr/news/50-notes-d-applications/699-an-ek016-fr-utilisation-de-dvt-pour-les-variateurs-sevcon-gen4>
- [12] NXP founded by Philips, « KTY84 series – Silicon temperature sensors », Product data sheet, Rev. 06, 8 May 2008, 9 pages.
- [13] D. Conboy, "SEVCON Application Note - KTY83-84 Obsolescence", 4 pages, version du 22 mai 2015.