

La mesure au cœur du Challenge EducEco

Jean-Paul Chassaing

Inspecteur Général Honoraire Sciences et Techniques Industrielles

Patrick Lefort

Inspecteur Pédagogique Régional Honoraire Sciences et Techniques Industrielles

Cet article résume l'aventure du Challenge EducEco : la mesure d'énergie embarquée, sa transmission et son exploitation rapide.

Réaliser une course à la moindre consommation d'énergie sur un parcours authentiquement urbain a constitué la dernière évolution du Challenge EducEco en mai 2013 à Colomiers dans la Communauté urbaine de Toulouse Métropole. Une évolution qui a permis de faire partager la passion des équipes en direction du public spectateur pendant les trois journées de compétition. Enfin, cela a permis également d'attirer les médias car il ne suffit pas d'apporter la preuve que « ça marche » il faut aussi le faire savoir.



La mesure : une préoccupation constante dans le Challenge EducEco

Tout d'abord en établissement de formation, en amont du Challenge EducEco, au cours de la conception, de la fabrication et de la mise au point d'un véhicule présenté par chaque équipe, il s'agit de prédéterminer la performance susceptible d'être accomplie lors de la compétition. En effet, en fonction du niveau de formation, des outils informatiques et des bancs d'essais sont constitués. Il s'agit généralement d'opérer un aller retour entre, d'une part, un modèle physique plus ou moins élaboré avec des paramètres identifiés d'un ensemble véhicule, piste utilisée pour la course et stratégie de pilotage adoptée pour la conduite et, d'autre part, la mesure de la performance évaluée par un système de banc d'essai permettant d'apprécier par mesurages l'influence des paramètres sur les performances réalisées et tout particulièrement sur la consommation d'énergie.

Ensuite, au niveau des organisateurs du Challenge EducEco, il s'agit de mesurer avec rigueur, quel que soit le vecteur énergétique utilisé, la consommation d'énergie lors de chaque tentative des équipes, sur le parcours spécifié et pour une vitesse moyenne donnée de 25 km/h

sur circuit urbain. Cette mesure d'énergie recouvre plusieurs méthodes dont celles traditionnellement utilisées pour la consommation de carburants ou de gaz (méthode de mesure volumique avec correction de température et méthode massique par pesée au centième de gramme). C'est au niveau de la mesure d'énergie électrique qu'il a fallu innover dans le cadre d'un budget nécessairement contraint. L'utilisation d'un joulemètre avec pour cœur un composant de la société Eagle Tree, le eLogger V4® a fait l'objet de nombreux développements pour qu'il puisse être embarqué, paramétré et rendu directionnel en courant tout en étant susceptible d'être exploité rapidement pour communiquer l'information aux équipes via le poste de mesures au retour d'une tentative et remis à zéro au poste de départ d'une nouvelle tentative de l'équipe considérée.

Cette aventure de la mesure d'énergie embarquée pour le Challenge EducEco et de sa transmission rapide résume l'un des objets de nos préoccupations majeures. Des développements sont toujours en cours pour améliorer et fiabiliser les moyens de mesure en fonction, notamment, de l'amélioration constante des performances réalisées par les meilleures équipes et par le

Pédagogie

caractère asymptotique des performances enregistrées, tout particulièrement s'agissant de la catégorie prototype. Il s'agit ici de discriminer les meilleures équipes alors que leurs performances se rapprochent.

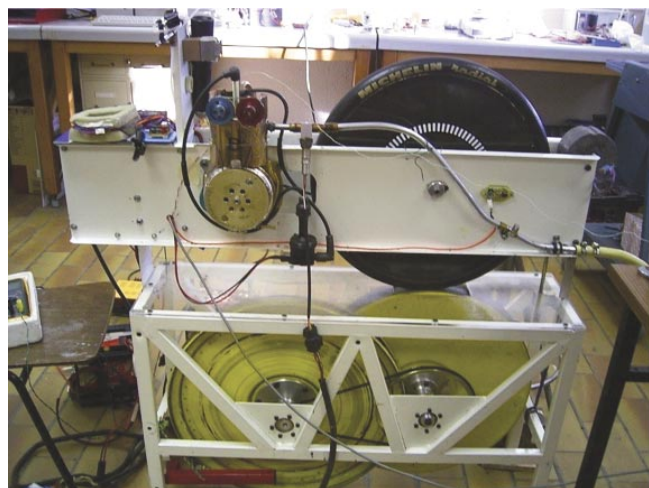
L'AD3E est parrainée par le Ministre de l'Éducation Nationale et l'avenir du Challenge EducEco est adossé à trois composantes essentielles de notre compétition éducative : la fidélité du cercle des partenaires de l'AD3E, la disponibilité et les compétences des 120 bénévoles qui participent à l'organisation et l'intérêt porté par les équipes pour participer et donner à voir les qualités de leurs projets en apportant la preuve que "ça marche".

Cet article serait incomplet si nous ne soulignons pas ici le rôle déterminant de la Société Chauvin-Arnoux qui, depuis l'organisation du premier Challenge EducEco, fait partie du Cercle des partenaires professionnels qui accompagne et soutient l'AD3E. La participation d'entreprises, comme sponsors ou mécènes, permet de financer une opération qui accueille sur cinq jours plus de 1000 participants (élèves, étudiants et professeurs) et qui concerne plus de 100 équipes.

Approche de la modélisation /simulation par les équipes

Cette approche peut se faire directement par modélisation informatique, c'est ce qui a été réalisé, par exemple, par l'équipe de l'École des Mines de Paris associée aux Lycées Louis Armand (de Paris & de Nogent sur Marne) avec le véhicule prototype à motorisation électrique : ICARE - N°29. Extrait du mémoire de projet de l'équipe à ce sujet page suivante.

Mais la simulation des performances escomptées peut aussi faire appel à un banc de test appareillé, permettant de multiples essais et la collecte de précieuses données. Le banc de l'équipe TIM de Toulouse Ingénierie Multidisciplinaire UPS / INSA / INP pour son véhicule TIM 05 à motorisation thermique, photographié ci-dessous, en est la parfaite illustration :



L'AD3E compte actuellement 120 bénévoles pour la gestion et l'encadrement du Challenge EducEco. Son siège social est basé à l'ENS de Cachan. En savoir plus sur le site : www.educeco.net

Catégorisation

Dans le challenge EducEco, depuis la compétition de Mai 2013, ne subsistent plus que deux catégories principales : les véhicules à motorisation électriques et les véhicules à motorisation thermique. Chacune de ces motorisations pouvant être déclinée en catégorie prototype, forme libre, et en catégorie éco citadin, de forme plus proche d'un véhicule d'usage courant (portière fonctionnelle, éclairage, marche arrière, avertisseur, rétroviseur, etc.). Par ailleurs, l'hydrogène est un vecteur d'énergie spécifique qui est en plein développement avec un record du monde battu en 2013 par l'équipe des étudiants de Polytechnique Nantes et des lycéens de la Joliverie avec le véhicule Cityjoule.

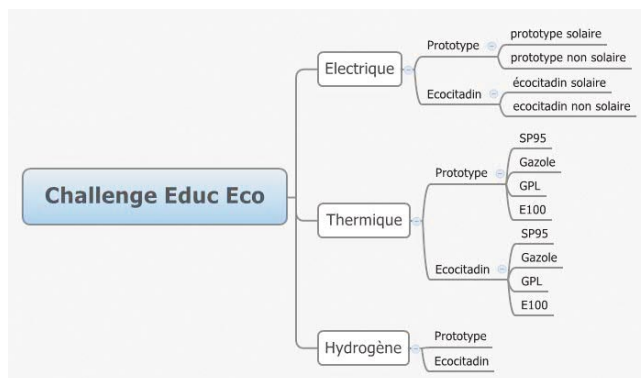
Avec la prise en compte des types de carburants, ce sont 14 catégories secondaires qui sont à gérer.



Groupe des véhicules Eco-citadins



Groupe des véhicules Prototypes



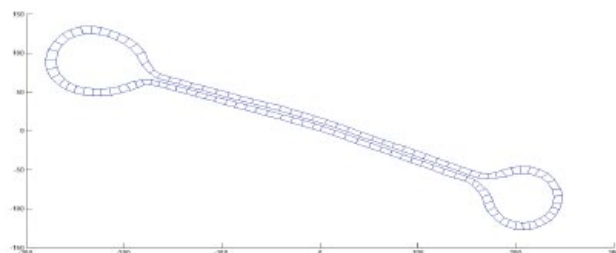
Extrait du mémoire « ICARE »

Pour cette partie il faut prendre en compte les caractéristiques de la voiture et du circuit. L'idée est d'arriver à trouver les vitesses en chaque point du circuit qui minimisent la consommation du prototype. Ce problème est en fait le problème de minimisation de l'énergie absorbée par le moteur (donc l'énergie tirée de la batterie) au cours de la course sous certaines contraintes.

- La contrainte $X=f(t)$ représente l'ensemble du comportement du véhicule. Il s'agit des équations de la dynamique et des équations électriques du moteur.
- La contrainte $V_{moy} = 25 \text{ km/h}$ impose la vitesse moyenne du moteur et $C < C_{max}$ et $U < U_{max}$ sont les contraintes d'utilisation (couple et tension de batterie bornés).
- Enfin les virages sont simplement modélisés comme étant les limites de vitesse, plus le virage est serré plus la vitesse limite est faible.

On résout ce problème en agissant sur la variable temps. On réalise une modélisation discrète du circuit en termes de distance. Le circuit proposé cette année une fois maillé a permis le maillage ci-après.

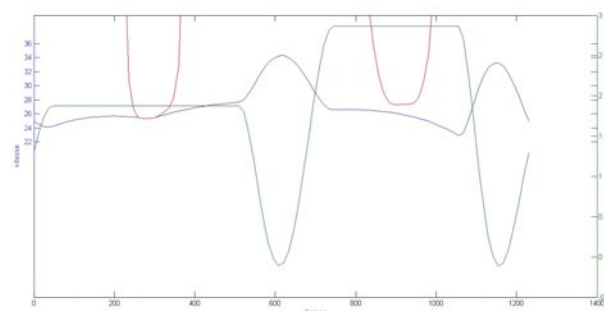
Toutes ces informations ont été intégrées sous la forme d'un programme Matlab. Le code généré définit un script (pric.m) et deux fonctions (myfunct.m qui calcule l'énergie consommée à chaque itération et cons.m qui donne les contraintes d'optimisation du système à chaque point). On obtient par exemple



comme résultat une courbe de vitesse en km/h pour des vitesses limites modélisant les virages et la pente sur un tour.

Résultats de la simulation sous Matlab

À noter, la simulation a été effectuée sans relevé exact de la topographie du circuit. Nous avons donc approximé les valeurs de pentes via Google Street View. Les vitesses maximales en virage sont dépendantes des caractéristiques prévues pour la voiture.



Véhicule thermique, calcul des consommations

La consommation est obtenue par la mesure du volume de carburant utilisé, en tenant compte des coefficients de dilatation volumique thermique des carburants, ceci par la mesure des températures à tout moment du process.

Pour cela, le circuit d'alimentation du véhicule étant rempli avec un volume VD (en ml) préalablement à l'épreuve, on refait le niveau par un volume Va (en ml) à l'arrivée. Un tableau de coefficient permet de ramener

les consommations des véhicules thermiques, quel que soit le carburant utilisé, à l'étalon choisi : le SP95 ceci en tenant compte des variations de températures.

(Tableau ci-dessous)

Pour ceux qui voudraient avoir le détail du calcul énergétique des véhicules thermiques, ils peuvent se référer à l'article suivant

<http://www.educeco.net/spip.php?article167>

Carburants	Masse volumique (kg/L) de référence (15°C°)	Pouvoir calorifique inférieur massique (kJ/kg)	Coefficient de dilatation volumique thermique
SP95	0,744	42 900	0,0012
Gazole	0,831	42 60	0,0007
Éthanol E100	0,79	26 900	0,0011
Diester	0,88	37 700	0,0007
GPL	0,55	46 000	
H2	0,0000846	119 930	

Pour des raisons d'équité et de sécurité, tous les carburants nécessaires sont fournis gracieusement aux compétiteurs par les organisateurs du challenge.

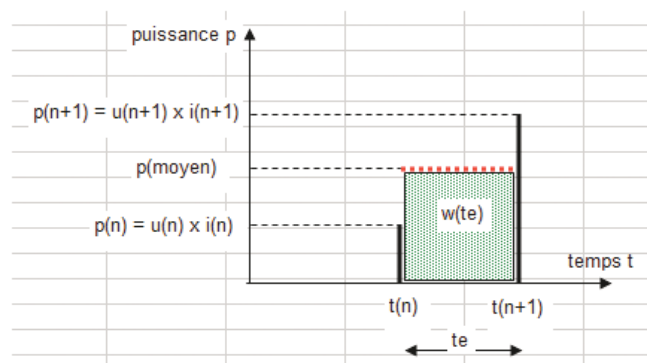
Véhicules électriques

Pour classer les candidats, il faut réaliser les mesures des énergies consommées et récupérées par les véhicules à motorisation électrique et les mesures des énergies fournies par les panneaux solaires.

Il s'agit de définir entre les deux méthodes possibles de traitement des données mesurées et de choisir la plus appropriée.

Calcul des consommations par la méthode de la puissance moyenne

Modèle de calcul de la puissance



Données

Réglée :

- fréquence d'échantillonnage

Mesurées :

- $u(n)$: tension mesurée au temps $t(n)$
- $i(n)$: courant mesuré au temps $t(n)$
- $u(n+1)$: tension mesurée au temps $t(n+1)$
- $i(n+1)$: courant mesuré au temps $t(n+1)$

Conséquentes :

- temps élémentaire d'échantillonnage : te
- $p(n)$: puissance au temps $t(n)$
- $p(n+1)$: puissance au temps $t(n+1)$
- $p(moyen)$
- $w(te)$: énergie élémentaire pendant le temps d'échantillonnage te

Calculs

Hypothèse : pendant un temps élémentaire d'échantillonnage on considère que la puissance est constante, de valeur $p(moyen)$.

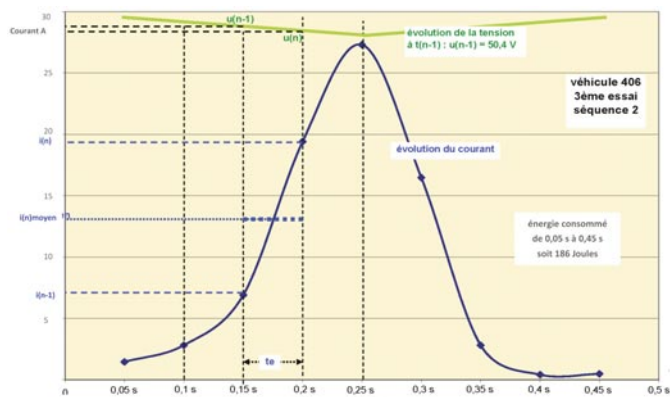
Calcul de l'énergie pendant le temps élémentaire d'échantillonnage te :

- $w(te) = p(moyen) \times te$
- w pendant te en J = $[[u(n) \text{ en V}] \times [i(n) \text{ en A}] + [u(n+1) \text{ en V}] \times [i(n+1) \text{ en A}]] / 2 \times te$ en s
- énergie cumulée à $t(n+1)$ = W cumulée à $t(n)$ + w pendant te

Nota : à $t = 0$: $w = 0$

Calcul des consommations par la méthode du courant moyen

Modèle d'évolution du courant et de la tension



Données

Réglée :

- fréquence d'échantillonnage

Mesurées :

- $u(n)$: tension mesurée au temps $t(n)$
- $i(n)$: courant mesuré au temps $t(n)$
- $u(n-1)$: tension mesurée au temps $t(n-1)$
- $i(n-1)$: courant mesuré au temps $t(n-1)$

Conséquentes :

- temps élémentaire d'échantillonnage : te
- $i(moy(te))$: courant moyen pendant te
- $w(te)$: énergie élémentaire pendant le temps d'échantillonnage te

Calculs

Hypothèses : les constituants d'alimentation (batteries, panneaux solaires) sont considérés comme des sources de tension. Les groupes moto-variateur sont considérés comme des sources de courant.

La structure modélisée est donc constituée d'une source de tension qui débite dans une source de courant.

Sur un temps $[te]$ la tension u est considérée comme constante et la commutation se fait sur fronts raides. Pour $[t(n-1) < te < t(n)]$, la référence tension est prise à $t(n-1)$ soit $[u = u(n-1)]$.

Le courant est linéarisé sur un temps élémentaire d'échantillonnage $[te]$, la valeur calculée est $[i(moy(te))]$.

Calcul de l'énergie pendant le temps élémentaire d'échantillonnage te :

- $w(te) = u(n-1) \times i(moy(te)) \times te$
- w pendant te en J = $[u(n-1) \text{ en V}] \times [[i(n-1) \text{ en A}] + [i(n) \text{ en A}]] / 2 \times te$ en s
- énergie cumulée à $t(n+1)$ = W cumulée à $t(n)$ + w pendant te

Nota : à $t = 0$: $w = 0$

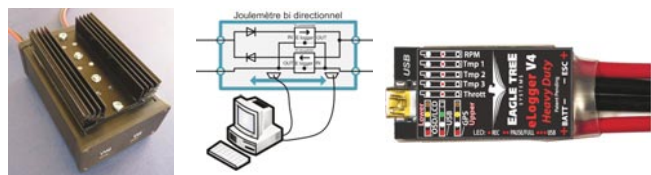
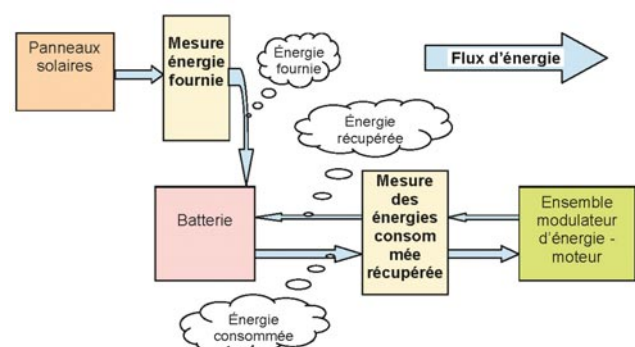
Choix de la méthode

Les calculs appliqués à plusieurs tentatives réalisées au Solar Race en Espagne montrent que le pourcentage d'écart entre les deux méthodes est inférieur à 1/100 donc non significatif. À partir des données échantillonnées du courant et de la tension issues des joulemètres, l'AD3E choisit la méthode du courant moyen qui est la plus rigoureuse pour le calcul de l'énergie consommée et récupérée par la chaîne de motorisation et fournie par les panneaux solaires.

Remarque : pour une heure de course avec un Data Logger paramétré à 20 Hz, le tableur choisi pour automatiser le calcul d'énergie doit pouvoir contenir $3600 \times 20 = 72\,000$ lignes

Mesure de W_c , W_r et W_f , utilisation de joulemètres

Le diagramme ci-dessous représente les flux d'énergie susceptibles de transiter suivant les structures des véhicules. Au maximum, trois flux.



Il est à noter que suivant les véhicules, l'ensemble modulateur d'énergie-moteur peut être unidirectionnel ou bidirectionnel. Toutes ces mesures seront effectuées par des joulemètres. Ceux retenus après de longues séances de mesures comparatives sont des productions propres à AD3E sur la base d'un MicroPower eLogger V4 USB® 70 V, 150 A version câble (MPRV4-LEADS-150) de la marque Eagle Tree. À ce eLogger ont été rajoutées deux diodes Shottky STTH6004W de chez ST de courant nominal 60 A montées sur un radiateur et un fusible type MaxiFuse® de 50 A.

La période d'échantillonnage choisie est de 20 Hz (10 Hz pour l'énergie solaire W_f). Les données récupérées par la prise USB sont traitées par le logiciel.

Influence de la structure et de la position des joulemètres

La nécessité de placer deux joulemètres dans certaines structures impose d'étudier l'influence de la position de ces joulemètres dans le dispositif. Les deux exemples ci-contre, pris parmi les 8 cas possibles, illustrent ces difficultés.

Conformité des véhicules

Pour des raisons de sécurité évidentes et d'équité entre candidats devant le challenge, un contrôle technique rigoureux est mis en place. Ce contrôle se déroule en deux étapes : la première consiste à vérifier les structures et organes de sécurité, le respect des règles imposées par le règlement (poids, dimensions, équipements, etc.), la deuxième est différenciée suivant la catégorie de motorisation et porte, pour les véhicules électriques, sur les caractéristiques de la chaîne de transmission.

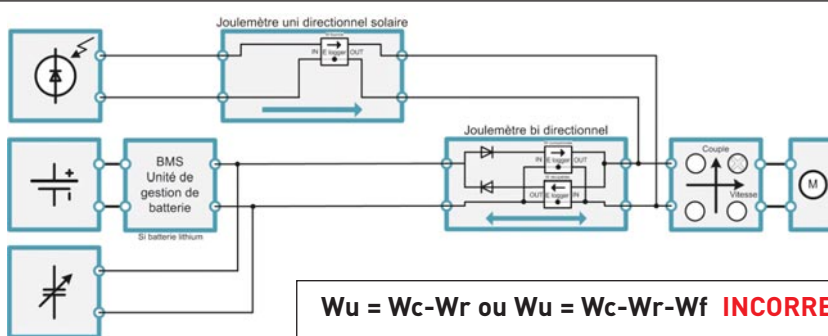


À chaque contrôle un sticker attestant la conformité est apposé sur la carrosserie du véhicule. En cas de non-conformité du véhicule, il peut être refusé définitivement ou renvoyé à son stand pour correction. Il peut se représenter au contrôle si l'anomalie est corrigée. Sinon il ne prendra pas le départ.

Voici deux photographies de motorisation électrique, prototype et écocitadin en cours de contrôle (ci-dessous et ci-contre).



Véhicule solaire, avec une non-réversibilité annoncée.



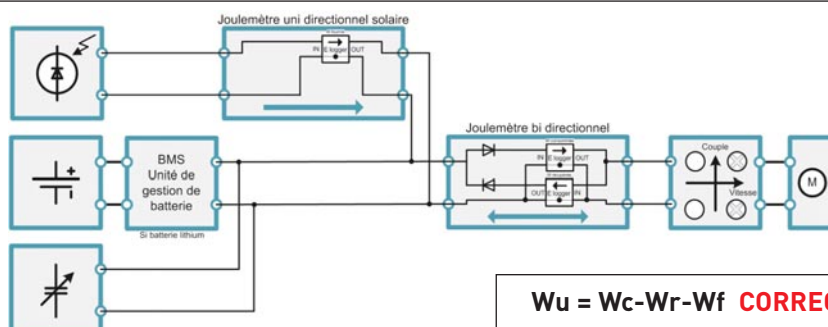
Montage d'un joulemètre **bidirectionnel**.

L'énergie électrique solaire est réinjectée en aval du joulemètre. La consommation W_c est mesurée ainsi que W_r avec W_f du panneau. Néanmoins s'il y a réversibilité en courant du moto-variateur, elle est permise puisque diode en inverse mais pas comptée et soustraite. Le véhicule est donc pénalisé sur ce point : « tant pis » il n'avait qu'à annoncer sa réversibilité.

Par contre l'énergie issue du solaire W_f - quand le moto-variateur n'est pas sollicité - remonte via la diode inverse vers la batterie, il ne faut pas la décompter deux fois (une fois comme W_f une fois comme W_r).

Toutefois en phase motrice, l'énergie fournie par le panneau participe à l'alimentation du moteur et améliore l'autonomie du véhicule : il faudrait décompter W_f dans ce quadrant.

Véhicule solaire, avec une réversibilité annoncée



Montage d'un joulemètre **bidirectionnel**.

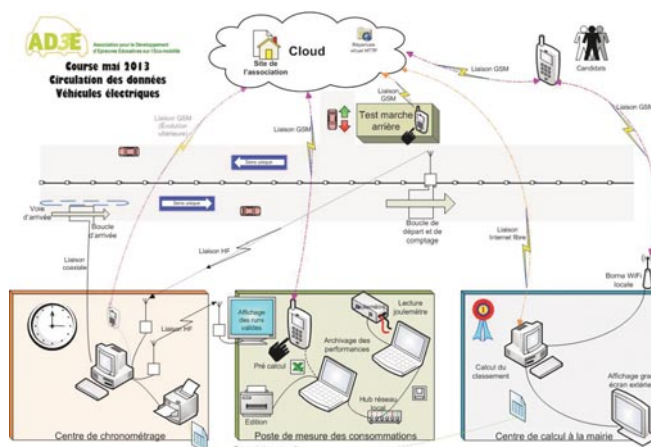
L'énergie électrique solaire est réinjectée en amont du joulemètre. La consommation W_c est mesurée ainsi que W_r avec W_f du panneau. Lorsque le moteur ne demande ni ne fournit du courant, le panneau solaire procure alors de l'énergie à la batterie, augmente l'autonomie du véhicule. Cette énergie est comptée W_f .

Lorsque le moteur demande du courant, celui-ci est fourni par la batterie (comptée W_c) et le panneau (comptée W_f).

La chaine de mesure au cours du challenge

Le classement est obtenu après la collecte de nombreuses informations. Si certaines sont de nature binaire (telle la réussite au test de la marche arrière pour les véhicules de la catégorie écocitadine) d'autres sont de nature numérique (consommation, vitesse moyenne, nombre de tours, temps de parcours etc.). La fiabilité des informations ainsi recueillies est inversement proportionnelle au nombre de traitements

manuels auxquels ils seront soumis. Ainsi il a été décidé, dès le challenge 2012, de minimiser autant que faire se peut les interventions manuelles sur la collecte, le traitement et la transmission de ces fichiers de données. De chaque poste technique les informations remontent au centre de calcul via le site internet de l'association. Le schéma suivant montre cette circulation des données.



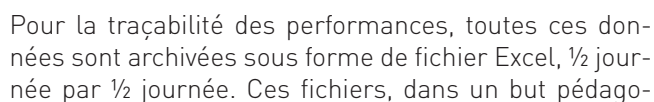
On voit sur ce schéma l'importance des communications et de leur sécurisation, traitées en temps réel, sous la pression - amicale - des compétiteurs.

On a vu qu'il faut mesurer l'énergie consommée mais aussi, éventuellement, les énergies générées par les panneaux solaires et par la réversibilité de la chaîne motrice. Pour cela on aura sur le véhicule soit un seul joulemètre bidirectionnel, soit un (ou deux) joulemètre(s) unidirectionnel(s) (suivant la disponibilité).

Lors de l'arrivée du véhicule, l'équipe en charge de poste de mesure des consommations, débranche le (ou les) joulemètre(s) posé(s) sur le véhicule. Par branchement sur un PC portable muni du logiciel fourni avec le Data Logger Eagle tree V4, on récupère sur chaque joulemètre, via la prise USB, un fichier de données au format .FDR, fichier texte non délimité.

Ce fichier est alors traité par une macro Excel qui permet une mise en forme des données qui nous sont nécessaires : temps écoulé entre chaque échantillonnage, tension et courant.

Cette macro poursuit par un calcul et donne la performance énergétique en Joules ainsi que les données maxi. Si ces données sortent du gabarit prévu, les équipes sont averties de ces anomalies (surcharges, surtension, enregistrement partiel, etc.).



Code Essai	Energie Consommée (kJ)	Umax (V)	I _{max} (A)	Fréquence (Hz)	Nombre de Mesures	Durée du test	Durée chronométrée
035.2.C	201.00	39.00	44.00	20	29.425	00:24:31	

Le logiciel édite ensuite un tableau de synthèse individuel, c'est ce tableau de données qui est transmis au centre de calcul.

Toujours pour assurer une traçabilité maximale, un fichier Excel de synthèse des envois des données est généré et archivé. Ce n'est qu'après l'envoi de ces données et le retour de l'accusé de bonne réception que le joulemètre concerné est remis à zéro et placé en position d'être réutilisé.

Ce seront ainsi plus de 340 fichiers qui seront traités en 3 jours de course sur le poste mesures des consommations électriques.

La discrimination des meilleures performances devient difficile avec les joulemètres actuels. Pour le challenge 2014, avec un partenaire de compétence reconnue dans le domaine de la mesure électronique, nous nous efforçons de :

- minimiser l'influence des écarts de température,
- insensibiliser les joulemètres aux champs magnétiques extérieurs,
- annuler les effets des hystérésis,
- industrialiser les produits pour une meilleure fiabilité notamment des connexions.

Pour les années futures, une transmission HF en temps réels des consommations serait un plus, sûrement bien accueilli par les compétiteurs. Dans tous les cas l'AD3E est contrainte d'offrir le meilleur compromis entre fiabilité des mesures d'énergie, sécurité des personnes, disponibilité des valeurs dans un temps très court et budget très contraint pour l'appareillage embarqué.

À chacun son Challenge, celui des candidats et celui de l'association AD3E sont finalement de même nature car les ressources pour la réussite reposent sur la notion de projet qui suppose, moyens, planification des actions, partenariat et, au-delà, sur une aventure humaine qui se joue en équipe car là est le meilleur chemin pour le développement durable comme pour la culture scientifique et technique. ■

Principe de fonctionnement du capteur de courant à effet Hall

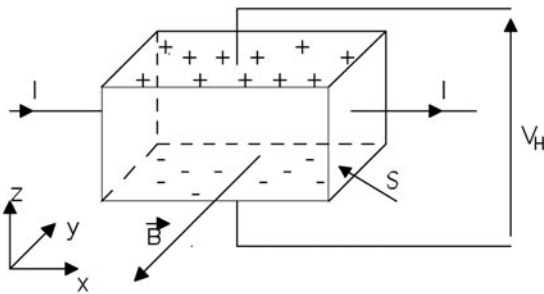
Une puce de silicium est traversée par un courant selon l'axe des x et est en même temps soumise à un champ magnétique selon l'axe des y (voir figure ci-dessous).

Les électrons de la puce de silicium, de charge $-e$, sont soumis à la force de Lorentz

Cette force s'écrit $\vec{F}_1 = (-e) \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$ et elle est dirigée selon l'axe des z.

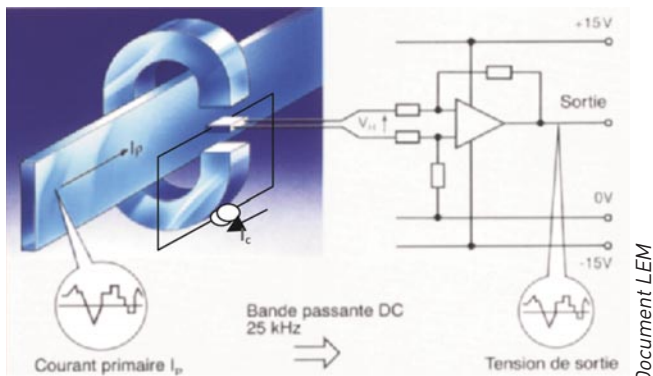
Il en résulte que les électrons se déplacent du haut vers le bas en s'y concentrant.

Il se crée alors un champ électrique \vec{E} (comme pour un condensateur) qui donne naissance, entre les faces, à une différence de potentiel $V_H = E \cdot d$ (où d est la distance entre les faces). À l'équilibre, ce champ agit sur les électrons en imposant une force $\vec{F}_2 = -e \cdot \vec{E}$ telle que $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}$.



L'effet Hall est la création de ce champ électrique \vec{E} pour compenser l'effet du champ magnétique \vec{B} . De plus, V_H est proportionnelle à B et à I : on pourra donc, en mesurant V_H , avoir une mesure de B si on connaît I et réciproquement.

Capteur à effet Hall employé en boucle ouverte



La tension du générateur de Hall est générée par le courant de commande I_c et par l'induction dans l'entrefer B_{pe} .

Le courant de commande I_c est fourni par une source à courant constant. Le courant I_p , celui que l'on mesure, génère l'induction B_{pe} .

Dans la zone linéaire du cycle d'hystérésis, B_{pe} est proportionnel à I_p tel que : $B_{pe} = a \times I_p$.

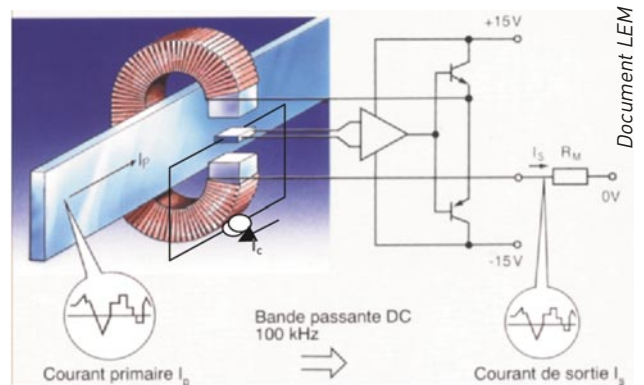
La tension de sortie du générateur de Hall, V_H est proportionnelle à B_{pe} , donc à I_p .

Pour linéariser le cycle d'hystérésis, il faut augmenter l'entrefer mais alors on peut rendre le capteur sensible aux champs magnétiques parasites extérieurs.

Cette structure économique à boucle ouverte est bien adaptée aux applications industrielles :

- Plage de mesure : 0 à 18 000 A
- Bande passante : 0...25 kHz
- Précision typique : $\pm 1\%$
- Linéarité : $\pm 0,5\%$
- Temps de réponse : < 3 à $7 \mu s$

Capteur à effet Hall employé en boucle fermée



Le courant de commande I_c est fourni par une source à courant constant. Le courant I_p , celui que l'on mesure, génère l'induction B_{pe} .

Les capteurs à boucle fermée délivrent un courant secondaire I_s proportionnel à la tension de Hall V_H , lequel en alimentant un bobinage secondaire agit en signal de contre-réaction afin de compenser les A_t primaires, créés par le courant I_p à mesurer, par des A_t secondaires opposés.

Le courant I_s est réduit à quelques dizaines de mA.

On choisit $N_p \times I_p + N_s \times I_s = 0$

L'entrefer est plus réduit, le capteur est moins sensible aux champs magnétiques parasites extérieurs.

Le courant I_s est l'image du courant I_p à mesurer.

Structure plus coûteuse, adaptée aux mesures industrielles exigeantes :

- Plage de mesure : 0 à 15 000 A
- Bande passante : 0...250 kHz
- Précision typique : $\pm 0,5\%$
- Linéarité : $\pm 0,1\%$
- Temps de réponse : $< 1 \mu s$