

ECCE véhicule hybride : du militaire vers le civil

JEAN-MARIE KAUFFMANN*, DANIEL HISSEL*, MICHEL AMIET**

* Université de Franche-Comté, Institut FEMTO-ST, Département ENISYS, UMR CNRS 6174, Techn-Hom, 90010 Belfort Cedex – jean-marie.kauffmann@univ-fcomte.fr ; daniel.hissel@univ-fcomte.fr

** Direction Générale de l'Armement, 7-9 rue des Mathurins 92220 Bagneux - xpert.amiet@gmail.com

***Résumé :** Le Banc ECCE, véhicule hybride série plug-in, est une plateforme de test qui permet d'évaluer les différentes technologies des moteurs, des convertisseurs, des sources d'énergie et de stockage et de leur gestion. Ce véhicule présente de nombreuses originalités tant par le niveau de tension que par la gestion des consignes de ses quatre moteurs de propulsion qui sont tous différents. et par la gestion de l'énergie à bord avec récupération au freinage. Ce projet coopératif a permis de maîtriser de nombreux aspects d'une part dans la conduite et le pilotage de véhicules hybrides et d'autre part dans l'association multi-sources et multi-charges. Dans une deuxième phase actuellement en cours, il est doté de nouvelles sources, permanente, transitoire et impulsionsnelle. Le schéma de base du Banc ECCE a été repris pour d'autres applications dans le domaine des transports.*

1. Introduction

Les véhicules électriques présentent des performances dynamiques largement supérieures à celles des véhicules mus par un moteur à combustion interne mais ils sont fortement pénalisés par leur autonomie. La DGA était donc particulièrement intéressée à tester les différentes structures et les composants d'un véhicule hybride de forte puissance. Compte tenu des applications potentielles, l'hybridation série est la plus intéressante.

Cette démarche a conduit à la conception, à la construction et aux essais du Banc ECCE (Banc d'Evaluation des Composants d'une Chaîne Electrique), fruit d'une collaboration sous l'égide de la DGA entre des industriels et des laboratoires universitaires et publics. Le financement du projet, conçu en 1994 et concrétisé en 1998 par la signature d'une convention, a été apporté par la DGA, les collectivités régionales et locales du Grand Est (Franche-Comté et Lorraine) et les partenaires impliqués. La liste avec les attributions figure en annexe 2.

Le Banc ECCE est innovant dans de nombreux domaines, niveau de tension du bus continu, production d'énergie, motorisation, ... Le caractère mobile du Banc ECCE même sur un circuit d'essai privé, impose de satisfaire la réglementation, stabilité, freinage, accessoires, sécurité, ... La motorisation électrique sur les quatre roues permet la mise en œuvre de techniques telles que l'ABS ou l'ESP. La gestion de l'énergie prend en compte les trois types de sources et la récupération au freinage.

La structure modulaire a été voulue pour faire du Banc ECCE un réel laboratoire mobile à échelle 1 et ainsi tester, par exemple, différents types de motorisation à la manière d'un échange standard. Tout a été pensé pour que la structure admette tant sur le plan mécanique que sur les plans électrique et commande

d'autres composants tels que des moteurs à réluctance à champ transverse ou des moteurs roues à réducteur intégré ou d'associer d'autres sources pour la fourniture énergétique. Dans la phase 2 actuellement en cours, trois nouvelles sources d'énergie électrique sont testées. Il s'agit de sources, impulsionsnelles et transitoires (supercondensateurs, alternateur inertiel) et permanentes (générateur à aimant permanent, générateur à pile à combustible PEMFC). Les partenaires de cette phase 2 qui fait l'objet d'un contrat DGA sont précisés en annexe 3.

Le Banc ECCE permet d'étudier toute la problématique des véhicules hybrides du type série avec plug-in. L'expérience acquise est mise à profit pour d'autres véhicules hybrides civils (liaison par la route) ou militaires ou pour développer la notion de poutre énergétique.

2. Description du Banc ECCE

Le Banc ECCE a été conçu pour tester différentes solutions de génération et de stockage d'énergie électrique, diverses solutions de motorisation, mais également différentes solutions de gestion temps réel des flux énergétiques. Seul le véhicule hybride série permet cette souplesse. Les contraintes de masse et de volume sont au second plan (il s'agit, faut-il le rappeler, non pas d'un véhicule au sens classique du terme, mais plutôt d'un laboratoire mobile) ce qui a conduit à une structure de véhicule lourd pour pouvoir placer tous les équipements. Les puissances mises en jeu doivent donc également être en conséquence. S'agissant d'un banc de test roulant, donc supposé évoluer en conditions réelles d'usage, le véhicule doit posséder tous les équipements de sécurité que l'on trouve habituellement sur un poids lourd.

La structure est organisée autour de deux longerons sur lesquels sont boulonnés les différents ensembles mécaniques. Les suspensions sont

pneumatiques. Le volume utile est partagé en deux parties, l'une pour loger les groupes électrogènes et l'autre avec les équipements électriques (convertisseurs, protections, dispositifs de gestion d'énergie et de pilotage). Les accumulateurs sont logés en dessous de ces volumes.



Figure 1 : vue du Banc ECCE

2.1. Schéma de principe

Le schéma de principe de la figure 2 détaille les différents sous-ensembles qui seront détaillés plus loin. Le choix s'est porté sur une structure à quatre roues indépendantes donc sans liaison mécanique entre elles. La puissance nominale aux roues est de 4x30 kW. Pour avoir également de la souplesse au niveau de la génération, la solution retenue est, dans une première architecture étudiée, composée de deux groupes électrogènes entraînés par des moteurs diesel du commerce.

Les deux fonctions intitulées auxiliaires et cœur sont indispensables au bon fonctionnement du véhicule pour alimenter des composants tels que les pompes et pour définir les consignes à appliquer à la génération d'énergie et aux motorisations.

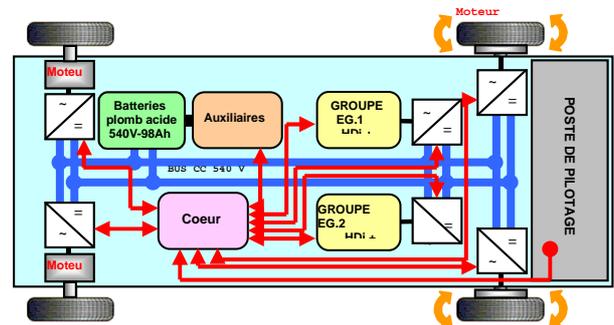


Figure 2 : Schéma de principe du Banc ECCE

2.2. Caractéristiques électriques du Banc ECCE et schéma unifilaire

Un point fondamental est le niveau de tension du bus continu sur lequel sont connectés tous les équipements. Le choix s'est porté sur une tension normalisée non pour les véhicules électriques ou hybrides où les tensions peuvent être extrêmement variables mais en avionique. La tension de 270 volts se développe de plus en plus sur les avions militaires et civils. Le bus continu a donc été choisi à $\pm 270V$. La tension de 540V correspond au 230/400V alternatif redressé. La tension du bus continu est fixée par les batteries et peut donc varier entre 430 et 620 volts. Pour éviter tout problème d'instabilité, les générateurs sont pilotés en courant.

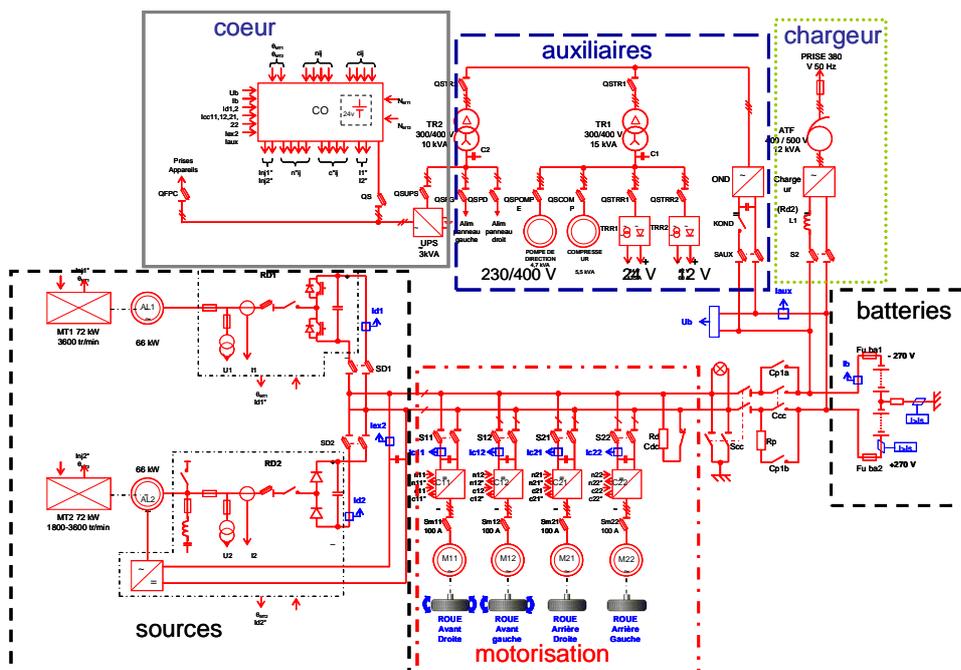


Figure 3 : Schéma unifilaire du Banc ECCE

Le schéma unifilaire de la figure 3 met en évidence les différentes protections et les sécurités qu'il a fallu mettre en œuvre. On peut noter en particulier les disjoncteurs pour relier les deux bornes du bus lorsqu'il est déconnecté des batteries et le système de recharge des capacités des convertisseurs. Le système ne peut fonctionner sans les batteries même si les générateurs fournissent la puissance nécessaire pour la motorisation et les auxiliaires.

Les caractéristiques des éléments principaux sont données dans l'annexe 1.

2.3. Fonction génération et stockage de l'énergie

Les deux générateurs sont entraînés par des moteurs diesel dont seule la commande a été modifiée pour que le point de fonctionnement (vitesse, couple) soit défini par le cœur. Le premier groupe électrogène tourne à la vitesse constante de 3600 tr/min. L'alternateur d'une puissance de 66kW, est à aimant permanent et le redressement est nécessairement commandé.

Le deuxième groupe fonctionne entre 1800 et 3600 tr/min ; la génératrice de puissance égale à 66kW est une machine dite généralisée¹. Elle est triphasée au stator et au rotor et le contrôle de la tension et de la fréquence au stator est obtenue en modifiant le courant rotorique en fréquence et en amplitude via un convertisseur DC-AC.

Les deux machines sont pilotées en courant continu de sortie. Les consignes peuvent être liées à une optimisation globale de la consommation en carburant pour une puissance totale demandée par la motorisation, les auxiliaires et la batterie.

Eu égard à la quantité d'énergie nécessaire et au coût des batteries, le choix s'est porté sur des batteries au plomb type énergie. 90 éléments (6V ; 98Ah) ont été mis en série pour former deux groupes et le point commun est relié à la masse du châssis. Les batteries imposent le courant maximal (462A ; 1min) dans les charges et le courant de recharge (20A) pour garantir une durée de vie satisfaisante.



Figure 4 : Implantation des batteries

¹ Ce type de machine est utilisé de plus en plus dans les éoliennes

2.4. Motorisation

Chaque roue dispose d'un convertisseur alimentant un moteur pour sa propulsion en attaque directe. S'agissant d'un banc de test mobile, les quatre moteurs sont de nature différente mais avec la même puissance nominale de 30kW. Ainsi on a à l'avant, un moteur roue à aimants permanents avec une commande sinus et un moteur roue à aimants permanents à commande trapèze. Les aimants de ces moteurs sont montés en surface. A l'arrière on dispose d'un moteur asynchrone avec une commande vectorielle et d'un moteur synchrone à griffes à commande sinus. Les convertisseurs sont adaptés au type de moteur, seul est défini le niveau de commande en couple donc en courant.

Ce sont les moteurs avant qui ont les meilleures performances en particulier pour le couple de démarrage qui atteint 6 fois le couple nominal de 700N.m. Ces moteurs avant sont refroidis à l'huile au niveau des chignons.

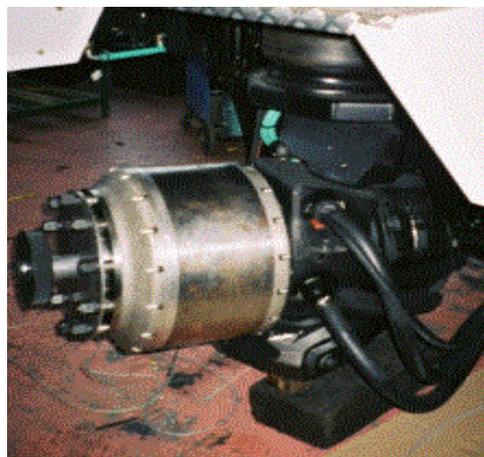


Figure 5 : Moteur roue à aimants permanents

2.5. Auxiliaires

Certains auxiliaires sont indispensables pour le véhicule comme la pompe de direction, l'assistance de freinage, la suspension, ... D'autres sont liés à la partie électrique. Les convertisseurs et certains moteurs sont refroidis à l'eau ou à l'huile, d'autres à l'air, d'où la nécessité d'alimenter toutes ces pompes. Le choix s'est porté sur des constituants industriels alimentés en triphasé sous 400V. Un réseau alternatif 230/400V 50Hz a été créé, à partir de la batterie. Les tensions de 12V et 24V spécifiques aux poids lourds sont obtenues à partir de ce réseau alternatif. La consommation des auxiliaires est loin d'être négligeable puisqu'elle est de l'ordre de 20kW suivant le point de fonctionnement.

Un réseau indépendant a été conçu pour une alimentation sans coupure sur laquelle est connecté le cœur.

Le chargeur intégré au véhicule est constitué d'un autotransformateur et d'un convertisseur AC-DC dont la tension est contrôlée lors de la charge des batteries à partir d'un réseau triphasé classique 230/400V.

2.6. Gestion de l'énergie

La gestion de l'énergie a un double rôle : maintenir les batteries dans un état de charge adéquat de telle manière que l'énergie récupérée au freinage puisse être absorbée et définir les consignes en courant des deux alternateurs et par voie de conséquence les consignes d'injection pour les moteurs diesel d'entraînement. Le freinage électrique (actionné dans une première phase lors d'une action sur la pédale de frein) nécessite que la batterie ne soit pas totalement chargée car il n'a pas été prévu de résistance de freinage. Ainsi le SOC doit être maintenu entre 40 et 80%. Les courants de consigne I_{d1} et I_{d2} des deux alternateurs sont définis par une optimisation à partir des puissances demandées par les moteurs de propulsion et les auxiliaires, la tension du bus continu est connue à chaque instant.

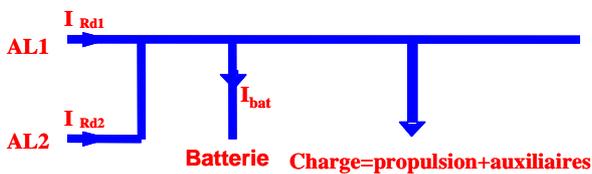


Figure 6 : Définition des courants de charge

Connaître l'état de charge de la batterie n'est pas chose facile car elle dépend de la température, de l'état initial et de la quantité de charge échangée et ce à chaque instant. La tension à vide et la température moyenne des batteries (avant toute opération) constituent les données initiales. La charge échangée est obtenue par intégration du courant de batterie.

2.7. Pilotage du Banc ECCE

Le deuxième rôle du cœur est de définir à chaque instant les consignes de couple des moteurs de propulsion. Ce point est complexe car il faut recréer un différentiel sous forme électronique. Les contraintes sont les mêmes que pour un différentiel mécanique : même couple sur un même essieu. De plus on ne dispose pas de la vitesse du véhicule ; on ne connaît que les vitesses de rotation des moteurs quelle que soit l'adhérence des roues. La vitesse du véhicule est obtenue grâce à l'utilisation de la logique floue sachant qu'une roue qui patine n'oppose qu'un couple résistant faible.

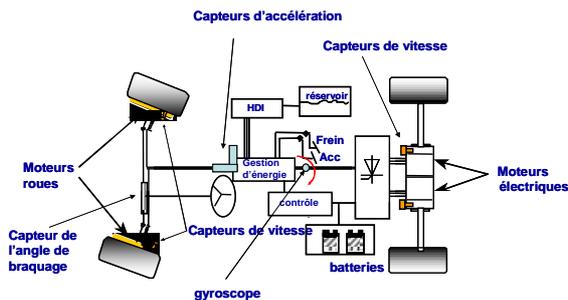


Figure 7 : Capteurs servant au pilotage du Banc ECCE

Le contrôle de chaque roue permet de mettre en œuvre l'ABS ; il en est de même pour l'ESP et le contrôle de trajectoires. Des capteurs complémentaires à celui de l'angle de braquage et aux capteurs de position des moteurs synchrones sont alors nécessaires comme des accéléromètres suivant les deux axes du véhicule.

2.8. Aspects sécurité et protections

La sécurité de fonctionnement est un point très délicat car il faut d'une part veiller à protéger les personnes et en particulier le conducteur, assurer les fonctions normales de conduite et protéger le matériel contre les défauts. Les fonctions de sécurité classique de tout véhicule lourd comme le freinage respectent les règles en vigueur. Le frein de parking est indépendant alors que le freinage électrique intervient avant le freinage mécanique qui est seul à même d'arrêter le véhicule. Les éclairages sont en tout point conformes aux normes.

La mise en œuvre au démarrage et à l'arrêt sont confiées à un automate piloté par le cœur de telle manière que le conducteur ne puisse faire une mauvaise manipulation tout en étant libre de choisir le type de motorisation, roues avant, roues arrière ou quatre roues. Il faut à titre d'exemple au démarrage prendre les mesures des conditions initiales de la batterie, définir si on est en mode zéro émission (si le niveau de la batterie le permet) ou non, charger les condensateurs des convertisseurs, vérifier les états des groupes électrogènes. Les phases de démarrage et arrêt du (des) groupe(s) électrogène(s) sont automatisées. A la mise à l'arrêt, il faut veiller à ce qu'un opérateur puisse intervenir en toute sécurité et donc que les condensateurs soient déchargés et que le bus soit court-circuité.

Le câblage et les protections respectent les normes même s'il n'y a pas pour le moment de textes spécifiques pour les véhicules électriques et hybrides de ce type.

Un autre point délicat concerne les protections contre les courts-circuits. Chaque équipement est protégé par des fusibles. Une mise à la terre en un point quelconque du circuit électrique doit être immédiatement détectée. Le point milieu des batteries n'est pas mis directement à la masse du véhicule mais à travers une résistance calibrée et dimensionnée suite à une large série de simulations. Il faut enfin que les perturbations conduites et rayonnées des différents convertisseurs ne puissent influencer la commande et les mesures.

2.9. Exemple d'essais

Dans l'exemple présenté sur la figure 8, nous utilisons la stratégie de gestion d'énergie préconisée pour optimiser la consommation et les groupes électrogènes sont pilotés par le cœur. Le cycle d'essai est constitué d'une montée en vitesse jusqu'à 40km/h environ suivie d'une décélération puis à nouveau d'une phase d'accélération.

De $t=0$ à $t=7s$ seul le générateur 1 fonctionne ; le courant de batterie augmente lentement (I_b est compté positif quand la batterie reçoit du courant). A $t=7s$, le calculateur donne l'ordre de démarrer le générateur 2 et le courant dans la batterie s'annule. A $t=12s$ les deux générateurs atteignent leurs valeurs limites (fixées ici arbitrairement pour l'essai) ; la batterie fournit le complément nécessaire.

A partir de $t=28s$ la pédale d'accélération est relâchée progressivement ; le courant batterie diminue puis les générateurs 2 et 1 sont arrêtés respectivement à $t=32s$. La batterie se recharge légèrement. La deuxième phase d'accélération débute à $t=42s$. L'ordre de démarrer les deux générateurs intervient rapidement et ils prennent le relais de la batterie.

Nous n'avons présenté ici qu'une série d'essais mais ceux-ci peuvent être extrêmement variés sachant que tous les paramètres peuvent être modifiés à volonté pour un fonctionnement donné. Ces essais ont été réalisés sur un circuit privé sachant que le véhicule ne peut être homologué.

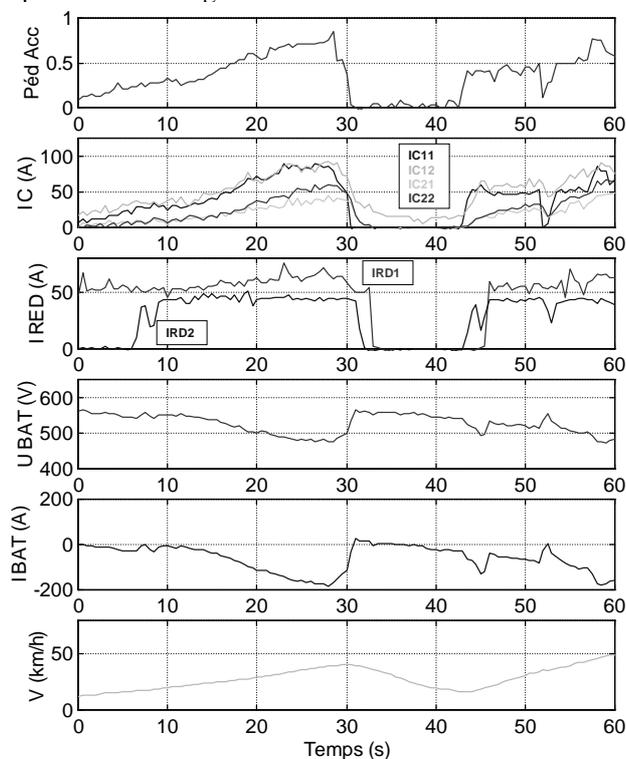


Figure 8 : Enregistrement durant une phase d'essais : pédale d'accélérateur, les 4 courants des convertisseurs moteurs, les courants délivrés par les générateurs, tension et courant de batterie, vitesse du banc ECCE

3. Banc ECCE Phase 2

La phase 1 a montré la faisabilité, la modularité et l'efficacité du Banc ECCE. Dans une deuxième phase, l'objectif est de tester différentes sources complémentaires respectant la règle des 3E :

- source permanente, pile à combustible
- source transitoire, alternateur inertiel
- source impulsioennelle, supercondensateurs

Cette deuxième phase qui est encore en cours, fait l'objet d'un contrat avec la DGA. Les partenaires sont précisés dans l'annexe 3.

La mise en place de ces 3 sources ne peut se faire simultanément sauf pour les supercondensateurs qui sont localisés en dessous des batteries. Eu égard aux délais entre les deux phases, il a été nécessaire de faire un upgrade du cœur, de remplacer les batteries et d'assurer une maintenance approfondie des différents organes.

3.1. Générateur Pile A Combustible (PAC)

Le programme générateur pile à combustible a été couplé avec le projet SPACT80². Le système pile à combustible est composé de 2 stacks de type PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) de 110 cellules de surface active 760 cm². Chaque PAC est alimentée en air et hydrogène. Un contrôleur interne gère le système PAC dans son ensemble (stacks, compresseur d'air, débitmètre, vannes...etc). Le refroidissement est à eau et les échanges de chaleur avec l'extérieur se font par l'intermédiaire d'un échangeur air-eau. La PAC est connectée au bus de 540V via un convertisseur DC/DC.

Sur la figure 9 on aperçoit à gauche le système PAC et au milieu les échangeurs eau-air pour le refroidissement (en effet, bien que le rendement électrique d'une pile à combustible soit très élevé, près de 50% de l'énergie produite l'est sous forme thermique). L'alimentation en hydrogène est obtenue au moyen d'un cadre de 6 bouteilles d'hydrogène comprimé (200 bars) installé à l'arrière des échangeurs. Des capteurs d'hydrogène ont bien entendu été installés pour garantir la sécurité en cas de fuite.



Figure 9 : Vue sur la PAC installée sur la plateforme du Banc ECCE

La figure 10 montre que le courant délivré par la PAC suit parfaitement la consigne délivrée par le cœur. Dans cet essai, la PAC fournit une puissance de 35kW au niveau du bus continu.

² Programme financé par l'ANR qui associe Héliion, FEMTO-ST, CEA, GREEN, INRETS, SNCF et DGA

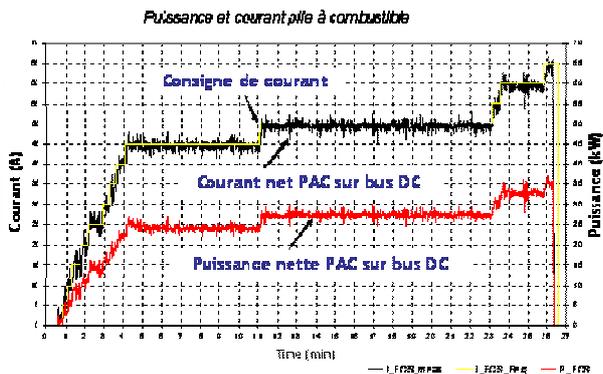


Figure 10 : Courant et puissance délivrés au niveau du bus continu du Banc ECCE

3.2. Supercondensateurs

Les supercondensateurs permettent de stocker de l'énergie et de la restituer très rapidement. Ce sont donc des éléments de stockage d'énergie de type impulsif. Les deux packs de 30F supportant chacun une tension de 270V sont mis en série et connectés au bus continu au moyen d'un convertisseur DC/DC. Les packs sont conditionnés avec les systèmes d'équilibrage et de refroidissement. Un échangeur de chaleur externe est nécessaire.



Figure 11 : Vue sur des supercondensateurs

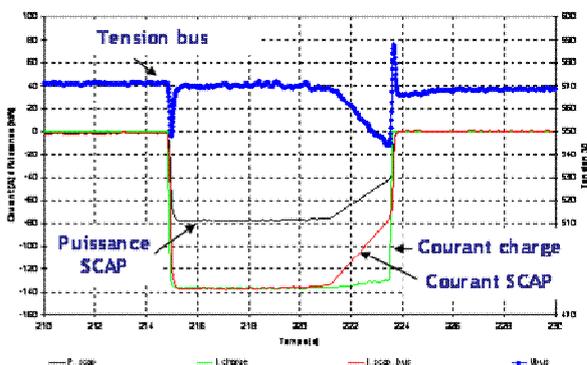


Figure 12 : Réponse à un créneau de puissance de 80kW

L'énergie stockée dans les supercondensateurs est suffisante pour maintenir la tension du bus continu suite à un appel de puissance de 40kW pendant 9s. Le pic de tension du bus est inférieur à 10V sur les fronts positif et négatif. Comme le montre la figure 12, suite à

un créneau de puissance de 80kW, la tension du bus commence à chuter au bout de 6s. Le temps de réponse du système supercondensateurs est estimé à 60ms.

Dans une phase d'essai actuellement en cours, le comportement en phase de roulage de PAC et supercondensateurs d'une part et alternateur à aimants permanents et supercondensateurs d'autre part est étudié.

3.3. Alternateur inertiel

Les systèmes de stockage inertiels posent toujours des problèmes pour des véhicules en raison des effets gyroscopiques. Une solution classique consiste à utiliser un montage à cardan. Nous testons ici une autre solution avec deux alternateurs rapides en contrarotatifs. Ils sont entraînés par un moteur diesel. En raison de la très forte inertie, une boîte de vitesse est insérée pour le démarrage. Les vitesses nominales des alternateurs sont de 30 000tr/min et la puissance nominale est de 60kVA. Eu égard aux grandes vitesses, des protections mécaniques sont indispensables. Cette phase est la dernière à être mise en œuvre dans le projet.

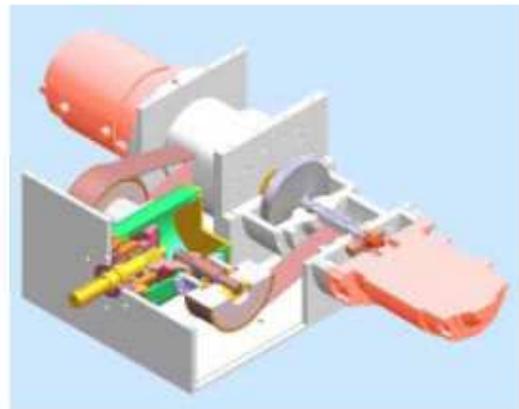


Figure 13 : Alternateurs inertiels contrarotatifs

3.4. Conclusion

Cette phase 2 du Banc ECCE est parfaitement complémentaire avec la première. L'accent était mis dans la première phase sur différentes motorisations et sur des sources en régime permanent. Dans cette deuxième phase, nous mettons en évidence l'intérêt des sources transitoires et impulsives. Les générateurs pile à combustible ne peuvent encore rivaliser avec les générateurs classiques en raison de la complexité du système et des limites actuelles pour le stockage d'hydrogène.

4. Les petites sœurs d'ECCE

Les véhicules hybrides, quelle que soit leur architecture, nécessitent des composants électriques pour la motorisation, pour le stockage de l'énergie et la commande. Il n'y a pas de solution unique ; il était donc intéressant d'en tester un certain nombre sur le

banc ECCE mais également dans le cadre d'autres projets.

4.1. Les développements induits par ECCE

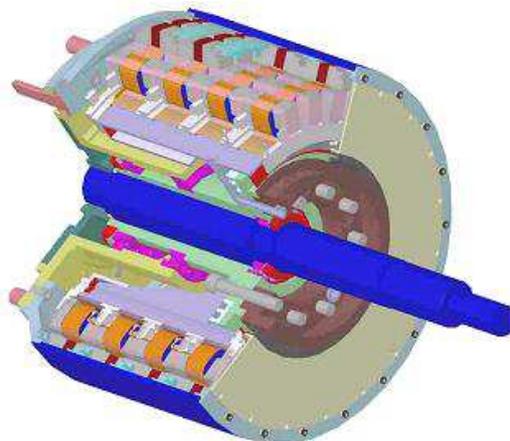


Figure 14 : Moteur à réluctance à flux transverse

ECCE a permis de tester les performances de quatre types de motorisations. D'autres configurations ont été étudiées avec les mêmes contraintes de volume, de tension d'alimentation, de puissance et de vitesse. Deux moteurs méritent d'être signalés. Le premier est un moteur roue à réducteur intégré. La vitesse élevée de rotation du rotor permet de réduire la taille du moteur et de loger dans le même encombrement un réducteur. La deuxième est un moteur type vernier à double réluctance avec excitation assurée par des aimants. Le trajet du flux est transverse ce qui complique beaucoup la réalisation. Le volume d'aimants est plus faible que pour le moteur roue décrit au § 2.4 mais la saturation des circuits magnétiques diminue fortement l'effet de réluctance et donc le couple maximum. Par contre la disposition permet d'augmenter la puissance en ajoutant des galettes élémentaires.

4.2. PLATHEE

Les locomotives hybrides de type série sont utilisées depuis fort longtemps mais le moteur diesel, dimensionné pour un trafic en ligne, est très polluant à faible vitesse comme pour des opérations de triage. La solution de locomotive hybride avec système de stockage et groupe électrogène de faible puissance est une solution. La SNCF a initié un projet appelé PLATHEE³ sur la base d'une locomotive de triage avec un groupe électrogène de faible puissance connecté sur un bus continu à 540V. Des batteries et des supercondensateurs sont utilisés pour fournir l'énergie transitoire et l'énergie impulsienne. La pile à combustible du programme SPACT80 a été testée dans le cadre de ce programme mais avec des contraintes différentes d'ECCE.

4.3. Notion de poutre énergétique

La notion de poutre énergétique est liée aux sources. Il s'agit de regrouper dans un ensemble modulaire des sources permanente, transitoire et impulsienne sous des tensions normalisées pour alimenter des charges diverses. Une gestion intelligente de l'énergie permet de réduire le dimensionnement des composants dans le cas d'utilisations intermittentes.

4.4. PHEBUS

Le programme PHEBUS⁴ consiste à hybrider un quadricycle lourd. Par rapport au véhicule initial, l'avant est inchangé mais le moteur thermique est de puissance plus faible. Les moteurs électriques du type moteur roue, sont placés sur l'essieu arrière ce qui conduit à faire un couplage par la route. Il s'agit d'un full hybrid plug-in suivant la terminologie classique. Le fonctionnement à zéro émission est prévu pour la ville. La motorisation électrique peut servir de boost. La récupération de l'énergie au freinage est faite au moyen de supercondensateurs. La gestion de l'énergie pilote l'ensemble du fonctionnement du véhicule.

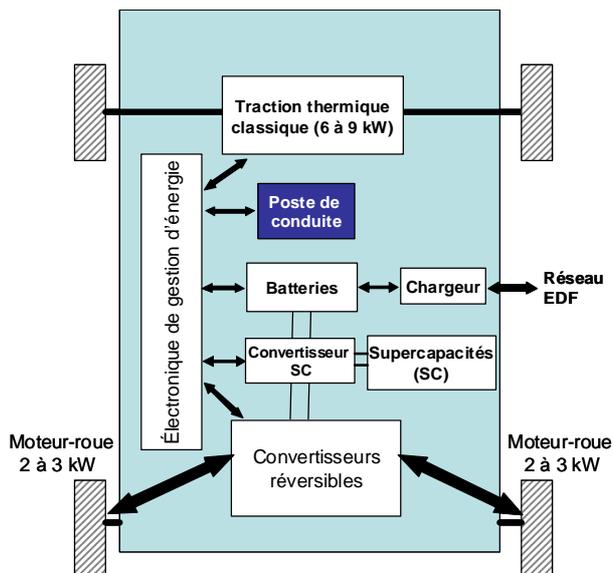


Figure 15 : Architecture du véhicule hybride PHEBUS

5. Conclusion

Le Banc ECCE constitue un ensemble extrêmement intéressant par ses possibilités de tests en conditions réelles de fonctionnement. Il permet également d'étudier la fiabilité des différents composants. Les points faibles sont d'une part au niveau de certains convertisseurs qui n'avaient pas nécessairement été conçus pour un fonctionnement roulant et d'autre part les connexions qui subissent également des contraintes fortes.

Le travail de partenariat a été remarquable et a permis de développer des solutions originales

³ Labellisé par le PREDIT

⁴ PHEBUS associe les sociétés AIXAM, Novelté Système, CIRTEM, NSI et le laboratoire FEMTO-ST. Le projet est labellisé par le PREDIT et financé par l'ADEME.

susceptibles d'être reprises sur d'autres projets comme en témoignent les projets ultérieurs.

La phase 2 est encore en cours mais elle montre d'ores et déjà l'intérêt de certaines sources même si, comme la pile à combustible, elles ne sont pas encore susceptibles d'être mises en œuvre sur des applications commercialisables.

Bibliographie

- [1] D. Diop, "Contribution à la gestion d'énergie d'une plate-forme mobile d'essais de constituants d'une chaîne de traction électrique," Thèse de l'Université de Franche-Comté, juin 2004
- [2] A. de Bernardinis, "Etude et optimisation d'un ensemble alternateur à aimants / redresseur commandé. Application à un véhicule hybride", Thèse de l'INPL, Décembre 2000.
- [3] H. Godfroid, A. Mirzaian, D. Ramuz, "Machine synchrone pour procédés exigeants", Revue Internationale de Génie Electrique, HERMES editing, volume n° 1, 1998.
- [4] R. Pusca, "Contribution au pilotage d'une plate-forme mobile d'essais de constituants d'une chaîne de traction électrique", Doctorate Thèse de l'Université de Franche-Comté, décembre 2002.
- [5] C.Espanet, J.-M.Kauffmann, R.Bernard, "Comparison of Two In-Wheel Permanent Magnet Motors for Military Applications", *VPPC'2006, IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference*, Windsor, England, septembre 2006 6 pages
- [6] R.Pusca, Y.Ait Amirat, A.Berthon, J.M.Kauffmann; Control applied to hybrid electrical vehicle with four separate wheel s drives. Fuzzy estimator of vehicle speed. *Vehicular Technology Conference 2001*, Atlantic City, October 8-10, 8 pages
- [7] C.Espanet, M.Tekin, R.Bernard, A.Miraoui, J.M.Kauffmann; A new structure of high torque motor destined to be integrated in a wheel, *5th International AECV Conference*, Angers, 2-5 june 2003 pp 19
- [8] K.El Kadri, A.Berthon "Modeling and simulation tool of a dual power energy system for hybrid vehicle design", *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, Vol. 1 N. 3, pp 363-373, ISSN 1827-6660, July-August 2006
- [9] El Kadri Khadija «Contribution à la conception d'un générateur hybride d'énergie électrique pour véhicule : modélisation, simulation, dimensionnement» Thèse de l'Université de Franche-Comté, 27 novembre 2006
- [10] K. El Kadri, A. Berthon, J.M. Kauffmann, M. Amiet, "Simulation and test of a modular platform hybrid vehicle", 4th Symposium Hybrid Vehicles and Energy Management, Braunschweig, Allemagne, Feb. 2007 PP187-206 ISBN 9783937655109..
- [11] Mulot, J., Harel, F., Bégot, S., Hissel, D., Rodet, I., Boblet, S., Amiet, M., "Fuel cell system integration into a heavy-duty hybrid vehicle: preliminary experimental results", *IEEE VPPC'10 Vehicular Power Propulsion Conference*, CD-ROM, 5 p., Lille, France, 2010.
- [12] Solano, J., Hissel, D., Péra, M.C., Amiet, M., "Practical Control Structure of a Heavy Duty Hybrid Electric Vehicle", *IEEE VPPC'10 Vehicular Power Propulsion Conference*, CD-ROM, 8 p., Lille, France, 2010.
- [13] Jevvrey, J., Harel, F., Bégot, S., Hissel, D., Rodet, I., Faure, V., Boblet, S., "Fuel cell system integration on a heavy-duty vehicle and development of a control strategy with real-time simulation", *IEEE VPPC'09 Vehicular Power Propulsion Conference*, CD-ROM, pp. 704-710, Dearborn, USA, 2009.

Annexe 1 : Les caractéristiques principales du Banc ECCE

Les caractéristiques du Banc ECCE sont les suivantes ::

- Masse t : 13 tonnes,
- longueur: 6.2m, largeur: 2.24m, hauteur: 3.65m
- Vitesse maximale : 90 km/h

- Suspension pneumatique à correcteur d'assiette
- Jantes de 22"5
- 4 freins à disque à commande pneumatique
- Contrôle de trajectoire avec ESP, anti-patinage et ABS. .
- Bus continu : $\pm 270V$
- Batteries : 90 éléments de 6V et 98Ah
- Moteurs diesel HDI de 75kW
- Alternateurs de Puissance nominale 66kW
- Alternateur à aimants permanents 3600tr/min
- Machine généralisée de 1800 à 3600tr/min,
- Transformateurs pour les auxiliaires : 15 et 10kVA
- Autransformateur pour la recharge sur le secteur : 12kVA
- Cœur : système dSpace et automate TSX3708
- Supercondensateurs : 2 packs de 30F sous 270V
- Pile à combustible : 2 stacks PEMFC de 110 cellules chacun ; surface active : 760 cm² / cellule

Annexe 2 : Les partenaires de la phase 1

La gestion administrative a été assurée par le Créébel (Centre de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Belfort) alors que la responsabilité scientifique et technique avait été confiée à Alstom Power Conversion qui s'appelle maintenant Converteam et à la DGA.

Les différentes tâches ont été réparties comme suit :

- conception et réalisations mécaniques, SNAA-AUVERLAND devenu Panhard ;
- Bus continu et cœur : L2ES (Laboratoire Systèmes, Electrotechnique et Electronique) à Belfort, qui fait partie maintenant de FEMTO-ST ;
- Conception des moteurs, L2ES, Novelté Système (Belfort) et Alstom Power Conversion (Nancy) ;
- Réalisation des machines tournantes : Alstom Power Conversion (Nancy) et CEN (Nancy) ;
- Alternateur à aimant permanent et convertisseur associé : GREEN (Groupe de Recherche en Electronique et Electrotechnique de Nancy), CEN ;
- Convertisseurs des moteurs avant, GREEN
- Alternateur à vitesse variable, Alstom Power Conversion (Belfort) et L2ES ;
- Gestion de l'énergie, INRETS (LTE - devenu aujourd'hui IFSTTAR) et L2ES ;
- Protections et sécurité, SNAA, Alstom Power Conversion (Belfort) et L2ES ;
- Essais, L2ES.

Le financement a été assuré par la DGA, les Régions de Franche-Comté et Région Lorraine (CR, CG Meurthe et Moselle et District Grand Nancy) et les partenaires du projet

Annexe 3 : Les partenaires de la phase 2

Les partenaires de la phase 2 réunis autour de l'Université de Franche-Comté qui est propriétaire du banc ECCE sont FEMTO-ST, Panhard et Héliion (pour la partie PaC). La phase 2 fait l'objet d'un contrat DGA.