

Quelques informations et précautions concernant la réalisation d'un kart électrique

Note d'Application EK001-FR – Avril 2009

Thierry LEQUEU – thierry.lequeu@gmail.com

Président de l'Association e-Kart – 152, rue de Grandmont – 37550 SAINT AVERTIN – FRANCE

Tel : +33 (0)6 77 27 86 47 – Fax : +33 (0)2 47 36 71 06

1 - Introduction.....	4
2 - Le châssis du kart.....	4
2.1 Introduction.....	4
2.2 L'assurance.....	5
2.3 La protection du pilote.....	5
2.4 Le système de freinage.....	6
2.5 La couronne de l'arbre arrière.....	7
2.6 Les pneumatiques.....	8
2.7 La dynamique du kart.....	9
3 - La motorisation électrique.....	10
3.1 Introduction.....	10
3.2 Les moteurs à courant continu.....	11
3.3 Concernant les moteurs E-Tek.....	12
3.4 Concernant les moteurs PERM PMG.....	14
3.5 Concernant les moteurs LYNCH LMC 200.....	16
3.6 Concernant les moteurs « AGNI® motors ».....	17
3.7 Les moteurs asynchrones basses tensions.....	19
3.8 Les moteurs synchrones basses tensions.....	21
3.9 Synthèse concernant les moteurs.....	24
4 - Des batteries pour le kart électrique.....	25
4.1 Présentation.....	25
4.2 Les batteries au plomb.....	26
4.3 Les batteries Ni-Mh.....	27
4.4 Les batteries Lithium LiFeBATT.....	27
4.5 Les batteries Lithium ACCUWATT.....	28
4.6 Les chargeurs de batteries.....	29
5 - Convertisseurs d'énergie pour le kart : solutions pour la variation de vitesse.....	30
5.1 Introduction.....	30
5.2 Le hacheur abaisseur de type BUCK.....	31
5.3 Le hacheur de type BUCK à transistor flottant.....	36
5.4 Le hacheur BUCK avec le transistor à la masse.....	36
5.5 Le hacheur 2 quadrants réversible en courant.....	37
5.6 Le câblage de puissance.....	38
6 - Un peu d'électronique, d'automatique, de gestion de projet, d'expression technique... ..	39
6.1 Synoptique général.....	39
6.2 D'autres solutions de convertisseur.....	41
7 - Bibliographie.....	43

Liste des figures :

Fig. 1. Exemple du kart électrique Speed O Max (techniques/images/DSCF0393.JPG).....	4
Fig. 2. Exemple de carte verte de l'assurance MAIF, pour un kart de l'IUT de Tours (techniques/images/MAIF-2007-37007-37c.jpg).....	5
Fig. 3. Exemple de frein hydraulique avec disque double ventilé (techniques/images/DSCN5652.JPG).....	6
Fig. 4. Transmission par courroie (techniques/images/DSCN5653.JPG).....	7
Fig. 5. Vitesse en fonction du moteur, du pignon et de la couronne (techniques/AN-Calculs.xls).....	7
Fig. 6. Pneu arrière et pneu avant (images-maquettes\kart-pneu-avant-12 & arriere-12.jpg). A l'arrière : VEGA 11 x 5.00 – 5 ; diamètre Dr = 25,5 cm ; circonférence 801 mm. A l'avant : VEGA 10 x 4.00 – 5 ; diamètre Dr = 24 cm ; circonférence 754 mm.	8
Fig. 7. Qualité des pneus Bridgestone – Rapport Grip/Longévité (techniques/images/ DSCN1903.JPG).....	8
Fig. 8. Comportement dynamique de l'arbre arrière, source Kartmag N°104, page 29 (techniques/images/Kartmag104-p29.jpg).....	9
Fig. 9. Motorisation du TGV Sud Est, 12 moteurs courant continu à excitation série [8].....	10
Fig. 10. Le schéma équivalent du moteur électrique (thierry\dessins\rlc1.drw).....	11
Fig. 11. Moteur E-tek Briggs & Stratton (http://www.briggsandstratton.com/).....	12
Fig. 12. Performances du moteur électrique E-tek sous 48V (Etek-Specs.htm from http://www.electricmotorsport.com/).	13
Fig. 13. Caractéristiques du moteur PERM PMG 132 sous 48V (http://www.perm-motor.de).....	15
Fig. 14. Caractéristiques du moteur PERM PMG 132 sous 72V (http://www.perm-motor.de).....	15
Fig. 15. Le moteur « AGNI® motors » (http://www.agnimotors.com).....	17
Fig. 16. Caractéristiques du moteur « AGNI® motors » type 135 sous 48V.....	18
Fig. 17. Caractéristiques du moteur « AGNI® motors » type 135 sous 60V.....	18
Fig. 18. Schéma équivalent par phase du moteur asynchrone.....	19
Fig. 19. Le moteur asynchrone Speed o Max.....	20
Fig. 20. Dimensions du moteur asynchrone Speed o Max (http://www.speedomax.fr/).....	20
Fig. 21. Kit de développement du moteur Brushless [11] (http://www.electricmotorsport.com/).	22
Fig. 22. Vue arrière du moteur Brushless (crédit photo Thierry LEQUEU).	22
Fig. 23. Moteur disque PERM (http://www.perm-motor.de/).	23
Fig. 24. Comparaison des performances spécifiques de quelques accumulateurs commercialisés, source Techniques de l'Ingénieur [17].....	25
Fig. 25. Comparaison des batteries et des super capacités en terme de densité d'énergie et de puissance massique, source MAXWELL [31].....	25
Fig. 26. Les batteries OPTIMA JAUNE 12V 48AH 3,7 L 16,7 kg, source CENTRADIS [16].	26
Fig. 27. Élément Lithium 3,2V 10AH LiFeBATT, source http://www.lifebatt.co.uk/	27
Fig. 28. Elements Lithium Thunder Sky, source http://www.thunder-sky.com/	28
Fig. 29. Le pack batterie e-OXO LCP-100AH.	28
Fig. 30. Courbe de charge du circuit spécialisé BQ2031.	29
Fig. 31. Le chargeur CTEK XS-7000 pour les batteries au plomb, distribué par CENTRADIS [16].....	29
Fig. 32. Synoptique général de l'adaptation d'énergie pour le moteur du kart électrique (http://www.thierry-lequeu.fr/data/DIV407.HTM).	30
Fig. 33. La fonction hacheur BUCK (thierry\dessins\h_serie1.drw).....	31
Fig. 34. Formes d'ondes du hacheur BUCK (thierry\dessins\h_serie1.drw)	32
Fig. 35. Courant, tension et puissance dissipée dans les interrupteurs (thierry\dessins\pertes1.drw)	32
Fig. 36. Les transistors dans les convertisseurs de puissance (thierry\dessins\...).	34
Fig. 37. Circuit de commande de grille IR2111 d'International Rectifier (thierry\images\ir2111a.jpg).....	35
Fig. 38. Commande de grille UC3705 d'Unitrode – Texas Instrument (thierry\images\uc3705a.jpg).	35
Fig. 39. Le hacheur de type BUCK à transistor flottant.	36
Fig. 40. Le hacheur de type BUCK à transistors à la masse.....	36
Fig. 41. Le hacheur 2 quadrants réversible en courant.	37
Fig. 42. Synoptique détaillé des projets autour du variateur de vitesse le moteur du kart électrique (http://www.thierry-lequeu.fr/data/DIV407.HTM).	39
Fig. 43. Onduleur triphasé pour moteur asynchrone (kart4a.drw).....	41
Fig. 44. Schéma complet du convertisseur du département GEII de Tours étudié en 2005-2006.....	41

Fig. 45. Variateur réversible en puissance avec un bus DC à super-capacité (kart4b.drw).....	42
Fig. 46. Alimentation multi-sources et régulation du bus DC continu (techniques\dessins.ppt) ICE : Internal Combustion Engine.	43

Liste des tableaux :

Tableau 1. Caractéristiques du moteur d'après Briggs & Stratton (fichier ETEK-275225.pdf).	12
Tableau 2. Caractéristiques du moteur (d'après D. EYMARD [10]).	12
Tableau 3. Caractéristiques techniques du Moteur Etek™, référence : 695001.....	13
Tableau 4. Caractéristiques du moteur PERM PMG 132 sous 24V, 48V et 72V.	14
Tableau 5. Définition des moteurs LYNCH LMC.	16
Tableau 6. Caractéristiques techniques des moteurs LYNCH LMC 200.	16
Tableau 7. Caractéristiques techniques du moteur « AGNI® motors » type 135.	17
Tableau 8. Caractéristiques du moteur « AGNI® motors » type 135 sous 24V, 48V et 60V.....	17
Tableau 9. Vitesse de synchronisme des moteurs triphasés.	19
Tableau 10. Caractéristiques des moteurs PERM PMS 156 « AC- Synchronous Disc Moteur ».	23
Tableau 1. Caractéristiques de la batterie LiFeBATT HPS 7210 [20].	27
Tableau 2. Composants semi-conducteurs de puissance.	33

1 - Introduction

Le kart électrique est un ensemble technique composé de différentes parties qui demandent une certaine attention afin de bien vivre ensemble, à savoir :

- un châssis mécanique avec 4 roues dont - en général - 2 roues avant directrices et 2 roues arrières de propulsion ; un système de freinage et un siège baquet pour le pilote ;
- un moteur électrique de quelques kW (courant continu, asynchrone ou synchrone) ;
- une batterie d'accumulateur, généralement des batteries plombs ou Lithium, de 12V à 72V (voir plus), capable de délivrer plusieurs centaines d'Ampères ;
- un variateur de vitesse pour le moteur électrique qui assure l'adaptation de l'énergie de la batterie aux caractéristiques du moteur en fonction de la pédale d'accélération ;
- un chargeur de batterie généralement connecté sur le secteur EDF ;
- un peu de câblage électrique et un peu d'entourage technique, comme une remorque, une caisse à outils, un compresseur...

2 - Le châssis du kart

2.1 Introduction

Le kart électrique est un petit véhicule mécanique à 4 roues. Le kart électrique en version standard avec 4 batteries plomb pèse entre 150 et 250 kilogrammes, sans le pilote. L'engin peut dépasser les 300 kg avec le pilote et atteindre 60 km/h très rapidement :

c'est un « jouet » très dangereux !

Les premiers paragraphes de cette section concernent les aspects sécuritaires : assurance, protection du pilote et freinage. Viennent ensuite quelques aspects purement mécaniques concernant le châssis.



Fig. 1. Exemple du kart électrique Speed O Max (techniques/images/DSCF0393.JPG).

2.2 L'assurance

La MAIF, qui est partenaire de l'Association e-Kart, propose une assurance pour un véhicule type « Engin de Loisir, kart d'une puissance inférieure à 250 cm³ » pour environ 100 euros par an.

N'hésitez pas à contacter Evelyne GABILLY, de la MAIF de Tours [1], qui se chargera d'expliquer aux agences locales la façon de procéder.

Pour le numéro d'immatriculation, utilisez l'année d'achat du châssis + le numéro de votre équipe + le numéro de kart. Par exemple pour l'IUT GEII de Tours, équipe 37A, année d'achat 2007, kart numéro 3, l'immatriculation devrait être : **2007-37A3**.

CERTIFICAT D'ASSURANCE		CARTE INTERNATIONALE D'ASSURANCE AUTOMOBILE		1. CARTE INTERNATIONALE D'ASSURANCE AUTOMOBILE - INTERNATIONAL MOTOR INSURANCE CARD		ORIGINAL	
DU AU		INTERNATIONAL MOTOR INSURANCE CARD		3. VALABLE (ces deux dates comprises)		4. N° de la carte et n° de la police	
01 01 2007 15 01 2008		(1) Dans chaque pays visité, le Bureau de ce pays assure, pour ce qui a trait à l'utilisation du véhicule décrit ci-contre, la responsabilité qu'aurait un assureur conformément aux lois de ce pays relatives à l'obligation d'assurance.		DU Jour Mois Année		F567	
IDENTIFICATION		(2) Le sousigné, souscripteur du contrat d'assurance, autorise par la présente le Bureau Central Français, ainsi que les Bureaux du ou des pays indiqués ci-contre, auxquels le Bureau Central Français a délégué ses pouvoirs, à recevoir les notifications, à instruire et à régler, pour son compte, toute demande de dommages-intérêts qui met en cause la responsabilité à l'égard des tiers, que les lois sur l'assurance obligatoire du ou des pays indiqués ci-contre lui font une obligation de couvrir par une assurance et qui peut résulter de l'utilisation du véhicule dans ce pays (ou ces pays).		15 01 2008		1663186 D	
3700737C		(3) La couverture d'assurance fournie par les cartes vertes délivrées pour Chypre est limitée aux parties géographiques de Chypre qui sont sous le contrôle du gouvernement de la République de Chypre.		5. N° d'immatriculation, ou à défaut, n° du châssis ou n° du moteur		6. Catégorie et marque du véhicule *	
N° 1663186 D		(4) La couverture d'assurance fournie par les cartes vertes délivrées pour la Communauté Etatique de Serbie-et-Monténégro est limitée aux parties géographiques de la Communauté Etatique de Serbie-et-Monténégro qui sont sous le contrôle du Conseil des Ministres de la Communauté Etatique de Serbie-et-Monténégro.		3700737C		A ENGINLOIS P	
MAIF		(5) Signature du souscripteur du contrat d'assurance		Cette carte n'est pas valable pour les pays dont la case a été rayée			
Détachez de votre carte verte le certificat d'assurance ci-dessus.		(6) Pour les personnes se rendant au Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, ainsi qu'à Chypre seulement : signature de toutes autres personnes qui peuvent utiliser le véhicule.		A B CY CZ D DK E EST F FIN GB GR H I IRL IS L LT LV M N NL P			
Affichez ce certificat : - sur le pare-brise pour les quatre roues, - sur le garde-boue avant pour les deux-roues, dans le support adhésif prévu à cet effet.		(7) Nom et adresse du souscripteur du contrat d'assurance (ou de l'utilisateur du véhicule)		PL S SK SLO CH AL AND BG BIH BY HR IL IR MA MD MK RO SCG TN TR UA			
Remarque : le certificat d'assurance accompagnant les cartes vertes des véhicules non soumis à l'obligation d'affichage est rendu inutilisable par des XXXXXX.		(8) Cette carte a été délivrée par (nom et adresse de la société d'assurance)		37.1			
		(9) Signature de l'assureur		UNIVÈRS. F. RABELAIS			
				IUT			
				29 RUE DU PONT VOLANT			
				37082 TOURS CEDEX 2			
				MAIF Délégation départementale			
				72 avenue Marcel Dassault - BP 537			
				37205 Tours cedex 03			
				Téléphone : 02 47 71 45 00 - Télécopie : 02 47 71 45 01			

Fig. 2. Exemple de carte verte de l'assurance MAIF, pour un kart de l'IUT de Tours (techniques/images/MAIF-2007-37007-37c.jpg).

2.3 La protection du pilote

- Le minimum avant de monter dans un kart est de se munir d'un casque. Intégral et de l'attacher !
- La minerve est largement conseillée pour la protection des cervicales.
- Viennent ensuite les chaussures montantes pour protéger les mollets, la combinaison pour limiter le frottement du pilote lorsqu'il est éjecté sur la piste, les gants, la ceinture de protection pour les côtes...
- Dans le stand, prévoyez également un extincteur : même sans la présence de carburant, en cas de court-circuit avec les batteries, les isolants des câbles électriques peuvent prendre feu. J'en ai eu la confirmation en 2006 : après l'échauffement excessif d'un moteur E-Tek, l'étain du rotor a fondu, entraînant la mise en court-circuit de la batterie et un début d'incendie sur la piste de PKS à Joué Les Tours.
- Remarque : le fusible de 200 A sur la batterie est indispensable...

2.4 Le système de freinage

Lors de l'achat d'un châssis de kart d'occasion, vérifiez le bon état du système de freinage. C'est le point clef du châssis : il faut être capable d'arrêter le véhicule dans toutes les situations d'urgence.

La liaison entre la pédale de frein et les mâchoires de frein, ou le maître cylindre en cas de frein hydraulique, DOIT être doublée (norme imposée par la F.F.S.A.).

Speedomax utilise les 2 câbles de freins pour transmettre l'effort à la mâchoire arrière.

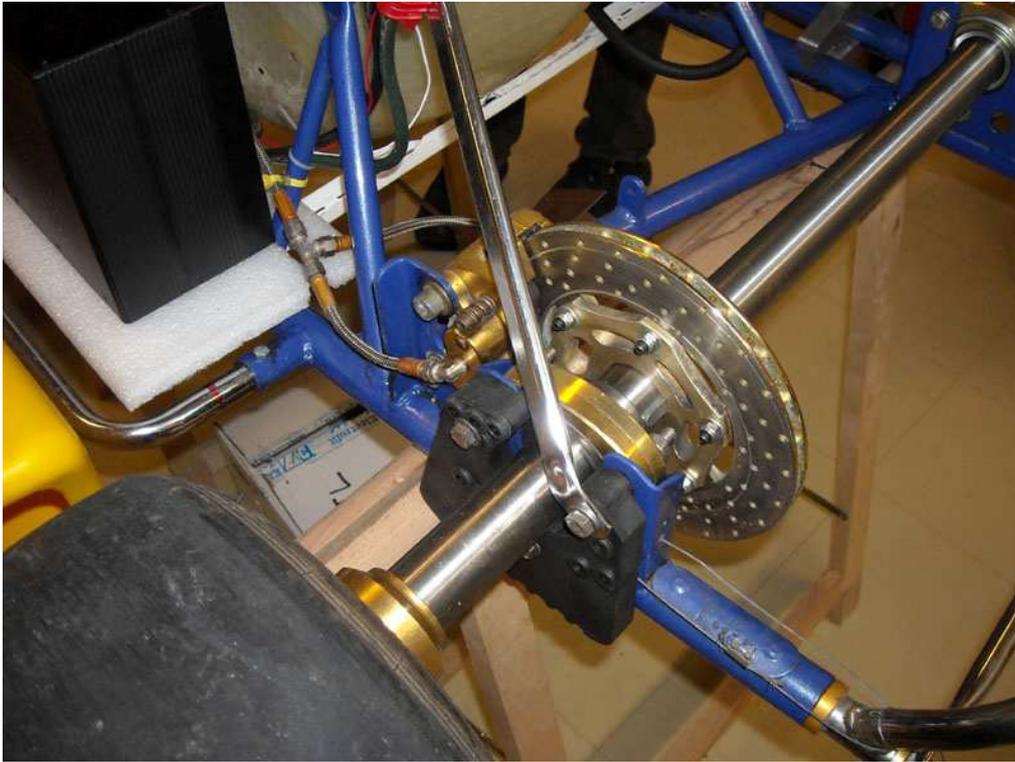


Fig. 3. Exemple de frein hydraulique avec disque double ventilé (techniques/images/DSCN5652.JPG).

Voici quelques fournisseurs de système de freinage (liste non exhaustive), qui proposent de la vente par correspondance :

- Speed O Max, Clermont Ferrand, 63, [3] ;
- Sodikart Itaka, Nantes, 44, [4] ;
- Gokart, La Ville aux Dames, 37, [5] ;
- Alpha Karting, 30, [6] ;
- Mavikarting, Belgique, [7].

Comptez entre quelques centaines d'euros pour un système basique et plus de 800 euros pour un frein hydraulique complet KELGATE.

Sur certains karts de compétition, il existe la possibilité de monter des freins hydrauliques sur les roues avant.

Remarque : le diamètre des disques de frein est environ de 200 mm.

Il est utile de prévoir un sabot de frein en cas d'éclatement de pneu ou de sortie de piste afin d'éviter au disque de toucher le sol.

2.5 La couronne de l'arbre arrière

La transmission entre le moteur et l'arbre arrière peut se faire par courroie HTD, pas de 8 mm, largeur de 30 mm. La courroie est plus silencieuse que la chaîne et demande moins d'entretien. Le réglage de la vitesse se fait en choisissant le couple pignon de sortie moteur et couronne de l'arbre arrière.

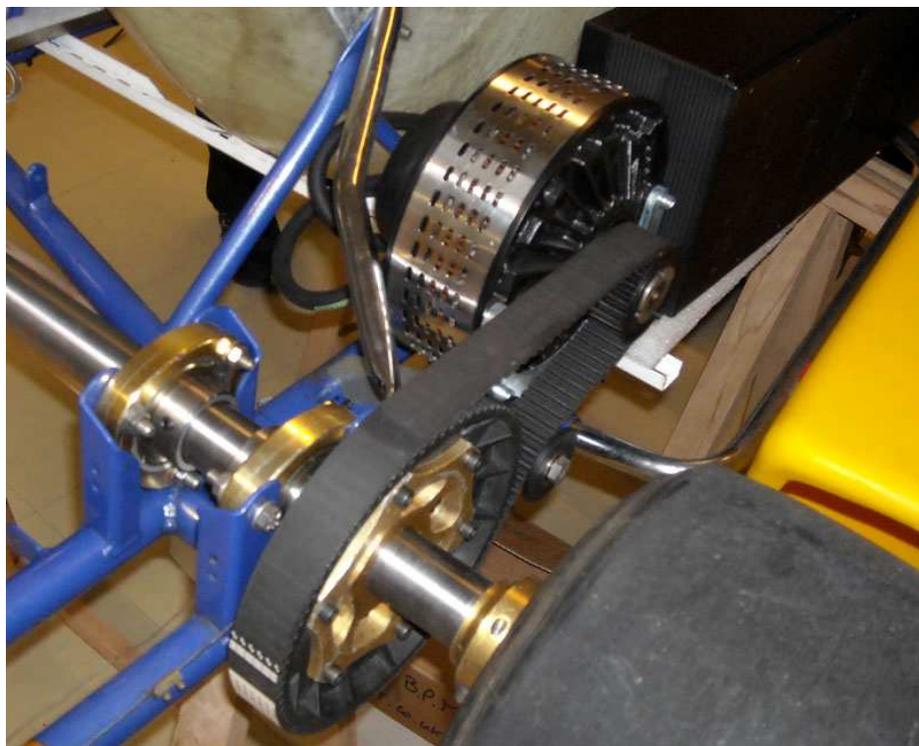


Fig. 4. Transmission par courroie (techniques/images/DSCN5653.JPG).

Les plus grandes couronnes en polyamide (plastique léger) font 80 dents, pour un diamètre de 200 mm. Comme pour le disque de frein, il y a nécessité d'avoir un sabot de protection pour empêcher la couronne de toucher le sol en cas de problème (une couronne polyamide et son support coûte environ 100 euros).

Nmot = 3200 tr/min Rsc = 135 mm			Nmot = 3600 tr/min Rsc = 135 mm			Nmot = 6000 tr/min Rsc = 135 mm		
Pignon	Couronne	V en km/h	Pignon	Couronne	V en km/h	Pignon	Couronne	V en km/h
18	80	36,6	18	80	41,2	18	80	68,7
26	80	52,9	26	80	59,5	26	80	99,2
36	80	73,3	36	80	82,4	36	80	137,4
49	80	99,8	49	80	112,2	49	80	187,0
18	55	53,3	18	55	60,0	18	55	99,9
26	55	77,0	26	55	86,6	26	55	144,4
36	55	106,6	36	55	119,9	36	55	199,9
49	55	145,1	49	55	163,2	49	55	272,1

Fig. 5. Vitesse en fonction du moteur, du pignon et de la couronne (techniques/AN-Calculs.xls).

2.6 Les pneumatiques

Les jantes standards ont un diamètre de 5 pouces (1 pouce = 25,4 mm), soit 127 mm.

Le diamètre des pneus arrière vaut en standard 11 pouces, soit 279,4 mm.

Le diamètre des pneus avant vaut en standard 10 pouces, soit 254 mm.

La largeur de la bande de roulement est variable, 5 et 4 pouces pour des karts mini cadets et 7,1 et 4,5 pouces pour du standard.

Attention : il y a des différences entre la largeur de la jante et la largeur effective de la bande de roulement.



Fig. 6. Pneu arrière et pneu avant (images-maquettes\kart-pneu-avant-12 & arriere-12.jpg).

A l'arrière : VEGA 11 x 5.00 – 5 ; diamètre $D_r = 25,5$ cm ; circonférence 801 mm.

A l'avant : VEGA 10 x 4.00 – 5 ; diamètre $D_r = 24$ cm ; circonférence 754 mm.

Ensuite intervient la qualité du pneu, qui diffère d'un fabricant à l'autre. Les pneus les plus dur sont les DURO, idéal pour de la location, sur piste bitume.

Pour récupérer un peu d'adhérence, il faudra passer en Bridgestone, avec des qualités supérieures, qui donnent plus de grip au détriment de la longévité du pneu.

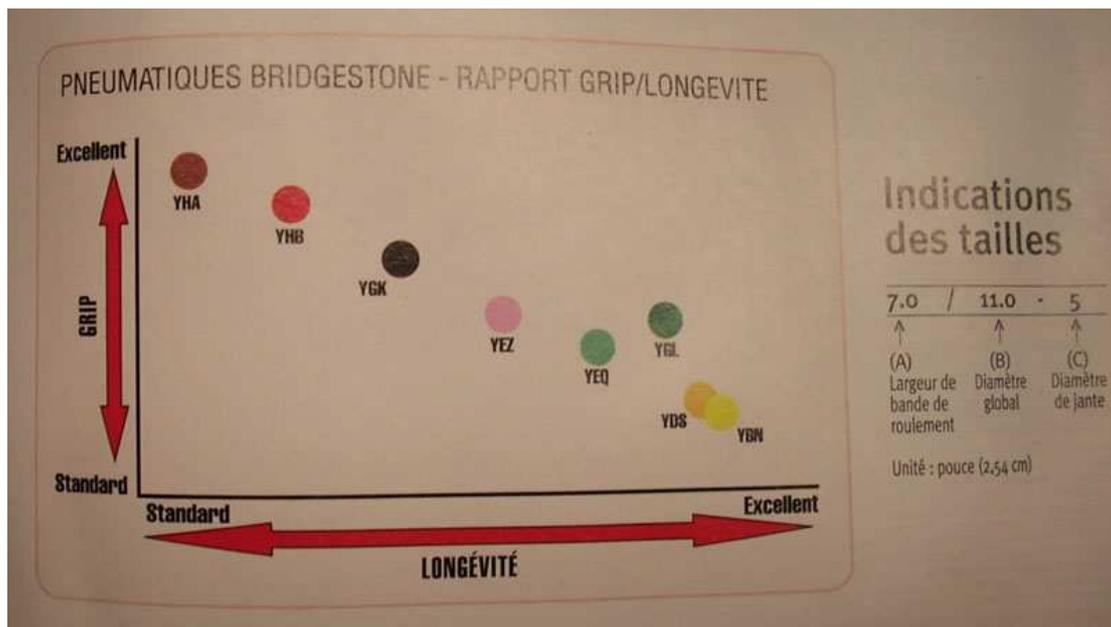


Fig. 7. Qualité des pneus Bridgestone – Rapport Grip/Longévité (techniques/images/DSCN1903.JPG)

2.7 La dynamique du kart

On constate qu'un kart, sans pilote, posé à plat, ne tourne pas, bien que le volant soit braqué. On remarque alors qu'une roue avant se lève et le train arrière, lié par l'arbre, oblige le kart à aller tout droit.

Il existe donc 2 solutions pour prendre un virage :

- 1) le dérapage, qui implique une perte de vitesse ;
- 2) la déformation du châssis : en plaquant les roues avant au sol et en levant la roue arrière intérieure au virage, le kart se retrouve sur trois roues et peut tourner.



Fig. 8. Comportement dynamique de l'arbre arrière, source Kartmag N°104, page 29 (techniques/images/Kartmag104-p29.jpg).

Ce comportement est plus difficile à obtenir avec un kart électrique, beaucoup plus lourd, surtout avec un kart de location, dont le châssis plus rigide est conçu pour résister aux chocs.

La répartition des masses et de celle du pilote pendant la course influent largement sur la tenue de route en virage.

Il est néanmoins possible « d'aider » le kart par transfert de masse sur les roues à l'avant et sur la roue extérieure par déplacement du corps du pilote dans le baquet : attention aux côtes !

3 - La motorisation électrique

3.1 Introduction

Les performances du moteur électrique sont bien mises en valeur ici avec un petit véhicule « relativement léger » où l'autonomie n'est pas le souci majeur. La sensation de puissance est obtenue par le couple moteur que l'on peut imprimer au kart. Avec le moteur électrique, le couple maximal est « pratiquement » disponible tout le temps, depuis l'arrêt jusqu'à pratiquement la vitesse nominale, sauf dans le cas des moteurs à réduction de flux. C'est d'ailleurs ce moteur série qui a été utilisé en premier dans la traction, par exemple dans le cas du TGV Sud-Est [8] (figure 9). Il dispose d'un fort couple au démarrage, et par réduction du flux (défluxage), en travaillant à puissance constante, on augmente la vitesse (en réduisant le couple moteur disponible).

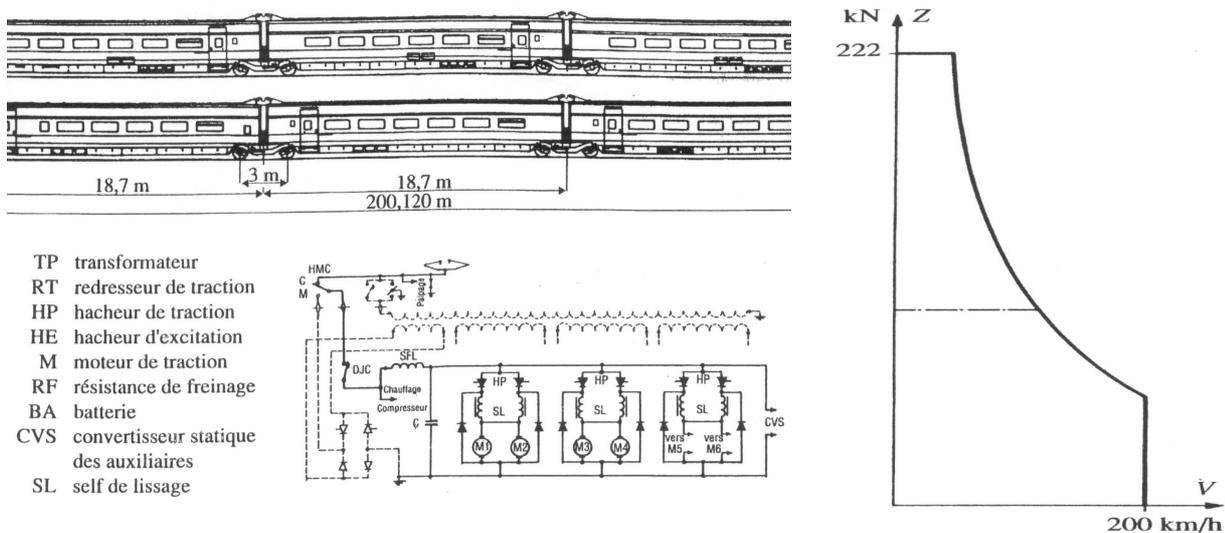


Fig. 9. Motorisation du TGV Sud Est, 12 moteurs courant continu à excitation série [8].

Le premier kart du département GEII de l'IUT de Tours était en 24V, avec un moteur E-Tek. Il a démarré avec un variateur étudiant 50A, soit environ 1200 W [9]. La vitesse de pointe était de 22 km/h avec un couple à la roue de 23 Nm, juste suffisant pour vaincre les frottements.

Passé le premier kW qui sert à vaincre les frottements « sec », toute la puissance supplémentaire est utilisée pour avoir plus de couple et plus de vitesse (les frottements augmentant avec la vitesse).

Un moteur électrique de quelques kW est « agréable ». Arrivé à 10 kW, il y a vraiment moyen de se faire plaisir. Les 15-20 kW sont réservés aux « bons » pilotes. A partir de 28 kW (moteur DC 72V 400A), il faut commencer à savoir piloter, alors avec 2 moteurs de 28 kW, il vaut mieux prendre une bonne assurance... mais le plaisir est au rendez-vous !

Les sections suivantes présentent différents types de moteur :

- 1) Les moteurs à courant continu à balai ou « DC Brush Motors » : faible coût, très compact très performant mais avec de l'entretien (changement des balais) et une tendance à « fondre » en cas de suralimentation ;
- 2) Les moteurs asynchrones basses tensions ou « Brushless (Asynchronous) Motors » : plus lourds, plus chers, mais étanches, sans entretien, surveillés en température, idéal pour la location (utilisation intensive) ;
- 3) Les moteurs synchrones basses tensions ou « AC Brushless (Synchronous) Motors » : en théorie les plus performants (sous 400V), en court de test en basse tension ;

3.2 Les moteurs à courant continu

3.2.1 Principales relations sur le moteur à courant continu

Le moteur est équivalent à une charge électrique de type (R–L–E), avec R–L la résistance et l'inductance d'induit, et E la Force ElectroMotrice (fem) du moteur. Les principales relations entre grandeurs mécaniques et électriques sont les suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} E = k \cdot \phi \cdot \Omega = K \cdot \Omega = K \cdot \frac{\pi \cdot N}{30} \\ \Gamma_M = k \cdot \phi \cdot I = K \cdot I \\ J_{eq} \frac{d\Omega}{dt} = \Gamma_M - \Gamma_{résistant} \end{array} \right. \quad (1)$$

avec :

- E la fem en Volt ;
- Ω la vitesse de rotation en rd/s ;
- N la vitesse de rotation en tr/min ;
- Γ_M le couple moteur en Nm ;
- I le courant d'induit en A ;
- Φ le flux magnétique dans le moteur ;
- K la constante du moteur en V/rd/s ou en Nm/A ;
- J_{eq} l'inertie équivalente du système ramenée sur l'arbre du moteur ;
- $\Gamma_{résistant}$ le couple résistant en Nm ;

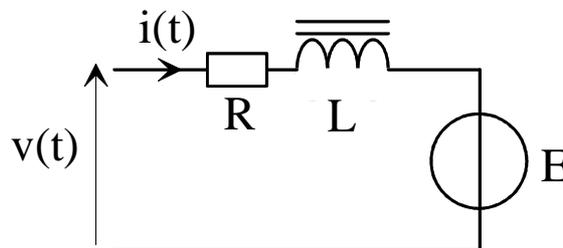


Fig. 10. Le schéma équivalent du moteur électrique (thierry\dessins\rle1.drw).

3.2.2 Calcul des caractéristiques

La puissance absorbée est donnée par :

$$P_{abs} = V \times I \text{ en W (Watts) avec V en V (Volts) et I en A (Ampères)} \quad (2)$$

La vitesse angulaire est donnée par :

$$\Omega = \frac{N \times 2\pi}{60} \text{ en rd/s (radian par seconde), avec N en Tr/mn (Tours / Minutes)} \quad (3)$$

A partir de la relation donnant la puissance $P_u = \Gamma_u \times \Omega$, le couple utile est donné par :

$$\Gamma_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{60 \times P_u}{N \times 2\pi} \text{ en Nm (Newton mètre) si } P_u \text{ en Watts et N en tr/mn} \quad (4)$$

3.3 Concernant les moteurs E-Tek

3.3.1 Informations du site <http://www.briggsandstratton.com/> de mai 2003



Fig. 11. Moteur E-tec Briggs & Stratton (<http://www.briggsandstratton.com/>).

Le moteur dispose d'une carcasse fermée avec des ailettes de refroidissement.

D'après le site web de l'époque, la puissance maximale est de 12 HP (8832 W, 48 V, 180 A), et de 2.7 HP en continu (1987 W, 48 V, 41 A).

Tableau 1. Caractéristiques du moteur d'après Briggs & Stratton (fichier ETEK-275225.pdf).

Tension maximale	48 V	Constante de vitesse	72 tr/min/V
Courant à vide	6 A	Vitesse sous 48V	3456 tr/min
Puissance maximale	15 HP (11 kW)	Constante de couple	0,13 Nm/A
Puissance en continu	6 HP (4,4 kW)	Couple à 330 A	42,9 Nm
Courant maximal	330 A pendant 1 min	Poids	21 Lbs (9,52 kg)

3.3.2 Caractéristiques d'après l'article D. EYMARD [10]

Le moteur électrique E-tec de Briggs & Stratton est d'une puissance de 5 kW. Il est alimenté en 50V, avec un courant de démarrage de 500A pendant une minute [10].

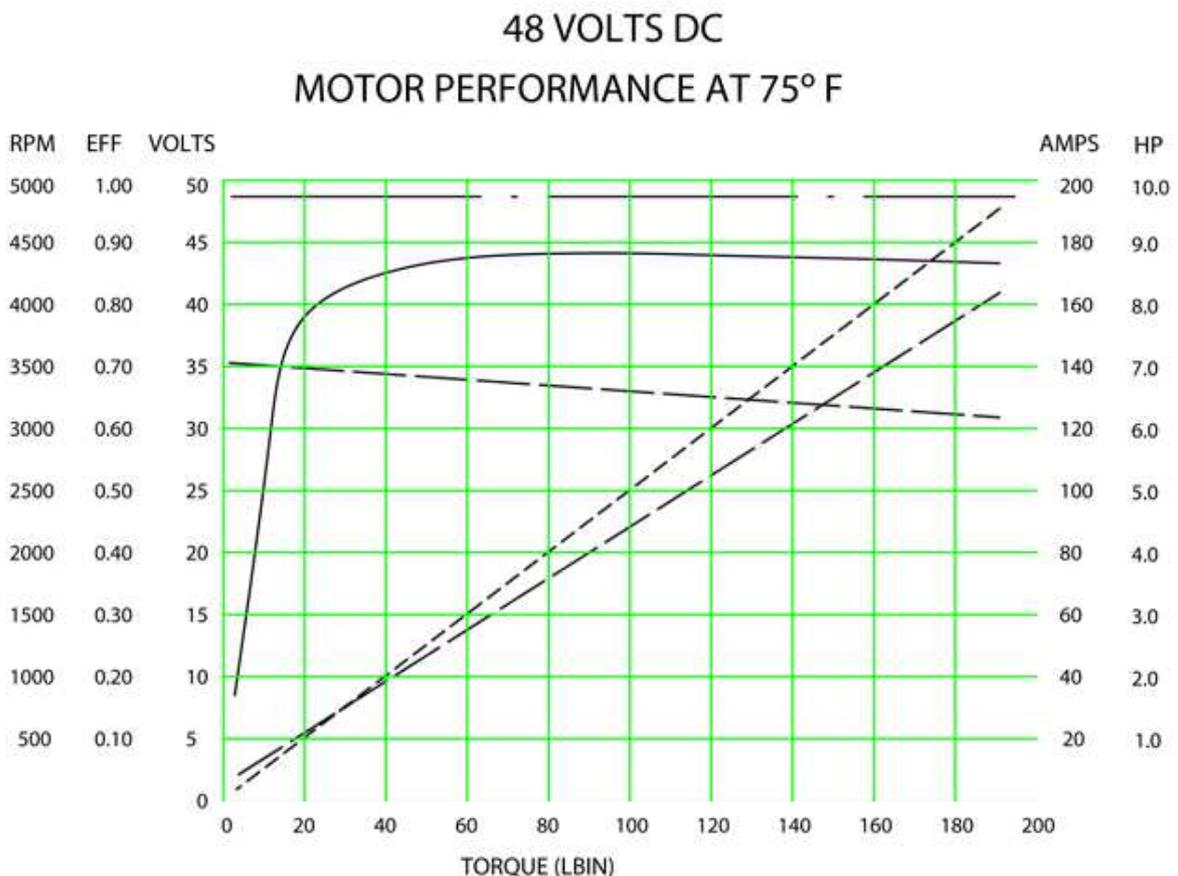
Tableau 2. Caractéristiques du moteur (d'après D. EYMARD [10]).

Tension nominale	50 V	Vitesse	5000 tr/min
Courant nominal	100 A	Rendement	> 88%
Puissance nominale	5 kW	Couple nominal	8,4 Nm
Puissance utile	6 ch	Couple maximum	42 Nm
Courant maximal	500 A pendant 1 min	Poids	10 kg

3.3.3 Caractéristiques d'après Briggs & Stratton

Tableau 3. Caractéristiques techniques du Moteur Etek™, référence : 695001

Alimentation : 48 Volts	Tension constante : 72 Tr/min par volt
Courant maxi à vide : 6 Amp	Couple constant : 0,13 Nm/Amp
Vitesse maxi à vide : 3600 Tr/min	Courant maxi : 330 A pendant 2'
Vitesse mini à vide : 3300 Tr/min	Poids moteur : 9,5 Kg
Vitesse mini à 18 Nm : 3200 Tr/min	Puissance moteur
Courant continu max à 18 Nm : 140 Amp	Continue : 8 CV (5900 W)
Puissance maxi continue : 8,1 CV (6 kW)	Maximum : 15 CH (11 kW)



VOLTAGE CONSTANT: 72 RPM PER VOLT
 TORQUE CONSTANT: 1.14 LB-IN/AMP (0.13 NM/AMP)
 MAXIMUM MOTOR CURRENT: 330 AMPS FOR 1 MINUTES
 MOTOR WEIGHT: 21 LB
 MOTOR OUTPUT: 15 HP MAXIMUM, 8 HP CONTINUOUS

VOLTS ———
 HP ———
 EFF ———
 AMPS - - - -
 RPM - · - · -

BRUSH LIFE:
 65 AMPS CONTINUOUS - 3000 HOURS
 100 AMPS CONTINUOUS - 2000 HOURS
 150 AMPS CONTINUOUS - 500 HOURS

Fig. 12. Performances du moteur électrique E-tek sous 48V (Etek-Specs.htm from <http://www.electricmotorsport.com/>).

3.4 Concernant les moteurs PERM PMG

3.4.1 Caractéristiques du moteur PERM PMG 132

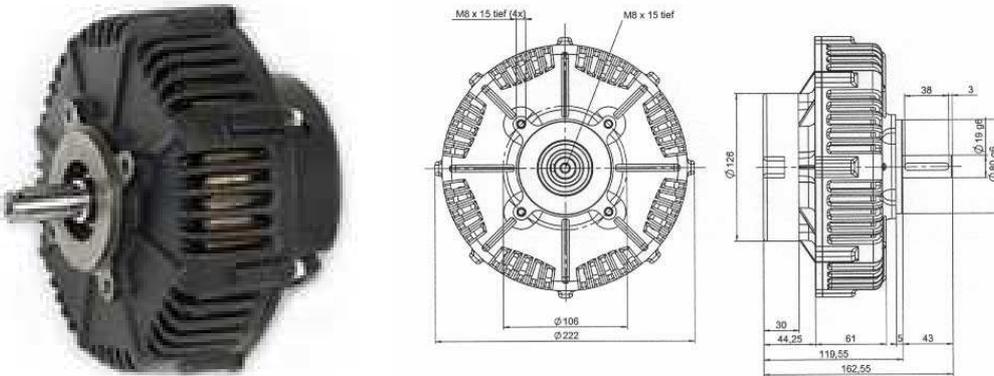


Fig. 3.1. Moteur PERM PMG 080 et PMG 132 (<http://www.perm-motor.de>).

Les figures 13 et 14 donnent les caractéristiques du moteur PERM 132 pour une tension d'alimentation de 48V et 72V.

Tableau 4. Caractéristiques du moteur PERM PMG 132 sous 24V, 48V et 72V.

		PMG 132 sous 24V	PMG 132 sous 48V	PMG 132 sous 72V
Vitesse maximale à vide	en tr/min	1 672	2 300	3 577
Constante de vitesse	en tr/min/V	69	48	49
Rendement max	en %	90%	92%	94%
Courant maximum	en A	200	200	200
Couple maximal	en Nm	40	40	40
Constante de couple	en Nm/A	0,2	0,2	0,2
Puissance mécanique	en W	6 144	8 500	13 222

Si on considère que le rotor du moteur est un disque plein d'acier, de diamètre $D = 190$ mm et d'épaisseur $L = 30$ mm, l'inertie calculée vaut :

$$J = \frac{1}{2} \cdot M \cdot R^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot R^2 = 0,0268 \text{ kg m}^2 \text{ (pour } 0,025 \text{ kg m}^2) \quad (5)$$

avec $\rho = 7000 \text{ kg/m}^3$ la densité de l'acier et $V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \times L$ le volume du rotor.

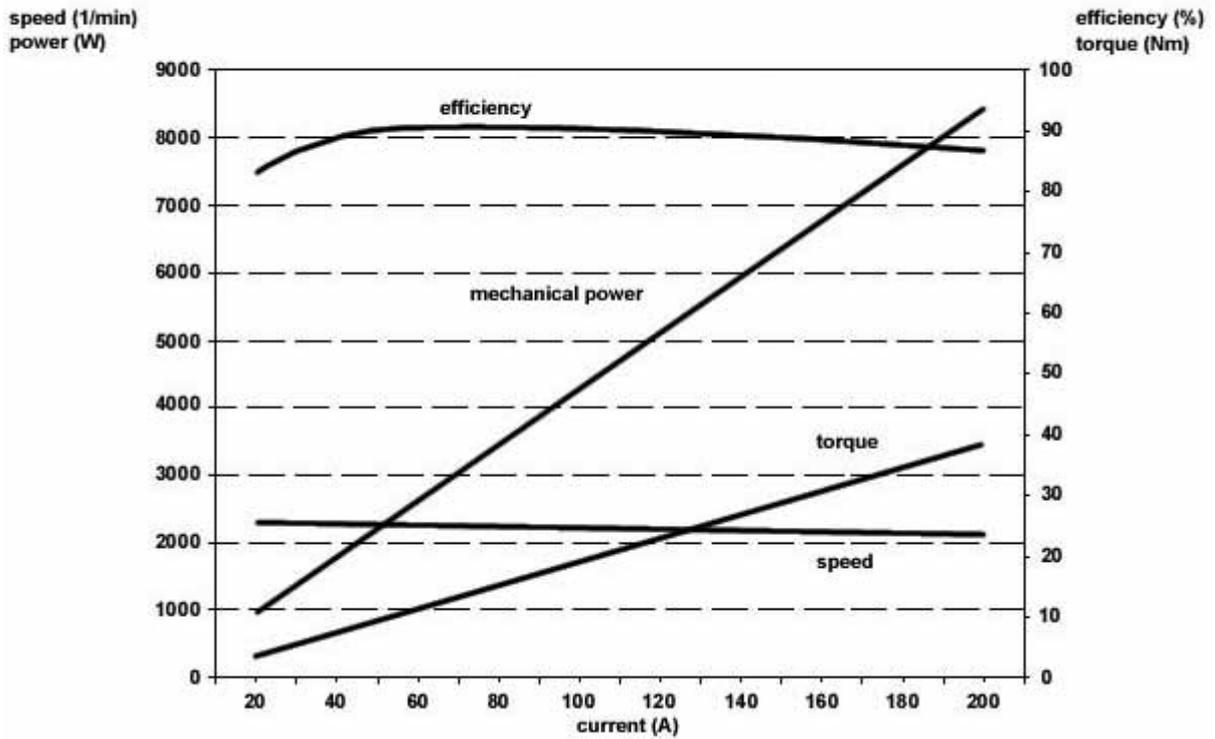


Fig. 13. Caractéristiques du moteur PERM PMG 132 sous 48V (<http://www.perm-motor.de>).

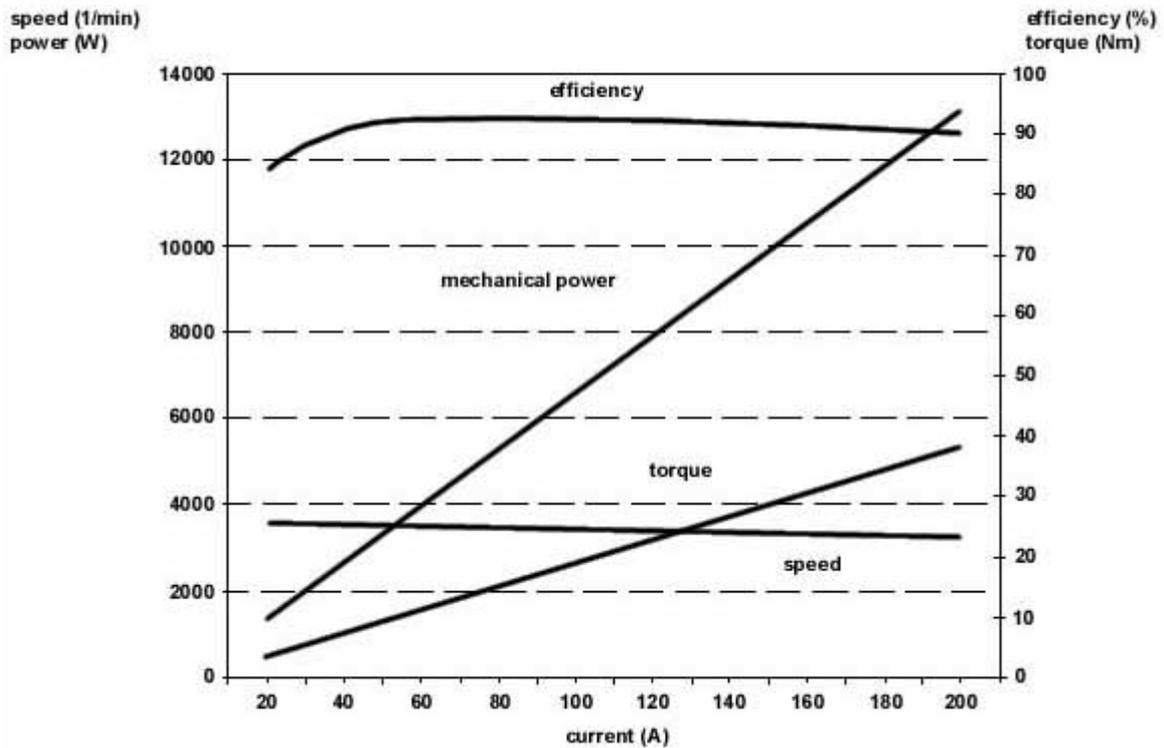


Fig. 14. Caractéristiques du moteur PERM PMG 132 sous 72V (<http://www.perm-motor.de>).

3.5 Concernant les moteurs LYNCH LMC 200

3.5.1 Généralités

Les moteurs basés sur le brevet de Cédric LYNCH sont des moteurs à courant continu, basse tension, fort courant, à aimants permanents, à rotor plat. Ils sont distribués par la société Lynch Motor Company <http://www.lmcltd.net/> (en 2008).

Les moteurs LYNCH LMC existent en version 130, 170 et 200, correspondant à des diamètres de 132 mm, 175 mm et 200 mm.

Le nombre de barres de cuivre au rotor est variable, ainsi que la qualité des aimants.

Tableau 5. Définition des moteurs LYNCH LMC.

	LMC 130	LMC 170	LMC 200
Aimants simples	LMC 130-95	LMC 170-126 LMC 170-127	LMC 200-126 LMC 200-127
Aimants doubles		LMC 170-D126 LMC 170-D127	LMC 200-D126 LMC 200-D127 LMC 200-D135
Poids	3,0 kg	8,5 kg	11 kg
Couple	6 Nm @ 100A	22 Nm @ 200A	35 Nm @ 200A
Vitesse	5300 tr/min	3700 tr/min	3900 tr/min
Puissance	2 500 W	7 000 W	11 000 W
Inertie du rotor	0,025 kg m ²	0,025 kg m ²	0,025 kg m ²

3.5.2 Caractéristiques des moteurs LMC 200

Tableau 6. Caractéristiques techniques des moteurs LYNCH LMC 200.

Type	No load current	Torque Constant	Speed Constant	Armature Resistance @ 15 kHz	Armature Inductance @ 15 kHz	Armature Inertia
	Amp.	Nm / A	Rpm / V	mΩ	uH	Kgm ²
LMC 200-126	10	0,0737	105	175	6	0,0234
LMC 200-127	5	0,15	54	800	23	0,0236
LMC 200-D126	5	0,0748	100	138	5	0,0234
LMC 200-D127	4	0,17	50	697	13	0,0236
LMC 200-D135	3,5	0,185	45	650	16	???

Type	Peak Power	Peak Efficiency	Peak Current	Rated Power	Rated Speed	Rated Voltage	Rated Current	Rated Torque
	Watt	%	A	Watt	Rpm	V	A	Nm
LMC 200-126	7 590	83	400	6 220	2 520	24	330	23,6
LMC 200-127	16 080	88	400	8 500	2 592	48	200	28,5
LMC 200-D126	11 140	81	400	7 470	3 600	36	270	19,8
LMC 200-D127	15 770	90	250	12 560	3 600	72	200	33,3
LMC 200-D135	18 050	90	250	14 390	3 780	84	200	36,4

3.6 Concernant les moteurs « AGNI® motors »

3.6.1 Généralités

C'est un moteur à courant continu, basse tension, fort courant, à aimants permanents, à rotor plat, développé par Cédric LYNCH, pour des applications particulières, nécessitant beaucoup de puissance massique <http://www.agnimotors.com> (en 2008).



Fig. 15. Le moteur « AGNI® motors » (<http://www.agnimotors.com>).

3.6.2 Caractéristiques du moteur « AGNI® motors » type 135

Tableau 7. Caractéristiques techniques du moteur « AGNI® motors » type 135.

Poids	11 kg	Tension max	60V	Couple	35 Nm
Diamètre		Vitesse max	3000 tr/min	Constante de couple	0,175 Nm/A
Rendement	93%	Constante de vitesse	50 tr/min/V	Courant maximum	160A @ 60V
Puissance	9 kW			Courant maximum	80A @ 12V

Les figures 16 et 17 donnent les caractéristiques du moteur « AGNI® motors » pour une tension d'alimentation de 24V, 48V et 60V.

Tableau 8. Caractéristiques du moteur « AGNI® motors » type 135 sous 24V, 48V et 60V.

		sous 24V	sous 48V	sous 60V
Vitesse maximale à vide	en tr/min	1283	2261	3253
Rendement max	en %	90%	92%	93%
Courant maximum	en A	200	200	200
Couple maximal	en Nm	35	35	35
Puissance mécanique	en W	3 600	8 328	10 746

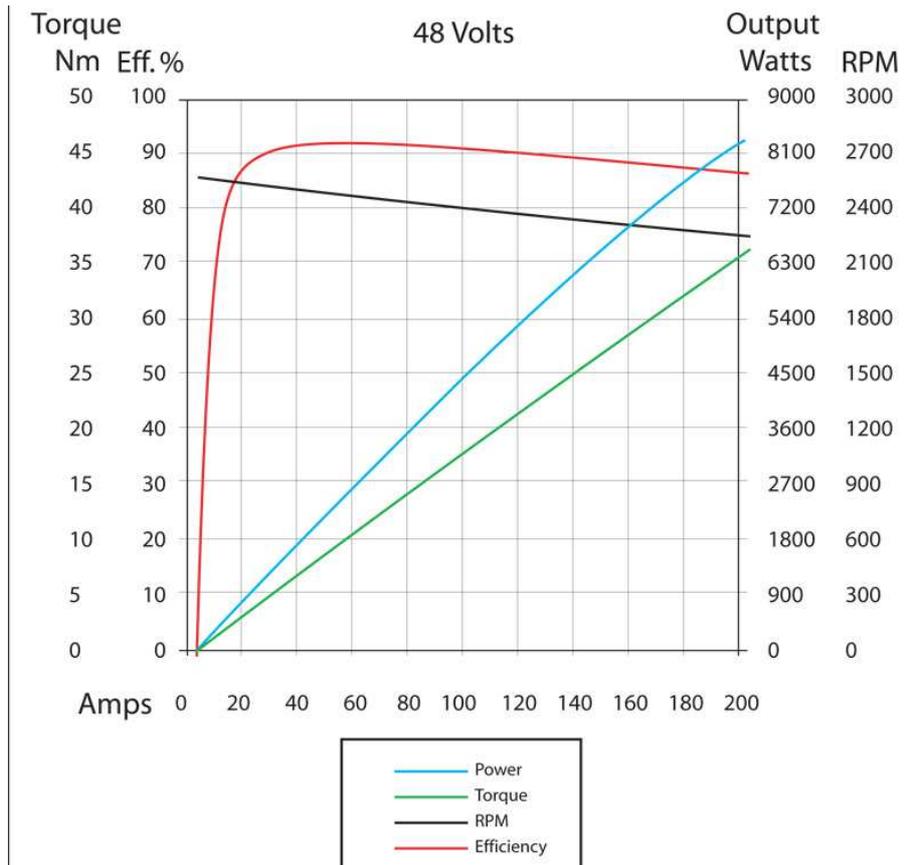


Fig. 16. Caractéristiques du moteur « AGNI® motors » type 135 sous 48V.

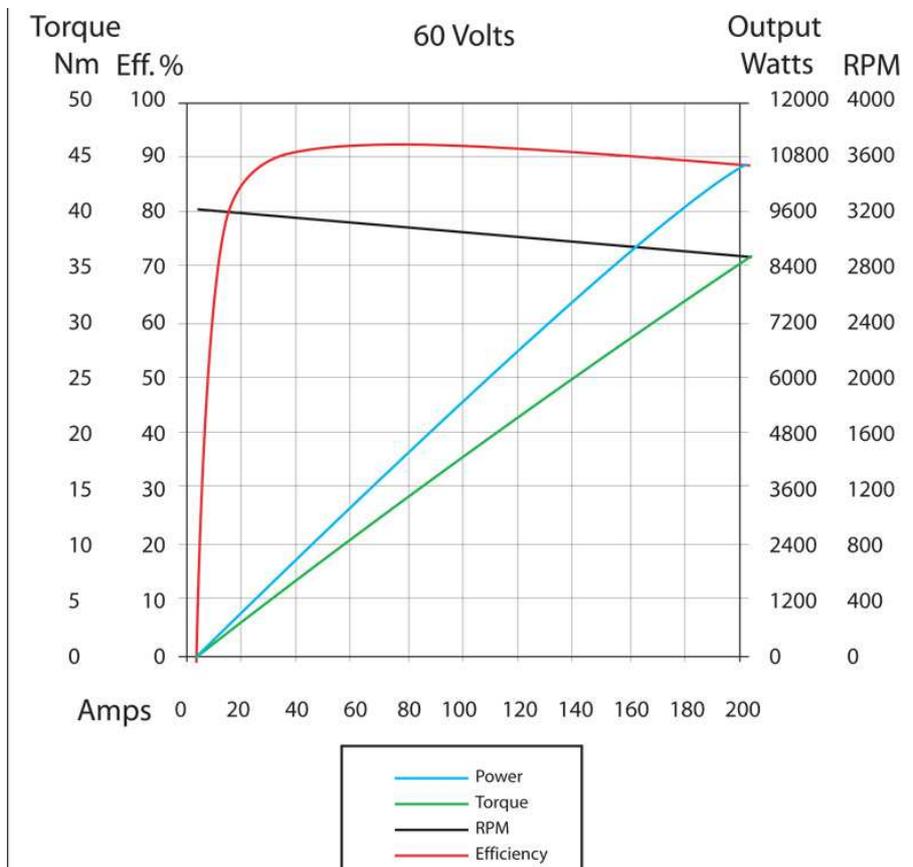


Fig. 17. Caractéristiques du moteur « AGNI® motors » type 135 sous 60V.

3.7 Les moteurs asynchrones basses tensions

3.7.1 Présentation

On arrive ici dans la section des moteurs triphasés, bien connu dans les applications industrielles sous 400V avec ou sans variateur (démarrage direct, étoile triangle...).

Un bobinage triphasé, au stator, crée un champ tournant à une vitesse proportionnelle à la fréquence des courants statoriques F_s et aux nombres de paire de pôles du bobinage p . La vitesse du champ tournant, ou vitesse de synchronisme N_s est donnée par la relation :

$$N_s = \frac{F_s}{p} \times 60 \text{ en tr/min, avec } F_s \text{ en Hertz et } p \text{ le nombre de paire de pôles} \quad (6)$$

Tableau 9. Vitesse de synchronisme des moteurs triphasés.

p = 1		p = 2	
Fs	Ns	Fs	Ns
50 Hz	3 000 tr/min	50 Hz	1 500 tr/min
60 Hz	3 600 tr/min	60 Hz	1 800 tr/min
150 Hz	9 000 tr/min	150 Hz	4 500 tr/min
400 Hz	24 000 tr/min	400 Hz	12 000 tr/min

Le rotor est constitué de fer et de matériaux conducteurs, siège de courants induits qui entraînent le mouvement de rotation. Pas de courant induit, pas de couple : il faut donc un certain glissement g entre le champ statorique et le rotor pour assurer le fonctionnement du moteur asynchrone :

$$N_r = N_s \times (1 - g) = \frac{F_s}{p} \times 60 \times (1 - g) \text{ en tr/min, avec } N_s \text{ en tr/min} \quad (7)$$

Les pertes rotoriques sont directement proportionnelles au glissement, donc le rendement du moteur sera fortement dépendant du glissement, qui est de l'ordre de 2 à 8%.

La variation de vitesse se fera à l'aide d'un onduleur triphasé à fréquence variable (N_s variable) et à tension efficace variable (V_1, V_2, V_3), afin de garantir un flux constant dans le circuit magnétique du stator. En effet, le flux est proportionnel au rapport entre la tension aux bornes de l'inductance magnétisante V'_1 et la fréquence des courants statoriques :

$$\Phi_s = L \times I_m = \frac{V'_1}{2\pi \times F_s} \text{ en Weber, avec } V \text{ en Volts et } F_s \text{ en Hertz} \quad (8)$$

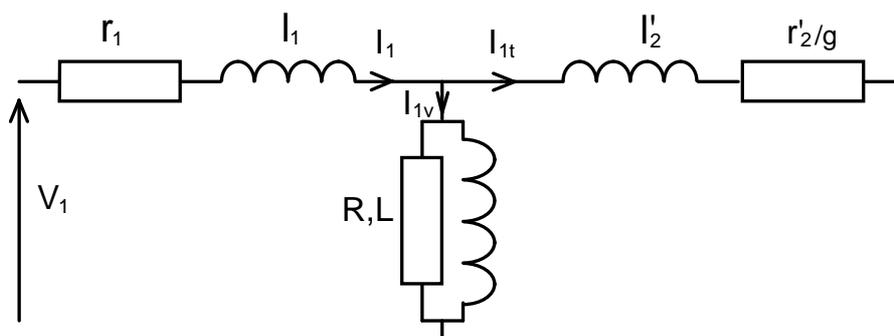


Fig. 18. Schéma équivalent par phase du moteur asynchrone.

3.7.2 Le moteur asynchrone Speed O Max

Le moteur triphasé utilisé sur les karts électriques est un moteur asynchrone spécifique, développé et distribué par la société Speed O Max [3] (Figure 19). Ces caractéristiques sont les suivantes :

- Tension nominale entre phase : 28 V.
- Courant nominal : 150 A.
- Cos phi : 0,85.
- Fréquence nominale : 150 Hz.
- Vitesse de rotation : 4350 tr/min (glissement $g = 3,33\%$).
- Puissance utile : 4600 W.
- Puissance absorbé
 $P_a = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos(\Phi) = 6183 \text{ W}$.
- Rendement $\eta = 74\%$.



Fig. 19. Le moteur asynchrone Speed o Max.

Le moteur peut être « poussé » à une puissance de 10 kW, soit des courants de phase d'environ 240 A. Il est équipé d'un capteur de vitesse et de position, par l'intermédiaire d'un codeur QEP 32 pas ou 48 pas intégré dans un roulement à bille. Les impulsions permettent de retrouver la vitesse du rotor et de connaître sa position. Il dispose également d'une sonde de température intégrée dans le bobinage statorique.

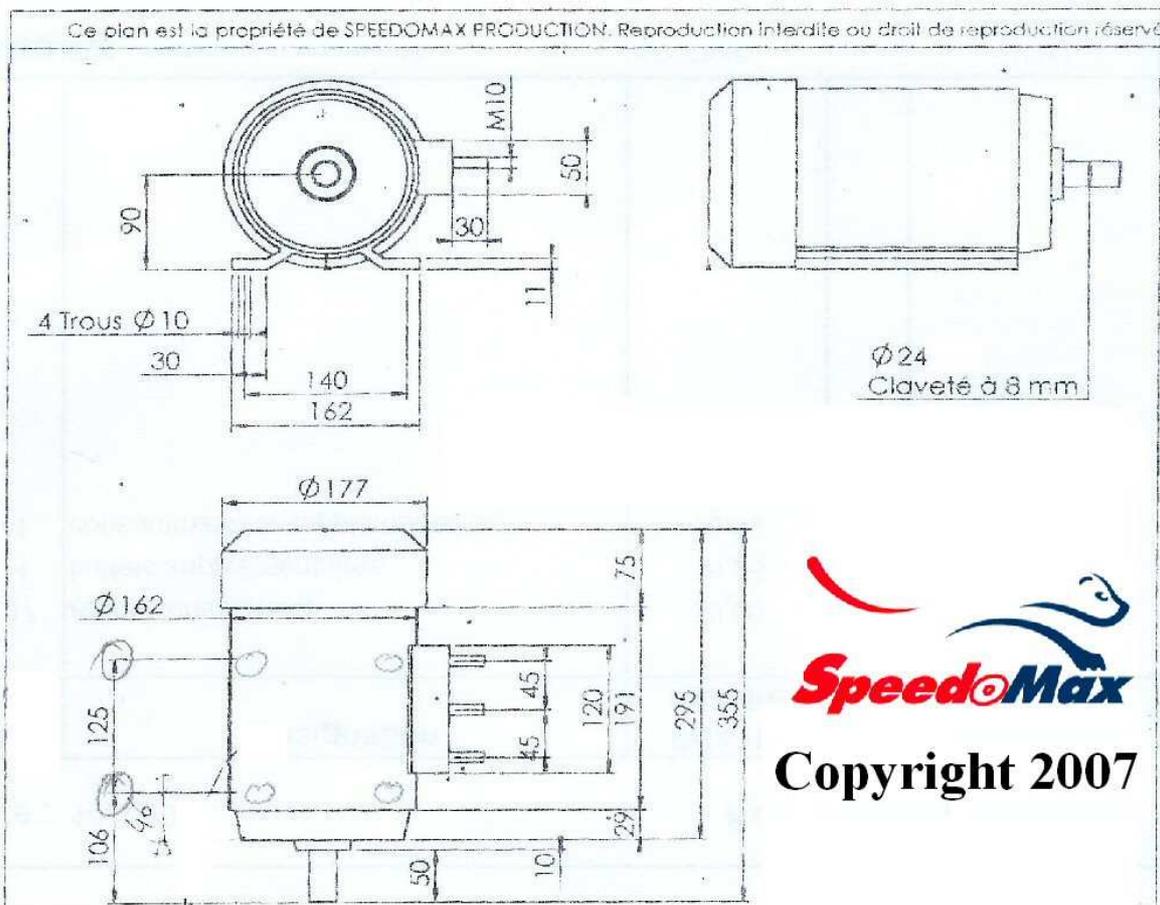


Fig. 20. Dimensions du moteur asynchrone Speed o Max (<http://www.speedomax.fr/>).

3.8 Les moteurs synchrones basses tensions

3.8.1 Présentation

Le moteur synchrone est également une machine triphasée bien connue : les Giga Watt qu'Electricité de France (EDF) produit chaque seconde et qui nous alimente en énergie, proviennent de générateurs synchrones triphasés.

Comme pour le moteur asynchrone, il faut un bobinage statorique triphasé. La différence réside dans la réalisation du rotor : il y a un aimant permanent tournant. Pour les « grosses » machines synchrones, on trouve un électro-aimant qu'il faut alimenter depuis le stator avec des systèmes de bagues collectrices de courant et de balais.

Le couple du rotor est le résultat du produit vectoriel du champ tournant statorique et du champ rotorique.

$$\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B} \Rightarrow \|\vec{\Gamma}\| = \Gamma = \|\vec{M}\| \times \|\vec{B}\| \times \sin(\vec{M}, \vec{B}) = M \cdot B \cdot \sin(\alpha) \quad (9)$$

- Γ : couple électromagnétique en Nm ;
- M : moment magnétique du rotor ;
- B : champ magnétique du stator ;
- α : angle interne de la machine.

La vitesse mécanique est rigoureusement égale à la vitesse de synchronisme, tant que la machine n'a pas « décroché » : $N_r = N_s$. Pour un fonctionnement correct, il faut simplement veiller à ce que l'angle interne reste inférieur à 90° , ce qui oblige à connaître à tout moment la position du rotor. Il faut donc un capteur de position sur le rotor.

Les moteurs synchrones sont plus chers que leurs homologues asynchrones, car les aimants du rotor sont constitués d'aimants en terre rare, chers et délicats à fixer au rotor.

Par contre, le rendement du moteur est meilleur et la puissance massique plus importante.

3.8.2 Le moteur E-Tek Brushless

Le moteur E-Tek Brushless se présente comme le moteur E-Tek DC, avec une carcasse plus longue. 3 câbles de puissance sont nécessaires pour le relier à l'onduleur triphasé, ici un SEVCON Millipack PMAC.

Un connecteur auxiliaire donne les informations concernant le capteur de position et la sonde de température.



Fig. 21. Kit de développement du moteur Brushless [11] (<http://www.electricmotorsport.com/>).



Fig. 22. Vue arrière du moteur Brushless (crédit photo Thierry LEQUEU).

3.8.3 Les moteurs synchrones PERM

Le fabricant allemand PERM <http://www.perm-motor.de> propose une large gamme de moteur basse tension, étanche IP 54, avec refroidissement à air ou liquide [12].

Le rendement global du moteur est entre 91% et 95%.

Tableau 10. Caractéristiques des moteurs PERM PMS 156 « AC- Synchronous Disc Moteur ».

PMS 156 - Air cooled					PMS 156 W - Water cooled			
Vitesse	Couple	Puissance	Tension	Courant	Couple	Puissance	Tension	Courant
1500 tr/min	41,67 Nm	6,54 kW			62,50 Nm	9,82 kW		
3000 tr/min	40,01 Nm	12,57 kW			60,02 Nm	18,85 kW		
4 500 tr/min	37,54 Nm	17,69 kW			56,32 Nm	26,54 kW		
6000 tr/min	33,85 Nm	21,27 kW			50,78 Nm	31,90 kW		



Fig. 23. Moteur disque PERM (<http://www.perm-motor.de/>).

3.9 Synthèse concernant les moteurs

Voici quelques remarques concernant l'utilisation des moteurs précédemment présentés :

- 1) Le moteur à courant continu avec balais est un moteur économique. C'est la solution retenue lorsqu'une école veut développer le variateur. Le prochain chapitre expose des solutions pour la réalisation de hacheur continu-continu (DC-DC) accessible à des projets étudiants niveaux BAC, BAC+2 et BAC +5. De par ses faibles dimensions, il s'intègre bien en lieu et place du moteur à essence sur un châssis de kart thermique « classique ».
- 2) Le moteur à courant continu avec balais de type LYNCH ou AGNI est intéressant pour la compétition. C'est un moteur performant, léger et compact. Associé à un variateur robuste un quadrant (uniquement une marche avant et la roue libre) de type ALLTRAX, la simplicité, le rendement et la performance de la chaîne de traction sont au rendez-vous.
- 3) Pour des utilisations intensives telles que le kart de location, le moteur asynchrone est la solution économique actuelle. Le moteur est robuste, étanche et ne nécessite pas d'entretien. Il est protégé contre les échauffements excessifs. Plus lourd et plus encombrant, il nécessite de revoir le châssis du kart afin d'intégrer correctement la motorisation. Mais c'est l'occasion de recentrer les masses, par une disposition judicieuse des batteries par rapport au pilote. La dégradation du rendement moteur est compensée par une gestion correcte de la charge des batteries, qui, dans les applications de location, reste le point faible de cette solution : prendre soin des batteries, c'est retarder l'investissement pour les changer ! (4 x 200 euros pour une durée moyenne de 1 à 3 ans).
- 4) Le moteur synchrone, bien que plus prometteur en termes de performance, manque de développement dans les applications basse tension. Un plus fort volume de vente devrait faire baisser les coûts d'un moteur plus cher à la baisse. Le couple moteur synchrone + batterie Lithium devrait permettre à terme la réalisation de karts électriques faible consommation, donc grande autonomie, plus légers (< 150 kg hors pilote), donc plus sécuritaires. Ces solutions sont en cours d'étude, de développement et de test.

4 - Des batteries pour le kart électrique

4.1 Présentation

La source d'énergie du kart électrique est la batterie d'accumulateur : l'énergie prélevée sur le réseau électrique est stockée dans la batterie via un chargeur. L'autonomie du véhicule est directement liée à la capacité de la batterie. On s'intéresse ici à quelques technologies de batteries utilisées en traction électrique telle que :

- les batteries au plomb, les plus économiques, les plus lourdes ;
- les batteries Ni-Mh sans effet mémoire, préférable aux batteries Ni-Cd ;
- les batteries Lithium, les plus performantes et les plus chers ;
- les super-capacités pour le stockage transitoires (quelques secondes).

Accumulateur	Fem à vide E_0 (V)	Énergie spécifique théorique (Wh/kg)	Énergie spécifique pratique (Wh/kg)	Énergie volumique pratique (Wh/dm ³)
Accumulateur au plomb (étanche)	2,1	173	35	80
Accumulateur nickel-cadmium	1,30	211	30-50	80
Accumulateur nickel-fer	1,41	268	40-60	60
Accumulateur nickel-hydrure métallique	1,32	216	65	200
Accumulateur lithium-ion.....	4,1	750	100-150	200-300

Fig. 24. Comparaison des performances spécifiques de quelques accumulateurs commercialisés, source *Techniques de l'Ingénieur* [17].

L'application de ces batteries au kart électrique donne des contraintes spécifiques qui sont :

- des temps d'utilisation courts, entre 5 et 15 minutes,
- des puissances instantanées importantes, entre 5 et 30 kW, soit entre 100 A et 400 A ;
- des cycles de recharge importants, surtout en location, charge entre 50 A et 120 A ;
- des masses embarquées pénalisantes pour la conduite et la sécurité en cas de chocs.

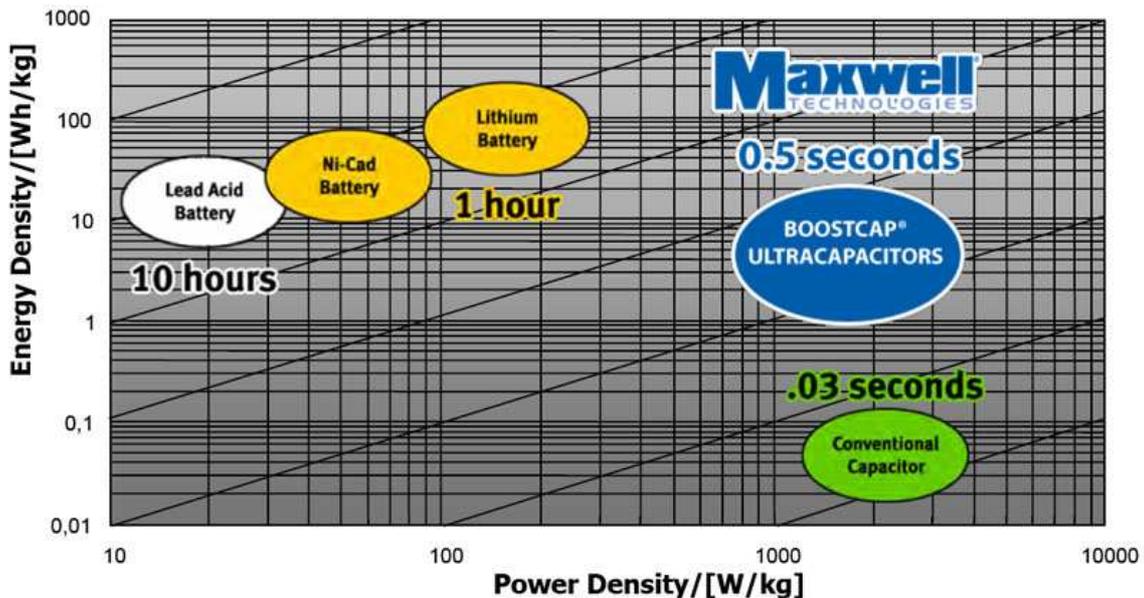


Fig. 25. Comparaison des batteries et des super capacités en terme de densité d'énergie et de puissance massique, source MAXWELL [31].

Remarque 1 :

On parle bien ici de batteries d'accumulateurs, c'est-à-dire la mise en série d'éléments unitaires. Par extension la batterie d'accumulateur de 12V d'une voiture est souvent appelée batterie, mais est bien constituée de 6 accumulateurs élémentaires au plomb.

Remarque 2 :

Il faut prendre des précautions lors de la manipulation des batteries : ce sont des objets « vivants ». Même si les tensions sont relativement basses (cas des batteries plomb 12 V), les courants de court-circuit peuvent provoquer les arcs électriques nuisibles pour les yeux, faire fondre des pièces métalliques et provoquer de graves brûlures. Utiliser les méthodes et les outils adaptés : clef isolées, nappes isolantes, lunettes de protection contre les ultra-violets.

4.2 Les batteries au plomb

Les seules batteries au plomb capables de répondre au cahier des charges du kart électrique sont les batteries en technologies spiralées étanches qui disposent d'une faible résistance série et d'une capacité de charge et de décharge importante. EXIDE et OPTIMA propose ce genre de batteries [14][15]. La société CENTRADIS distribue en France les batteries OPTIMA [16]. Par exemple, la batterie OPTIMA JAUNE 12 V 48 AH 3,7 L 16,7 kg dispose d'un courant de démarrage de 660 A (souvent 900 A mesurée) et une possibilité de charge jusqu'à 300A (d'après le constructeur).



Fig. 26. Les batteries OPTIMA JAUNE 12V 48AH 3,7 L 16,7 kg, source CENTRADIS [16].

Le couple Plomb Acide dispose d'un potentiel de 2,1 V [17][18]. Cette tension dépend fortement de la température. A cela il faut ajouter les chutes de tension dues aux résistances internes de la batterie et aux connexions externes. La tension aux bornes d'une batterie OPTIMA JAUNE peut varier de 10 V, batterie complètement déchargée, à 16 V lorsque la batterie est en charge avec des courants importants.

La capacité donnée en AH dépend également du courant de décharge et de la température. La batterie OPTIMA JAUNE 55 AH a une capacité de réserve de 2h00 pour un courant de décharge de 25 A [15]. Même si cette technologie est robuste vis-à-vis des décharges profondes (100% de décharge pour une tension de 10,5 V), les décharges importantes réduisent considérablement la durée de vie en réduisant la capacité de la batterie et par augmentation des résistances internes.

Un taux de décharge de 10 à 20 % est conseillé, suivi d'une recharge rapide. En effet, il ne faut pas laisser le temps à la réaction chimique de « reconstituer le potentiel électrique », car cette étape « consomme » les plaques de plomb.

Après une utilisation intensive, décharge sous fort courant, il est fortement conseillé de brancher rapidement le chargeur, dans les secondes qui suivent l'arrêt de la consommation.

Lors de l'utilisation de plusieurs batteries en série, il est fortement conseillé de réaliser une charge unitaire des batteries : en cas de déséquilibre des tensions, comme la tension globale est imposée par le chargeur, ce sont les batteries qui se chargent le mieux qui se retrouvent avec le plus de tension et donc se dégradent le plus rapidement !

4.3 Les batteries Ni-Mh

Les accumulateurs Ni-Mh disposent d'une tension de service plus faible que l'élément plomb, mais d'une énergie massique deux fois plus importante. Ils ont remplacé avantageusement les accumulateurs Ni-Cd qui ont de l'effet mémoire, obligeant une décharge complète avant de pouvoir les recharger.

L'accumulateur au format bâton de type AA ou AAA est le plus utilisé dans les appareils nomades bon marché, comme les jouets, les appareils photos et les appareils de mesures portatifs.

Voici un commentaire issu des Techniques de l'Ingénieur [19] :

Cette technologie de batterie semble cependant avoir été adoptée par la plupart des constructeurs automobiles comme batterie de puissance. Elle fonctionne alors à faible profondeur de décharge, ce qui augmente considérablement sa durée de vie (nombre de cycles charge/décharge). Ce type de batterie, dans sa version traction, a équipé principalement les véhicules des constructeurs japonais commercialisés en 1998 : le RAV4 EV de Toyota, l'EV Plus de Honda et le Prairie de Nissan. Enfin des batteries de puissance de cette technologie équipent la Toyota Prius, le seul véhicule hybride thermique/électrique produit en masse à ce jour (entre son introduction en 1998 et mars 2002, 103 000 véhicules ont été vendus).

4.4 Les batteries Lithium LiFeBATT

La société LiFeBATT propose des batteries à base d'éléments 10 AH, capable de supporter des courants de décharge importante. Ces batteries sont bien adaptées à l'application du kart électrique, pour des capacités de batteries entre 20 AH et 40 AH sous des tensions de 48 V à 72 V.

Les batteries LiFeBATT sont réalisées à partir de l'assemblage de module élémentaire 3,2V 10AH Lithium [20].

Un circuit électronique surveille les éléments : c'est le « Voltage Management System » (VMS).

Une des liaisons interne de la batterie est réalisée par un fusible de 150A.

Le courant maximum de décharge de la batterie est limité à 120A (12 × CA).

Le courant maximum de charge de la batterie est limité à 30A (3 × CA).



Fig. 27. Élément Lithium 3,2V 10AH LiFeBATT, source <http://www.lifebatt.co.uk/>.

Pour plus d'informations, on se référera aux notes d'applications AN-EK004-FR et AN-EK004-GB disponible sur le site <http://www.e-kart.fr> [21][22].

Par exemple, la batterie 72 V 10 AH est réalisée avec 2 couches de 12 éléments Lithium LiFeBATT 3,2V 10AH.

Tableau 1. Caractéristiques de la batterie LiFeBATT HPS 7210 [20].

Tension max	Tension typique	Tension de référence	Tension min	Energie de référence	Poids	Energie massique	Energie volumique
87,6 V	76,8 V	72 V	50,4 V	720 Wh	12,6 kg	57 Wh/kg	62 Wh/L

Les dimensions de la batterie sont 116 mm de hauteur, 182 mm de largeur et 546 mm de longueur.

4.5 Les batteries Lithium ACCUWATT

La société ACCUWATT assemble et distribue des batteries à base d'éléments Thunder Sky, historiquement Lithium Cobalt et maintenant Lithium Fer. Les éléments Lithium Thunder Sky sont disponibles de 40 AH à 10 000 AH !



Fig. 28. Elements Lithium Thunder Sky, source <http://www.thunder-sky.com/>.

Les caractéristiques de la batterie TS-LCP-100-AHA sont les suivantes :

- Technologie Lithium-Ion Cobalt
- Désignation LCP 100 AHA (3,6V 100 Ah).
- Fabricant : ACCUWATT.
- 7 éléments, soit une tension de 25,2 V.
- Dimensions batterie : 427 x 220 x 145 mm
- Dimensions du pack : 450 x 235 x 145 mm
- Masse : 21 kg



Fig. 29. Le pack batterie e-OXO LCP-100AH.

On obtient alors les caractéristiques suivantes :

- ⊕ Energie Volumique = 185 Wh/L.
- ⊕ Energie Massique = 120 Wh/Kg.

Par exemple, une batterie TS-LCP-40AHA (Lithium Fer 26 V 40 AH) à un courant de décharge nominal de $3 \times CA$ soit 120 A et un courant de décharge maximal de $3 \times CA$ soit 120 A, pour un courant de charge nominal de $0,3 \times CA$ soit 12 A et un courant de charge maximal de $3 \times CA$ soit 120 A.

Pour l'application kart électrique, ceci oblige à surdimensionner la capacité pour pouvoir utiliser la fonction frein moteur (60 AH ou 90 AH pour avoir 180 A ou 270 A de courant de charge transitoire), ou à utiliser des super-capacités.

Le temps de charge reste long.

4.6 Les chargeurs de batteries

Les batteries plombs et les batteries Lithium se chargent en deux temps :

- 1) Charge à courant constant (I_{COND} et ensuite I_{MAX}) lorsque la tension est faible (batterie déchargée) jusqu'à la tension maximale V_{BLK} . On atteint alors le point de puissance maximale $P_{charge\ max} = V_{BLK} \times I_{MAX}$ (par exemple $64\ V \times 50\ A = 3200\ W$)
- 2) Charge à tension constante, jusqu'à ce que le courant diminue en dessous du courant minimum I_{MIN}

La fin de la charge est détectée lorsque le courant diminue en dessous de la valeur I_{FLT} . Il y a ensuite une phase d'équilibrage des cellules. Durant la charge, il faut veiller à contrôler la température afin de ne pas avoir d'emballement thermique.

La phase d'équilibrage est très longue dans le cas des batteries au plomb. La tension est réduite à la valeur de la tension de FLOATING (tension d'entretien ou de maintenance).

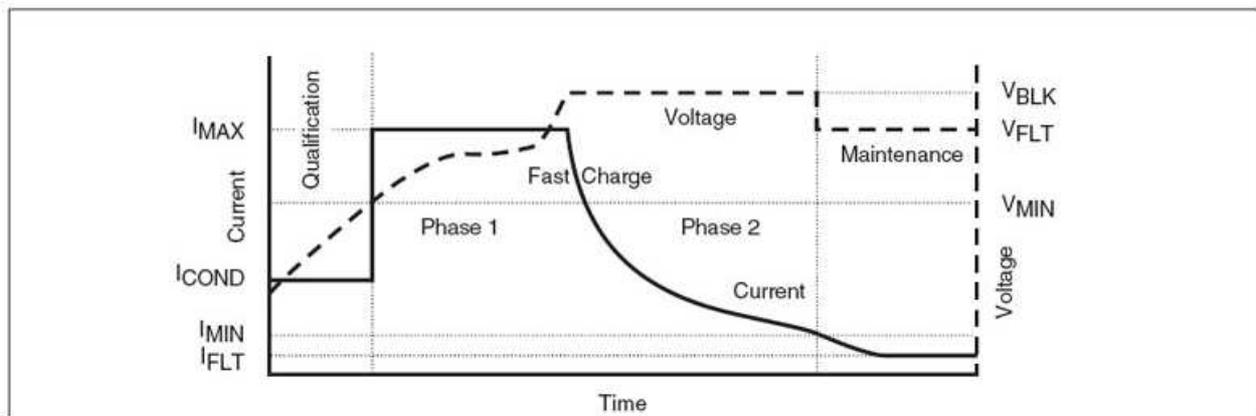


Fig. 30. Courbe de charge du circuit spécialisé BQ2031.

Les chargeurs CTEK offrent toutes ces fonctions et bien d'autres, pour l'entretien d'une batterie plomb à partir d'une alimentation secteur 230V.

La réalisation de chargeurs dans le cadre des projets ouvrent un large champ d'étude en fonction du nombre de batteries et des courants de charges souhaités :

- N x 12 V, de 10 A à 100 A ;
- 24 V, de 10 A à 100 A ;
- 48 V, de 10 A à 100 A ;

mais aussi en fonction du type de source d'alimentation utilisée :

- ✓ à partir du secteur 230 V 16 A 50 Hz, avec ou sans Power Factor Corrector (PFC) ;
- ✓ à partir d'un bus batterie 48 V (entre 40 V et 64 V) : batterie stationnaire rechargée par un panneau solaire et/ou une éolienne ;
- ✓ à partir d'une batterie de 12 V : charge de maintien du kart à partir d'une voiture.



Fig. 31. Le chargeur CTEK XS-7000 pour les batteries au plomb, distribué par CENTRADIS [16].

5 - Convertisseurs d'énergie pour le kart : solutions pour la variation de vitesse

5.1 Introduction

Ce chapitre concerne directement des exemples d'applications de projets étudiants, avec une partie importante concernant les hacheurs DC-DC. Les variateurs industriels seront également présentés, et notamment les onduleurs triphasés pour moteur alternatif. Les points importants du variateur sont :

- les spécifications de puissance : tension maximale et courant maximum ;
- la simplicité de mise en œuvre et les coûts de réalisation ;
- la réversibilité en puissance : frein moteur ou pas ;
- la sécurité du variateur et du moteur : limitation du courant moteur, protection des transistors de puissance, surveillance de la tension continue en cas de réversibilité, protection en température...

Le principe de base pour la connexion du moteur sur les batteries du kart est d'assurer une limitation en courant, et donc en couple moteur : la pédale d'accélérateur donne la consigne de courant (de couple). La vitesse est libre, fonction de l'inertie du véhicule et du couple d'accélération.

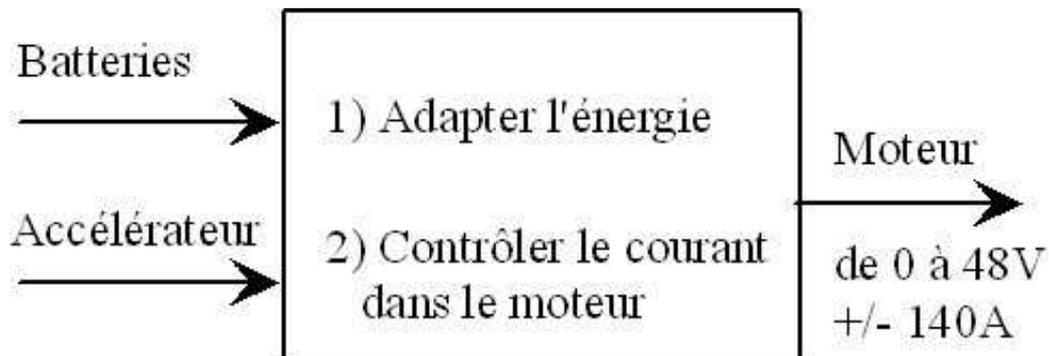


Fig. 32. Synoptique général de l'adaptation d'énergie pour le moteur du kart électrique (<http://www.thierry-lequeu.fr/data/DIV407.HTM>).

La vitesse du kart fait augmenter la Force Electro Motrice (FEM) du moteur : lorsque celle-ci atteint la tension des batteries, il n'y a plus d'accélération.

La vitesse est constante, le moteur est connecté directement à la batterie.

Le courant est celui nécessaire pour vaincre les différents frottements qui sont fonction de la vitesse, de la masse, des pneus, de la qualité de la piste et de la transmission mécanique.

5.2 Le hacheur abaisseur de type BUCK

5.2.1 Présentation

Le hacheur série est un convertisseur direct DC–DC. On cherche à associer une charge (le moteur) de type source de courant unidirectionnelle en courant et en tension avec un générateur de type source de tension également unidirectionnelle en courant et en tension (la batterie). Le courant étant positif dans la charge, seules les phases en connexion directe et de roue libre sont utiles. L'interrupteur K1 est réalisé à partir d'un transistor et l'interrupteur K2 est une diode. On trouve les définitions suivantes pour cette fonction hacheur : hacheur abaisseur, hacheur dévolteur, hacheur série, hacheur de type BUCK, buck chopper.

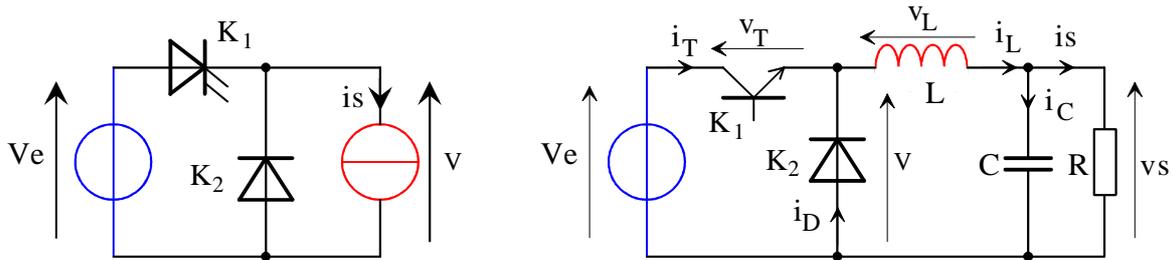


Fig. 33. La fonction hacheur BUCK (thierry\dessins\h_serie1.drw).

5.2.2 Fonctionnement

L'interrupteur K1 est fermé pendant la fraction αT de la période de découpage T . La source d'entrée fournit l'énergie à la charge au travers de l'inductance L . Lors du blocage du transistor, la diode K2 assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans la charge. La tension de sortie est donnée par la relation suivante :

$$v(t) = \begin{cases} 0 & \text{pour } 0 < t < \alpha T \\ 1 & \text{pour } \alpha T < t < T \end{cases} \times V_e = v_L(t) + v_s(t) \quad (10)$$

En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, ce qui impose :

$$V_s = \langle v_s \rangle = \langle v - v_L \rangle = \langle v \rangle = \alpha \times V_e \quad (11)$$

Par définition du rapport cyclique α (Duty Cycle) : $0 \leq \alpha \leq 1$. Le montage est abaisseur de tension.

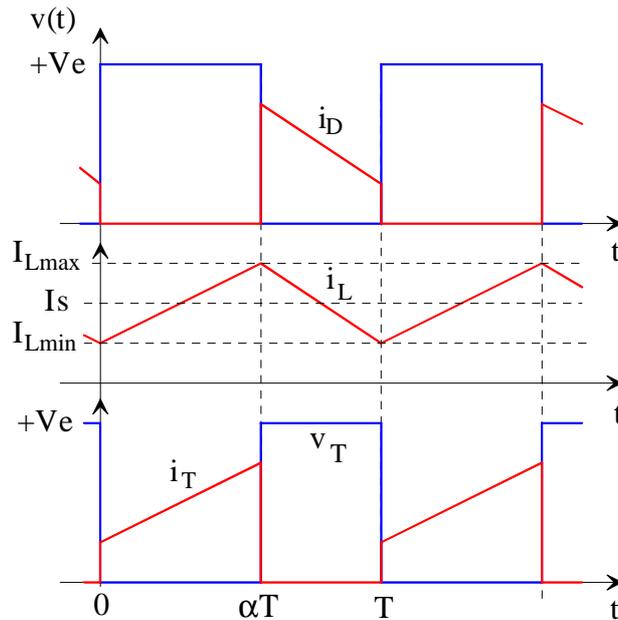


Fig. 34. Formes d'ondes du hacheur BUCK (thierry\dessins\h_serie1.drw).

5.2.3 Comportement des grandeurs électriques lors des commutations

En fonction de la commande de l'interrupteur (état OFF ou état ON), les grandeurs électriques, tension V_{K1} & V_{K2} et courant I_{K1} & I_{K2} , vont évoluer en fonction du temps. Cette évolution dépend des caractéristiques intrinsèques de l'interrupteur, mais également du circuit extérieur (nature de la charge et des autres interrupteurs du convertisseur d'énergie).

Les relations électriques du circuit sont :

- 1) la tension d'entrée est constante et $V_e = v_T(t) + v(t)$;
- 2) le courant de sortie est constant pendant la commutation et $I_s = i_T(t) + i_D(t)$;

La figure 35 montre une forme d'onde idéalisée typique des commutations :

- à la fermeture du transistor pour $t = 0$: le courant i_T est croissant et sa tension s'annule, alors que la diode se bloque i_D s'annule ;
- et à l'ouverture pour $t = \alpha T$: le courant i_T est décroissant lorsque le transistor se bloque, rendant passante la diode par un courant i_D positif.

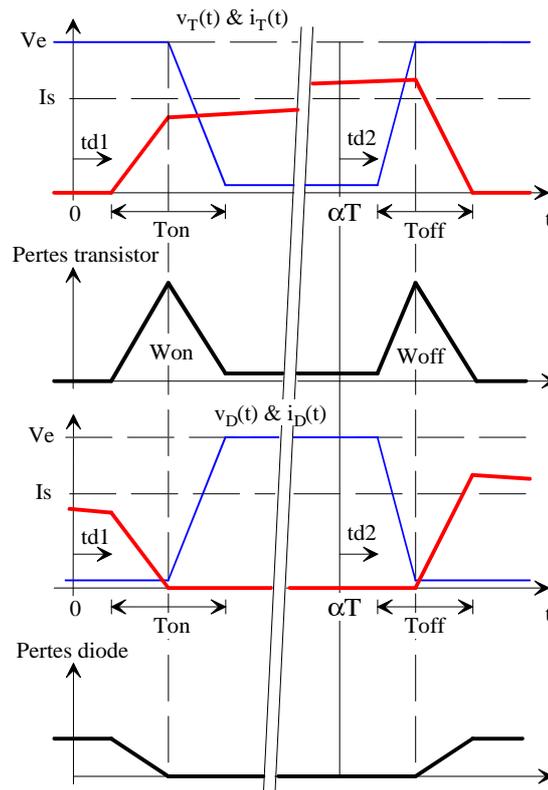


Fig. 35. Courant, tension et puissance dissipée dans les interrupteurs (thierry\dessins\pertes1.drw).

5.2.4 Pertes statiques dans les semi-conducteurs

Tableau 2. Composants semi-conducteurs de puissance.

Composant	Diode	Thyristor	Bipolaire	MOSFET	IGBT
Symbole					
Schéma équivalent					
E =	0,2 à 0,8 V	0,8 à 3 V	0,4 à 2 V	= 0	1 V à 5 V
R =	1 mΩ à 1 Ω	50 mΩ à 2 Ω	1 mΩ à 1 Ω	1 mΩ à 10 Ω	50 mΩ à 2 Ω

Les pertes statiques valent : $P_0 = R \cdot I_{EFF}^2 + E \cdot I_{MOY}$

5.2.5 Pertes dynamiques dans les semi-conducteurs

Les temps de commutation doivent être très inférieurs à la période de découpage et imposent une fréquence de découpage maximale.

Les énergies dissipées pendant les commutations valent $W_{on} = \frac{1}{2} \cdot V_e \cdot I_s \cdot \Delta t_{on}$ et

$$W_{off} = \frac{1}{2} \cdot V_e \cdot I_s \cdot \Delta t_{off} .$$

Les pertes dynamiques valent $P_D = (W_{on} + W_{off}) \times F_{découpage} = \frac{1}{2} F \cdot V_e \cdot I_s \cdot (\Delta t_{ON} + \Delta t_{OFF})$.

5.2.6 Choix des semi-conducteurs

Au vue des tensions et des courants mis en jeu dans ces applications, deux familles de transistors MOSFET se dégagent naturellement, avec également les IGBT « basse tension » :

- des composants MOSFET 100V pour des batteries 48V ;
- des composants MOSFET 200V pour des batteries 72V ;
- des composants IGBT de 200A à 600A, 600V ou 900V.

Les diodes de roues sont souvent intégrées dans le cas d'utilisation de modules de puissance.

Dans le cas d'utilisation de composants discrets en boîtier TO220 ou TO247, les diodes SCHOTTKY sont idéales : elles sont rapides, avec une faible chute de tension directe, un fort courant et une basse tension (jusqu'à 100V).

5.2.7 La commande des transistors : le driver

Dans deux cas typiques d'application des convertisseurs de puissance, la commande des transistors MOSFET ou IGBT est connectée à un potentiel variable, à savoir :

- 1) le cas du hacheur abaisseur BUCK ou du hacheur inverseur BUCK-BOOST (Fig.36.a & b) ;
- 2) le cas d'un bras de pont-hacheur 2 quadrants, onduleur mono ou triphasé (Fig.36.d).

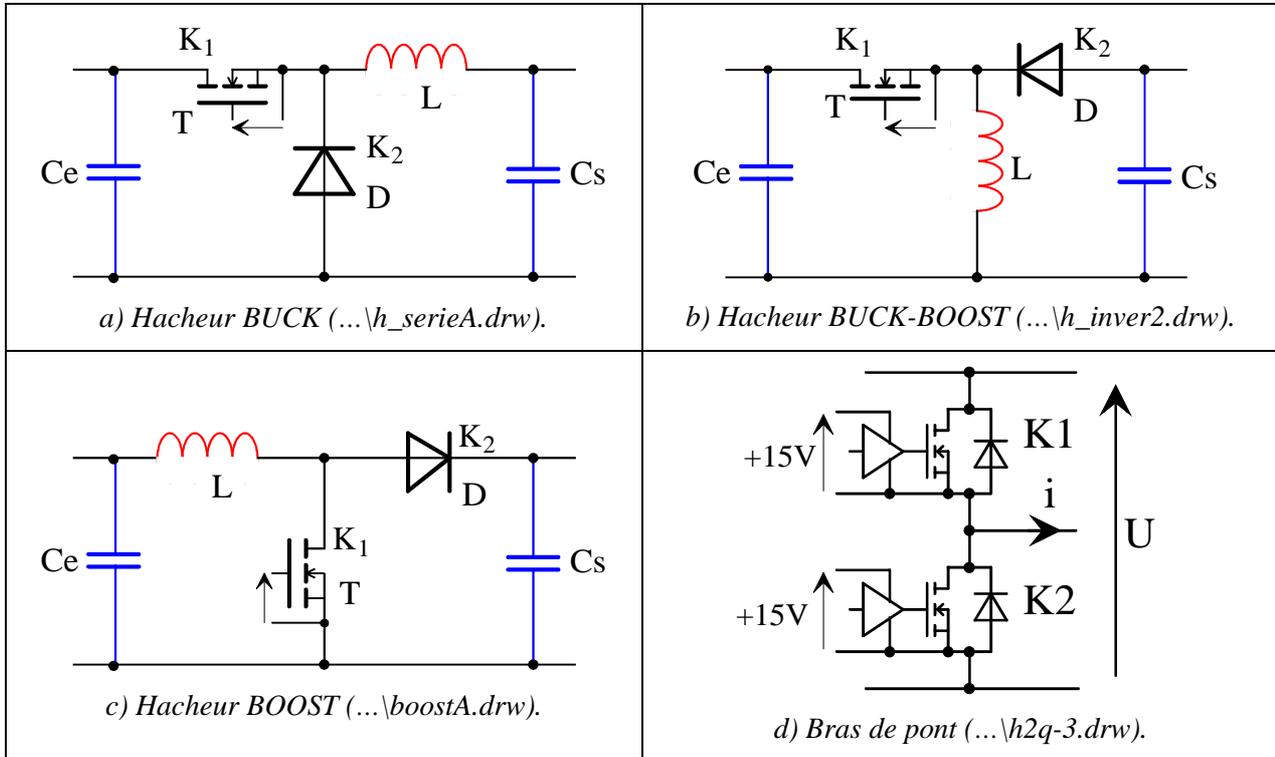


Fig. 36. Les transistors dans les convertisseurs de puissance (thierry\dessins\...).

Il faut alors résoudre plusieurs problèmes :

- 1) l'alimentation de ou des grille(s) ;
- 2) la commande ouvert/fermé (ON/OFF) avec un courant de grille $I_{G_{max}} = \pm V_G / R_G$;
- 3) le temps mort pour ne pas fermer les deux transistors en même temps ;
- 4) les différentes sécurités (manque de tension, surintensité, échauffement excessif) ;
- 5) l'isolation par rapport au potentiel de sortie et une bonne tenue au dV/dt lors de la commutation.

Les solutions de « driver » pour MOSFET et IGBT existent dans la littérature et sont bien expliquées dans les Technique de L'Ingénieur [25],[26] et aussi sur le site [27]

Functional Block Diagram

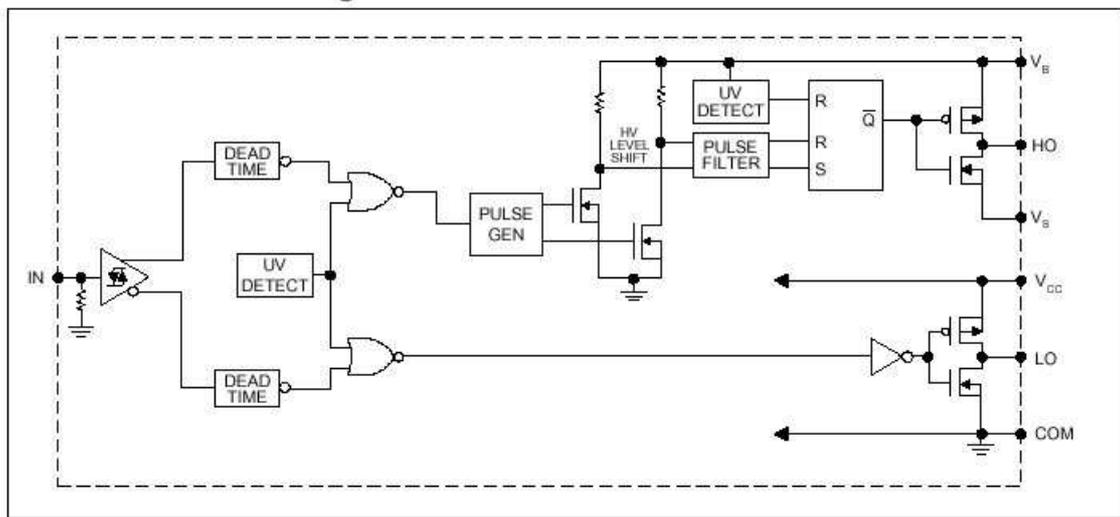
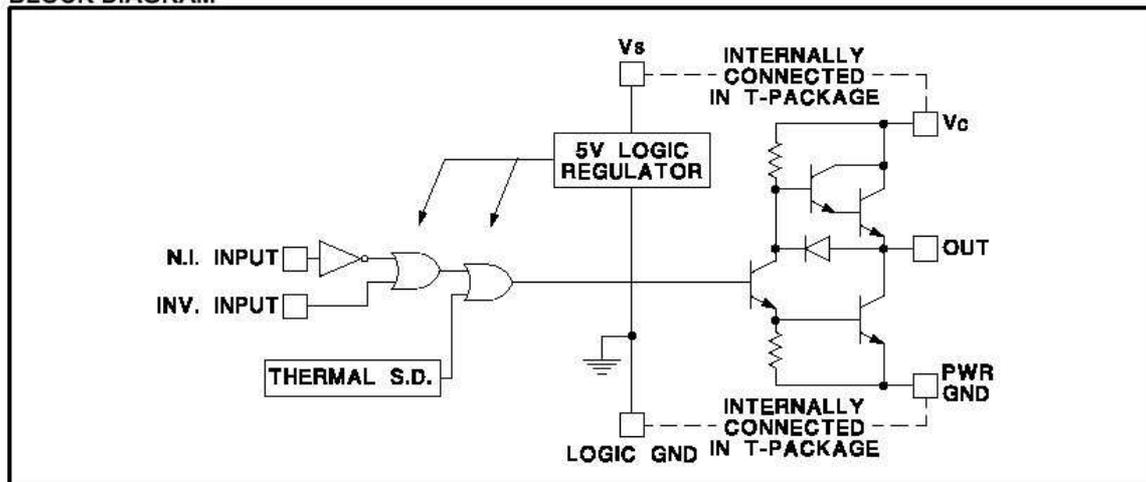


Fig. 37. Circuit de commande de grille IR2111 d'International Rectifier (thierry\images\ir2111a.jpg).

BLOCK DIAGRAM



JANUARY 1994 - REVISED AUGUST 2000 - SLUS370A

Fig. 38. Commande de grille UC3705 d'Unitrode – Texas Instrument (thierry\images\uc3705a.jpg).

5.3 Le hacheur de type BUCK à transistor flottant

Les courants moteurs sont souvent importants (entre 100A et 400A) ce qui justifie le fait de ne pas ajouter d'inductance supplémentaire en série avec le moteur. Le principal inconvénient est, qu'avec les technologies de moteur utilisé ici, les inductances propres des moteurs sont souvent très faibles (quelques μH). Les fréquences de découpage étant relativement faibles (entre 15 kHz et 50 kHz), l'ondulation du courant dans le moteur est importante :

$$\Delta I_{L_{\max}} = \frac{U}{4 \times L \times F} = \frac{48V}{4 \times 5\mu\text{H} \times 20\text{kHz}} = 120A \quad (12)$$

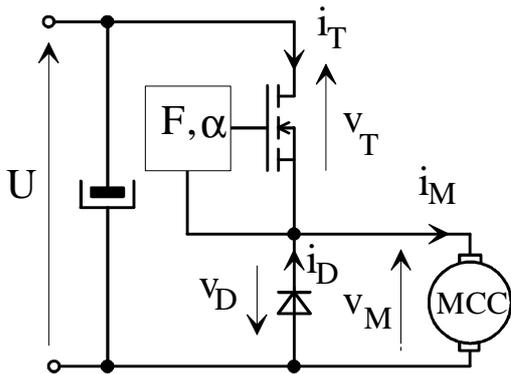


Fig. 39. Le hacheur de type BUCK à transistor flottant.

- ✓ Le transistor MOSFET est en potentiel « flottant ».
- ✓ Il faut une commande de grille isolée (commande et alimentation).
- ✓ Il n'y a pas de réversibilité en courant, donc pas de frein moteur.
- ✓ Pour $\alpha = 0$, le transistor est toujours ouvert : le moteur n'est pas alimenté.
- ✓ Pour $\alpha = 1$, le transistor est toujours fermé : le moteur est connecté directement sur la source de tension U.

5.4 Le hacheur BUCK avec le transistor à la masse

On profite ici de rappeler que le courant prélevé sur la batterie est un courant « découpé » : $i_e(t) = i_{\text{mot}}(t)$ pour $t \in [0 ; \alpha T]$. Le condensateur d'entrée a le rôle fondamental de filtrer ce courant (fournir les transitoires rapides de courant). L'ondulation de la tension aux bornes du condensateur vaut alors $\Delta V_{c_{\max}} = \frac{I_s}{C_e \cdot F} \alpha(1 - \alpha) \leq \frac{I_s}{4 \cdot C_e \cdot F}$. On prendra nécessairement en compte la résistance série, notée ESR dans le calcul de l'ondulation de la tension, et on tiendra compte surtout de la contrainte de courant efficace maximale dans le condensateur

$$I_{\text{ceff}} = \sqrt{\left(I^2 + I \cdot \Delta I + \frac{\Delta I^2}{3} \right) \alpha - \left(I + \frac{\Delta I}{2} \right)^2 \alpha^2}. \text{ En première approche } I_{\text{ceff}} \approx \frac{I}{2} \text{ pour } \alpha = \frac{1}{2} \text{ et } \Delta I = 0.$$

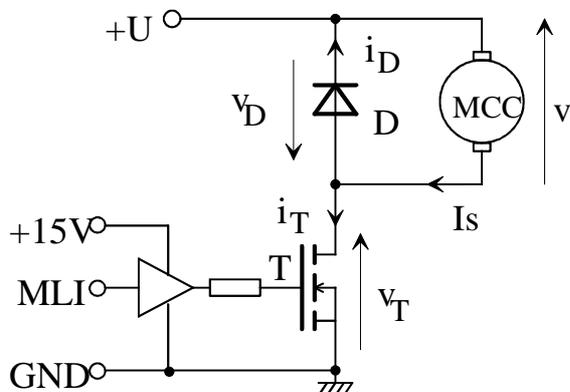


Fig. 40. Le hacheur de type BUCK à transistors à la masse.

- ✓ Le transistor MOSFET est relié à la masse.
- ✓ Le moteur est en potentiel « flottant » (peu important).
- ✓ La commande de grille est reliée à la masse.
- ✓ Il n'y a pas de réversibilité en courant, donc pas de frein moteur.
- ✓ C'est le principe des variateurs ALLTRAX.

5.5 Le hacheur 2 quadrants réversible en courant

Pour avoir du frein moteur sur le kart, on utilise la réversibilité du moteur à courant continu. Avec un kart EN MARCHÉ AVANT, l'inertie du véhicule entraîne la machine à courant continu en AVANT, produisant une FEM positive : le moteur devient générateur. Pour appliquer un couple de freinage, avec cette FEM toujours positive, il faut INVERSER le couple du moteur, donc inverser le courant de l'induit : passer en frein moteur sur un kart en marche avant oblige à inverser le sens du courant dans le moteur. Le moteur passe en génératrice, et moyennant un convertisseur adéquat, renvoie l'énergie dans la batterie. Pour cela il faut :

- un hacheur BUCK pour l'accélération : courant $I > 0$ et vitesse $\Omega > 0$ avec $U_{bat} > U_{mot}$;
- un hacheur BOOST pour la décélération car $U_{mot} < U_{bat}$, courant $I < 0$ et vitesse $\Omega > 0$;
- une batterie qui accepte les courants négatifs.

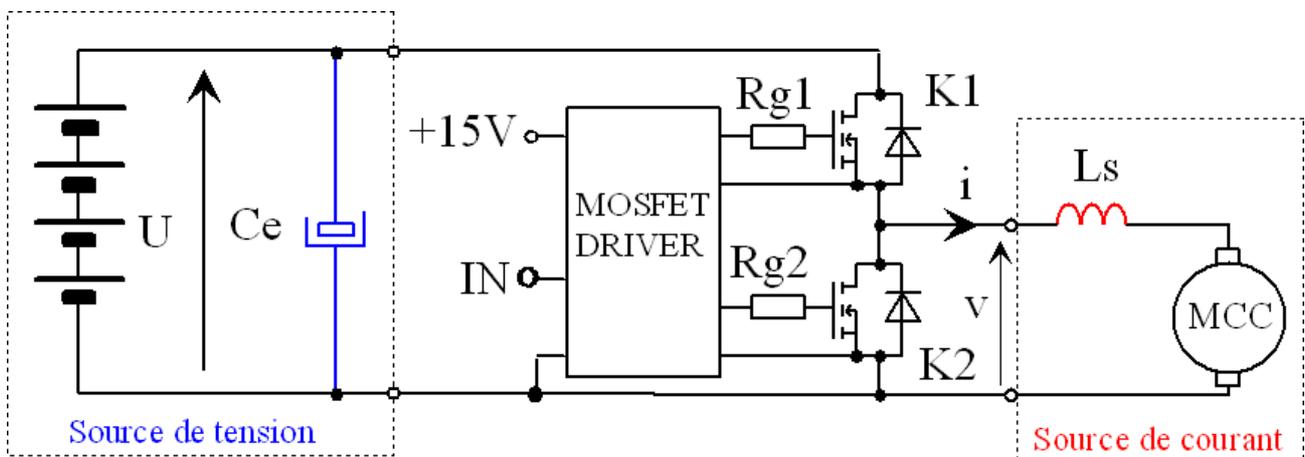


Fig. 41. Le hacheur 2 quadrants réversible en courant.

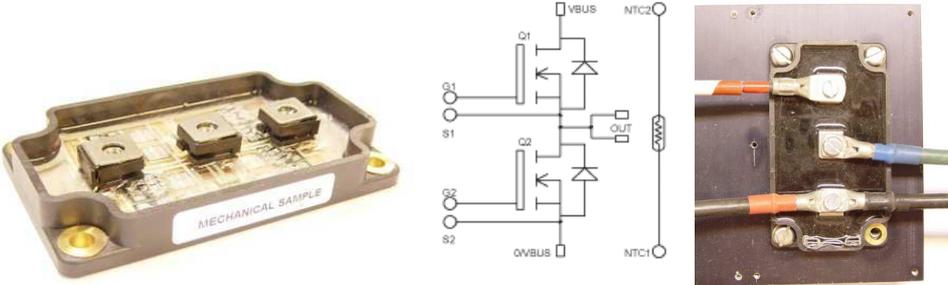
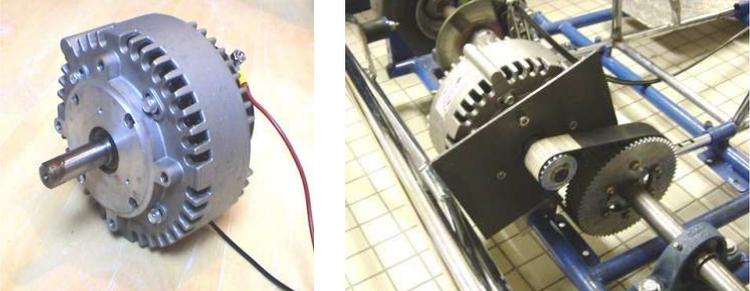
La réversibilité fournit le frein moteur, mais implique plusieurs choses :

- ⊕ avec le frein moteur, on « économise » les freins à disque et on dispose d'une bonne maîtrise du ralentissement ;
- il y a un échauffement supplémentaire du moteur pendant les phases de freinage ;
- la transmission mécanique doit être réversible : changement de « brin mou » lors de la tension de la courroie ;
- la batterie doit être constamment connectée au variateur : en cas de perte de connexion de la source de tension (fusible ouvert, câbles débranchés, Arrêt d'Urgence ouvert...), l'énergie du moteur est renvoyée sous forme de courant dans le condensateur de filtrage d'entrée, qui se charge très vite $ic(t) = C \cdot \frac{dvc}{dt} \Rightarrow I = C \cdot \frac{\Delta Vc}{\Delta T}$ soit 1 Volt pour 1 Ampère, dans 1 Farad en 1 seconde et la tension maximale aux bornes des semi-conducteurs et des condensateurs est très vite atteinte !

Pour protéger le variateur, il faut « ouvrir » les transistors en cas de surtension sur la capacité d'entrée : le freinage devra se faire mécaniquement...

5.6 Le câblage de puissance

On passe en revue ici les différents composants de liaison des batteries, du variateur et du moteur.

De 1 à 4 batteries			
Coupe circuit ou relais et fusible			
Module à transistors de puissance MOSFET Microsemi [29]			
Le capteur de courant moteur LEM et la commande d'accélérateur PB-6			
Moteur E-tek 48V 140A et la transmission			

Les sections de câbles sont données ici à titre indicatif :

- 10 mm² : 40-50A, câbles de charge unitaire des batteries plomb, prises PRATIKA ;
- 16 mm² : 50A, câbles de charge du chargeur 48V ou 72V 50A ;
- 25 mm² : 100A-200A, câbles de puissance moyenne, des liaisons des batteries LiFeBATT et des chargeurs 80A-120A ;
- 35 mm² : 200A-300A, câbles de puissance des liaisons moteur – variateur ;
- 50 mm² : 400A, câbles de forte puissance, faible chute de tension ;

6 - Un peu d'électronique, d'automatique, de gestion de projet, d'expression technique...

6.1 Synoptique général

On peut faire autre chose que de la mécanique avec un kart électrique. Le synoptique suivant présente le projet global de la réalisation de la chaîne de traction entre la batterie et le moteur.

Le travail des étudiants ne se cantonne pas à la réalisation des cartes électroniques, il leur faut ici quelques notions supplémentaires, comme :

- La gestion de projet, d'un planning, des contraintes extérieures et la gestion de leur cahier des charges : où sont les limites du projet ?
- La recherche et la synthèse d'informations diverses, sur internet, dans les rapports des années précédentes, la lecture de documentations et d'informations en anglais : Devices Data Sheet and Applications Notes...
- La rédaction de document, la présentation orale des résultats et la réalisation d'un site web.
- Des mesures, des graphiques et des calculs de composants.

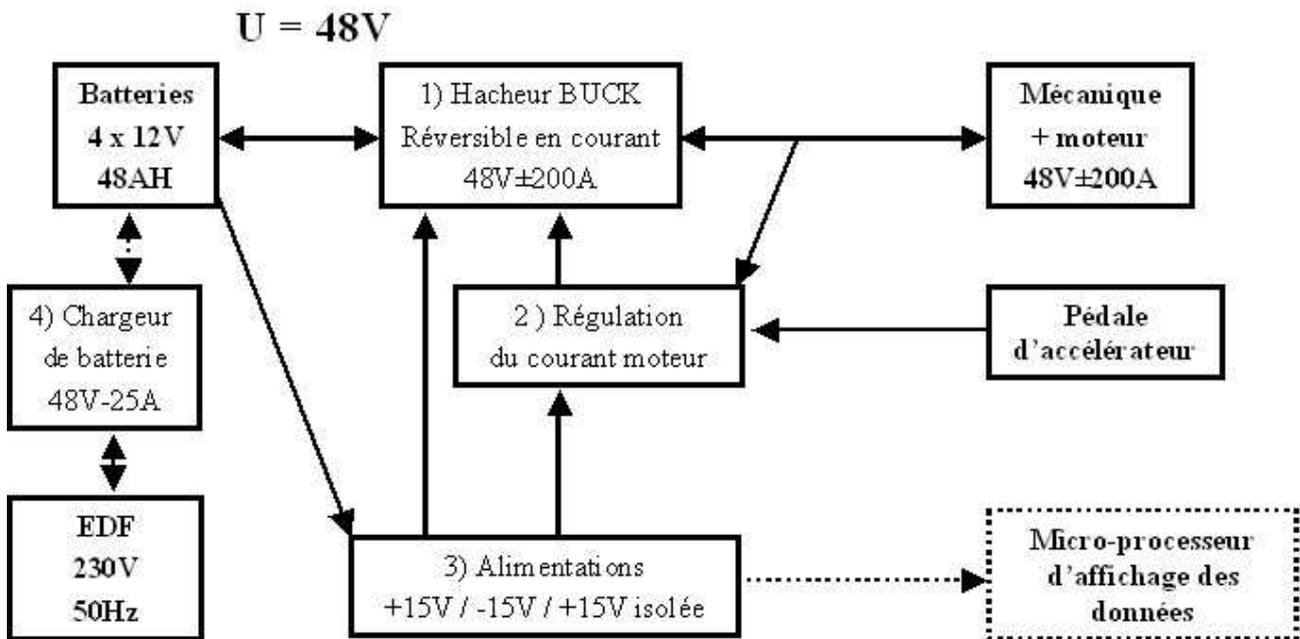


Fig. 42. Synoptique détaillé des projets autour du variateur de vitesse le moteur du kart électrique (<http://www.thierry-lequeu.fr/data/DIV407.HTM>).

Le projet est découpé en 4 grandes parties, à savoir :

- 1) Le hacheur de puissance avec les drivers des grilles des transistors MOSFET.
- 2) La Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI ou Pulse Width Modulation PWM), la régulation du courant dans le moteur et l'interface avec la pédale.
- 3) Les alimentations +15V et -15V pour les circuits analogiques et +15V isolée pour le circuit driver du transistor MOSFET « flottant ».
- 4) Un chargeur de batterie : une alimentation continue stabilisée en tension et régulée en courant.

D'autres applications viennent très naturellement se greffer autour de ce support pédagogique et sont listées en détails et de façon non exhaustive à l'adresse :

<http://www.thierry-lequeu.fr/data/DATA337.HTM>

et je cite ici quelques exemples :

- L'affichage du courant moteur, de la tension des batteries, de la vitesse et de la température du moteur (entre autres...).
- La transmission et l'enregistrement des informations aux sols (avec la possibilité d'avoir un site web embarqué grâce à une liaison WiFi).
- La gestion des feux de STOP arrière et de l'éclairage avant pour les courses de nuit.
- La borne de mesure de temps et de vitesse pour les essais d'accélération du genre 50 mètres départ arrêté.

Mais aussi :

- ✓ Des actions de recherche de sponsor et de financement, des actions de communication relayées par la presse, comme les journées portes ouvertes, la Fête de La Science, le Téléthon, le Concours Lépine... ;
- ✓ La recherche d'autres sources électriques pour recharger les batteries, comme les énergies renouvelables avec des panneaux photovoltaïques, des éoliennes, des groupes électrogènes à carburants « propres ».
- ✓ Des solutions d'hybridation, moteur thermique + moteur électrique, mais aussi hybridation des sources de stockage, comme les batteries et les super-capacités.
- ✓ D'autres applications vers d'autres véhicules, comme les vélos électriques, les scooters et quads électriques, les motos, les bateaux et les avions électriques...

6.2 D'autres solutions de convertisseur

6.2.1 L'onduleur triphasé pour moteur asynchrone

La réalisation du variateur de vitesse pour moteur triphasé s'apparente plus à une liste de problèmes à résoudre ! Pour atteindre les 10 kW sur le moteur asynchrone, il faut dimensionner et commander correctement les modules de puissances MOSFET. Vient ensuite le temps des alimentations et de l'interfaçage des différents capteurs (courants, tension, vitesse, position, température et consignes) vers la carte processeur (souvent un Digital Signal Processor DSP). On passe les problèmes informatiques, pour se plonger dans l'identification dynamique de la machine dont le constructeur ne donne aucun paramètre... Tests en boucle ouverte, tests en boucle fermée, étude du démarrage : on est prêt pour l'implantation finale sur le kart ! [30].

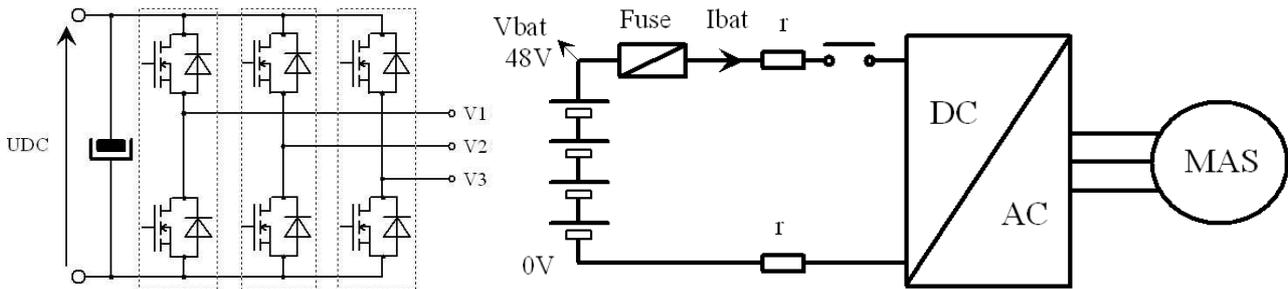


Fig. 43. Onduleur triphasé pour moteur asynchrone (kart4a.drw).

6.2.2 La solution « compliquée » du département GEII l'IUT de Tours

Ici, le variateur de vitesse pour le moteur à courant continu est un hacheur 2 quadrants réversibles en courant, qui autorise le freinage électrique du kart par inversion du courant dans le moteur.

On utilise un premier étage de type BOOST afin de stabiliser la tension intermédiaire U . Ceci permet d'avoir les caractéristiques suivantes :

- ⊕ La régulation à $U = \text{constante}$ permet de travailler à vitesse maximale constante : les performances du kart sont indépendantes de l'état de charge de la batterie.
- ⊕ La réversibilité en courant autorise le frein moteur qui peut recharger la batterie car le hacheur BOOST est également réversible.
- ⊕ Le stockage transitoire de l'énergie de freinage peut se faire en utilisant des super-capacités pour le filtrage de la tension U (Supercap Maxwell 165 F 48,6 V [31]).
- ⊕ La batterie ne fournit plus que la valeur moyenne de l'énergie, elle peut être réduite (36V, 24V ou 12V). On réduit également les cycles de charge et de décharge rapide..

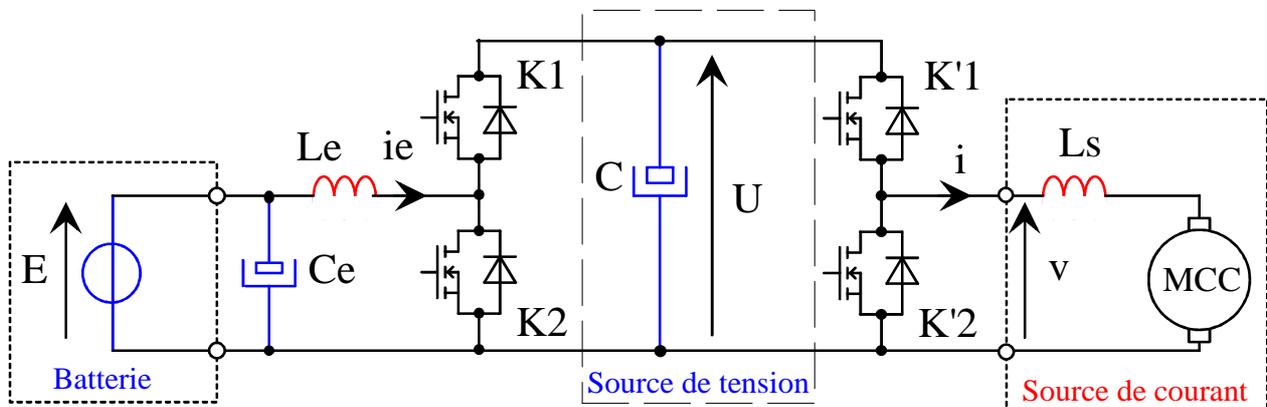


Fig. 44. Schéma complet du convertisseur du département GEII de Tours étudié en 2005-2006.

6.2.3 Super-capacité pour le stockage transitoire de l'énergie

Les super-capacités sont un bon moyen pour augmenter la durée de vie des batteries au plomb. Elles assurent le stockage de l'énergie de freinage durant des temps très courts, comme par exemple, à l'entrée d'un virage, 200 A pendant 2 s sur une capacité de 165 F ne provoque qu'une variation de 2,4 V ! Et cette énergie est instantanément disponible pour l'accélération en sortie de virage.

La batterie est moins sollicitée : sa durée de vie s'en trouve augmentée []. Le couplage le plus simple est soit la liaison directe (sans la diode), soit la liaison via une diode de puissance (qq 100A faible chute de tension). ATTENTION à pré-charger la capacité avant de la connecter sur la batterie, le coupe circuit du variateur doit se trouver entre la capacité et le variateur (voir même le fusible).

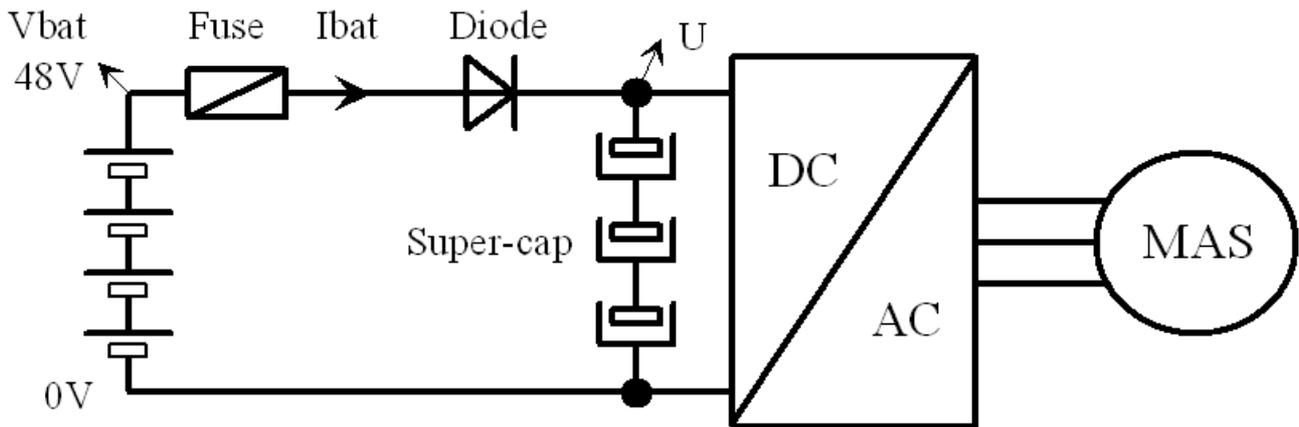


Fig. 45. Variateur réversible en puissance avec un bus DC à super-capacité (kart4b.drw).

6.2.4 Généralisation de la solution BOOST et super-capacité

Voici quelques idées pour généraliser l'alimentation d'un véhicule électrique.

- ❖ La solution avec des convertisseurs élévateurs de tension permet d'avoir un bus continu « haute tension » régulée : on peut alors utiliser des variateurs industriels avec des tensions continues entre 350V et 600V.
- ❖ Le convertisseur BOOST permet également le stockage de plus d'énergie dans les super-capacités en autorisant une plus grande dynamique de tension $\Delta W = \frac{1}{2} C \cdot V_{MAX}^2 - \frac{1}{2} C \cdot V_{MIN}^2$.
Un partage judicieux entre des capacités de filtrage classique et des super-capacités est à faire entre le bus continu et la source de stockage.
- ❖ On réduit dans tous les cas la quantité de batteries embarquées.
- ❖ On peut ajouter une pile à combustible ou d'autres types de générateurs (hybridation avec un petit moteur thermique couplé à une génératrice).
- ❖ Pour des utilisations de courte durée, on peut n'utiliser que des super-capacités, le temps de recharge étant relativement court : 4800 A pour 165 F 48,6 V donne 1,67 s ! [31]

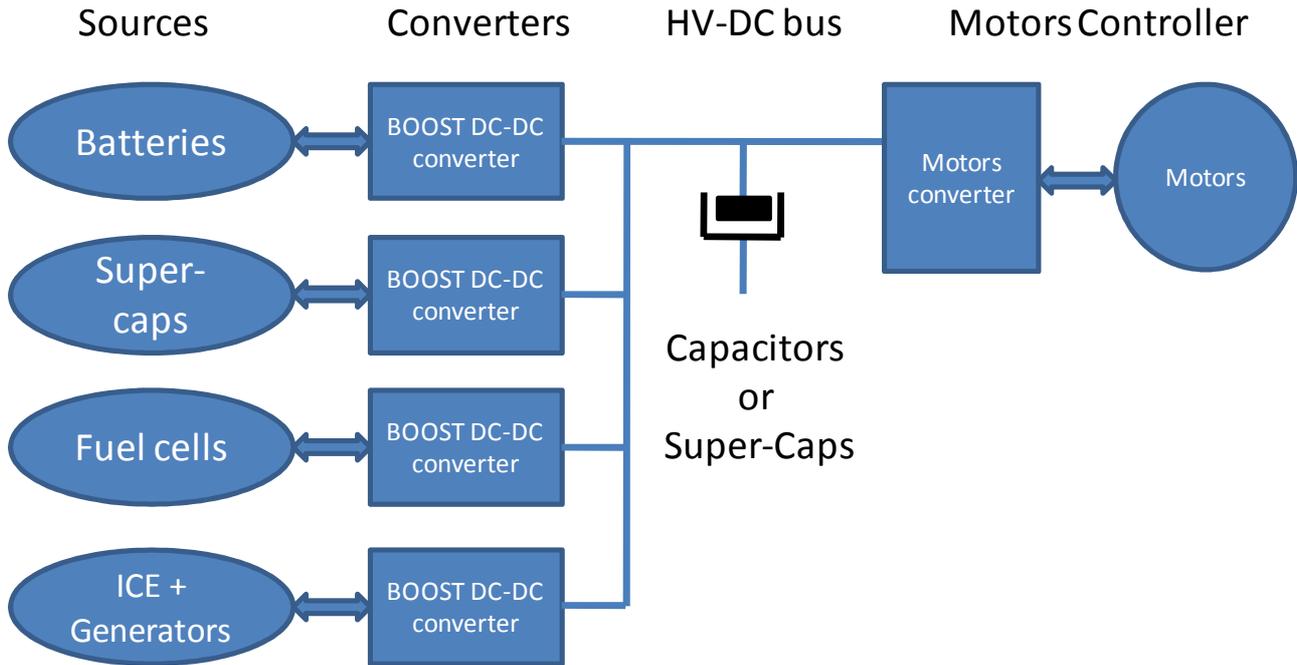


Fig. 46. Alimentation multi-sources et régulation du bus DC continu (techniques\dessins.ppt)
ICE : Internal Combustion Engine.

7 - Bibliographie

- [1] Site web <http://www.maif.fr/>, le 31 décembre 2008, Evelyne GABILLY, Tél : 02 47 71 45 28, Fax : 02 47 71 45 01, E-mail : evelyne.gabilly@maif.fr, Délégation Départementale de l'Indre et Loire, 72 avenue Marcel Dassault, BP 537, 37205 TOURS CEDEX 03.
- [2] Site web <http://www.kartmag.net>, le 31 décembre 2008, Kartmag N°104, page 29.
- [3] Speed O Max, Clermont Ferrand, 63, site web <http://www.speedomax.fr>, le 31 décembre 2008.
- [4] Sodikart Itaka, Nantes, 44, site web <http://www.speedomax.fr>, le 31 décembre 2008.
- [5] Gokart, La Ville aux Dames, 37, site web <http://www.gokart.fr>, le 31 décembre 2008.
- [6] Alpha Karting, , site web <http://www.alpha-karting.com>, le 25 avril 2009.
- [7] Mavikarting , site web <http://www.mavikarting.com>, le 25 avril 2009.
- [8] R. KALLER, J.-M. ALLENBACH, *Volume 2 : Traction électrique*, Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, 1995, [LIVRE081].
- [9] Article en ligne depuis mars 2005 sur le site web <http://www.iutenligne.net> : http://www.iutenligne.net/ressources/etudes_realisations/Lequeu/kart/default.htm, le 31 décembre 2008.
- [10] D. EYMARD, *Le kart électrique : une application pédagogique*, Revue Technologie, N° 120, mai-juin 2002, pp. 74-76, [ART315].
- [11] Site web <http://www.electricmotorsport.com/>, le 1^{er} janvier 2009.
- [12] Site web <http://www.perm-motor.de/>, le 1^{er} janvier 2009.
- [13] Rapport MAXWELL, *Ultracapacitors - Microelectronics - High Voltage Capacitors - MORE POWER. MORE ENERGY. MORE IDEAS*, September 2008, fichier : 20080828_MaxwellTechnologies.pdf, 29 pages, <http://www.maxwell.com/>, le 2 janvier 2009.

- [14] Site web <http://www.exide.com>, le 2 janvier 2009.
- [15] Site web <http://www.optima.com>, le 2 janvier 2009.
- [16] Site web <http://www.centradis.fr>, le 2 janvier 2009.
- [17] J. ROBERT, J. ALZIEU, [D3351], *Accumulateurs - Considérations théoriques*, , Techniques de l'Ingénieur, Traité Convertisseurs et machines électriques, novembre 2004, 11 pages, [PAP556].
- [18] J. ROBERT, J. ALZIEU, [D3352], *Accumulateurs - Accumulateurs au plomb*, , Techniques de l'Ingénieur, Traité Convertisseurs et machines électriques, novembre 2004, 14 pages, [PAP596].
- [19] R. MOSDALE, [D5565], *Transport électrique routier - Batteries pour véhicules électriques*, , Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie électrique, février 2003, 21 pages, [PAP531].
- [20] Site web <http://www.lifebatt.co.uk/>, le 2 janvier 2009.
- [21] T. LEQUEU, I. GOODMAN , *Comment utiliser les batteries Lithium LiFeBATT*, Note d'Application AN-EK004-FR, janvier 2009, 8 pages, site web <http://www.e-kart.fr>.
- [22] I. GOODMAN, R. WOLFE, *How to use a LiFeBATT Lithium Battery*, Application Note AN-EK004-GB, December 2008, 8 pages, web site <http://www.e-kart.fr>.
- [23] Site web <http://www.accuwatt.fr>, le 2 janvier 2009.
- [24] Site web <http://www.thunder-sky.com>, le 2 janvier 2009.
- [25] C. GLAIZE, [D3120][D3121], *Commande des composants actifs*, , Techniques de l'Ingénieur, mars 1989, [PAP063].
- [26] S. LEFEBVRE, B. MULTON, [D3233], *Commande des convertisseurs - MOSFET et IGBT : circuits de commande*, , Techniques de l'Ingénieur, août 2003 1998, 16 pages, [ART443].
- [27] T. LEQUEU, *Informations diverses sur les Circuits de commande et drivers pour l'Electronique de Puissance*, novembre 2004, site web <http://www.thierry-lequeu.fr/data/DIV300.HTM>.
- [28] J.-P. FERRIEUX, F. FOREST, *Alimentations à découpage - Convertisseurs à résonance*, DUNOD, 3e édition revue et augmentée, 1999, [LIVRE122].
- [29] Site web <http://www.microsemi.com/>, le 1^{er} janvier 2009.
- [30] N. GODEFROY, *Commande vectorielle d'un moteur asynchrone basse tension sur un kart*, stage de Master 1 IUP STS/EEATS/GEII, Université de Grenoble 1, du 2 avril au 27 juillet 2007, site web <http://www.thierry-lequeu.fr/data/DATA335.HTM>, le 25 avril 2009.
- [31] Site web <http://www.maxwell.com/>, le 2 janvier 2009.