

Un Kart électrique 25kW son banc d'essais et son contrôle

Carole Henaux¹, Guillaume Pellecuer¹, Thierry Martire¹, Jean-Jacques Huselstein¹, Fabrice Cano², Laurent Deknyff²

1 Université de Montpellier, Faculté des sciences, Montpellier, France

2 IES, Institut d'Electronique et des Systèmes – UMR 5214, Montpellier, France

Carole Henaux : carole.henaux@umontpellier.fr

Résumé : *Le papier présente un projet pédagogique autour de la conception d'un Kart à motorisation électrique devant participer à un challenge universitaire national e-Kart. Ce projet englobe plusieurs sous-projets pédagogiques s'intégrant dans des modules d'enseignement du Master EEA de la faculté des Sciences de Montpellier. Autour d'un kart thermique de 9CV mis hors d'usage sur un circuit karting de location les étudiants de Master 1 EEA accompagnés de leurs enseignants ont effectué dans un premier temps un retro-fit électrique. Parallèlement un banc d'essais devant intégrer le moteur de propulsion du kart a été développé et doit être mis à disposition des étudiants pour l'amélioration des performances dynamiques. Enfin tout une problématique d'acquisition en temps réel des données de courses et de leur traitement à posteriori permet d'adresser des projets relatifs à l'électronique embarquée et au traitement du signal.*

Mots clés : propulsion électrique, traitement du signal, instrumentation temps réel

Abstract: Article title translated in English

The paper presents an educational project focused on the design of an electric kart dedicated to participate in a national university e-Kart challenge. This project encompasses several educational sub-projects integrated into the teaching modules of the Master's program in Electrical Engineering (EEA) at the Faculty of Sciences in Montpellier. Starting with a 14HP gasoline kart that was taken out of service at a rental karting circuit, the first-year Master's students in EEA carried out an initial electric retrofitting. In parallel, a test bench to integrate the kart's propulsion motor was developed and is to be made available to students

for improving dynamic performance. Lastly, an entire system for real-time acquisition of race data and its post-processing addresses projects related to embedded electronics and signal processing.

Keywords: electrical drive, signal processing, data acquisition.

1. Introduction

Autour d'un challenge national de karts à propulsion électrique il s'agit de monter des projets pédagogiques mettant en jeu toutes les compétences du Master EEA. Si la problématique principale est focalisée sur la mise au point du kart, des projets annexes d'une durée de 8 semaines relatifs à l'électronique embarquée à l'optimisation des ressources énergétiques via un programme de simulation et à la gestion de course par des protocoles de communication spécifiques ont pu et seront développés. Le retour d'expérience se concrétise directement via les résultats obtenus durant le challenge national sur lequel on peut souligner que les pilotes sont aussi des étudiants de master EEA. Actuellement un karting entièrement rétrofité par des étudiants et des enseignants est opérationnel et a participé à un premier challenge. Un deuxième kart doit être lui aussi rétrofité cette année. Parallèlement des étudiants ont participé à la définition et l'élaboration d'un banc d'essais intégrant le moteur de propulsion du kart accouplé à un moteur d'une puissance de 17kW. Ce banc doit être piloté à terme via une électronique et une RTBOX afin d'optimiser la gestion de la batterie. Les performances de la chaîne de propulsion en temps réels à l'image de ce qui se fait dans les courses automobiles dépendent aussi des informations renvoyées en temps réels dans le box et de leur traitement à posteriori. En conséquence des projets relevant de l'acquisition temps réels, du traitement du signal à partir des capteurs embarqués sont aussi en cours.

L'article se scinde en 4 parties traitant successivement des projets relatifs à la motorisation électrique, au banc d'essais moteur, aux cartes d'acquisition temps réel et au programme de simulation énergétique.

2. Retrofit d'un Kart

2.1. Retrofit d'un kart thermique

Le kart d'origine est un kart de 9 CV classique repris dans un karting de loisir (cf Figure 1). Ce kart avait été mis au rebus compte tenu de son état comme illustré sur la Figure 2.



Figure 1. Kart thermique de base

Les étudiants de M1 ont été fortement encadrés par leur enseignants, l'objectif étant dans un premier temps de démonter, analyser et définir la nouvelle chaîne de propulsion.

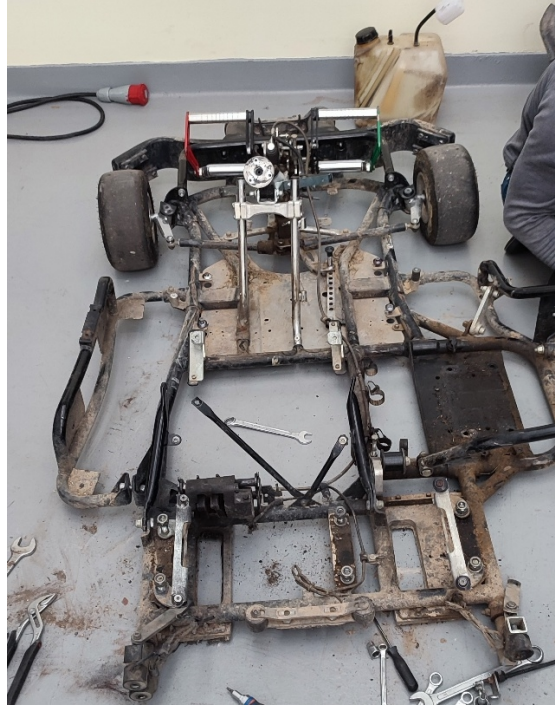


Figure 2. Kart thermique après démontage pour analyse du châssis

Compte tenu du temps imparti, les différents composants de la nouvelle chaîne de propulsion qui intègre un moteur synchrone à aimants permanents, une électronique embarquée une transmission par chaîne ont été achetés sur étagère. La batterie a été entièrement montée après évaluation des besoins énergétiques sur la base de cellules Lithium-Ion. Une électronique de supervision avec écran digital est disposée au niveau du volant afin d'avoir les informations en temps réel sur plusieurs paramètres critiques de la propulsion, ce qui donne au final la configuration illustrée sur la Figure 3. Il est à noter qu'il n'y a pas de récupération d'énergie prévue pour l'instant, ceci dans l'optique de préserver la batterie [1]. Cette option fera l'objet d'un projet dans les années futures lorsque nous disposerons d'un retour de mesures suffisant à l'issue du premier challenge

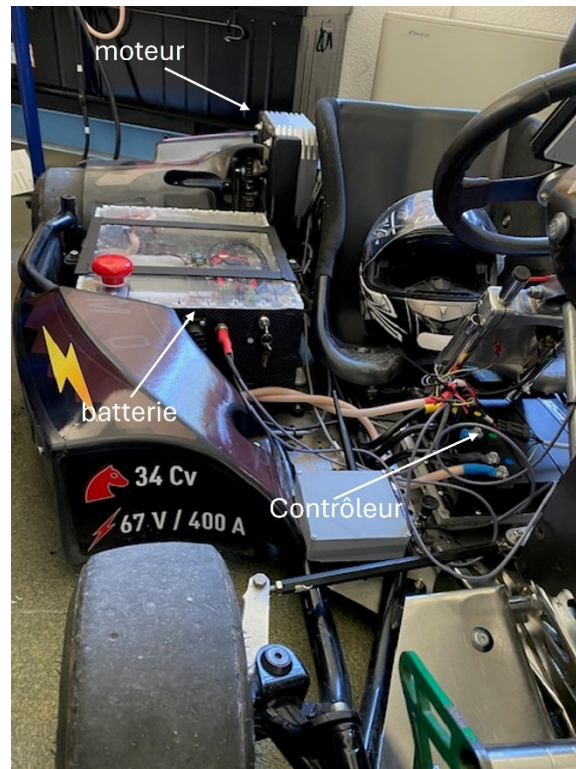


Figure 3. Chaîne de propulsion du Kart retrofité

In fine le kart qui a participé à son premier challenge en Mai 2024 et illustré sur la Figure 4 se caractérise par une chaîne motorisée décrite dans le tableau I.



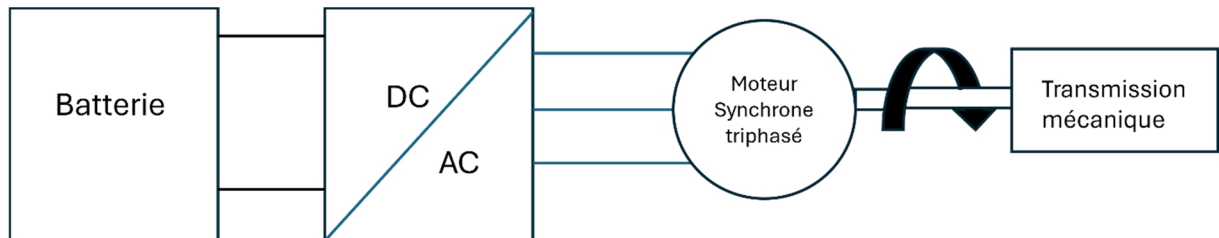
Figure 4. Le Kart de compétition

Tableau 1. Caractéristiques nominales de la chaîne

Composant	Caractéristiques
Contrôleur	- Tension bus-continu 72-95V - Puissance électrique 13-22kW - Courant nominal par phase 1500A - Courant nominal côté bus continu 750A
Moteur	- 20kW – 3400tr/mn - 48-96V
batterie	- Cellule de base 3,6V 4Ah INR Samsung 21700 – 40T - Montage 16S12P pour 400A sous 67V

3. Le banc d'essais pour les TP Master

L'objectif principal du banc d'essais vise à tester les moteurs de propulsion et la stratégie de pilotage pour accroître le rendement de la chaîne de propulsion soit in fine diminuer le poids et le coût batterie. Ce banc moteur schématisé sur la Figure 5 comporte deux machines électriques similaires l'une fonctionnant en moteur et la seconde en machine de charge.

**Figure 5.** Configuration du banc de test moteur

La machine de charge doit être similaire en puissance au moteur, c'est pourquoi il a été décidé de prendre les deux machines chez le même fournisseur et dans la même série. En se basant sur une puissance nominale de 15kW la source continue de puissance primaire du même ordre de grandeur a un coût d'achat rédhibitoire (1k€/kVA en moyenne). L'alternative retenue consiste à renvoyer la puissance électrique générée par la machine de charge en sortie du bus continu. Ainsi la source primaire ne devra fournir que les pertes du groupe qui restent dans un scénario pessimiste et compte tenu des machines choisies (machine synchrone à aimants permanents) inférieures à 20% de la puissance utile compte tenu des moteurs sélectionnés (rendement entre 90 et 95%). La puissance que doit dans ces conditions fournir l'alimentation primaire si on estime une pointe de puissance à 25kW et un facteur de puissance de 0,7 dans le pire de cas sera de 7kVA. L'alimentation choisie est une alimentation de 10kW- 140A – 200V référence EA-PSI 9200-140 3U de chez Elektro-Automatic. La mesure du couple s'effectue par une jauge de contrainte fixée entre le stator et le bâti comme illustré sur la Figure 6. Les étudiants doivent dans un premier temps effectuer les essais nécessaires à la caractérisation du moteur (essais à vide, en court-circuit, mesure des constantes de temps

électriques et mécaniques) et de ses fonctions de transfert électriques et mécaniques requises pour le développement de la commande.

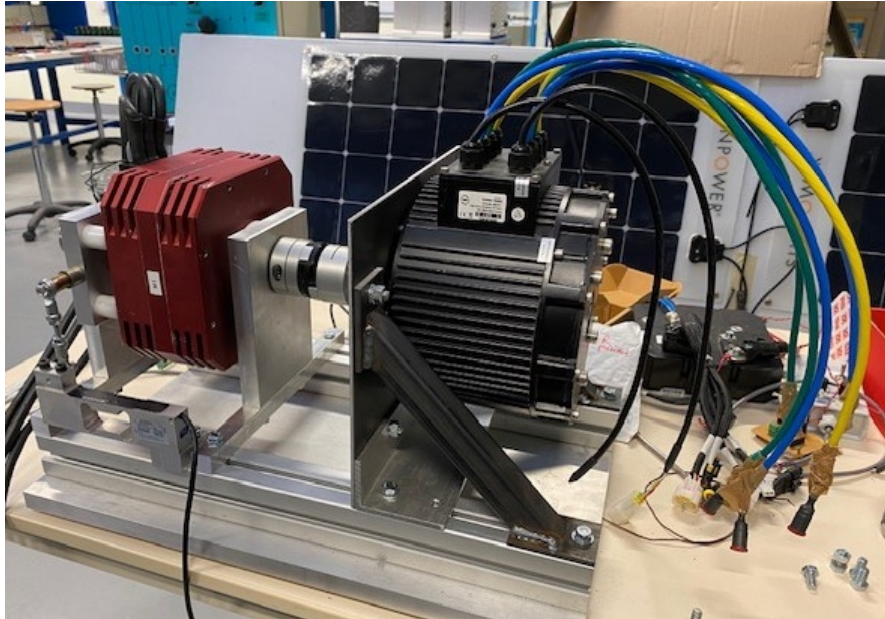


Figure 6. Banc d'essais en salle de TP pour les Master 1 et les Master 2

4. Programme de supervision

4.1. Carte d'acquisition 1

Le kart a été testé sur des portions courtes et sur un circuit extérieur homologué en circuit karting de loisir. Dans le but d'assurer la sécurité du pilote et de la chaîne de puissance durant la phase de validation, et d'optimiser la gestion de l'énergie pendant la compétition, une carte d'acquisition de données basée sur microcontrôleur STM32, associée à un émetteur-recepteur Xbee a été mise en place.

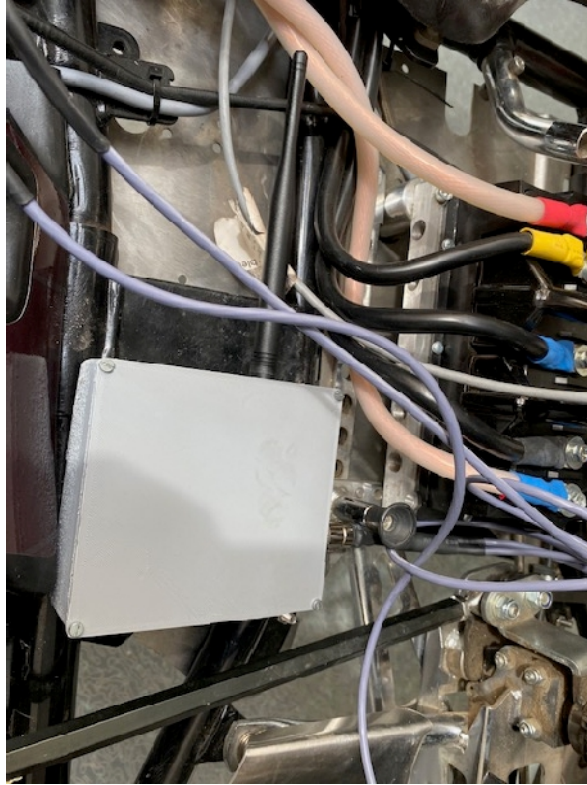


Figure 7. Boîtier de carte d'acquisition et antenne émettrice

Cette carte (cf Figure 7) communique en temps réels avec le BMS via un bus CAN, le contrôleur et les différents capteurs qui instrumentent la chaîne de propulsion (capteurs de température dans les bobinages du moteur, capteurs de courant). Un premier écran de contrôle rattaché au volant (cf Figure 8) permet au conducteur d'avoir en temps réel l'état fonctionnel des composants critiques de la chaîne.



Figure 8. Ecran de contrôle vitesse-température-SOC

L'émetteur XBee fonctionnant à une fréquence de 2,4 GHz, permet la transmission de données de mesures en temps réel et leur visualisation sur un PC distant. Enfin cet équipement permet aux étudiants de les stocker pour analyse ultérieure comme le montre la figure 9 :

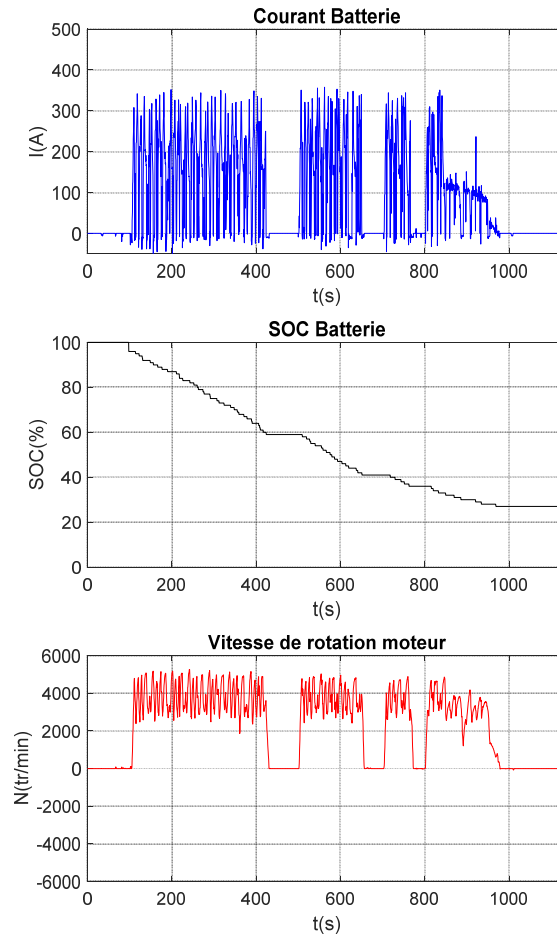


Figure 9. Analyse des données sur un cycle de course

Néanmoins, la transmission et la réception de signaux en temps réel ne permettent pas l'acquisition des données indispensables à la modélisation énergétique de la chaîne de propulsion, notamment la position, l'accélération et les températures du moteur, de l'électronique, de la batterie et des freins. Dans ce contexte, les étudiants pourront mettre en œuvre un système d'acquisition de données dédié et complémentaire du précédent pour d'obtenir ces informations.

Une deuxième carte a été développée par un membre du département EEA et mise à disposition des étudiants de Master1 afin qu'ils puissent acquérir toutes les données nécessaires et les analyser. Cette carte d'acquisition de données, autonome (cf Figure 10), intègre un module GPS pour l'enregistrement de la position du kart en environnement extérieur, un capteur de pression pour la détermination et l'étalonnage de l'altitude, un accéléromètre et un gyroscope MEMS, ainsi qu'une mémoire de stockage de 16 Mo. Elle permet d'obtenir avec précision la position du kart, la fréquence d'acquisition des données GPS pouvant atteindre 10 Hz.

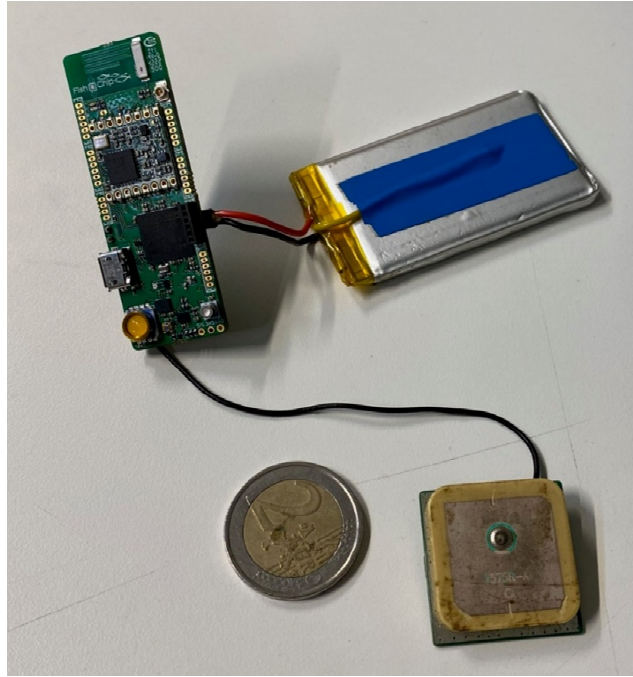


Figure 10. Carte Emetteur-Recepteur et sa batterie

Les données peuvent être récupérées sur un ordinateur entre les tours afin de pouvoir les traiter en recomposant par exemple la trajectoire du kart durant la course tel qu'illustré sur le Figure 11. À terme, elle sera équipée d'un émetteur-récepteur pour permettre l'échange d'informations en temps réel avec les pilotes pendant la course et pourra également remonter des informations du BMS et de l'onduleur via le bus CAN ainsi que la température de divers éléments grâce à l'ajout de mesures analogiques.

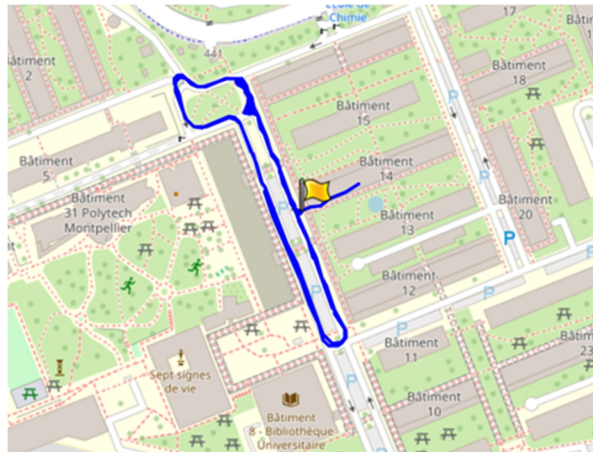


Figure 11. Reconstitution du circuit effectué en test du Kart

5. Un modèle énergétique

Afin d'améliorer la chaîne énergétique et de développer une stratégie d'alimentation moteur optimale il est nécessaire de disposer d'un modèle énergétique du kart. Un premier projet a permis d'établir les bases de ce modèle, codé dans l'environnement Matlab, dont les équations fondamentales sont les suivantes :

Le principe fondamental de la dynamique

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \quad \text{Eq. 1}$$

Dans les forces prises en compte on retrouve :

- la force de résistance aérodynamique
- la force de résistance à la pente
- la force de résistance aux roues/sol
- la force de résistance à l'accélération

La puissance nécessaire pour propulser le kart

$$P = FxV \quad \text{Eq. 2}$$

L'énergie totale consommée par le kart

$$E = \int P dt \quad \text{Eq. 3}$$

L'énergie totale consommée par le kart se compose principalement de l'énergie fournie par la batterie et de l'énergie dissipée dans les freins lors des accélérations. Les mesures accessibles permettront dans un premier temps de quantifier l'énergie fournie par la batterie.

Le kart étant non finalisé au début du projet étudiant sur la modélisation, les premiers essais de validation ont été réalisés en utilisant un cross-kart mis à disposition par la société SMVE. Les étudiants ont proposé d'utiliser une carte Arduino UNO et un accéléromètre DFRobot 6 axes, Série S. Par ailleurs trois séries d'essais d'une durée de 3mn respectivement caractérisés par une tension batterie de 110V à basse vitesse, une tension batterie de 109V à vitesse moyenne et une tension batterie de 108V à grande vitesse ont été menés avec mesure avant et après de la consommation batterie.

Tableau 2. Consommation d'énergie du cross kart sur trois séries d'essais

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Consommation batterie	66Wh	153Wh	270Wh

Parallèlement les données fournies par l'accéléromètre ont permis de tracer les courbes suivantes :



Figure 12. Vitesse instantanée essai – basse vitesse**Figure 13.** Vitesse instantanée essai – moyenne vitesse

L'analyse de ces résultats ont conduit les étudiants à conclure que l'accéléromètre choisi et la carte d'acquisition associée n'étaient pas des outils de mesure fiables pour deux principales raisons :

- L'accéléromètre fixé au kart vibrait beaucoup ;
- Le capteur ne fournissait pas directement la composante verticale de l'accélération par rapport au référentiel terrestre.

Dans ce type de projet les étudiants doivent combiner en permanence une approche théorique avec des résultats expérimentaux et proposer des solutions techniques adéquates.

6. Les modes d'apprentissage et les résultats

Le challenge ekart donne actuellement lieu à de nombreux sujets de projets M1 et M2 dont la durée varie entre 8 et 9 semaines. En fonction des sujets, les étudiants travaillent seuls ou en équipe de 2 ou 3. Le kart et le banc d'essais permettent de proposer des sujets très pratiques qui mettent en œuvre des compétences assez variées telles que l'électronique de puissance, la conception de circuits imprimés pour la gestion des données capteurs ou l'affichage en temps réel des paramètres importants du kart, du traitement de signal, de la programmation. Afin de pouvoir améliorer la chaîne de propulsion des sujets plus théoriques sont aussi proposés, il s'agit dans ce cadre de pouvoir disposer d'un modèle énergétique de la chaîne sous un environnement type Matlab-Simulink ou PLECS.

Exemples de projets pédagogiques :

Ce projet a donné lieu à de multiples sujets de projets pédagogiques en Master1 et Master 2 :

- Développement d'une motorisation pour karting électrique
- Développement d'un banc d'essais pour le test d'une chaîne de propulsion électrique
- Caractérisation d'un moteur de propulsion pour une chaîne de propulsion électrique
- Définition d'un capteur de courant (de type smart-shunt fort courant) pour l'instrumentation d'une chaîne de propulsion électrique

- Définition d'une sonde de tension différentielle
- Dimensionnement d'une batterie pour un karting électrique
- Modélisation sous Matlab Simulink de la motorisation de Karting électrique

A ce jour 15 étudiants dont 1 L3, 10 M1 et 4 M2 ont travaillé sur le projet. Les retours sont positifs puisque nous engageons cette année 2 karts, un deuxième kart ayant été développé cette année et en cours de finalisation sur le challenge comme illustré sur la figure 14 .



Figure 14. Kart électrique numéro2 réalisé en 2024-2025 en cours de finalisation

Enfin soulignons que le kart constitue un atout majeur lors des journées des cordées de la réussite au cours desquelles le département doit mettre en avant les thématiques de l'EEA auprès des collégiens et lycéens.

7. Conclusion

Le kart retrofitté participant au challenge national ekart constitue un outil pédagogique très puissant car il requiert pour sa mise au point et l'amélioration de ses performances la mise en œuvre de multiples compétences EEA. Adossé au banc d'essais moteur qui lui est entièrement dédié et situé dans une salle de TP du master, le projet karting donne lieu à de nombreux projets transverses de niveaux master1 et master2.

Références

- [1] A. Sivert, F. Betin, T. Lequeu, *Réalisation d'un kart électrique performant : gestion de l'énergie embarquée et choix technologiques*, Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes (CETSIS 2014), Besançon, 27-29 Octobre 2014.
- [2] A. Sivert, F. Betin, T. Lequeu, *Réalisation d'un kart électrique performant : gestion de l'énergie embarquée et choix technologiques*, J3EA, Volume 14 Hors Série 1, 2015
- [3] T.Lequeu, B.Bidoggia, A.Schellmanns, Y.Derrien, N.Godefroy, (2008). *Exemples d'applications pédagogiques autour du kart électrique e-kart*. <http://dx.doi.org/10.1051/j3ea:2008031>.

- [4] CC. Cardoso, J.Ferreira,V.Alves, R.Araújo, Rui, *The design and implementation of an electric go-kart for education in motor control*, 2006. 1489 - 1494. 10.1109/SPEEDAM.2006.1650003.
- [5] O. Suchý, T. Košan and L. Streit, *Implementation of Control Unit for Electric Drive Kart*, 2020 International Conference on Applied Electronics (AE), Pilsen, Czech Republic, 2020, pp. 1- 4, doi: 10.23919/AE49394.2020.9232728.
- [6] W. O. Avelino, F. S. Garcia, A. A. Ferreira and J. A. Pomilio, *Electric go-kart with battery-ultracapacitor hybrid energy storage system*, 2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Detroit, MI, USA, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/ITEC.2013.6573499
- [7] K. Vitols, N. Reinberg, A. Sokolovs and I. Galkin, *Drive selection for electric kart*, Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010, Ohrid, Macedonia, 2010, pp. T9-15-T9-18, doi: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606882

Remerciements

Le master EEA de l'université de Montpellier tient à remercier :

- La société SMVE pour sa contribution dans la motorisation (moteur et contrôleur) et dans la mise à disposition de ses moyens d'essais ;
- Le professeur Serge Bernard , directeur de recherche CNRS du LIRMM pour la mise à disposition de la carte d'acquisition

Biographie des auteurs

Carole Henaux : Carole Henaux, professeur des Universités enseigne dans le département EEA de la Faculté de Sciences de l'Université de Montpellier depuis 2021 et est affiliée à l'Institut d'Electronique et des Systèmes dans le groupe de recherche en Génie Electrique, Matériaux et Systèmes. Diplômée Ingénieur en Génie Electrique et Automatique en 1992, elle a obtenu en 1997 un doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse sur le thème de la motorisation de véhicules hybride en collaboration avec Renault. Ses recherches sont focalisées sur le dimensionnement d'actionneurs et générateurs électriques innovants principalement dédiés à des systèmes embarqués (aéronautique, automobile, spatial).

Guillaume Pellecuer : Guillaume Pellecuer, maître de conférences, enseigne depuis 2022 dans le département EEA de la Faculté des Sciences de l'Université de Montpellier et est rattaché à l'Institut d'Électronique et des Systèmes, au sein du groupe de recherche en Génie Électrique, Matériaux et Systèmes. Diplômé d'un doctorat en 2019 sur le thème de la fiabilité des composants de puissance, ses travaux de recherche concernent l'étude, la modélisation, la commande et la réalisation de convertisseurs de puissance dédiés à l'interconnexion des réseaux électriques.

Thierry Martiré : maître de conférences, enseigne depuis 2006 dans le département EEA de la Faculté des Sciences de l'Université de Montpellier et est rattaché à l'Institut d'Électronique et des Systèmes, au sein du groupe de recherche en Génie Électrique, Matériaux et Systèmes. Diplômé d'un doctorat en 2001 sur le thème de l'électronique de puissance pour les énergies renouvelables, ses travaux de recherche concernent l'étude, la modélisation, la commande et la réalisation de convertisseurs de puissance basse tension et forts courants.

Jean-Charles Laurentie : Jean Charles Laurentie est chercheur à l'Université de Montpellier, il a soutenu une thèse de doctorat en 2011 et à poursuivit ses recherches au sein du laboratoire PPRIME de l'Université de Poitiers jusqu'en 2013, période pendant laquelle il a travaillé sur la modélisation numérique des écoulements électro-fluido-dynamiques et le contrôle aéro-acoustique par actionneurs plasma. Il est désormais chercheur et enseignant à l'Université de Montpellier, où il est rattaché à l'Institut d'Électronique et des Systèmes (IES) dans le groupe GEMS. Ses domaines de recherche portent sur les propriétés des matériaux isolants, la mesure, la modélisation et la simulation de phénomènes physiques liés au vieillissement des diélectriques. Ses enseignements au sein de l'université de Montpellier sont axés autour du transport et de la production de l'énergie électrique, de l'électrostatique, des matériaux isolants, de l'électrotechnique ainsi que le calcul numérique.

Jean-Jacques Huselstein est maître de conférences à l'Université de Montpellier, où il enseigne depuis 1994 au sein du département Électronique, Électrotechnique et Automatique (EEA) de la Faculté des sciences. Il est rattaché à l'Institut d'Électronique et des Systèmes (IES), dans l'équipe Génie Électrique, Matériaux et Systèmes (GEMS). Ancien élève de l'ENS Paris-Saclay et agrégé de Génie Électrique (1988), il a soutenu en 1993 une thèse de doctorat à l'Université de Montpellier portant sur la commutation des convertisseurs matriciels. Ses travaux de recherche portent sur le dimensionnement, la réalisation et la commande rapprochée, implémentée sur FPGA, de convertisseurs de puissance multicellulaires.