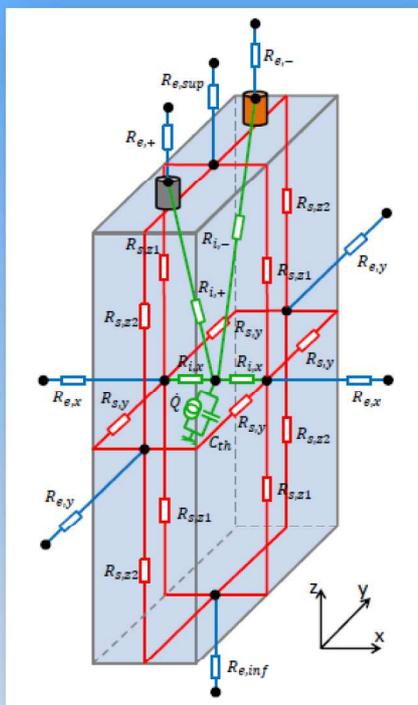
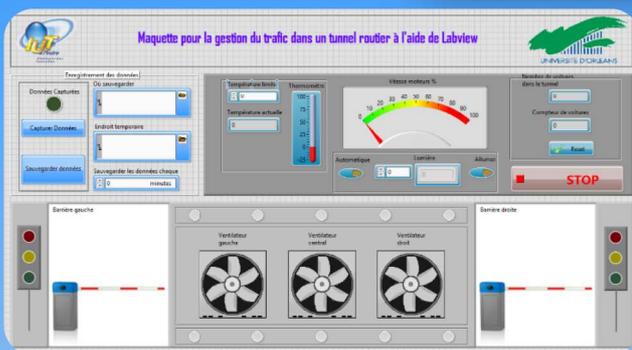
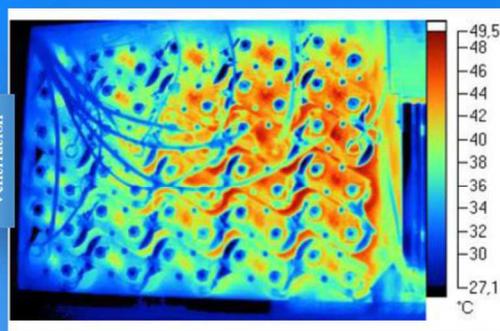




Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>



Le stockage de l'énergie électrique

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



Société de l'Électricité, de l'Électronique
et des Technologies de l'Information
et de la Communication



La Revue 3EI
publication trimestrielle
de la SEE

SOCIÉTÉ de l'ELECTRICITE, de l'ELECTRONIQUE et des TECHNOLOGIES de l'INFORMATION et de la COMMUNICATION.

17, rue de l'Amiral Hamelin, PARIS 75783 CEDEX 16
Tél : 01 56 90 37 09
site web : www.see.asso.fr

SEE, association reconnue d'utilité publique par le décret du 7 décembre 1886
Siret 785 393 232 00042, APE 9412 Z, n° d'identification FR 44 785 393 232

3EI : Enseigner l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle

La Revue 3EI, Édition SEE, 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 PARIS Cedex 16		Sommaire du n° 87	
Directeur de la publication François GERIN Président de la SEE		Thème :	
Rédacteur en Chef Franck LE GALL			
Adresser les propositions d'article à : revue3ei@gmail.com ou sur le site https://www.see.asso.fr/3ei_rubrique "soumettre un article"			
Communication Mr Jacques HORVILLEUR communication@see.asso.fr 01 56 90 37 09			
Promotion et Abonnements (4 numéros par an) Janvier, Avril, Juillet, Octobre 2017. Aurélien COURTOISIER Tél : 01 56 90 37 17 abo@see.asso.fr			
tarifs TTC : (revue papier + num)			
Individuel :			
France et UE 42 €		p. 2 <i>Éditorial, Abonnement</i>	
Pays hors UE 53 €			
Collectivités :			
France et UE 60 €		p. 4 <i>Accumulateurs Lithium-ion et véhicules électriques</i> D. CHATROUX, B. BERANGER CEA	
Pays hors UE 75 €			
Au numéro :			
France et UE 12 €		p. 12 <i>Optimisation du cout de revient global d'un véhicule électrique utilitaire 3,5t</i> A. BABIN ^{1,2} , N. RIZOUG ¹ , D. BOSCHER ² , Z. HAMDOUN ² , C. LAROUCI ¹ ¹ ESTACA ^{LAB} , Parc Universitaire Laval-Changé, LAVAL ² GRUAU LAVAL, SAINT BERTHEVIN	
Impression JOUVE 53100 Mayenne 11 bd de Sébastopol 75027 Paris Cédex 1 Tel : 01 44 76 54 40		p. 19 <i>Contrôle des circuits d'équilibrage des systèmes de stockage d'énergie (supercondensateurs) en vue d'estimer et d'améliorer leur durée de vie</i> S. SHILJI ^(a) , P. VENET ^(a) , A. HIJAZI ^(b) , A. SARI ^(a) , X. LIN-SHI ^(b) ^(a) Université de Lyon, Université Claude Bernard, Lyon, CNRS, UMR 5005, Laboratoire AMPERE, VILLEURBANNE ^(b) Université de Lyon, INSA de Lyon, CNRS, UMR 5005, Laboratoire AMPERE, VILLEURBANNE	
Dépôt Légal : Janvier 2017		p. 27 <i>Modélisation thermique en vue du dimensionnement d'un pack batterie, avec prise en compte du couplage électro-thermique pour la caractérisation des pertes électriques.</i> N. DAMAY, C. FORGEZ, G. FRIEDRICH Sorbonne universités, Université de technologie de Compiègne Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne, Centre de recherche Royallieu, COMPIEGNES	
Commission Paritaire 1217 G 78028 ISSN 1252-770X		Hors Thème :	
		p. 36 <i>Limitation thermique et paramétrage d'un moto-variateur pour véhicule électrique</i> A.Sivert ¹ , F. Betin ¹ , B. Vacossin ¹ , T. Lequeu ² ¹ U.P.J.V Université de Picardie Jules Verne, IUT de l'Aisne Laboratoire des Technologies innovantes, équipe Énergie Électrique et Systèmes Associés ² Université François Rabelais de Tours TOURS.	
		p. 46 <i>Gestion du trafic routier dans un tunnel à l'aide de LabView</i> K. BOUDJELABA, J-M. ROUSSEL, I.a. GONZALEZ PEREZ, C. NOVELLO IUT de l'Indre, Département GEII, CHATEAUROUX	
		p. 54 <i>Récupération d'énergie dans un réseau d'irrigation par pico-génération</i> J-L. VALLIAMÉE	

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans la présente édition, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées. Toutefois des copies peuvent être utilisées avec l'autorisation de l'éditeur. Celle-ci pourra être obtenue auprès du Centre Français du Droit de Copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris, auquel la Revue 3EI a donné mandat pour la représenter auprès des utilisateurs. (loi du 11 mars 1957, art.40 et 41 et Code Pénal art. 425).

Pour le premier numéro de l'année 2017, nous vous proposons de creuser le sillon sur lequel nous nous sommes engagés dans le numéro d'octobre 2016. A la suite de l'exposé de quelques exemples de tractions électriques du numéro 86, il est en effet tout naturel de s'intéresser à la source d'énergie principale de ces applications : les batteries. Les quatre articles consacrés à ce thème sont issus des conférences des journées **SGE 2016**. Ils vont nous permettre de faire le point sur cet organe critique pour le développement des véhicules dans nos sociétés modernes.

Le thème s'ouvre par l'article de M. Chartoux et M. Beranger du CEA. Leur comparaison des technologies Lithium-ion par rapport aux autres stockages met en évidence les spécificités techniques qui permettent des ruptures technologiques dans les véhicules électriques mais aussi dans les applications d'outillage électroportatif.

L'aspect coût est traité par M. Babin et ses collègues de l'ESTACA'LAB d'Angers. Ils nous proposent un article sur l'optimisation du TCO (Total Cost of Ownership) d'un véhicule électrique utilitaire de 3,5 t, basé sur une modélisation multi-physiques de la source embarquée et l'application des bonnes stratégies de gestion lors de l'utilisation du véhicule, ainsi que durant la phase de recharge.

Comment s'assurer de la surveillance et de l'amélioration de la durée de vie des systèmes de stockage d'énergie ? Mme Shily et son équipe propose de répondre à ces questions, en présentant des méthodes originales de contrôle des circuits d'équilibrage présents sur ces systèmes de stockage basées sur l'estimation de la Résistance Equivalente Série (ESR).

Le dimensionnement thermique optimal d'un pack batterie proposé par M. Damay, M. Forgez et Friedrich, permet de mieux maîtriser son vieillissement. La comparaison des simulations avec des mesures expérimentales démontre que l'erreur d'estimation des pertes électriques est fortement réduite à fort régime et à basse température.

Hors thème

M. Sivert et ses collègues, toujours entraînés par leur passion des véhicules légers, nous proposent aujourd'hui un article pour répondre à la question suivante : quelles sont les limitations thermiques d'un moteur et d'un variateur dans l'application à la traction d'un véhicule électrique ? L'objectif de cette étude est de faire les bons choix pour les différents modes de fonctionnement du véhicule (« super boost », « boost », « cool »), en utilisant pleinement les possibilités des moto-variateurs sans risque de destruction et sans surdimensionnement.

L'équipe de l'IUT de GEII de Châteauroux nous présente une maquette de gestion du trafic routier dans un tunnel à l'aide du logiciel LabView de National Instruments. Cette maquette, utilisée avec les étudiants du semestre 3, gère d'une manière automatique les différents capteurs et commandes (actionneurs) avec des flux de données traités en temps réel.

Enfin, dans le cadre de l'épreuve de projet de la série STI2D, une équipe de 4 élèves de terminale en option énergie et environnement du lycée Roland Garros de la Réunion, a présenté un projet visant à améliorer les conditions de production d'une exploitation de canne à sucre. Dans cet article, M. Valliamée et M. Payet nous exposent la démarche de leurs élèves, qui permet à l'agriculteur de s'affranchir des tâches afférentes à l'arrosage de son champ de cannes démunie d'énergie électrique et d'apporter un éclairage de sécurité lors de la récolte des produits maraîchers sous serre. Ils ont remporté le premier prix de la série STI2D aux olympiades de l'ingénieur de l'académie de La réunion.

Nous vous souhaitons une bonne et heureuse année 2017. N'hésitez pas à nous proposer vos articles que nous serons heureux de diffuser au plus grand nombre.

Bonne lecture.

Le Comité de Publication de la Revue 3EI

La Revue 3EI

Comité de publication

Hamid BEN AHMED

Arnaud BRUGIER

Jacques COURAULT

Jean FAUCHER

Gilles FELD

Jean Michel GAY

Jean-Philippe ILARY

Chérif LAROUCI

Marie-Michèle LE BIHAN

Franck LE GALL

Denis LABROUSSE

Pascal LOOS

Marc PETIT

Sylvain PIETRANICO

Oviglio SALA

Jean-François SERGENT

Jean-Claude VANNIER

**Faites connaître notre revue !
Vous en assurez ainsi la pérennité.**

BULLETIN D'ABONNEMENT A LA REVUE 3EI Année 2017
n°87 (Janvier 2017), n°88 (Avril 2017), n°89 (Juillet 2017) et n°90 (Octobre 2017)

Pour l'année 2017, nous vous proposons

3 formules d'abonnement :

- Formule « papier et accès aux articles numériques au format pdf » sur le site SEE revue 3EI
- Formule « accès aux articles numériques au format pdf SEUL » sur le site SEE revue 3EI
- FORMULE ECO : Adhésion SEE + Tarif préférentiel à la revue 3E.I format papier + Accès numérique aux revues 3E.I et REE + Tarifs préférentiels conférences et journées d'études + Réduction fiscale (voir en page de couverture)

A partir du 01/01/2017, les tarifs pour la revue 3EI sont les suivants :

➤ <u>Abonnement individuel</u>	France et pays de l'UE	Pays hors UE
<u>Abonnement papier et accès aux articles numériques</u>	42 € TTC	53 € HT
<u>Accès aux articles numériques</u>	30 € TTC	

➤ <u>Abonnement « collectivités »</u>	France et pays de l'UE	Pays hors UE
<u>Abonnement papier et accès aux articles numériques</u>	60 € TTC	75 € HT
<u>Accès aux articles numériques</u>	30 € TTC	

L'abonnement collectivités concerne les bibliothèques, CDI, laboratoires, entreprises, universités, écoles d'ingénieur, lycée, IUT ...). Prendre soin de mentionner sur le bon de commande le lieu de livraison de la revue ainsi que le destinataire (personne physique ou service).

TRES IMPORTANT L'adresse électronique à laquelle vous recevrez le code d'accès au site de la SEE-revue 3EI est indispensable en cas d'abonnement avec accès numérique.

Nom : Prénom :

Adresse d'expédition de la revue 3EI :

Rue, n° :

Code postal : Ville :

Pays :

Adresse électronique :

Activité (pour statistiques) :

Adresser le bulletin renseigné, accompagné d'un chèque libellé à l'ordre de :
SEE- la revue 3EI ou d'un bon de commande pour les collectivités, à l'adresse suivante

SEE-la revue 3EI 17 rue Hamelin, 75783 PARIS CEDEX 16

Vous pouvez également vous abonner sur le site
<http://www.see.asso.fr/3ei>

Accumulateurs Lithium-ion et véhicules électriques

Daniel CHATROUX, Bruno BERANGER

CEA

Résumé : L'objectif de cette présentation est de comparer les technologies Lithium-ion par rapport aux autres stockages et de mettre en évidence les spécificités techniques qui permettent des ruptures technologiques dans des applications, comme l'outillage électroportatif ou les véhicules électriques.

Mots-clés— Accumulateurs Lithium-ion, batteries, véhicules électriques

1. Introduction

La présentation a pour objectif de présenter les critères principaux de choix d'un mode de stockage d'énergie et de donner des ordres de grandeur pour situer le stockage d'électricité par des accumulateurs électrochimiques. Le panorama des différentes technologies d'accumulateurs permet alors de situer les technologies traditionnelles à base d'électrolyte aqueux par rapport aux chimies Lithium-ion plus récentes, de situer les performances annoncées et mesurées et de présenter l'impact sur certaines applications [1].

2. Stockages d'énergie chimiques ou électrochimiques

2.1. Critères de performances des stockages d'énergie

Les stockages d'énergie peuvent être caractérisés par quatre paramètres essentiels, l'énergie massique (Wh/kg), l'énergie volumique (Wh/l), le rendement et le comportement vis à vis de la sécurité.

Tableau 1. Performances principales des stockages chimiques et électrochimiques

Stockage d'énergie	Energie massique (Wh/kg)	Energie volumique (Wh/l)	Rendement ou rendement de conversion	Risques impactant la sécurité
Hydrogène	33 000	2,75 (gaz - 1bar) 2100 (liquide)	50 % (pile à combustible)	Explosion
Essence Diesel	13 000 12 400	9 800 10 500	15 to 40 % (moteur thermique à différents régimes de charge)	Combustion rapide, risque d'explosion avec l'essence
Bois	4 000	1600-2000	15 à 40 %	Combustion lente
Accumulateurs électrochimiques	40 to 200	70 to 300	80 à 95%	Combustion rapide, faible risque d'explosion, risques électriques

L'unité d'énergie est le Joule, mais dans le domaine du stockage de l'énergie, le W.h (3600 J), et le kW.h (3,6 MJ) sont préférés.

L'hydrogène a une énergie massique très élevée, mais une très faible énergie volumique dans les conditions normales de températures et de pression. Il doit donc être liquéfié ou être stocké sous pression. Les piles à combustibles qui utilisent l'hydrogène ont un rendement qui est de l'ordre de 50% sur une large plage de puissance.

L'essence et les gasoils offrent des énergies massiques et volumiques élevées car ce sont des liquides. Les rendements des moteurs à combustion internes munis de leur dépollution atteignent des rendements maximaux de l'ordre de 30 à 35% à forte charge. Par contre, ces rendements chutent fortement à faible charge, lorsque la puissance demandée est plus faible. Pour pallier ce défaut, l'hybridation à dérivation de puissance permet de combiner un moteur thermique à essence qui fonctionne toujours sous forte charge, à fort couple, à la vitesse de rotation la plus faible possible, pour être toujours dans sa zone de rendement élevé associé à une batterie auxiliaire pour fournir la puissance en phase transitoire [2].

Le niveau de risque lié au feu d'un combustible liquide est lié à la température d'inflammation. Ce risque est donc plus élevé pour l'essence que pour les diesels. D'autre part, le danger d'un feu est fonction de l'énergie stockée qui sera libérée, mais surtout à la cinétique du dégagement d'énergie. Le bois est cité ici car il correspond à un fort niveau d'énergie de 4 kWh/kg, mais avec un niveau de risque faible, car sa combustion est lente.

Les accumulateurs électrochimiques stockent entre vingt et cent fois moins d'énergie que les stockages chimiques, mais avec de très bon rendement. Leurs niveaux de risque sont en partie liés à la chimie, mais aussi à la cinétique de l'emballement en cas de défaut.

2.2. Choix du type de stockage

Le diagramme de Ragone permet de situer les différentes technologies de stockages selon les axes énergie massique, énergie volumique :

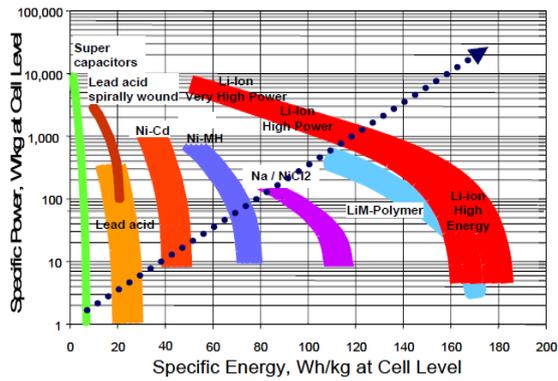


Fig.1 Diagramme de Ragone supercondensateur et accumulateurs électrochimiques

Pour la sélection d'un type de stockage, l'utilisation du critère temporel amène directement aux mêmes résultats :

- pour des durées inférieures à 100 ms environ, les condensateurs chimiques sont adaptés
- les supercondensateurs sont adaptés pour les durées de quelques secondes à quelques minutes
- de quelques minutes jusqu'à deux heures, voire plus, les accumulateurs électrochimiques sont adaptés
- Au-delà de deux heures, un groupe électrogène thermique ou à pile à combustible peut être pertinent.

2.3. Spécifications constructeur de différentes technologies d'accumulateurs

Le document [3] est une synthèse très complète des niveaux de performance spécifiés par les constructeurs pour les différentes technologies d'accumulateurs.

Cette synthèse qui présente un grand nombre d'informations peut être complétée des précisions et mises à jour suivantes :

- (1) Les accumulateurs Lithium-ion regroupent des familles différentes qui seront présentées dans ce document
- (2) Pour toutes les technologies d'accumulateurs, il existe des versions optimisées puissance et d'autres énergie
- (3) Les accumulateurs Lithium-ion d'outillage électroportatifs atteignent 3kW/kg, les accumulateurs spéciaux plus de 5 kW/kg
- (4) Pour le NimH, l'autodécharge est élevée après la charge puis décroît. Un stockage annuel est possible.
- (5) Des accumulateurs Lithium, dont ceux à phosphate de Fer (LiFePO4), de bonne qualité conservent leur énergie pendant des années
- (6) Comme pour le LiFePO4, les accumulateurs Lithium peuvent fonctionner en température négative en décharge, mais doivent

préférentiellement être chargé avec une température positive, sous peine de dégradation (rapide) de leur durée de vie.

- (7) Hydrure à base de Lanthane
- (8) Depuis 2005, les coûts des batteries Lithium ont fortement décrû. Les modules sont entre 300 et 1000 €/kWh, les accumulateurs entre 150 et 300€/ kWh

Tableau 2. Spécifications de différentes technologies d'accumulateurs

Technologies	Plomb acide	NiCd	NimH	Li-ion Phosphate de Fer	Li-ion (1)
Energie massique (Wh/kg)	30-50	45-80	60-110	100-120	100-200
Energie volumique (Wh/l)	75-120	80-150	220-330	190-220	220-330
Densité de puissance (2) (W/kg)	700		900	800 (3)	1500 (3)
Nombre de cycles	600(1) 1200(2)	2000	1500	>2000	500-1000
Autodécharge mensuelle	5%	20%	30% (4)	5% (5)	10% (5)
Tension nominale	2V	1,2V	1,2V	3,2V	3,6V
Technologie	Plomb -acide	NiCd	NimH	Li-ion Phosphate de Fer	Li-ion
Gamme de température	-20 °C +60 °C	-40 °C +60 °C	-20°C +60°C	0°C +45°C (charge) -20°C +60°C (décharge)	-20°C +60°C (6)
Avantages		Fiabilité Basse température	Densité d'énergie	Densité d'énergie, sécurité, coût, nombre de cycles	Energie et puissance massique
Inconvénients	Faible énergie Mort subite	Faible énergie toxicité	Terre rare (7), coût, comportement en température	Charge à basse température (6)	Sécurité des gros accumulateurs, coût
Estimation de coût (€/kWh)	250 (a) 200 (b)	600	1500 à 2000	1000 à 1800 (8)	2000 (8)

- (a) Etanche
- (b) tubulaire

2.4. Accumulateurs aqueux

Les accumulateurs électrochimiques à base d'eau comme le plomb (eau et acide), ou Nickel-Cadmium ou NimH (eau et potasse) présentent des particularités liées à ces électrolytes. Il existe un grand nombre de réactions chimiques parasites. Certaines donnent lieu à des consommations permanentes, donc une autodécharge. Ce point est (fortement) pénalisant pour un grand nombre d'utilisations nomades ou intermittentes.

Par contre, le très grand avantage de ces technologies est de pouvoir charger des batteries, constituées de mise en série de ces accumulateurs, sans besoin d'électronique associée.

Un accumulateur chargé avant les autres, dans la mise en série, verra sa tension augmenter, puis il

apparaît l'amorçage d'une réaction parasite qui consommera l'énergie (électrolyse et/ou dissipation de chaleur). On peut ainsi continuer à faire passer du courant dans une mise en série, jusqu'à ce que tous les accumulateurs soient pleinement chargés. Il n'est pas nécessaire d'avoir des électroniques d'équilibrage additionnelles. L'équilibrage et la charge à 100% de tous les accumulateurs en série s'effectuent en faisant seulement une prolongation de charge avec une surcharge de certains éléments de la batterie.

Du fait de la présence des pertes d'énergies par des réactions parasites en stockage avec autodécharge ou en charge, les rendements sont limités.

2.5. Accumulateurs Lithium-ion

Les accumulateurs électrochimiques Lithium-ion sont basés sur un matériau positif (déposé sur un feuillard d'aluminium) et un matériau négatif (déposé sur un feuillard de cuivre), dans lesquels les ions Lithium s'insèrent alternativement. Il y a en fait plusieurs familles de Lithium-ion selon les matériaux utilisés avec des performances de stockage, de durée de vie et de sécurité différentes.

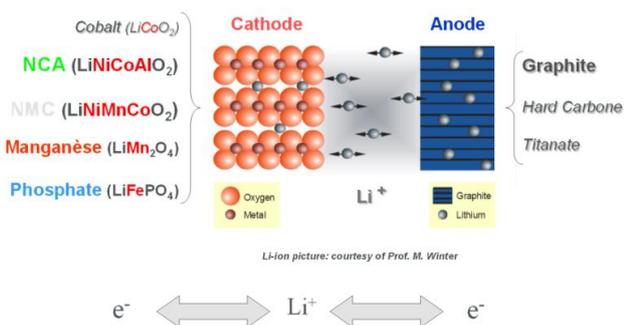


Fig.2 les différentes familles d'accumulateurs Lithium-ion

Pour les accumulateurs lithium-ion l'eau est un polluant. La fabrication des accumulateurs s'effectue en salle anhydre. Les étapes critiques sont sous atmosphère inerte.

Par rapport aux autres électrochimies, les accumulateurs Lithium-ion présentent la particularité d'une quasi absence de réactions chimiques parasites, autres que des réactions très lentes de vieillissement. Ceci a plusieurs impacts :

- La très faible autodécharge permet de conserver l'énergie pendant des années pour des accumulateurs de qualité,
- Chaque électron fourni ou extrait de l'accumulateur donne lieu à un déplacement d'un ion Lithium. Le rendement faradique est proche de 100%. On peut donc connaître l'état de charge précisément par comptage de charge.
- Une électronique de détection de fin de charge ou de décharge est indispensable sur chaque étage d'accumulateurs dans une mise en série pour arrêter la charge ou la décharge sur les seuils de tension haute et basse. Un accumulateur Lithium

ne doit jamais être surchargé sous peine de le détériorer et de risquer un emballement. Il ne doit pas non plus être déchargé en-dessous d'une tension minimale (classiquement spécifiée à 2V) sous peine de le détériorer (oxydation, transfert d'espèces chimiques). Ensuite, il ne faut pas le recharger du fait d'un risque d'emballement

- Un circuit électronique d'équilibrage est nécessaire, mais seulement pour traiter de très faibles différences de charge. Classiquement le circuit d'équilibrage amène tous les accumulateurs dans le même état de charge en fin de charge en déchargeant les accumulateurs les plus chargés pour les aligner sur les moins chargés. Cette méthode dissipative correspond en fait à très peu de pertes du fait des faibles niveaux d'énergies de déséquilibre à compenser. Au niveau de notre laboratoire, les cartes d'équilibrage que nous avons réalisées permettent d'équilibrer avec un courant de décharge de 250 mA. Nous les avons utilisés jusqu'à des batteries de 100Ah. Dans le domaine automobile des batteries de 40 Ah sont équilibrées avec des courants de seulement 10 ou 20 mA. L'équilibrage n'a pas besoin d'être immédiat, ni systématique, après chaque charge. Il doit par contre, au moins être fait de manière périodique.



Fig.3 Carte de surveillance et d'équilibrage d'un module de batterie Lithium-ion

- Classiquement, du fait des niveaux de courants d'équilibrage, le circuit d'équilibrage ne peut pas compenser un déséquilibre important qui existerait après fabrication. Les batteries sont donc fabriquées avec des accumulateurs livrés avec un même état de charge. Après leur fabrication, les accumulateurs Lithium-ion doivent être formés par plusieurs cycles de charge-décharge à régime lent. La capacité est alors mesurée. Le dernier cycle peut s'arrêter à un état de charge défini, sans surcoût. Il est donc classique de recevoir tous les accumulateurs de différents lots avec un même état de charge pour être assemblés.
- Les rendements peuvent être élevés, supérieurs à 95% par exemple, alors que les chimies aqueuses ont plutôt des rendements de 70-80%.

Si l'utilisation des chimies Lithium-ion peut sembler plus compliquée du fait de la nécessité d'avoir un circuit de mesure et d'équilibrage de chaque étage d'accumulateurs en série, ceci est très largement compensé par la possibilité de connaître facilement et précisément la fin de charge et de décharge, mais également d'avoir des indicateurs d'état de charge par coulombmétrie ou par mesure de tension pour les chimies où la tension croît avec la charge.

Le laboratoire avait modifié la batterie NimH d'un scooter VECTRIX par une batterie LiFePO4. La gestion de cette dernière est beaucoup plus simple que la batterie d'origine. La détection de fin de charge d'une batterie NimH est connue pour des charges rapides à températures ambiante (croissance de tension, puis dV/dt négatif et élévation de température). Par contre, ces modes de détection ne fonctionnent plus sur une batterie déjà chaude du fait d'un roulage. La gestion de la batterie NimH d'origine du scooter était complexe et néanmoins source de dysfonctionnements lorsque la batterie était chaude ou après un stockage de longue durée. Le passage à une batterie Lithium ion supprime ces problèmes.

Les accumulateurs Lithium-ion présentent des résistances internes plus faibles que les accumulateurs classiques. Ceci permet de conserver des rendements élevés, mêmes à fort régime de charge et de décharge. Par contre, le niveau de courant de court-circuit peut être très élevé. Les fusibles doivent être dimensionnés en conséquence.

Les chimies Lithium ion sont soumises à deux types de vieillissement. Le vieillissement calendaire est lié à l'âge des accumulateurs et s'accélère lorsque la température augmente. Le second mode de vieillissement est lié au cyclage. Il dépend du nombre de cycles, de l'amplitude des cycles et de leur position sur la courbe d'état de charge. Dans la mesure du possible, il faut éviter les extrêmes, ne pas charger totalement (ne pas aller à 4,2V, mais se limiter à 4,1V ou 4V pour la tension de fin de charge pour la plupart des chimies) et ne pas décharger totalement. Il faut aussi savoir que la charge des accumulateurs en température négative dégrade fortement la durée de vie. Selon les applications, un conditionnement en température peut s'avérer nécessaire.

Les chimies Lithium-ion progressent régulièrement d'environ 6% par an en énergie massique. On est loin de la progression de la loi de Moore, mais ce progrès régulier permet de franchir des seuils à partir desquels le stockage batterie peut devenir viable pour une application donnée.

Aujourd'hui, il y a plus de 7 milliard d'accumulateurs produits chaque année sur la planète, dont une grande part dans le format 18650 (cylindrique de 18 mm de diamètre, et de 65 mm de long) pour les applications batterie d'ordinateur portables initialement. Une grande part des progrès et innovations est fait dans ce format standard.

Du fait de la dynamique du domaine et de la conjoncture mondiale, la baisse des coûts est régulière. Il y a même actuellement une avance, estimée à environ cinq ans, sur la baisse des coûts.

Tableau 3. Paramètres des technologies d'accumulateurs aqueuses et lithium ion

Paramètre	Technologies aqueuses	Lithium ion
Equilibrage	😊	😞
Détection de fin de charge	😞	😊
Autodécharge	😞	😊😊
Energie	😞	😊😊
Sécurité	😊	😞 ou 😞😞
Risque hydrogène	😞	😊
Gamme de température	😊	😞
Coût	Constant	Décroit

2.6. Technologies d'accumulateurs Lithium

Il y a plusieurs familles d'accumulateurs Lithium-ion avec des performances en énergie et comportement en sécurité différents.

Pour l'électrode positive, on peut utiliser les composés suivants sur le feuillard d'aluminium :

L'oxyde de Cobalt est le matériau le plus ancien. Il est réactif. En cas de défaillance ou d'utilisation abusive, l'élévation de température produit la décomposition de l'oxyde et l'oxygène libéré réagit avec les autres matériaux qui sont combustibles. L'oxyde est un matériau cher du fait du coût du Cobalt. Il permet une forte énergie stockée.

Le NCA (Nickel cobalt Aluminium) est un oxyde réactif mais qui permet une forte énergie stockée. La durée de vie calendaire est bonne. Les accumulateurs PANASONIC utilisés par TESLA sont de cette technologie. Le coût du matériau est un peu inférieur du fait de la moindre quantité de Cobalt.

L'oxyde de Manganèse est un matériau à très faible coût et à énergie stockée élevée. Par contre, le vieillissement calendaire est rapide.

L'oxyde de Nickel Manganèse et Cobalt (NMC) est un matériau dont le coût, les performances et le comportement en vieillissement est lié aux pourcentages de ces constituants. Ils varient de 1/3, 1/3, 1/3 à 5%, 90%, 5%. Les NMC sont très utilisés actuellement.

Le phosphate de Fer est le matériau le plus stable, car il n'y a pas de libération d'oxygène en température. Contrairement aux autres chimies où la tension croît

tout au long de la charge et où la tension de fin de charge spécifiée est 4,2V, le phosphate de Fer a un plateau à 3,3V sur la plus grande partie de sa courbe de charge. La tension de fin de charge est de 3,6V. La tension de fin de décharge est de 2V. Comme il y a très peu d'énergie entre 3V et 2V, il est possible d'arrêter prématurément la décharge. Le phosphate de Fer permet alors d'avoir une batterie avec une tension nominale +/- 10% (plateau à 3,3V, fin de charge à 3,6V, fin de décharge à 3V). Le phosphate de Fer offre une durée de vie calendaire élevée et un grand nombre de cycles. Par contre, du fait de sa tension inférieure et de la capacité du matériau, l'énergie massique dépasse peu 100 Wh/kg alors que les autres chimies permettent le double. Le phosphate de Fer est très utilisé en Chine pour réaliser des accumulateurs de grande taille (plusieurs centaines d'Ah) pour les voitures et autobus. La sécurité a aussi permis à la société Valence®, puis d'autres par la suite, de proposer des modules Lithium ion à base de phosphate de Fer en remplacement en lieu et place de batteries au plomb. Avec ces modules, un intégrateur peut réaliser un pack batterie selon les besoins de l'application.



Fig.4 Batterie LiFePO4 de la société Valence ®

Pour les autres chimies plus réactives, les fournisseurs proposent un pack batterie complet qui leur permet de maîtriser plus complètement les choix de sécurité.

L'électrode négative est classiquement en cuivre revêtu de graphite ou d'autres matériaux carbonés, (fibre de carbone, noir de carbone). Le graphite est instable dans l'électrolyte, mais est protégé par une couche d'interface, la SEI qui se forme lors des premiers cycles. La stabilité de la SEI intervient au premier ordre sur la durée de vie de l'accumulateur. Comme le potentiel du graphite est proche de celui du dépôt de lithium métal, la vitesse de charge a une limite, principalement à froid, pour ne pas déposer du lithium métallique au lieu d'avoir la réaction insertion des ions Lithium.

Pour avoir un nombre de cycle, une durée de vie accrue et la possibilité de charge rapide à basse température, une électrode négative en titanate peut être utilisée. Outre le coût supérieur, l'énergie décroît d'un tiers car, comme la tension de l'électrode est plus

élevée (1,55V au lieu de 0,15V), la tension nominale de l'accumulateur est plus faible d'un volt.

Les électrodes négatives à base de silicium, ou contenant un peu de silicium, commencent à être commercialisées pour offrir des densités d'énergies supérieures.

2.7. Sécurité des batteries Lithium

La sécurité des batteries Lithium-ion est un sujet complexe multi-paramètres :

- Réactivité de la chimie Lithium-ion
- Electrolyte avec solvant combustible que l'on cherche à remplacer par un électrolyte entièrement polymère, et non pas seulement gélifié comme actuellement
- Séparateur multicouche, dont une couche qui est fusible pour bloquer les pores et la circulation des ions Lithium en cas d'échauffement
- CTP (fusible réarmable interne en bout d'accumulateur)
- CID (interrupteur mécanique interne qui ouvre le circuit en cas de surpression interne à l'accumulateur)
- Design de l'accumulateur
- Design des modules, par exemple pour empêcher la propagation d'un emballement thermique d'un accumulateur
- Conception du pack (résistance à un feu extérieur, absorption des chocs, refroidissement pour empêcher l'emballement thermique, polymère résistant au feu...)
- Electronique de gestion de la batterie qui maintient tous les accumulateurs dans la plage de tension et de température autorisée. Les électroniques peuvent être conçues selon des niveaux de sûreté élevés si l'application le nécessite.
- Architecture électrique (relai sous vide ou gaz pour l'ouverture de courant continu, fusibles à haut pouvoir de coupure ou disjoncteur ...).

Aujourd'hui, toutes les électrochimies présentées sont utilisées dans les applications, même celle qui sont réactives car elles présentent des niveaux élevés d'énergies stockées.

C'est au niveau de la conception globale système que les contraintes de sécurité sont gérées pour atteindre le niveau requis.

En laboratoire, l'extinction d'un feu de batterie s'effectue par inertage par injection de gaz neutre. Sur véhicule, malgré la tension présente en interne du pack, une solution classique d'extinction consiste à utiliser de l'eau pour agir par refroidissement.

3. Applications

3.1. Applications principales des batteries aqueuses

Le premier marché pour les batteries au plomb acide est le démarrage des véhicules thermiques. Pour celui-ci la gamme de température de ces batteries est un avantage. Le plomb est aussi utilisé pour les applications de secours, UPS et centraux téléphoniques.

Le NiCd est aujourd'hui la technologie de batterie de démarrage et de secours des avions et de réseau de bord et de secours des trains. Cette technologie offre un bon niveau de fiabilité et de sécurité, avec une gamme de température étendue. Certaines technologies nécessitent de la maintenance (appoint d'eau).

Un marché important du NimH est la batterie des hybrides de type Toyota PRIUS. Dans cette application la batterie de l'ordre d'un kilowatt heure est conçue comme une batterie de puissance (20 kW). Elle est utilisée en microcycle (de 5%) dans une fenêtre d'utilisation (de 20% pour la version 2004) pour assurer la durée de vie garantie et un coût d'utilisation compétitif [2]. Les versions rechargeables utilisent une batterie Lithium-ion.

3.2. Marché classique des batteries Lithium

Les marchés classiques des batteries Lithium sont l'ordinateur portable, le téléphone et les autres objets connectés. Il est à noter qu'il existe un format standard qui est utilisé à la fois pour les ordinateurs portables et l'outillage électroportatif qui est le 18650. Comme indiqué précédemment, il s'agit de d'un cylindre de 18mm de diamètre et de 65 mm de long. En 2015, sept milliard d'accumulateurs Lithium ont été fabriqués sur la planète, dont une part importante selon ce format. Les progrès sont constants et rapides pour ces marchés très dynamiques qui tirent et alimentent les autres marchés. Pour obtenir une durée d'utilisation la plus longue possible, les chimies les plus énergétiques sont utilisées, associées à de nombreuse protection pour assurer un très bon niveau de sécurité au grand public. Outre la qualité de réalisation les accumulateurs sont munis de CTP et de CID. La batterie est encapsulée dans un capot polymère de protection mécanique. L'électronique de gestion est associée à des transistors MOSFETs de sécurité qui empêchent une surcharge ou une sur décharge du pack. Le prix des packs batteries d'ordinateurs est de quelques centaines d'euros le kilowattheure.

On peut le vérifier en tant qu'utilisateur : le pack de la figure 5 stocke 60Wh pour 388g. La densité d'énergie est de 154 Wh/kg. Le prix public en pièce de rechange est de 30 €. Ce qui fait 500 €/kWh. Le coût en pièce de première monte est bien inférieur.



Fig.6 Pack batterie d'ordinateur portable

3.3. Outillage électroportatif

L'outillage électroportatif était traditionnellement en NiCd, puis NimH, et a brutalement commuté pour passer presque complètement au Lithium en moins de trois ans. Ceci a été rendu possible par la chute des coûts, due à la croissance des marchés et une surproduction mondiale. Les progrès amenés par cette mutation sont :

- La disparition des problèmes dus à l'autodécharge. Après des mois de stockage l'outil peut encore être utilisé sans recharge préalable.
- Des possibilités de charge rapide en 15-20 mn avec un impact relativement faible sur la durée de vie.
- Des batteries très légères et très puissantes.

On observe maintenant que la batterie est un produit à part entière, qui peut se monter sur de nombreux outils, aussi bien en gammes amateurs que professionnelles.

3.4. Véhicule électrique

Par le passé, plusieurs tentatives de démarrage du véhicule électrique ont avorté. Outre la trop faible autonomie, il a été montré un coût d'usage pour les véhicules des années 90 trois fois plus élevé que celui des véhicules thermiques.

Nous avons montré par des études de retour d'expérience sur véhicules que les accumulateurs plomb, NiCd et NimH utilisés sont inadaptés pour les régimes de décharge des véhicules [4].

Tableau 4. Comparaison des énergies massiques spécifiée et celles mesurées sur véhicule en usage réel

Technologie	Plomb-acide	NiCd	NimH	Li-ion Phosphate de Fer	Li-ion
Energie massique spécifiée	30-50	45-80	60-110	100-120	100-200
Energie massique mesurée sur véhicule	20	30	40	70-80	100 +

On observe sur véhicules que les chimies aqueuses utilisées ne délivrent que la moitié de l'énergie spécifiée. L'énergie embarquée est limitée. Les temps de décharge sont alors de l'ordre de l'heure. Ces temps correspondent à des décharges trop rapides pour ces technologies. Par exemple, les accumulateurs NiCd de Saft utilisés sur les voitures électriques des années 1990 sont spécifiés pour des décharges en trois heures. Une décharge trois à quatre fois plus rapide amène à une forte chute de l'énergie délivrée et impacte aussi la durée de vie. Outre la chute de tension due à la résistance interne, la chute de l'énergie délivrée est due à la limitation de la vitesse de diffusion des espèces chimiques qui limite la capacité restituée. Par exemple, pour ce régime de décharge, un pack NiCd de 100Ah restitue entre 60 et 70Ah.

Il a été observé sur véhicules que la décharge en une heure ou moins se traduit par :

- Une énergie restituée réduite.
- Une chute de la durée de vie.
- Un coût d'usage qui correspond principalement au coût d'usure de la batterie qui est non compétitif. Il est trois fois supérieur à celui d'un véhicule thermique [4].

Les technologies aqueuses Plomb acide, NiCd, NiMH ne sont pas adaptées pour les véhicules électriques.

En lieu et place, l'utilisation des chimies Lithium-ion permet de réaliser des packs batterie à très faible autodécharge, à bon rendement, même en charge rapide et délivrant l'énergie spécifiée.

Si les performances en énergies stockées des batteries croissent bien moins vite que la loi de Moore qui a régit la croissance de la densité d'intégration des transistors sur le silicium, la croissance en énergie massique est quand même de 6% par an.

D'autre part, la chute des coûts est beaucoup plus rapide que prévue.

Les batteries Lithium sont adaptées pour les véhicules électriques et hybrides rechargeables :

- Avec la même masse, elles offrent deux à trois fois plus d'énergie utile que les batteries traditionnelles.
- Les charges et décharges peuvent se faire dans des temps inférieurs à l'heure sans pertes importantes ni impact significatif sur la durée de vie.
- La batterie a un bon rendement énergétique de 90% à 95% selon les régimes de charge et décharge
- La détection de fin de charge et les jauges d'autonomies sont fiables et précises.

La seule contrainte importante est la limitation de la gamme en température, surtout pour la charge qui peut amener à faire du conditionnement en température pour certaines utilisations.

Le véhicule électrique est souvent considéré comme un véhicule urbain ou périurbain. En fait, les véhicules électriques sont particulièrement performants quand on se limite à 90-100 km/h. Outre les trajets urbains, les trajets routiers s'effectuent avec les très bons rendements des batteries et des chaînes de traction. On observe alors que la consommation chute d'environ 20% quand on passe de 90 km/h à 80 km/h, ce qui augmente l'autonomie d'autant.

Ce changement de consommation avec cet écart de vitesse n'est pas visible avec les véhicules thermiques, car pour ces vitesses les besoins en puissance sont faibles 10 ou 15 kW et les moteurs thermiques qui sont dimensionnés pour fournir la puissance pour les accélérations (70-100 kW par exemple) sont alors dans des zones de faibles rendements, avec un fort niveau de pertes fixes.

Les consommations des véhicules électriques sur routes sont de l'ordre de 10 kW.h / 100km par tonne (à température ambiante et pour la traction uniquement).

Par contre, le véhicule électrique est peu pertinent sur autoroute où la consommation croît fortement (comme le carré de la vitesse pour la partie aérodynamique) et il est très vite limité par sa très faible énergie stockée, comparée à celle d'un véhicule thermique.

Du fait des caractéristiques couple vitesse des moteurs électriques, les voitures n'ont ni boîte à vitesse ni embrayage. Il y a seulement une réduction entre le moteur et le différentiel.

Les différentes technologies motrices sont utilisées : asynchrone, synchrone à aimant, synchrone à excitation séparée.

Deux voitures électriques méritent d'être citées plus particulièrement.

La TESLA [5], véhicule emblématique américain, utilise presque 10 000 accumulateurs standards en format 18650, dont elle consomme plus de 10% de la production mondiale. Ce véhicule a une autonomie de 500 km, mais ceci à la vitesse contenue (90-100 km/h) qu'oblige la législation américaine (60mph).



Fig.7 Pack batterie de véhicule TESLA intégré dans le plancher [5]

Les véhicules TESLA ne sont pas des véhicules thermiques électrifiés. Le véhicule est pensé électrique et est construit autour du pack batterie qui constitue le plancher du véhicule.

Aujourd'hui, deux stratégies coexistent, celle de TESLA qui est de faire avec les meilleurs accumulateurs d'aujourd'hui produits en très grande quantité à haut niveau de qualité et de les intégrer, l'autre approche comme celle de Renault ou BMW et d'autres grands constructeurs qui consiste à utiliser des accumulateurs de format spécifique, de plus grande taille, qui devraient être moins chers par grande quantité. Par contre, ils nécessitent un décollage des ventes de véhicules électriques pour atteindre ces quantités.



Fig.8 Renault ZOE

Le second véhicule que l'on peut citer est la ZOE de Renault. En effet, au niveau électronique de puissance, il est à noter que la ZOE a un chargeur embarqué de forte puissance (44kW initialement et 22 kW actuellement) actuellement qui réutilise l'onduleur moteur et les bobinages moteur. Ceci permet de minimiser les coûts d'infrastructure de charge rapide, quand cette infrastructure est souhaitée, puisque des prises de fortes puissances sécurisées suffisent (en 400V AC triphasé). Il n'est pas besoin de chargeur régulés qui rechargent directement la batterie en courant continu comme classiquement.

Aujourd'hui, le panorama des véhicules électriques et hybrides est large chez les différents constructeurs, ce qui montre un premier niveau de maturité [6].

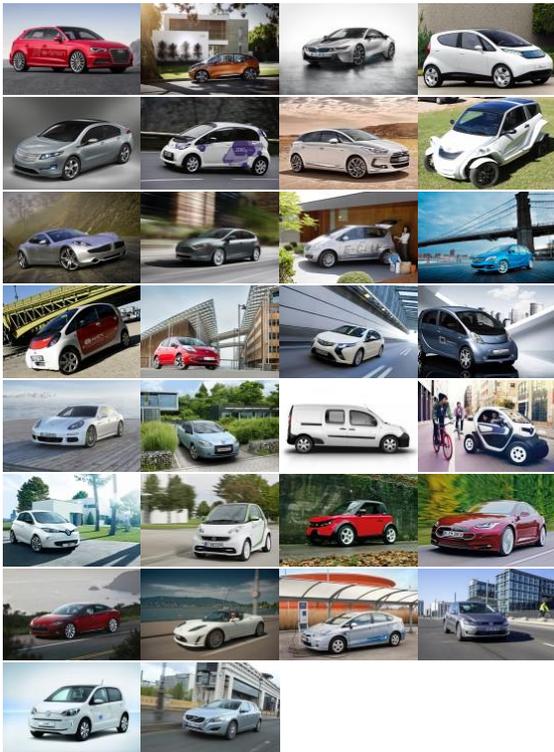


Figure 1 : Electric or plug-in vehicles : Audi, BMW , Bollore , Chevrolet, Citroën, Coupé, Fisker, Ford, Mercedes, Mitsubishi, Nissan, Opel, Peugeot, Porsche, Renault, Smart, Tazzari, Tesla, Toyota, Volkswagen, Volvo

Fig.9 Véhicules électriques et hybrides rechargeables.

4. Conclusions

Dans le domaine du génie électrique, le stockage de l'énergie électrique est une fonction très difficile, à forte contraintes techniques (masse, volume), et à coûts d'achat et d'usage élevés.

Les accumulateurs Lithium-ion se distinguent des autres technologies classiques qui sont aqueuses par une quasi-absence de réactions chimiques parasites, par une très faible autodécharge, de très bons rendements et la possibilité de charges et décharges rapides.

Une électronique de gestion des fins de charge et de décharge, est indispensable. Il faut aussi assurer l'équilibrage, mais l'énergie à traiter est négligeable par rapport à celle stockée dans la batterie. Les

fonctions de détections de fin de charges et les jauges sont plus simples.

Le point faible principal des accumulateurs Lithium aujourd'hui est la gamme de température restreinte et en particulier la charge en température négative. Un conditionnement en température peut être nécessaire selon les applications et environnements.

Les technologies NiCd et NimH était trop peu performantes en énergies massiques et volumiques réellement délivrées en roulage pour les besoins des véhicules électriques. Du fait des faibles durées de vie, les coûts d'usage devenaient alors prohibitifs.

Le Lithium-ion permet d'offrir aujourd'hui des véhicules électriques ayant un niveau d'autonomie suffisant pour certains utilisateurs. Les coûts d'achat et d'usage sont en décroissance régulière, particulièrement pour un usage intensif du véhicule qui raccourci le temps d'amortissement. Cinq ans d'avances sur les prévisions de baisse des coûts sont observés.

Les accumulateurs progressent depuis deux décennies de 6% par an en énergie massique et des gains d'autonomie de 50% sont en préparation pour les prochains véhicules. Le véhicule électrique a une faible autonomie sur autoroute à haute vitesse, par contre il est très pertinent sur toutes les autres routes. Sur ces trajets, la batterie et la chaîne de traction électrique sont optimales en rendement, alors que les rendements des véhicules thermiques sont faibles.

Les progrès techniques des accumulateurs Lithium-ion associé à la baisse des coûts permet de passer des seuils techniques ou technico-économiques qui autorisent des mutations. Ainsi, tout l'outillage électroportatif à commuté en Lithium, la voiture électrique et les hybrides rechargeables deviennent une réalité. D'autres mutations peuvent devenir possibles dans un futur assez proche : véhicule électriques en soutien et stockage domestique (V2H), en soutien et stockage réseau (V2G) au fur et à mesure de la baisse du coût d'usage de la fonction stockage d'électricité.

5. References

- [1] D. Chatroux, « Electrochemical battery managements and applications », Power Conversion and Intelligent Motion Europe, Nuremberg, 2015.
- [2] D. Chatroux, "Toyota PRIUS: battery in microcycle mode: the cost of use is divided by five", PCIM 2009
- [3] V. Schwarz, B. Gindroz, "Le stockage électrochimique" Mines Energies Dossier stockage de l'Energie Janvier-Février 2005
- [4] D. Chatroux, « Performances of batteries technologies in vehicle applications », Power Conversion and Intelligent Motion Europe, Nuremberg, 2013.
- [5] <http://www.technologyreview.com/news/516961/how-tesla-is-driving-electric-car-innovation/>
- [6] <http://www.automobile-propre.com/voitures/>

Optimisation du cout de revient global d'un véhicule électrique utilitaire 3,5t

Anthony BABIN^{1,2}, Nassim RIZOUG¹, David BOSCHER², Zouheir HAMDOUN², Chérif LAROUCI¹

¹ ESTACA'LAB, École supérieure des techniques aéronautiques et de construction automobile (ESTACA)
Parc Universitaire Laval-Changé, Rue Georges Charpak – BP 76121, 53061 Laval Cedex 9

² GRUAU LAVAL, 9 bd Marius et René Gruau, 53942 Saint Berthevin

Résumé : *La démocratisation des véhicules électriques passe par la réduction du cout de revient total de ces derniers vis-à-vis des véhicules thermiques. L'estimation des couts dans ce cas est basée sur la connaissance des couts d'investissement et des couts de fonctionnement de chaque type de véhicule (véhicule électrique, véhicule thermique, véhicule hybride). La batterie est le composant le plus cher dans la chaine de traction électrique (jusqu'à 45% du prix de véhicule), pour cela, la rentabilisation de ce composant à travers l'amélioration de sa durée de vie est le principal objectif qui nous permet l'amélioration du cout des véhicules électriques. Dans ce papier nous présentons une méthodologie pour l'amélioration du TCO (Total Cost of Ownership) d'un véhicule électrique utilitaire 3,5t. L'optimisation du cout de revient global s'appuie principalement sur une modélisation multi-physique de la source embarquée et l'application des bonnes stratégies de gestion lors de l'utilisation du véhicule, ainsi que durant la phase de recharge. Les résultats des essais de vieillissements calendaires et en cyclage des cellules de batteries nous permettent de modéliser la batterie embarquée et de connaître les conditions qui favorisent la durée de vie de ses cellules. De l'autre côté, une planification de la recharge en fonction des prévisions d'utilisation du lendemain assure l'utilisateur de ne pas manquer d'énergie pour mener à bien sa mission, tout en préservant la longévité des batteries et, par suite, son cout global de possession.*

Mots-clés—optimisation, gestion, énergie électrique, véhicule électrique utilitaire, planification de la charge, modélisation multi physique, TCO, vieillissement.

1. Introduction

Le contexte écologique et économique actuel nous incite tous à trouver des solutions propres et viables pour se déplacer. Le cout de l'électrification d'un véhicule, l'autonomie, la durée de vie des batteries et l'adaptation des infrastructures électriques pour la recharge sont les principaux freins au développement des ventes de véhicules électriques.

Dans le domaine de l'utilisation professionnelle du véhicule électrique utilitaire, l'équation économique n'est pas satisfaite par les offres sur le marché. Le véhicule utilitaire et notamment le segment du 3,5t est très diversifié et comprend de nombreuses variations de configurations de bases (longueur, hauteur, PTAC...). A cela vient s'ajouter une grande diversité de clients avec des contraintes métier pouvant impacter la dynamique et l'architecture électrique du véhicule, allant de la rampe de chargement motorisée aux systèmes de température dirigée pour le transport de denrées périssables ou de médicaments fragiles. Il est donc nécessaire pour ce segment de disposer d'un véhicule qui ait les capacités de s'adapter à son utilisateur et ses contraintes. Les travaux présentés s'inscrivent dans un « Projet de recherche et développement Structurant pour les Pôles de compétitivité » (PSPC) intitulé VUE-Flex (Véhicule Utilitaire Electrique et Flexible) porté par un consortium de partenaires industriels (Gruau, Actia Automotive, ERDF et la PME Sector) et académiques (le CEA et le laboratoire Laplace) [1]. Il est

indispensable d'optimiser les couts de revient globaux de ces véhicules dans leur contexte. Pour la grande majorité, les professionnels utilisent des véhicules utilitaires de manière ritualisée et effectuent les mêmes types de trajets quotidiens. L'optimisation se base sur la connaissance des missions du lendemain et la prévision énergétique correspondante. La possibilité d'optimiser le TCO passe par une fine connaissance de la batterie. Ce composant dont les performances évoluent avec le temps, représente une part importante du budget du VUE. Aussi la modélisation de sa durée de vie en fonction de son utilisation est un élément primordial. La première étape du travail consiste à déterminer les données nécessaires à recueillir afin d'être en mesure de prévoir les besoins énergétiques. Il est ensuite important de s'intéresser au moyen de stockage de l'énergie. La batterie est pré-dimensionnée en fonction du besoin de la mission [2], une étude du vieillissement met en évidence ses faiblesses et des stratégies de recharge adaptées permettent de préserver au maximum sa durée de vie. Enfin, un algorithme d'optimisation règle les différents paramètres de dimensionnement, d'utilisation et de recharge pour satisfaire les besoins du client en assurant un TCO minimal.

2. La mission et les caractéristiques du véhicule

La détermination de l'énergie utile à un trajet se fait à travers un modèle énergétique complet. Ce modèle nécessite un nombre important de paramètres liés aux caractéristiques du véhicule qu'il convient d'estimer ou calculer avec la plus grande précision. Le modèle énergétique comprend un modèle de dynamique du véhicule afin de retraduire en énergie les besoins exprimés par une mission. Cette modélisation est réalisée à partir des équations du principe fondamental de la dynamique appliqué au véhicule utilitaire électrique (1) [3]. Les coefficients des efforts aérodynamiques et de ceux liés à la résistance au roulement sont estimés par identification avec des enregistrements de roulage du véhicule. Afin de déterminer l'effort induit par la pesanteur, il est nécessaire de connaître la masse du véhicule d'une part mais également le profil de la route, soit la pente à laquelle le véhicule est confronté. La masse du véhicule et par suite la masse des batteries embarquées a une influence directe sur les efforts donc sur l'énergie consommée.

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_{aéro} + \vec{F}_{roulement} + \vec{F}_{poids} + \vec{F}_{traction} \quad (1)$$

Connaissant les caractéristiques énergétiques de la chaîne de traction électrique et à partir du calcul de l'effort de traction issu de l'équation (1), nous pouvons calculer l'énergie nécessaire pour assurer une mission donnée. A cela vient s'ajouter l'énergie utile à tous les consommateurs électriques du véhicule (calculateurs embarqués, assistance de conduite, air conditionné, auxiliaires métier, etc...). La mission qui sera réalisée par le véhicule est définie à travers de nombreuses informations, notamment par la distance du trajet, son relief, le profil de vitesse, les temps de pauses et la température ambiante. Afin de relever ces informations dans des situations réelles d'usage, un moyen d'acquisition a été réalisé et permet d'obtenir l'information de vitesse à travers un module GPS qui indique également la position et l'altitude du véhicule (Fig. 1).

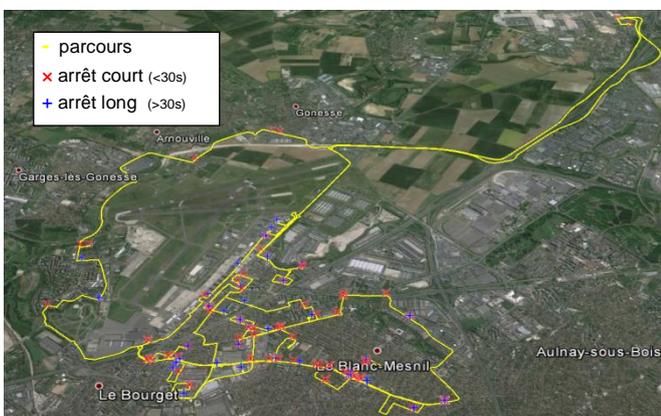


Fig.1 Visualisation d'un relevé de mission

Le parcours choisi pour l'étude est un parcours de type livraison à domicile mixte de 67km sur 5h30 (Fig.2 et Fig.3). L'énergie correspondante à ce trajet, calculée avec le modèle énergétique est de 20kWh.

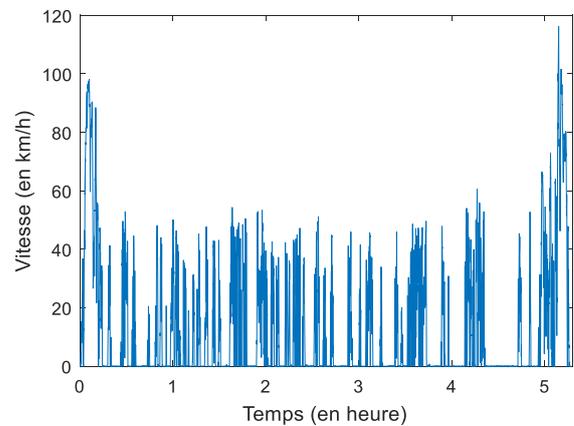


Fig.2 Profil de vitesse du parcours d'étude

Une centrale inertielle, comprenant accéléromètres et gyroscopes, recoupe les données du GPS pour en augmenter la précision. Enfin un accès au réseau CAN du véhicule apporte un complément de précision grâce aux informations fournies par les capteurs du véhicule électrique. L'instrument de mesure sert à relever des profils de missions qui serviront de données d'entrée aux modèles mais également à recalibrer les paramètres en comparant les sorties des modèles aux acquisitions.

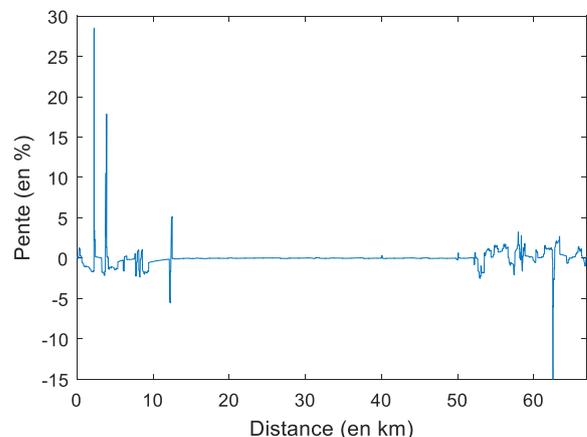


Fig.3 Profil de pente du parcours d'étude

3. Dimensionnement et gestion de la batterie

La partie la plus onéreuse d'un véhicule électrique est sa batterie qui représente à elle seule entre 30 et 45% du prix total. Sa durée de vie dépend fortement de son utilisation et peut se réduire à un temps relativement faible devant la vie d'un véhicule thermique. Le coût de la batterie étant très élevé, il est indispensable, afin d'être compétitif sur le marché, de la dimensionner au plus juste des besoins, d'éviter autant que possible son vieillissement en l'utilisant de la meilleure façon. Les cellules retenues pour l'étude sont des accumulateurs au lithium phosphate de fer (LFP). Le choix de cette technologie est

essentiellement dû au contexte du VUE qui se doit le plus sûr possible, or la chimie LFP est justement reconnue pour être plus stable thermiquement et électriquement que les autres technologies [4].

3.1. Dimensionnement de la batterie

Compte tenu du cout de stockage de l'énergie, il en va de soi à cette étape de minimiser la quantité d'énergie au plus juste des besoins. De plus, la répartition de la masse d'une batterie, qui peut atteindre jusqu'à 30% de la masse totale du véhicule, représente alors à elle seule une dépense énergétique considérable. En effet, un véhicule électrique qui embarquerait une quantité d'énergie surdimensionnée par deux fois ses besoins consommerait au moins 30% de plus d'énergie, sans oublier un prix d'achat également 30% plus élevé au minimum. Le pré-dimensionnement de la batterie se fait à partir du profil de mission souhaité, par l'intermédiaire du modèle énergétique du véhicule décrit dans la partie précédente, en fonction de l'énergie nécessaire entre chaque recharge (20kW.h). Une batterie est considérée en fin de vie lorsque celle-ci a perdu 20% de sa capacité initiale. La batterie sélectionnée par le pré-dimensionnement aura une capacité d'énergie nécessairement supérieure à 125% des besoins soit 25kW.h. Nous avons choisi pour l'étude une configuration de batterie 120s2p afin de satisfaire les besoins de la mission étudiée. La masse de cette solution est d'environ 400kg. A partir de ce premier pré-dimensionnement [2,3] commencera l'optimisation sur le TCO compte tenu de la dégradation engendrée sur les composants de stockage de l'énergie.

3.2. Vieillessement de la batterie

Une fois la solution de stockage pré-dimensionnée au plus juste, il faut s'assurer que celle-ci vieillisse suffisamment lentement pour garantir un cout de revient optimal et conforme à la durée d'étude choisie. Si la solution de stockage ainsi dimensionnée vieillit prématurément, elle ne pourra plus assurer ses fonctions et devra être remplacée ce qui, rappelons-le, représentera un cout pouvant être jusqu'à 45% du prix du véhicule. Afin d'appréhender au mieux ce vieillissement, un modèle multi-physique de la batterie est utilisé. Ce modèle multi-physique est constitué de plusieurs sous-modèles (Fig. 4).

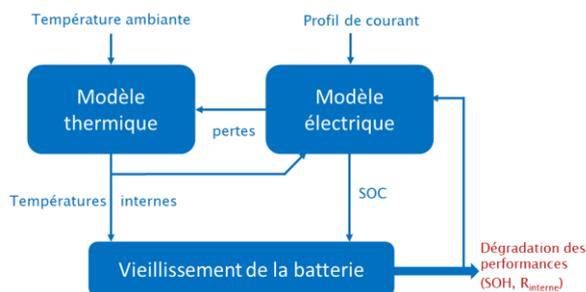


Fig.4 Modélisation multi-physique des composants de stockage d'énergie

Un modèle électrique basé sur un circuit électrique équivalent (Fig.5) couramment utilisé dans la littérature [5,6,7] composé d'une source de tension, d'une résistance interne variable caractérisant la chute de tension liée aux pertes ohmiques de la batterie et de circuits R/C parallèles en série afin de décrire précisément la partie dynamique liée au comportement double couche (dl) et celle liée au phénomène de diffusion (dif).

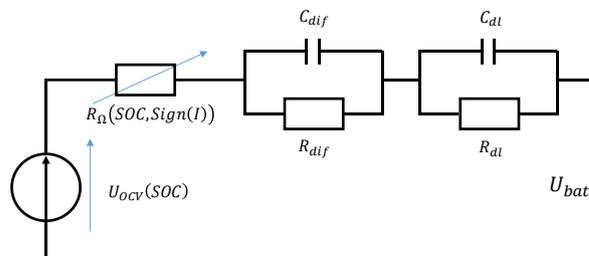


Fig.5 Circuit électrique équivalent de la batterie

Les équations (2) et (3) représentent le lien de la tension à vide et de la résistance interne R_{Ω} avec le SOC. x_i et c_i sont les coefficients d'optimisation déterminés par identification avec les essais.

$$U_{OCV} = x_1 + x_2 \cdot e^{c_1(1-SOC)} + x_3 \cdot e^{c_2 \cdot SOC} + x_4 \cdot e^{c_3(1-SOC)^2} + x_5 \cdot e^{(c_4 \cdot SOC)^2} + x_6 \cdot e^{c_5(1-SOC)^3} + x_7 \cdot e^{(c_6 \cdot SOC)^3} \quad (2)$$

$$R_{\Omega} = \frac{x_8}{\sqrt{SOC(1 + c_7 \cdot sign(I))}} \quad (3)$$

Un modèle thermique équivalent vient compléter le modèle électrique pour traduire la dissipation en chaleur des pertes au sein de la batterie (Fig.6) [8]. La puissance thermique est directement induite des pertes ohmiques de la batterie (4). L'équation (5) représente le lien entre la résistance thermique et le SOC avec a_1 et a_2 les coefficients d'optimisation.

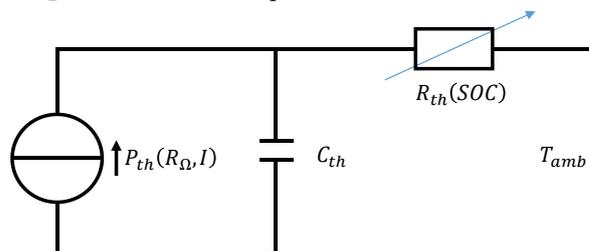


Fig.6 Circuit thermique équivalent de la batterie

$$P_{th} = R_{\Omega} I^2 \quad (4)$$

$$R_{th} = a_1 + a_2 \cdot SOC^3 \quad (5)$$

Enfin un modèle de vieillissement spécifique qui permet de prendre en compte le vieillissement dû au cyclage, ainsi que celui dû au calendrier, vient boucler le modèle multi-physique des accumulateurs. Ce modèle de vieillissement semi-empirique se doit d'être paramétré avec des essais de vieillissement. Grace au modèle énergétique et électrique du véhicule, les

courants fournis par la batterie ont été estimés pour les missions choisies dans le but de générer les plans de test sur les cellules de batterie. Pour le vieillissement, nous devons faire apparaître les deux types de vieillissement : le vieillissement calendaire et le vieillissement en cyclage. Le vieillissement calendaire correspond à la perte de capacité d'une cellule, aussi appelé SOH (State Of Health), lorsque la cellule n'est pas utilisée. Il dépend de la température, du niveau de charge (SOC : State Of Charge) et du temps. La cellule vieillie d'autant plus que le niveau de charge et la température sont important (Fig.7).

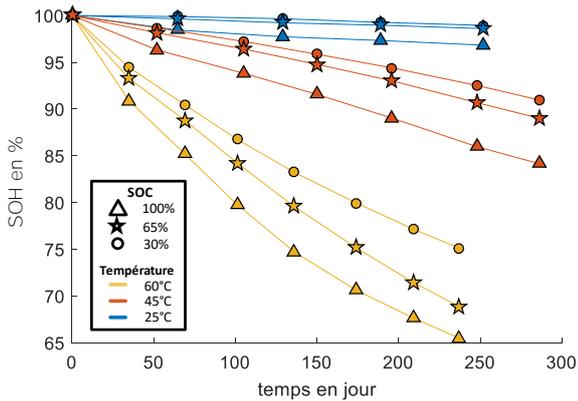


Fig.7 vieillissement calendaire

Le vieillissement en cyclage se cumule avec le vieillissement calendaire, et apparait lorsqu'un courant est utilisé sur la batterie. Il dépend du courant, de l'état de charge, de la température et du temps. Les plans d'essais détaillés dans la figure 8 ont été élaborés en collaboration avec le CEA qui les a ensuite réalisés.

Calendaire	Cyclage
<ul style="list-style-type: none"> 3 Températures : 25°C, 45°C, 60°C 3 SOC : 30%, 65%, 100% 2 cellules par essai 	<ul style="list-style-type: none"> 3 Températures : 0°C, 25°C, 45°C 3 niveaux de courant : 1C, 1.5C, 2.4C 5 plages de SOC : 0-100%, 30-60%, 40-70%, 60-90%, 70-100%
= 18 cellules testées	= 14 cellules testées (contraintes de cout)

Fig.8 Plan de test des cellules

Afin de construire un modèle de vieillissement complet, la première étape est la détermination du modèle calendaire, inspiré d'équations de la littérature qui ont fait leurs preuves [8,9] et adapté à la technologie étudiée LFP. L'équation retenue (6) tient compte du temps à la puissance 3/4, de la température et du SOC.

$$a_{bat}(t, T, SOC) = c_a \cdot t^{\frac{3}{4}} c_T^{\frac{\Delta T}{T}} \cdot c_{SOC}^{\frac{SOC - SOC_0}{\Delta SOC}} \quad (6)$$

De même que pour les autres équations du modèle de batterie, les coefficients c_a , c_T , c_{SOC} , T_0 , ΔT , SOC_0 et ΔSOC sont déterminés par identification aux résultats d'expérience à l'aide d'un algorithme PSO-NM (Particular Swarm Optimisation-Nelder-Mead) [10]. L'erreur relative entre la mesure expérimentale et le

calcul est inférieure à 2% et nous permet donc de valider le paramétrage et la modélisation. A partir de la dégradation globale de la batterie lors des essais en cyclage, nous pouvons à présent isoler la partie liée au vieillissement en cyclage en soustrayant la contribution du calendaire calculée à l'aide de l'équation précédemment déterminée. Le vieillissement en cyclage est ensuite identifié à une pente en fonction des conditions de température, de SOC, de courant et de quantité d'énergie déchargée. La figure 9 représente l'évolution de la dégradation de l'état de santé de la batterie en fonction de la température et du courant pour un cyclage de 1500 cycles.

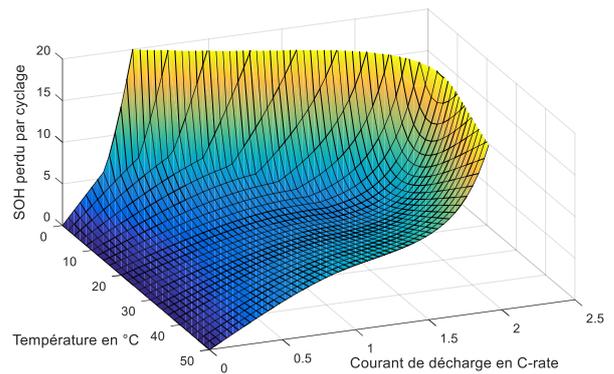


Fig.9 Evolution de la dégradation du SOH après 1500 cycles de cyclages purs

La modélisation de ces vieillissements conduit à la détermination du vieillissement total de la batterie afin d'estimer et optimiser sa durée de vie en agissant sur les conditions d'utilisation et de recharge. Des simulations ont été effectuées pour la solution de batterie choisie précédemment, sous trois températures de fonctionnement (10°C, 25°C et 37°C) afin d'en comparer le vieillissement (Tableau 1). La consommation d'énergie pour assurer cette mission représente 80% de l'énergie d'une solution de batterie composée de 2 séries de cellules en parallèle.

Tableau 1. Calcul du vieillissement à 20% en fonction de la température pour une mission identique

Température	Configuration 120s2p
10°C	2 ans et 6 mois
25°C	3 ans et 7 mois
37°C	2 ans et 8 mois

Nous constatons que la durée de vie de la batterie est relativement faible pour la mission choisie par rapport à la durée de vie d'un véhicule thermique.

3.3. Recharge intelligente de la batterie

La stratégie de recharge de la batterie est une phase importante de l'optimisation du cout de revient global. La modélisation du vieillissement des cellules électrochimiques nous montre que la durée de vie des batteries est liée au niveau de charge des batteries. De manière générale, la recharge d'un véhicule électrique se fait à partir du moment où celui-ci vient à être

connecté à une borne de recharge. Or celui-ci n'est pas toujours utilisé immédiatement après son cycle de recharge, ce qui induit un temps considérable de stationnement du véhicule à un niveau de charge élevé. En rechargeant le véhicule de manière différée et au juste nécessaire, un niveau de charge bas est maintenu le plus longtemps possible, ce qui limite le vieillissement calendaire. Cette intelligence de la recharge doit se faire en s'assurant que la borne soit capable de fournir l'électricité dans la période optimale et passe par une communication avec le réseau électrique [11]. De fait, l'utilisateur est assuré d'avoir un véhicule disponible et économique.

4. Optimisation sur le tco

4.1. Calcul du TCO

Le calcul du TCO tient compte par définition de l'ensemble des coûts liés à la possession du VUE. En premier lieu il y a le prix du véhicule en lui-même dont ses batteries représentent une grande part. Il faut également tenir compte des dépenses en énergie (électricité ou hydrocarbure pour la comparaison avec le véhicule thermique) et des frais liés à l'entretien (plus élevé pour un thermique avec les vidanges filtres et pièces d'usures comme l'embrayage, les injecteurs et les courroies). Il vient ensuite les avantages fiscaux que le véhicule électrique suscite tel que le bonus écologique, une carte grise moins chère, etc... Enfin, le coût résiduel du véhicule est pris en compte avec une perte de valeur plus rapide pour la batterie que le reste du véhicule puisque c'est l'élément qui va vieillir le plus vite. La figure 10 représente la comparaison du TCO entre un véhicule électrique et un thermique au bout de 5 ans en fonction du nombre de kilomètres parcourus. Il apparaît que plus le véhicule électrique parcourt de kilomètres, plus il devient compétitif par rapport au thermique. Il est dans ce cas plus rentable que le véhicule thermique à partir de 95 000 km parcourus en 5 ans. Ce phénomène est évidemment dû, pour la plus grande part, à la différence de coût de l'énergie en faveur de l'électrique. Le calcul est fait en supposant que la durée de vie de la batterie soit de 5 ans au minimum. Pour le parcours étudié, au bout de 5 ans, le véhicule aurait parcouru 120 000 km. Or les simulations issues de la modélisation multi-physique nous montrent que les batteries auraient des durées de vie inférieure à 5 ans pour les trois conditions de températures étudiées. Il est donc indispensable de coupler l'ensemble des modèles et calcul pour estimer la rentabilité d'une solution.

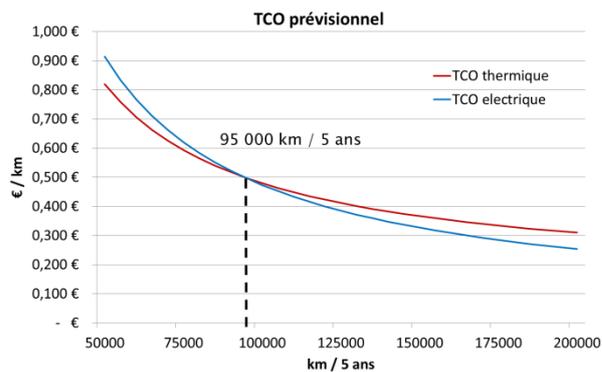


Fig10. comparaison TCO en électrique et thermique

4.2. Méthode d'optimisation du TCO

Un logiciel global développé sous Matlab® se charge de piloter l'ensemble des modèles multi-physiques, d'effectuer le calcul du TCO et de l'optimiser avec une méthode itérative [10]. La méthode, bien qu'efficace, peut cependant se révéler relativement longue. La figure 11 représente les évolutions des écarts relatifs du TCO du véhicule électrique pour la solution 120s2p, sous différentes températures, relativement au TCO du véhicule thermique.

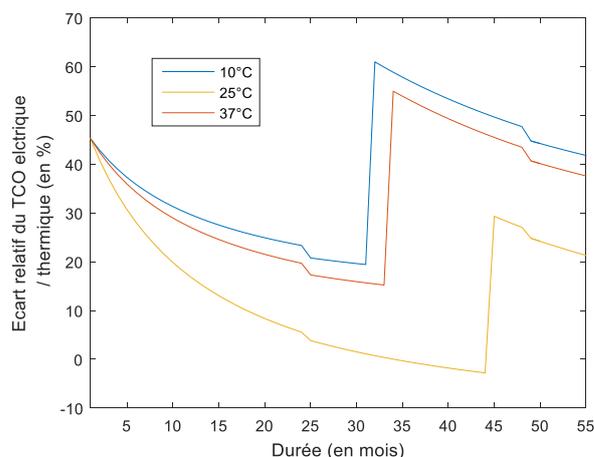


Fig11. Ecart relatif entre les TCO du véhicule thermique sous 10°C, 25°C et 37°C et le TCO du véhicule thermique équivalent.

Seule l'étude à 25°C devient plus rentable que le véhicule thermique équivalent au bout de 30 mois et jusqu'à la fin de la vie de la batterie. Afin de comparer les dimensionnements de batterie les calculs de TCO ont également été faits avec une solution surdimensionnée 120s3p. Elle contient 50% de plus d'énergie et sa masse est elle aussi augmentée du même ratio soit 200kg. Le résultat des simulations (Fig.12) met en évidence le fait que le surdimensionnement de la batterie entraîne une durée de vie plus longue dans les mêmes conditions. Cela est directement dû à la diminution du courant vu par la batterie qui est divisé par 1.5 avec une configuration de 3 séries de cellules en parallèle au lieu de 2.

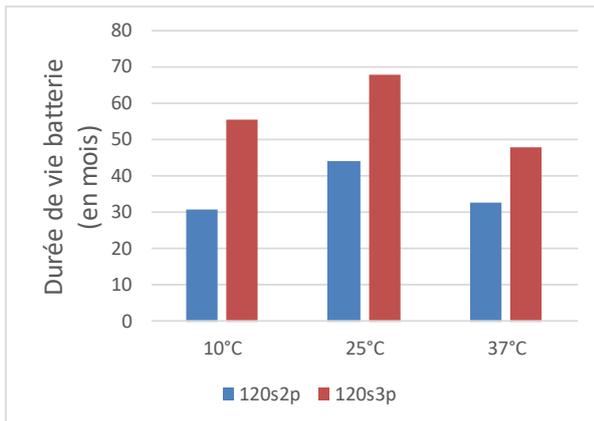


Fig12. Durée de vie des solutions batterie 2p et 3p sous 10°C, 25°C et 37°C

Le résultat ainsi obtenu par le calcul du vieillissement de la batterie doit être confronté au calcul du TCO dans l'algorithme d'optimisation. En effet, il faut comparer l'avantage lié au gain de durée de vie par rapport à la différence de prix des solutions. Une batterie avec une durée de vie plus importante n'est pas spontanément plus rentable puisque son prix sera indéniablement plus élevé. Cependant dans ce cas d'étude, les résultats de calculs résumés dans la figure 13 nous montrent que la batterie surdimensionnée est effectivement plus rentable sur le long terme.

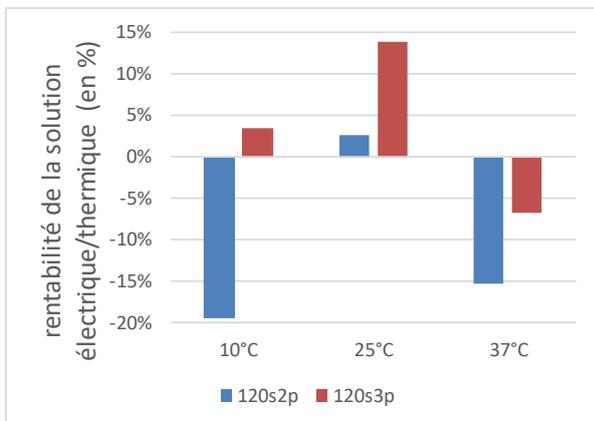


Fig13. TCO relatif des solutions batterie 2p et 3p sous 10°C, 25°C et 37°C

Il apparaît également que pour des températures élevées (37°C) aucune solution électrique n'est plus avantageuse que la solution véhicule thermique. Enfin, concernant la configuration 120s2p, bien que la durée de vie est loin d'atteindre les 5 ans, Le véhicule électrique n'est pas plus coûteux pour une utilisation à 25°C qu'un véhicule thermique.

5. Conclusions

Cette méthode d'optimisation permet à l'utilisateur du véhicule électrique d'être assuré d'avoir un cout de revient global optimal en fonction des objectifs souhaités à savoir disponibilité du véhicule, performance et conditions d'utilisations. Cette méthodologie sera intégrée à un logiciel afin de

conseiller le client sur la rentabilité de son action d'une part mais également de conseiller le vendeur pour qu'il estime les conditions de garantie qu'il va pouvoir se permettre d'offrir. Naturellement, les résultats calculés sont des prévisions par rapport à des conditions d'utilisation et au climat qui différeront plus ou moins dans les faits. La méthode n'est donc pas fiable à 100% dans l'absolu, cela étant, elle permet cependant de définir relativement, la meilleure solution d'électrification du VUE.

La méthode d'optimisation va être travaillée pour s'exécuter plus rapidement, pour donner des résultats encore plus fidèles et pour intégrer le retour d'expérience. Cette amélioration et l'enrichissement du modèle multi-physique offrirait la possibilité de porter cet algorithme dans un logiciel de gestion de flotte. Cet outil utilisable par le propriétaire du véhicule, pourrait ainsi affiner la charge et les modes de conduites du véhicule (limites de variation de couple, de couple maximum, de vitesse et de courant régénératif), en temps réel suivant les conditions d'utilisation et le retour d'expérience. Le logiciel serait alors en mesure de s'autocorriger et d'adapter les prévisions afin d'avoir une estimation quasi temps réel d'une réaffectation de mission à un véhicule.

6. References

- [1] BPIFrance, « Le projet VUE-FLEX, fruit d'un partenariat public-privé, bénéficie d'une aide de 5 millions d'euros dans le cadre du Programme d'investissements d'avenir (PIA), opéré par Bpifrance », <http://investissementsdavenir.bpifrance.fr>, 2015
- [2] R. Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholomeus, B. Barbedette, P. LeMoigne, « Sizing of hybrid supply (battery-supercapacitor) for electric vehicle taking into account the weight of the additional Buck-Boost chopper », in Renewable Energies and Vehicular Technology (REVET), 2012 First International Conference, pp.8-14, 2012
- [3] R. Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholomeus, B. Barbedette, and P. Le Moigne, « Optimal sizing of hybrid supply for electric vehicle using Li-ion battery and supercapacitor », in 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2011
- [4] M. Brand et al., « Electrical safety of commercial Li-ion cells based on NMC and NCA technology compared to LFP technology », Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013 World, Barcelona, 2013
- [5] H. Dai, X. Zhang, X. Wei, Z. Sun, J. Wang, F. Hu, « Cell-BMS validation with a hardware-in-the-loop simulation of lithium-ion battery cells for electric vehicles », International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013

- [6] A. Hentunen, T. Lehmuspelto, J. Suomela, « Electrical battery model for dynamic simulations of hybrid electric vehicles », 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 1–6. doi:10.1109/VPPC.2011.6043164, 2011
- [7] R. Xiong, H. He, H. Guo, Y. Ding, « Modeling for Lithium-Ion Battery used in Electric Vehicles » *Procedia Engineering*, 2011
- [8] T. Mesbahi, N. Rizoug, P. Bartholomeüs, P. Le Moigne, « Improved model of Battery/Supercapacitor hybrid energy storage system based on thermo-electrical and aging behaviors », In *Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014)*, 7th IET International Conference on (pp. 1-8). IET, 2014
- [9] M. Ecker, J. B. Gerschler, J. Vogel, S. Käbitz, F. Hust, P. Dechent, D. U. Sauer, « Development of a lifetime prediction model for lithium-ion batteries based on extended accelerated aging test data », *Journal of Power Sources*, Volume 215, 2012
- [10] T. Mesbahi, F. Khenfri, N. Rizoug, P. Bartholomeus, P. Lemoigne, « Dynamical modeling of Li-ion batteries for electric vehicle applications based on hybrid particle Swarm-Nelder-Mead (PSO-NM) optimization algorithm », *Electric power systems research*, 2015
- [11] ISO, Véhicules routiers - Interface de communication entre véhicule et réseau électrique - Partie 1: Informations générales et définition de cas d'utilisation, ISO 15118-1:2013, Véhicules routiers - Interface de communication entre véhicule et réseau électrique - Partie 2: Exigences du protocole d'application et du réseau, ISO 15118-2:2014.

Contrôle des circuits d'équilibrage des systèmes de stockage d'énergie (supercondensateurs) en vue d'estimer et d'améliorer leur durée de vie

SEÏMA SHILI^(A), PASCAL VENET^(A), ALAA HIJAZI^(B), ALI SARI^(A), XUEFANG LIN-SHI^(B)

(a) Université de Lyon, Lyon, F-69622, France ; Université Claude Bernard, Lyon, F-69622, France ; CNRS, UMR 5005, Laboratoire AMPERE, Villeurbanne, F-69622, France

(b) Université de Lyon, Lyon, F-69622, France ; INSA de Lyon, Lyon, F-69622, France ; CNRS, UMR 5005, Laboratoire AMPERE, Villeurbanne, F-69622, France

Résumé : Dans cet article, des méthodes originales pour la surveillance et l'amélioration de la durée de vie des systèmes de stockage d'énergie sont présentées. Ces objectifs sont menés à bien grâce au contrôle des circuits d'équilibrage présents sur ces systèmes de stockage. La surveillance proposée est en ligne et sans impact majeur sur la structure du système. Elle se base sur l'estimation d'un paramètre interne, à savoir la Résistance Equivalente Série (ESR). Les travaux présentés sont analysés avec des simulations réalistes de modules de supercondensateurs. Les méthodes utilisées pourraient être aussi adaptées sur des batteries.

Mots-clés— Circuit d'équilibrage, Durée de vie, Etat de Santé, Résistance Equivalente Série, Supercondensateur, Système de gestion d'énergie.

1. INTRODUCTION

Un système de stockage d'énergie électrique (SSEE) est constitué d'éléments de stockage (cellules) associés en série ou parallèle plus communément appelé module de stockage [1]. Pour des raisons, entre autres de sécurité et de fiabilité, on associe au module de stockage un système de gestion d'énergie, le BMS. Cette appellation provient de l'anglais « Battery Management system ». Le BMS constitue le système de gestion pour les batteries [2]. Pour les supercondensateurs, d'autres appellations existent comme par exemple SCM pour « SuperCapacitor Manager ». Un système de gestion d'énergie classique comprend différentes fonctions dont principalement la surveillance, la détermination des états du système de stockage et l'équilibrage de ses éléments [3]. La surveillance et la détermination des états du système comprend usuellement le suivi de la tension et de la température de chaque cellule afin, entre autres, de garantir leur maintien dans la bonne plage de fonctionnement. L'équilibrage a pour objectif de corriger la dispersion de tension entre éléments via les circuits d'équilibrage [4][5].

L'article proposé présente de nouvelles stratégies de commande de ces circuits d'équilibrage dans le but d'estimer la durée de vie des supercondensateurs et de l'améliorer. Les circuits d'équilibrage exploités sont des circuits dissipatifs car ce sont aujourd'hui les plus utilisés. Leur principe consiste à dissiper l'excès d'énergie des cellules les plus chargées dans une résistance d'équilibrage. Ils sont donc habituellement constitués d'une résistance d'équilibrage en série avec un interrupteur, placés aux bornes de chaque élément de stockage (cf. Figure 1).

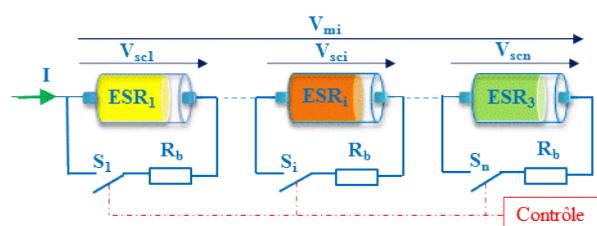


Figure 1. Circuits d'équilibrage dissipatif

La surveillance et l'amélioration de la durée de vie des systèmes de stockage proposées dans cet article sont basées sur des principes simples et ne nécessitent pas de matériel autre que celui déjà présent dans les SSEE. En effet, l'estimation de la durée de vie proposée est réalisée en ligne grâce au circuit d'équilibrage existant. Elle est dépourvue de modèle mathématique complexe et des erreurs associées et permet la détermination de la résistance équivalente série (ESR). La commande en durée de vie, quant-à-elle se base sur l'estimation de l'ESR proposée. Via une commande prédictive optimale, elle cherche à proportionner le niveau de sollicitation de chaque cellule à son niveau de dégradation. Ceci est réalisé dans le but de maximiser la durée de vie de l'ensemble du système. Cette commande est simple et s'affranchit d'algorithmes de calculs longs et complexes. Elle est donc facilement intégrable dans n'importe quel contrôleur de système de gestion d'énergie.

Le travail présenté se divise en quatre parties complémentaires. La première partie présente un état de l'art des supercondensateurs, en particulier de leurs modes et mécanismes de vieillissement. Cette partie permet d'introduire la problématique du travail présenté et son utilité. La seconde partie présente l'estimation de l'état de santé des éléments du module de stockage. La

troisième partie porte sur la nouvelle approche d'amélioration de la durée de vie de ce module. Enfin, dans la dernière partie, les travaux présentés sont traités et analysés grâce à une simulation réalisée sur Matlab/Simulink.

2. Supercondensateurs, modes et mécanismes de vieillissement

Les supercondensateurs, appelés aussi « supercapacités » ou condensateurs à double couches électriques sont des éléments de stockage d'énergie électrique dont la commercialisation est relativement récente [6]. Ils présentent différents avantages comprenant une résistance série faible, une densité de puissance massique forte et de bonnes performances en basse température comparativement aux batteries. Grâce à ces bonnes caractéristiques, les supercondensateurs sont de plus en plus exploités. On les retrouve dans des applications nécessitant une forte puissance durant une courte durée (quelques secondes) [7]. Ils peuvent aussi constituer, avec les batteries, par exemple, des systèmes de stockage multi-sources. Ils ont alors pour rôle de soutenir le système de stockage électrique primaire. Ils sont capables de répondre seuls aux appels de puissance impulsifs. Ce type de sollicitation existe dans différents domaines tels que les transports électriques et hybrides ou les réseaux électriques [8][9][10].

Les bonnes caractéristiques de ces supercondensateurs reposent sur le phénomène de double couche électrique qui a été découvert au 19^{ème} siècle [7]. Grâce à leur processus de stockage majoritairement électrostatique, ils bénéficient d'une durée de vie importante comparée à celle des batteries. Néanmoins, cette durée de vie reste limitée. Leur vieillissement se traduit par une dégradation de leurs performances au cours du temps jusqu'à atteindre la fin de vie.

Les mécanismes de dégradation des supercondensateurs sont dus essentiellement au charbon actif constituant les électrodes et aux liants [11][12].

Un supercondensateur, comme représenté sur la figure 2, est constitué de deux électrodes en charbon actif isolées par un séparateur poreux qui laisse passer les charges ioniques. Ces électrodes sont imbibées d'un électrolyte qui permet le transfert ionique. Deux collecteurs de courant assurent la liaison des électrodes avec l'extérieur.

Le charbon actif, en raison de son processus de fabrication, peut contenir des groupes fonctionnels de surface comme par exemple une quantité infime d'eau. Les groupes fonctionnels de surface sont très réactifs ; sous des contraintes de tension et de température, ils peuvent donc produire un dégagement gazeux (H₂, O₂ et CO₂) et des dépôts solides (fluor, azote, bore, ...) en réaction avec les molécules et les impuretés présentes dans l'électrolyte [13]. Enfin, la dégradation des liants (entre les particules de charbon actif et entre charbon actif et collecteur) au cours du temps peut entraîner aussi la production de particules et une usure du contact électrode/collecteur [14].

Les dépôts solides bouchent les pores des électrodes en charbon actif. Les émanations gazeuses, quant-à-elles, errent à l'intérieur du supercondensateur. Elles peuvent obstruer les pores des électrodes et du séparateur. Elles entraînent aussi l'augmentation de la pression interne. Cette augmentation de pression peut avoir plusieurs conséquences telles que la fissuration de l'électrode et l'altération du contact électrode/collecteur. Une forte augmentation de pression peut entraîner la fuite de l'électrolyte (cf. Figure 2) [16].

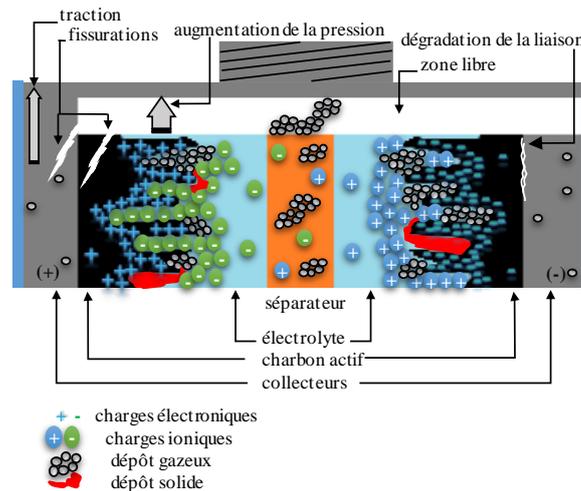


Figure 2. Représentation de la structure et des mécanismes de vieillissement d'un supercondensateur

Les mécanismes de dégradation se manifestent majoritairement au niveau de l'électrode et du séparateur. Au niveau de l'électrode, les particules gazeuses et solides entraînent une limitation de la pénétration des ions à l'intérieur des pores et donc une réduction de la surface accessible. Cette réduction de surface diminue la capacité de la cellule. Au niveau du séparateur, les particules gazeuses qui y sont piégées entraînent un ralentissement du transfert ionique qui augmente la résistance interne de la cellule. Quant à l'altération de la liaison collecteur/électrode, elle entraîne aussi l'augmentation de cette résistance [12]. Ainsi, les modes de dégradation du supercondensateur sont majoritairement représentés par la baisse de la capacité et l'augmentation de la résistance équivalente série ESR [17]. La diminution de la capacité se répercute négativement sur l'énergie stockée. L'augmentation de l'ESR entraîne des puissances plus faibles, des chutes de tension plus importantes à chaque début et fin de charge ou de décharge et un échauffement de la cellule plus important.

La cinétique de dégradation d'un supercondensateur est dépendante principalement de sa température, de sa tension et de son courant [18]. En effet, les réactions pseudo-capacitives non désirées ont une vitesse d'apparition plus importante à fort potentiel et haute température. À titre d'exemple, une augmentation de la tension de la cellule de 0.1 V ou de la température de 10°C peut réduire de moitié la durée de vie du supercondensateur [19]. De récentes études ont démontré aussi l'influence du courant (hors

échauffement global intrinsèque) sur l'amplification des réactions parasites pseudo-capacitives. Un courant élevé peut entraîner des échauffements localisés dans la cellule ce qui accélère son vieillissement.

Ainsi, au cours du vieillissement, un supercondensateur va voir sa capacité baisser et son ESR augmenter continuellement en fonction de ses niveaux de sollicitations électriques et thermique. Une baisse importante de la capacité entraîne une diminution importante de l'énergie disponible qui peut devenir critique lorsque la cellule ne répond plus aux besoins de l'application en termes d'énergie. Une augmentation importante de la résistance équivalente série entraîne un échauffement qui peut amener la cellule à dépasser ses limitations et causer une défaillance brusque. On peut définir donc un critère de défaillance ou de fin de vie du supercondensateur grâce à l'utilisation d'un seuil de capacité et/ou de résistance au-delà duquel le composant est considéré comme étant inutilisable.

Les constructeurs définissent usuellement comme critère fin de vie une baisse de capacité de 20 % et/ou une augmentation de la résistance équivalente série de 100 % par rapport aux valeurs initiales [1].

3. Surveillance de l'état de santé des supercondensateurs

3.1. Principe de surveillance de l'état de santé

La surveillance de l'état de santé des éléments de stockage cible la prévention de la défaillance. Notre objectif final est d'estimer la durée de vie des supercondensateurs constituant le système de stockage d'énergie et de prédire le temps restant avant leur défaillance. Le but est de prévoir le remplacement des éléments défaillants et d'étendre la durée de vie de tout le système.

Afin de suivre l'état de santé des éléments de stockage, nous nous sommes intéressés au suivi en ligne d'un paramètre interne, image du niveau de dégradation de l'élément, qui est la résistance équivalente série ESR. En effet, le vieillissement de l'élément de stockage est caractérisé par l'évolution de ce paramètre qui part d'une valeur initiale et augmente jusqu'à atteindre le critère de fin de vie (choisi comme le double de la valeur initiale). Ainsi, connaissant la loi de vieillissement de l'ESR en fonction du temps, une estimation de l'ESR à un instant donné comparée à sa valeur initiale peut nous indiquer l'âge actuel de la cellule mais aussi approximer la fin de vie éventuelle pour des conditions d'utilisation définies.

A titre d'exemple, l'état de santé peut être calculé grâce à l'indicateur (SOH_{ESR}) lorsque la surveillance se base sur l'évolution de l'ESR (eq. 1).

$$SOH_{ESR}(\%) = \frac{2 \cdot ESR(0) - ESR(t)}{ESR(0)} \cdot 100 \quad (1)$$

$ESR(0)$ correspond à l'ESR initiale de la cellule neuve et $ESR(t)$ correspond à l'ESR à un instant t .

Cet indicateur, SOH_{ESR} , est égal à 100% pour une cellule neuve ($ESR(t) = ESR(0)$) et est égal à zéro lorsque la cellule a atteint son critère de fin de vie ($ESR(t) = 2 \cdot ESR(0)$).

L'évolution de l'ESR au cours du vieillissement peut être assimilée à une croissance linéaire [20][21]. Ainsi l'historique des ESR sauvegardées permet d'approximer la vitesse d'évolution de l'ESR et de prédire le temps restant avant d'atteindre la fin de vie du composant.

L'ESR est un paramètre qui dépend de l'environnement du supercondensateur (température). La comparaison de l'ESR actuelle avec sa valeur initiale dans le but de surveiller son état de santé doit donc être réalisée dans les mêmes circonstances. Si cette condition n'est pas assurée, l'ESR initiale ($ESR(0)$) doit être corrigée pour correspondre aux conditions actuelles du supercondensateur. Cette correction nécessite la connaissance de la loi de variation de l'ESR en fonction de la température du supercondensateur.

La figure 3 représente un exemple de variation de l'ESR mais aussi de la capacité pour un supercondensateur de 1800 F/ 2.5 V en fonction de la température.

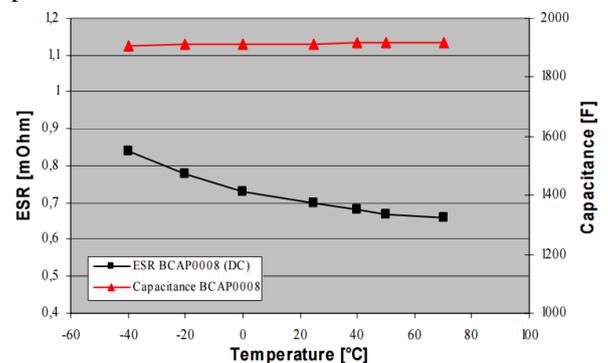


Figure 3. Variation de l'ESR et de la capacité en fonction de la température d'un supercondensateur 1800 F, 2.5 V [22]

Cette correction de l'ESR assure la fiabilité de la surveillance de l'état de santé face aux variations des conditions d'utilisation des supercondensateurs. La loi de variation de l'ESR peut être calculée à partir des données « constructeur » (cf. Figure 3) ou déduite d'une caractérisation initiale, réalisée à différentes températures de fonctionnement.

3.2. Nouvelle approche de commande

L'estimation de l'ESR du supercondensateur nécessite généralement l'utilisation d'un matériel comme un spectromètre d'impédance et l'emploi d'un protocole de caractérisation spécifique [23]. Dans ce cas, chaque cellule est caractérisée individuellement hors de son environnement d'utilisation.

Nous nous proposons dans cet article d'estimer l'ESR instantanée de l'élément en fonctionnement. L'idée consiste à provoquer, avec les circuits d'équilibrage, une chute de tension image de l'ESR. La chute de tension considérée est celle observée à chaque début ou fin de charge/décharge des cellules.

La suite de cet article est consacrée à la commande des circuits d'équilibrage utilisée. Considérons un système de stockage électrique constitué de n supercondensateurs associés en série. Chaque supercondensateur, SC_i , est représenté par un modèle simple à savoir une capacité C_i en série avec une

résistance ESR_i (avec $i \in [1, n]$). Aux bornes de chaque supercondensateur se trouve un circuit d'équilibrage constitué d'une résistance d'équilibrage R_b et d'un interrupteur S_i (avec $i \in [1, n]$). Le système de gestion d'énergie assure la surveillance de la température T_i et de la tension V_{sc_i} de chaque supercondensateur SC_i , mais aussi de la tension du système, V_{sys} et du courant I traversant le système (cf. Figure 4).

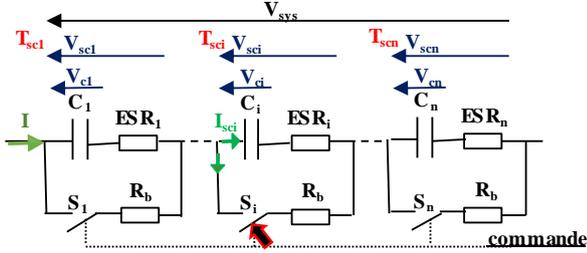


Figure 4. Schéma électrique du SSEE considéré

Le principe consiste à provoquer la chute de tension, image de l'ESR d'un élément donné, grâce à la commutation de l'interrupteur de son circuit d'équilibrage.

Soit $V_{sc_i}^-$ la tension du supercondensateur SC_i juste avant la commutation et $V_{sc_i}^+$ sa tension juste après la commutation. De même, les différents paramètres notés avec un indice (-), correspondent à leur état juste avant la commutation et ceux noté (+) juste après la commutation.

Les tensions avant et après commutation peuvent s'exprimer comme suit :

$$V_{sc_i}^- = V_{c_i}^- + ESR_i^- \cdot I^- , \forall i \in [1, n] \quad (2)$$

$$V_{sc_i}^+ = V_{c_i}^+ + ESR_i^+ \cdot I^+ - \frac{V_{sc_i}^+}{R_b} , \forall i \in [1, n] \quad (3)$$

Comme la commutation est de courte durée (< 1 seconde), la simplification de certains paramètres est possible. La tension aux bornes du condensateur C_i , V_{c_i} est supposée constante durant la commutation. De même, l'ESR dont l'évolution est très lente peut aussi être considérée constante durant la commutation.

La chute de tension, ΔV_{sc_i} , résultant de la commutation rapide du circuit d'équilibrage est donc exprimée comme suit :

$$\Delta V_{sc_i} = V_{sc_i}^- - V_{sc_i}^+ , \forall i \in [1, n] \quad (4)$$

$$\Delta V_{sc_i} = ESR_i \cdot \left(\frac{V_{sc_i}^+}{R_b} + (I^- - I^+) \right) , \forall i \in [1, n] \quad (5)$$

Si le système de stockage est au repos ou lorsque le courant est constant ou n'évolue pas trop durant la commutation, l'équation (5) peut être encore simplifiée. L'ESR de l'élément à caractériser grâce à la commande du circuit d'équilibrage est exprimée par l'équation (6).

$$ESR_i = \Delta V_{sc_i} \cdot \frac{R_b}{V_{sc_i}^+} , \forall i \in [1, n] \quad (6)$$

Ainsi la simple commutation rapide du circuit d'équilibrage branché aux bornes du supercondensateur permet d'avoir une estimation réelle de son ESR actuelle ($ESR(t)$) et de prédire son état de santé.

4. Commande proposée des circuits d'équilibrage

Dans cette partie, on s'intéresse à la commande des circuits d'équilibrage afin de maximiser la durée de vie du SSEE.

4.1. Problématique et notion de maximisation de durée de vie

Comme expliqué dans le deuxième paragraphe de cet article, les paramètres d'un supercondensateur évoluent au cours du temps jusqu'à atteindre un seuil limite (critère de fin de vie). La vitesse de dégradation du supercondensateur dépend du niveau de sollicitations électriques et thermique. Plus la température et/ou la tension et/ou le courant du supercondensateur sont élevés plus son seuil de fin de vie est atteint rapidement.

Considérons maintenant un système de stockage d'énergie constitué de plus de deux supercondensateurs associés en série.

Classiquement, grâce aux circuits d'équilibrage, les éléments du système de stockage sont maintenus à un même niveau de tension.

La fin de vie d'un module de stockage est entraînée par l'élément qui aura atteint son critère de fin de vie en premier. A tension et courant identiques, les supercondensateurs constituant le module vont présenter une dispersion des vitesses de dégradation essentiellement due à la dispersion de leur température. Ainsi, la cellule avec la température la plus élevée vieillit plus rapidement et entraîne la défaillance de tout le système. Il a été démontré que selon l'emplacement des supercondensateurs, on pouvait observer plus de 10°C d'écart entre les éléments d'un même système de stockage [24]. Ceci peut donc réduire de moitié la durée de vie opérationnelle du système.

La figure 5 représente une image thermique d'un module de stockage à base de supercondensateurs (120 supercondensateurs associés en série) surveillé par un SCM classique.

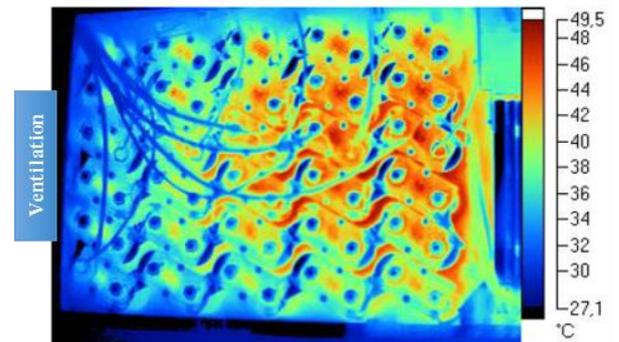


Figure 5. Image thermique d'un module de stockage de 120 supercondensateurs en série [24]

Sur cette figure, on observe environ 20 °C d'écart entre un supercondensateur placé au centre du module et un supercondensateur sur le côté, près de la ventilation.

Ainsi un module de stockage n'est pas utilisé de façon optimale. Il atteint sa fin de vie prématurément, entraîné par l'élément le plus faible, bien que les autres éléments ne soient pas au même stade de vieillissement et peuvent encore être exploités.

4.2. Principe de maximisation de durée de vie

L'approche de commande proposée des circuits d'équilibrage est nouvelle. Contrairement à l'égalisation classique de tension, cette stratégie prend en considération la dispersion du niveau de dégradation entre éléments causée par la dispersion des conditions d'utilisation (essentiellement liées à la température). L'objectif de cette commande est d'homogénéiser les vitesses de dégradation des différentes cellules. Ainsi, les cellules jugées faibles et risquant d'entraîner la défaillance du système seront, par l'intermédiaire de leur circuit d'équilibrage, moins sollicitées en abaissant leur tension. Réciproquement, les cellules les plus saines seront sollicitées par une tension plus importante. L'égalisation des tensions n'est alors plus assurée par les circuits d'équilibrage, une dispersion de tension est au contraire provoquée avec cette stratégie dans le but de maximiser la durée de vie du système.

Pour ce faire, la nouvelle commande des circuits d'équilibrage a donc besoin de l'information de l'état de santé de chaque élément constituant le système de stockage d'énergie surveillé. Cette nouvelle approche de commande est basée sur un modèle prédictif de l'évolution du paramètre interne surveillé, à savoir dans notre cas l'ESR. La prédiction de l'évolution de ce paramètre en fonction de la commande des circuits d'équilibrage permet alors de surveiller la vitesse de dégradation de chaque cellule.

La commande à modèle prédictif a été choisie pour sa simplicité et du fait qu'elle se réactualise avec les mesures en temps réel. Notre objectif est de rester simple en termes d'algorithme de commande de façon à ce que la stratégie proposée reste concurrentielle face à la comparaison de tension utilisée dans les commandes conventionnelles. La commande prédictive s'initialise à chaque pas de temps avec les paramètres réels (tension, courant, température), mesurés par le SCM classique mais aussi avec l'ESR estimée. Ainsi, et grâce à ces mesures, le modèle prédictif d'évolution de l'ESR reste très proche du comportement réel du supercondensateur modélisé et surveillé.

L'objectif de la commande prédictive est d'homogénéiser le vieillissement des supercondensateurs constituant le module de stockage. La prédiction de l'état de santé étant fonction de la vitesse de dégradation de la cellule surveillée, réduire la dispersion de ces états de santé prédits assure l'objectif d'homogénéisation. La fonction coût a donc pour rôle de minimiser l'écart de dispersion des vitesses de dégradation. Elle est donc exprimée par l'équation (7) comme suit :

$$J = \min[\max(\text{SOH}_{\text{ESR}_i}(t+tp)) - \min(\text{SOH}_{\text{ESR}_i}(t+tp))] \quad (7)$$

Avec J la fonction coût, $\text{SOH}_{\text{ESR}_i}(t+tp)$ l'état de santé prédit grâce à la prédiction de l'ESR durant le temps de prédiction tp.

La séquence de commande des circuits d'équilibrage choisie permettra donc de réduire l'écart des vitesses de dégradation entre l'élément le plus sain (plus grand état de santé prédit) et l'élément le plus vieilli (plus faible état de santé prédit).

5. Analyse de la commande par simulation

5.1. Présentation de la simulation réalisée

Afin de valider cette approche ainsi que le travail qui suit, une simulation sur Matlab/Simulink a été réalisée. Cette simulation correspond à un modèle évolutif d'un système de stockage d'énergie surveillé et contrôlé par un système de gestion d'énergie. Le système de stockage d'énergie est constitué de trois supercondensateurs associés en série. Chaque supercondensateur a des caractéristiques spécifiques et évolue en fonction de ses propres sollicitations électriques et thermiques jusqu'à atteindre son critère de fin de vie. Chaque supercondensateur a, à ses bornes, un circuit d'équilibrage dissipatif contrôlé afin d'estimer et d'améliorer la durée de vie des supercondensateurs.

Une telle modélisation nécessite trois sous-modèles pour chaque supercondensateur :

Un modèle électrique pour reproduire le comportement électrique du composant (cf. Figure 4).

Un modèle thermique pour simuler la température du supercondensateur [25].

Un modèle de durée de vie pour décrire l'évolution temporelle des paramètres internes du supercondensateur [18].

Les trois modèles interagissent entre eux comme représenté sur la figure ci-dessous (cf. Figure 6).

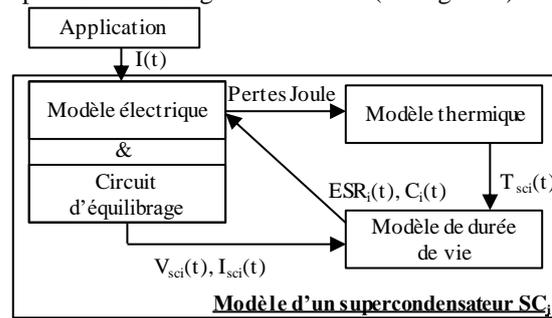


Figure 6. Modélisation d'un supercondensateur sur Matlab/Simulink

Le système de stockage simulé est initialisé afin de créer une dispersion initiale des paramètres internes et une dispersion des températures au cours du fonctionnement.

Les modèles électriques des supercondensateurs sont initialisés comme suit :

Tableau 1. Paramètres initiaux du modèle électrique

	$V_{sci}(V)$	$ESR_i(0) (m\Omega)$	$C_i(0) (F)$
SC₁	2.5	0.29	3000
SC₂	2.5	0.33	2625
SC₃	2.5	0.36	2250

Le modèle thermique a été initialisé afin de simuler une dispersion de température de 10 °C maximale entre les trois supercondensateurs. Ainsi, dans le module de stockage, on retrouve trois cellules sollicitées différemment. Une cellule est continuellement à plus haute température (SC₃), une cellule est continuellement à une température plus faible (SC₁) et enfin une cellule

se trouve à une température intermédiaire (SC2). L'objectif de cette simulation est d'analyser le comportement de la nouvelle approche de commande face à cette dispersion.

Le modèle de durée de vie étant identique pour les trois composants, il permet d'actualiser les paramètres internes des trois supercondensateurs en fonction de leurs sollicitations électriques et thermique spécifiques. Le système de stockage est sollicité électriquement par un cycle de puissance, répétitif, correspondant à l'application du nouveau cycle Européen de conduite (NEDC) (cf. Figure 7).

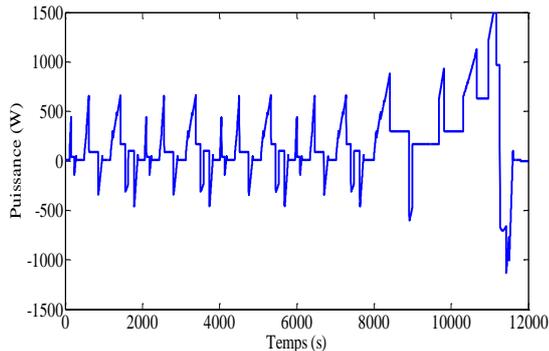


Figure 7. Cycle de puissance NEDC

Ainsi, le système de stockage évolue en fonction du temps et de ses sollicitations jusqu'à atteindre sa défaillance entraînée par son ou ses éléments qui auront atteint leur critère de défaillance.

5.2. Résultats de simulation

La première approche théorique de surveillance de l'état de santé provoque des chutes de tension présentées ci-dessous (cf. Figure 8, 9 et 10). L'estimation présentée est réalisée en début de vie du module simulé. On observe bien que ces chutes de tension permettent de remonter aux ESR initiales.

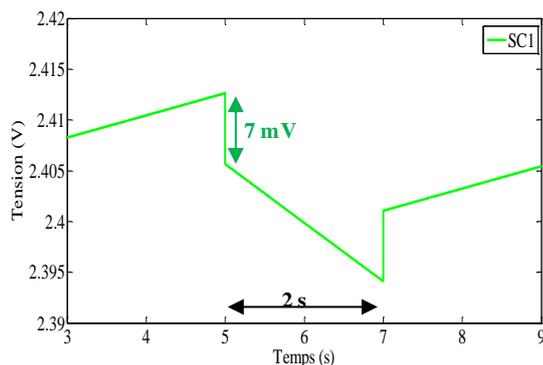


Figure 8. Tension du supercondensateur SC1 lors de l'estimation de l'état de santé

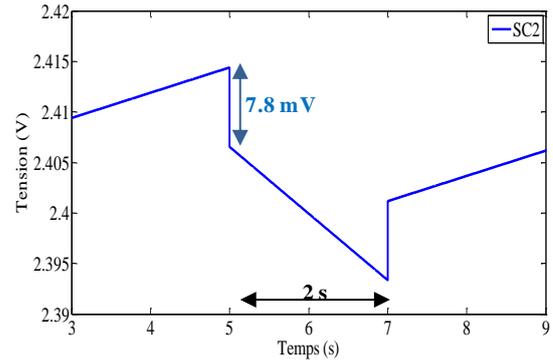


Figure 9. Tension du supercondensateur SC2 lors de l'estimation de l'état de santé

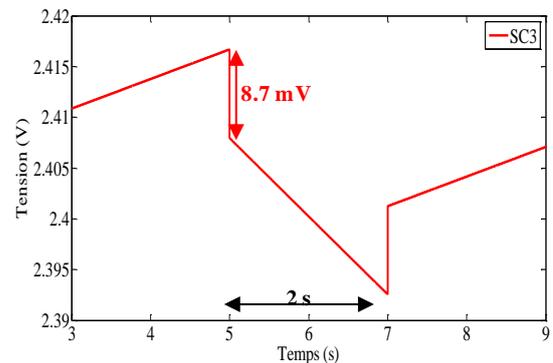


Figure 10 Tension du supercondensateur SC3 lors de l'estimation de l'état de santé

Afin de montrer l'efficacité de notre nouvelle approche, nous avons appliqué la commande classique et la commande en durée de vie sur un même système de stockage et on a observé l'évolution du système à chaque fois. Les deux commandes sont appliquées en phase de charge ou de repos et sont actualisées toutes les 0.3 s.

La figure 11 représente les tensions des éléments du système lors d'une commande classique d'égalisation de tension.

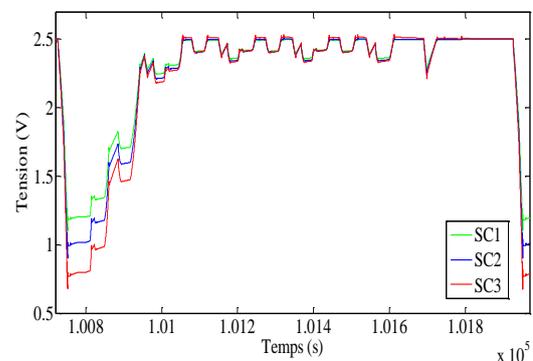


Figure 11 Tensions des éléments du SSE pour un cycle NEDC lors de la commande classique d'égalisation de tension

La figure 12 représente un cas de figure de dispersion créée au sein du système de stockage lors de la nouvelle approche de commande.

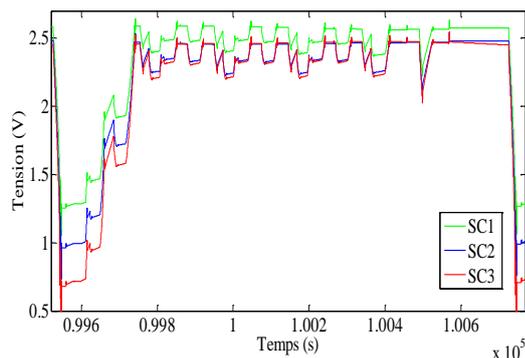


Figure 12. Tensions des éléments du SSE pour un cycle NEDC lors de la commande maximisant la durée de vie

La figure 13 représente l'évolution de l'ESR des éléments pour chaque commande. Les traits pointillés correspondent aux résultats de la commande classique et les traits plein correspondent aux résultats de la commande maximisant la durée de vie. La durée de vie initiale, de tous les supercondensateurs, a été réduite d'un facteur 10 pour réduire les temps de simulation.

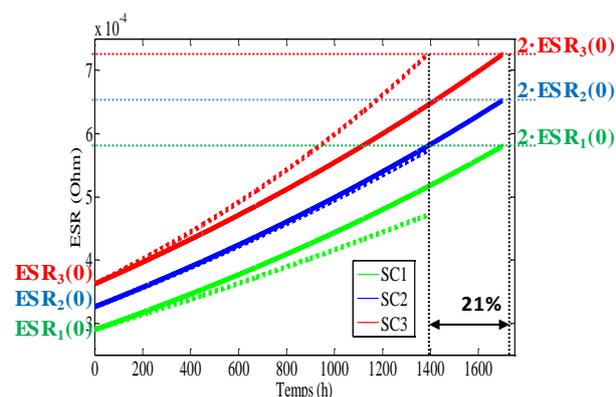


Figure 13 Evolution d'ESR en fonction de la commande appliquée

On remarque que pour la commande classique, comme prédit, la défaillance du système est entraînée par le supercondensateur SC_3 . Ce dernier, rappelons-le, subit une température plus importante. A tension égale SC_3 vieillit plus rapidement entraînant la défaillance du système, alors que SC_1 est encore à 38 % de sa durée de vie.

Pour la commande maximisant la durée de vie, la défaillance du système arrive 21 % plus tard grâce à la dispersion de tension qu'elle crée. La fin de vie du système est causée par la défaillance quasi-simultanée de ses trois éléments qui se dégradent à même allure au cours du temps. La commande proposée a permis donc grâce aux dispersions de tension provoquées de rallonger la durée d'utilisation du module de stockage

Ce résultat est très satisfaisant puisqu'il ne nécessite aucun ajout de matériel et qu'il est obtenu juste en changeant l'approche de commande d'un matériel existant.

6. CONCLUSIONS

Le travail présenté dans cet article porte sur l'amélioration de la durée de vie des systèmes de stockage d'énergie à travers une nouvelle approche de commande des circuits d'équilibrage du système de gestion d'énergie qui assure la surveillance et la sécurité des systèmes de stockage d'énergie.

Les méthodes proposées exploitent le matériel existant sur le SSEE et ne nécessitent pas une capacité de calcul importante. Elles peuvent être facilement implémentées dans un système de gestion d'énergie et prolonger de façon notable la durée de vie du SSEE.

7. REFERENCES

- [1] Maxwell Technologies, "Application Note: Maxwell Technologies, BOOSTCAP Energy Storage Modules, Life Duration Estimation," 2007.
- [2] M. Brandl, H. Gall, M. Wenger, V. Lorentz, M. Giegerich, F. Baronti, G. Fantechi, L. Fanucci, R. Roncella, R. Saletti, S. Saponara, A. Thaler, M. Cifrain, and W. Prochazka, "Batteries and battery management systems for electric vehicles," in Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), 2012, 2012, pp. 971–976.
- [3] A. David, Battery Management Systems for large Lithium-Ion Battery Pack. Boston, London: Artech House, 2010.
- [4] J. Cao, N. Schofield, and A. Emadi, "Battery balancing methods: A comprehensive review," in Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE, 2008, pp. 1–6.
- [5] Y. Qu, J. Zhu, J. Hu, and B. Holliday, "Overview of supercapacitor cell voltage balancing methods for an electric vehicle," in ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), 2013 IEEE, 2013, pp. 810–814.
- [6] B. E. Conway, Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications. Kluwer Academic/Plenum, 1999.
- [7] R. Kotz and M. Carlen, "Principles and applications of electrochemical capacitors," *Electrochimica Acta*, vol. 45, no. 15–16, pp. 2483–2498, 2000.
- [8] R. Karangia, M. Jadeja, C. Upadhyay, and H. Chandwani, "Battery-supercapacitor hybrid energy storage system used in Electric Vehicle," in Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2013 International Conference on, 2013, pp. 688–691.
- [9] A. Khaligh and Z. Li, "Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art," *Veh. Technol. IEEE Trans. On*, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814, 2010.
- [10] A.-L. Allegre, A. Bouscayrol, P. Delarue, P. Barrade, E. Chattot, and S. El-Fassi, "Energy Storage System With Supercapacitor for an Innovative Subway," *Ind. Electron. IEEE Trans. On*, vol. 57, no. 12, pp. 4001–4012, Dec.
- [11] P. Azaïs, L. Duclaux, P. Florian, D. Massiot, M.-A. Lillo-Rodenas, A. Linares-Solano, J.-P. Peres, C. Jehoulet, and F. Béguin, "Causes of

- supercapacitors ageing in organic electrolyte,” *J. Power Sources*, vol. 171, no. 2, pp. 1046–1053, Sep. 2007.
- [12] R. German, P. Venet, A. Sari, O. Briat, and J.-M. Vinassa, “Improved Supercapacitor Floating Ageing Interpretation Through Multipore Impedance Model Parameters Evolution,” *Power Electron. IEEE Trans. On*, vol. 29, no. 7, pp. 3669–3678, Jul. 2014.
- [13] Y. Zhang, H. Feng, X. Wu, L. Wang, A. Zhang, T. Xia, H. Dong, X. Li, and L. Zhang, “Progress of electrochemical capacitor electrode materials: A review,” *2nd Int. Workshop Hydrog. Int. Workshop Hydrog.*, vol. 34, no. 11, pp. 4889–4899, Jun. 2009.
- [14] R. Chaari, O. Briat, J. Y. Deletage, E. Woïgard, and J.-M. Vinassa, “How supercapacitors reach end of life criteria during calendar life and power cycling tests,” *Microelectron. Reliab.*, vol. 51, no. 911, pp. 1976 – 1979, 2011.
- [15] R. German, “Etude du vieillissement calendaire des supercondensateurs et impact des ondulations de courant haute fréquence,” Université Claude Bernard, Lyon1, France, 2013.
- [16] R. German, P. Venet, A. Sari, O. Briat, and J. M. Vinassa, “Interpretation of electrochemical double layer capacitors (Supercapacitors) floating ageing by multi-pore model,” in *IPEC, 2012 Conference on Power Energy*, 2012, pp. 218–223.
- [17] R. Kotz, P. W. Ruch, and D. Cericola, “Aging and failure mode of electrochemical double layer capacitors during accelerated constant load tests,” *J. Power Sources*, vol. 195, no. 3, pp. 923 – 928, 2010.
- [18] P. Kreczanik, P. Venet, A. Hijazi, and G. Clerc, “Study of Supercapacitor Aging and Lifetime Estimation According to Voltage, Temperature, and RMS Current,” *Ind. Electron. IEEE Trans. On*, vol. 61, no. 9, pp. 4895–4902, Sep. 2014.
- [19] A. Hammar, P. Venet, R. Lallemand, G. Coquery, and G. Rojat, “Study of Accelerated Aging of Supercapacitors for Transport Applications,” *Ind. Electron. IEEE Trans. On*, vol. 57, no. 12, pp. 3972 –3979, Dec. 2010.
- [20] R. German, A. Sari, P. Venet, O. Briat, and J.-M. Vinassa, “Study on specific effects of high frequency ripple currents and temperature on supercapacitors ageing,” *Proc. 26th Eur. Symp. Reliab. Electron Devices Fail. Phys. Anal. ESREF 2015*, vol. 55, no. 9–10, pp. 2027–2031, Aug. 2015.
- [21] M. Ayadi, O. Briat, R. Lallemand, A. Eddahech, R. German, G. Coquery, and J. . Vinassa, “Description of supercapacitor performance degradation rate during thermal cycling under constant voltage ageing test,” *SI ESREF 2014*, vol. 54, no. 9–10, pp. 1944–1948, Sep. 2014.
- [22] Maxwell Technologies, “Gateway to a New Thinking in Energy Management - Ultracapacitors,” San Diego, Jan-2005.
- [23] S. Buller, E. Karden, D. Kok, and R. W. De Doncker, “Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy,” *Ind. Appl. IEEE Trans. On*, vol. 38, no. 6, pp. 1622–1626, Dec. 2002.
- [24] P. Kreczanik, “Etude de la fiabilité et du vieillissement d’un système de stockage par supercondensateurs pour l’alimentation partielle et ponctuelle d’un trolleybus grâce à la récupération de l’énergie de freinage. Approche du composant au système de stockage,” Mémoire de thèse, Université Claude Bernard, Lyon1, France, 2011.
- [25] A. Hijazi, P. Kreczanik, E. Bideaux, P. Venet, G. Clerc, and M. Di Loreto, “Thermal Network Model of Supercapacitors Stack,” *Ind. Electron. IEEE Trans. On*, vol. 59, no. 2, pp. 979–987, Feb. 2012.

Modélisation thermique en vue du dimensionnement d'un pack batterie, avec prise en compte du couplage électrothermique pour la caractérisation des pertes électriques.

NICOLAS DAMAY

Sorbonne universités, Université de technologie de Compiègne

CHRISTOPHE FORGEZ

Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne, EA 1006

GUY FRIEDRICH

Centre de recherche Royallieu, CS 60319, 60203 Compiègne cedex (France)

Résumé : Le dimensionnement thermique optimal d'un pack batterie permet de mieux maîtriser son vieillissement mais il est tributaire de la précision des modèles utilisés. Un modèle thermique de batterie est proposé dans cet article et l'accent est porté sur la caractérisation des pertes électriques. Il est montré comment le couplage électrothermique peut affecter la dynamique électrique et une méthode de caractérisation tenant compte de ce couplage est proposée. La comparaison des simulations avec des mesures expérimentales démontre que l'erreur d'estimation des pertes électriques est fortement réduite à fort régime et à basse température.

Mots-clés – Pack batterie, modélisation thermique, caractérisation des pertes électriques, couplage électrothermique.

1. INTRODUCTION

Cet article s'inscrit dans la problématique de la gestion de la batterie au sein d'un véhicule électrique [1, 2]. Plus particulièrement, la maîtrise de la température de fonctionnement est essentielle pour pouvoir garantir la durée de vie du pack batterie, car les principaux mécanismes de vieillissement sont accélérés à haute température [3, 4]. Afin de limiter les dégagements de chaleur et d'extraire les calories générées de manière efficace, il faut dimensionner la batterie et son système de refroidissement à l'aide d'un modèle thermique [5].

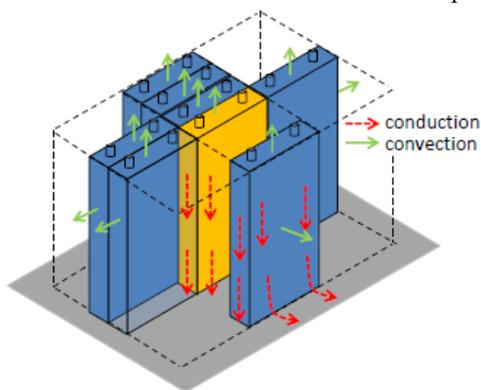


Figure 1 - Schéma d'un pack batterie composé de cellules prismatiques. Mise en évidence des différents échanges avec l'atmosphère interne et avec le fond du pack batterie (en gris), qui sont limités pour la cellule centrale (en jaune).

L'analyse d'un pack batterie composé de cellules prismatiques a permis d'établir que la modélisation de son élément central est suffisante pour permettre son dimensionnement thermique [6]. En effet, les cellules centrales peuvent être considérées comme étant à la même température, ce qui autorise une extraction des calories uniquement par le haut - par convection vers l'atmosphère interne du pack - ou par le bas - par conduction vers le fond du carter (Fig. 1).

Un modèle thermique d'une cellule prismatique LiFePO₄/graphite d'environ 40 Ah a été développé au cours d'une précédente étude et il est rappelé au sein de la deuxième section de cet article [6]. Il s'agit d'un modèle à constantes localisées permettant d'obtenir les températures-clés d'une cellule tout en ne demandant qu'une puissance de calcul réduite [7].

Les sources de chaleur du modèle thermique font l'objet d'une modélisation spécifique, notamment pour les pertes électriques [8, 9]. Au total, ce sont trois modèles : thermique, électrique et de génération de chaleur qui sont couplés pour simuler le comportement thermique de la batterie (Fig. 2). Dans les troisième et quatrième sections, une attention particulière est portée sur la modélisation puis sur la caractérisation des pertes électriques. Le fort couplage entre les phénomènes électriques et thermiques est présenté, puis il est montré comment sa prise en compte peut permettre de déterminer les paramètres électriques de manière précise.

Les modèles couplés sont validés expérimentalement dans la cinquième section dans le cas d'une cellule isolée et dans celui d'une cellule fonctionnant au centre d'un pack batterie. Elles sont soumises à des profils permettant de tester les capacités des modèles à représenter tout type de roulage. Les bénéfices de la prise en compte du couplage électrothermique durant la caractérisation sont mis en avant.

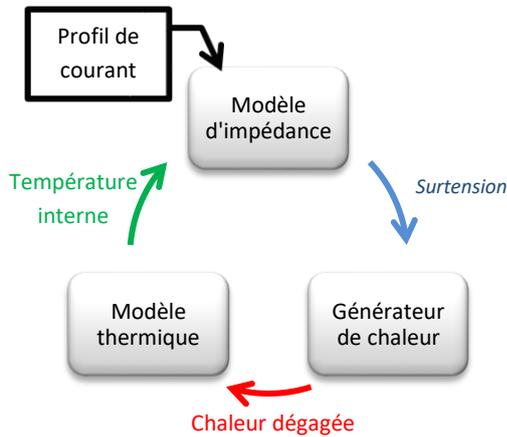


Figure 2 - Couplage entre les modèles thermique, électrique et de génération de chaleur

2. MODÈLE THERMIQUE

Le modèle thermique utilisé dans cette étude est représenté sur la figure 3. Les composants thermiques associés au « cœur actif » ont été représentés en vert, ceux du boîtier aluminium en rouge et les échanges extérieurs à la cellule en bleu. Ces derniers dépendent de la façon dont est intégrée la cellule dans le pack batterie.

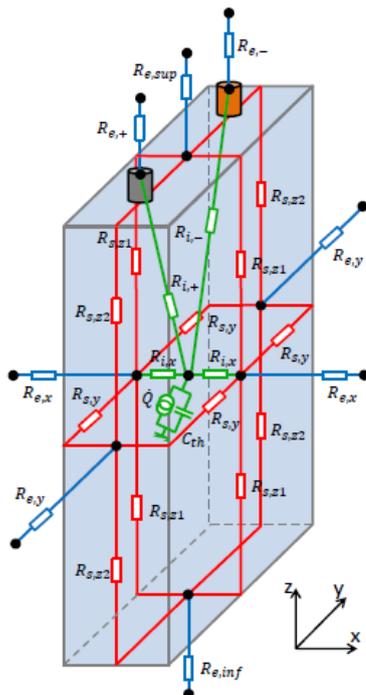


Figure 3 - Modèle thermique à constantes localisées d'une cellule prismatique

La construction et la détermination des paramètres de ce modèle sont détaillées dans un précédent article [6]. Les valeurs des paramètres thermiques - obtenues à l'aide de méthodes analytiques et expérimentales - ont été rappelées dans le tableau 1.

	Valeur	Type
Q	Variable	Modèle
C_{th}	1185 J.K ⁻¹	Expérimental
$R_{i,x}$	1.9 K.W ⁻¹	Analytique
$R_{i,+}$	5.0 K.W ⁻¹	Analytique
$R_{i,-}$	5.5 K.W ⁻¹	Analytique
$R_{s,y}$	3.1 K.W ⁻¹	Analytique
$R_{s,z1}$	9.0 K.W ⁻¹	Analytique
$R_{s,z2}$	37.1 K.W ⁻¹	Analytique
$R_{e,x}$	141.4 K.W ⁻¹	Analytique
$R_{e,y}$	441.9 K.W ⁻¹	Analytique
$R_{e,sup}$	85.1 K.W ⁻¹	Analytique
$R_{e,+/-}$	19.8 K.W ⁻¹	Analytique
$R_{e,inf}$	2.0 K.W ⁻¹	Expérimental

Tableau 1 : Valeurs et méthodes de détermination des paramètres du modèle

Les sources de chaleur \dot{Q} ont été modélisées à l'aide de l'équation (1) [10, 11]. Les pertes électriques sont calculées comme le produit du courant I par la surtension ΔU , cette dernière étant la différence entre la tension de la cellule U_{cell} et l'OCV U_{oc} (Open-Circuit Voltage). La chaleur entropique est le produit du courant I , de la température absolue T_K (en Kelvin) et de la variation de l'OCV avec la température $\partial U_{oc}/\partial T$.

$$\dot{Q} = I \cdot \Delta U + I \cdot T_K \frac{\partial U_{oc}}{\partial T} \quad (1)$$

Le terme $\partial U_{oc}/\partial T$ est proportionnel à la variation d'entropie (Fig. 4), dont la détermination peut être faite par des méthodes potentiométrique [12] ou calorimétrique [13, 14]. La surtension ΔU est quant à elle estimée à l'aide d'un modèle électrique présenté dans la section suivante.

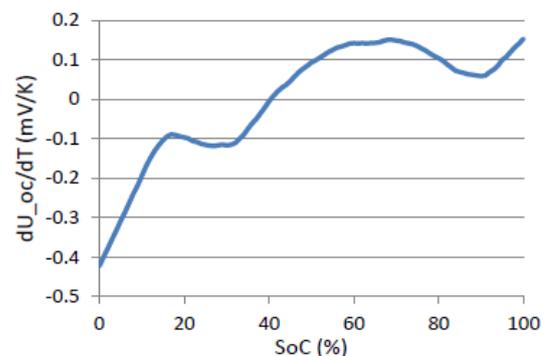


Figure 4 : Variation d'entropie de la cellule étudiée en fonction de l'état de charge (SoC : State of Charge)

3. MODÈLE POUR L'ESTIMATION DES PERTES ÉLECTRIQUES ET PARAMÈTRES DE DIFFUSION

Un circuit électrique équivalent a été utilisé pour représenter le comportement électrique de la batterie (Fig. 5) [15, 16]. Il s'agit d'un circuit de Randles modifié, où il est supposé que les phénomènes de diffusion et de transfert de charge ont des dynamiques suffisamment distinctes pour pouvoir être séparés [17]. Il est également supposé que la diffusion est de type limitée pour cette batterie, ce qui permet de la modéliser par une série de circuit RC parallèles [6]. Kuhn et al. [18] ont montré comment calculer les $R_{diff,p}$ et $C_{diff,p}$ à l'aide de deux paramètres k_1 et k_2 (Eq. 2).

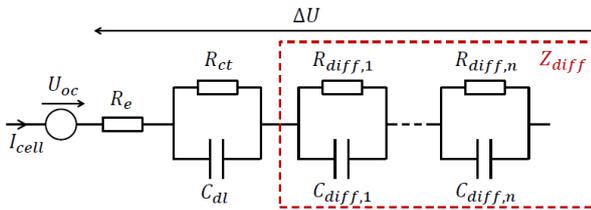


Figure 5 : Modèle électrique utilisé pour l'estimation des pertes électriques, avec approximation de l'impédance de diffusion limitée par une série de circuits RC parallèles.

$$R_{diff,p} = \frac{8 \cdot k_1}{\pi^2 (2p - 1)^2} \quad C_{diff,p} = \frac{k_1}{2k_2^2} \quad (2)$$

$$\tau_{diff,p} = R_{diff,p} \times C_{diff,p} = \frac{2 \cdot k_1^2}{k_2 \pi (2p - 1)}$$

Cependant, les paramètres k_1 et k_2 ne sont pas simples à interpréter physiquement, c'est pourquoi deux nouveaux paramètres sont proposés ci-après. Il s'agit de la «résistance de diffusion», notée R_{diff} et de la «constante de temps de polarisation», notée τ_{diff} . R_{diff} correspond à la somme des $R_{diff,p}$ de la figure 5 et τ_{diff} , quant à lui, correspond à la constante de temps du circuit RC le plus lent, soit celui d'indice 1. Les équations (2) peuvent alors être adaptées pour obtenir les équations (3).

$$R_{diff,p} = \frac{R_{diff,1}}{(2p - 1)^2}$$

$$\text{avec } R_{diff,1} = \frac{R_{diff}}{2k_2^2 \sum_{p=1}^n \frac{1}{(2p - 1)^2}} \quad (3)$$

$$\tau_{diff,p} = \frac{\tau_{diff}}{(2p - 1)^2} \quad C_{diff,p} = \frac{\tau_{diff}}{R_{diff,1}}$$

La figure 6 illustre la signification physique de ces deux paramètres dans le cas d'une réponse temporelle de Z_{diff} à un échelon de courant. La résistance de diffusion R_{diff} est ainsi représentative du comportement en régime pseudo-stationnaire. Quant à la constante de temps de polarisation τ_{diff} , elle est caractéristique du temps de réponse de l'impédance de diffusion limitée Z_{diff} à une sollicitation.

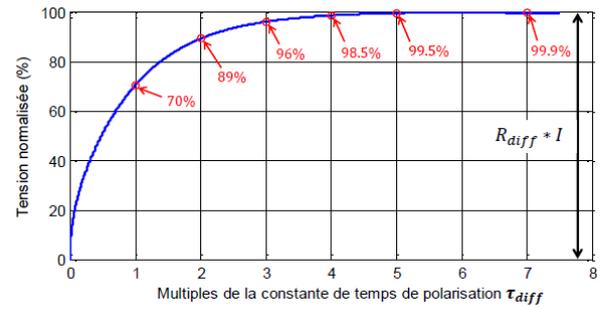


Figure 6 : Réponse temporelle théorique d'une impédance de diffusion limitée à un échelon de courant.

La réponse en tension de la figure 6 rappelle celle d'un circuit RC classique. La différence majeure réside dans la très rapide augmentation de la tension pour des temps très courts face à τ_{diff} . Ce comportement est reproduit grâce aux contributions des circuits RC d'indices supérieurs à 1, dont les constantes de temps sont de plus en plus petites (Eq. 3). Ainsi, en réduisant le nombre n de circuits RC utilisés pour modéliser la diffusion limitée, la précision de simulation pour des temps courts sera réduite. Néanmoins, la dynamique principale ainsi que la tension atteinte en régime pseudo-stationnaire resteront inchangées.

Le modèle utilisé contient ainsi six paramètres à déterminer : l'OCV U_{oc} , les résistances d'électrolyte R_e , de transfert de charge R_{ct} et de diffusion R_{diff} , la capacité de double couche C_{dl} et la constante de temps de polarisation τ_{diff} . L'objet de la prochaine section est de détailler comment obtenir des tables de ces paramètres en fonction du SoC, du courant et de la température. Il y est aussi montré comment tenir compte des variations de SoC et de température durant la mesure.

4. CARACTÉRISATION TEMPORELLE D'IMPÉDANCE DE DIFFUSION LIMITÉE (CTIDL)

La méthode détaillée ci-après a été nommée « Caractérisation Temporelle d'Impédance de Diffusion Limitée (CTIDL) », car elle permet de mieux caractériser la dynamique du phénomène de diffusion limitée. Bien que l'accent soit mis sur Z_{diff} , la CTIDL permet aussi d'extraire les autres paramètres du modèle électrique.

La détermination des paramètres électriques est effectuée à partir de la réponse de la cellule à des créneaux de courant entrecoupés de pauses [19, 1]. Ces pauses permettent à la cellule de revenir à l'équilibre en température et en tension. Il est ainsi possible d'estimer l'OCV U_{oc} en début et en fin de créneau, puis d'extraire la surtension dont sont déduits les paramètres du modèle électrique. Les créneaux de courant successifs permettent de balayer l'ensemble de la plage de SoC de la cellule. En répétant cette opération en charge et en décharge - pour différents courants et différentes températures - des tables complètes de paramètres sont obtenues en fonction du SoC, du courant et de la température.

La durée des créneaux de courant doit être choisie de manière à ce que la cellule atteigne un régime pseudo-stationnaire (où il n'y a plus de variations de tensions dues à la dynamique électrique), ce qui peut nécessiter des essais préliminaires. Ainsi, la précision de détermination de la résistance de diffusion R_{diff} sera maximale (Fig. 6) et la qualité des simulations pour de longues sollicitations sera améliorée (ex : profil autoroutier). Cette durée optimale des créneaux est notée t_{ps} et elle doit être au moins égale à $3 \times \tau_{diff}$.

4.1. Evolution de l'état de la cellule durant la mesure

Les paramètres électriques sont tous supposés dépendre du courant, du SoC et de la température [20, 21]. Ainsi, si le SoC ou la température varient significativement durant un créneau, cela peut entraîner une modification des paramètres électriques recherchés (Fig. 7).

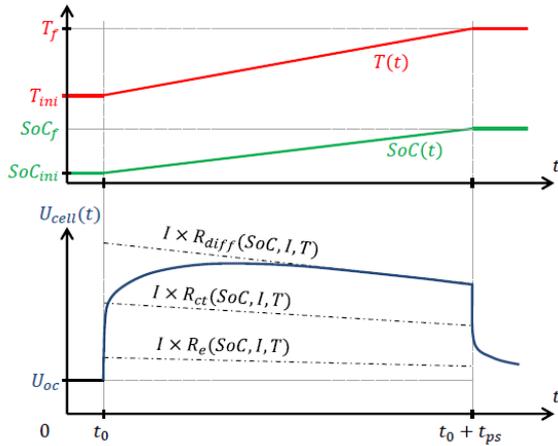


Figure 7 : Réponse en tension schématique d'une cellule à un créneau de courant, avec évolution du SoC et de la température. Mise en avant des variations des résistances durant le créneau.

Toutes ces variations au cours du temps compliquent la détermination de valeurs uniques de paramètres à des températures et à des SoC donnés. Afin d'obtenir des tables de paramètres précises, il faut lever ces incertitudes. L'objet de la section suivante est de détailler une méthode permettant à la fois d'extraire des valeurs précises de paramètres électriques et de leur associer des états physiques cohérents.

4.2. Extraction des paramètres et états associés

Afin d'associer des valeurs de paramètres uniques à des états physiques uniques, la CTIDL considère que chaque paramètre est déterminé à un instant précis de la réponse au créneau de courant. La figure 8 permet d'illustrer cette démarche.

Les paramètres R_e , R_{ct} , C_{dl} sont déterminés en début de créneau. Il est donc supposé qu'ils sont associés à l'état de charge initial SoC_{ini} et à la température initiale T_{ini} de la cellule.

En supposant que la durée t_{ps} du créneau est suffisamment longue pour que la cellule atteigne son régime pseudo-stationnaire, alors la tension atteinte en

fin de créneau correspond au produit du courant par un terme appelé « résistance pseudo-stationnaire ». Ce terme est noté R_{ps} et il correspond à la somme des

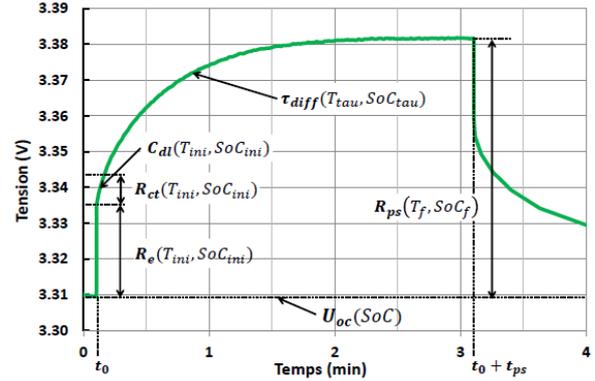


Figure 8 : Détermination des paramètres électriques et de leurs états physiques associés à partir de la réponse en tension à un créneau de courant de charge.

résistances du modèle électrique (Eq. 4). R_{ps} étant déterminé à la fin du créneau, il est associé à l'état physique final de la cellule, soit (SoC_f, T_f) .

$$R_{ps}(SoC, T) = R_e(SoC, T) + R_{ct}(SoC, T) + R_{diff}(SoC, T) \quad (4)$$

La constante de temps de polarisation τ_{diff} est plus délicate à obtenir, car elle n'est pas déterminée à un instant précis mais sur un intervalle de temps. La précision de sa détermination est donc réduite lorsque la réponse en tension est déformée comme sur la figure 7. Afin de simplifier le problème, la constante de temps est associée à un état physique unique (SoC_{tau}, T_{tau}) . Il est supposé que l'instant le plus réaliste est à $t_{tau} = t_0 + \tau_{diff}$ avec t_0 le début du créneau.

La détermination des valeurs SoC_{tau} et SoC_f se fait de manière classique par comptage coulométrique [22]. Quant aux valeurs de T_{tau} et T_f , elles peuvent être obtenues à l'aide d'une version simplifiée du modèle thermique. Sachant que la cellule est à l'équilibre thermique avant le début de créneau et en supposant que les créneaux de courant ont une durée très courte par rapport à la constante de temps thermique (qui est de l'ordre de l'heure), la cellule peut être considérée comme fonctionnant de manière adiabatique. Dans ce cas, T_{ini} est supposée être la température de l'enceinte climatique et l'évolution de la température $T(t)$ au cours du créneau peut être estimée grâce aux relations suivantes :

$$\begin{aligned} T(t) - T_{ini} &= \frac{1}{C_{th}} \int_{t_0}^t \dot{Q} \cdot dt \\ &= \frac{1}{C_{th}} \left(\int_{t_0}^t I \cdot \Delta U \cdot dt + I \cdot T_K \frac{\partial U_{oc}}{\partial T} \cdot dt \right) \quad (5) \\ &= \frac{I}{C_{th}} \left(\int_{t_0}^t \Delta U \cdot dt + T_K \frac{\partial U_{oc}}{\partial T} \cdot dt \right) \end{aligned}$$

C_{th} correspond à la capacité thermique de la cellule. L'intégrale de la chaleur entropique est calculée à l'aide

de la table représentée sur la figure 4 en supposant que la température absolue T_K est constante durant le créneau et qu'elle vaut $T_{mi}+273$. Les pertes électriques sont extraites de la réponse en tension de la cellule.

Grâce à la CTIDL, il est donc possible d'extraire les paramètres du modèle électrique et de tenir compte du fort couplage électrothermique en leur associant un état physique réaliste. Un exemple est présenté sur la figure 9 : il s'agit des valeurs de résistances pseudo-stationnaire extraites en décharge puis charge à 1C, 15°C. Les valeurs de R_{ps} sont exprimées en fonction de l'état de charge exprimé en Ah, avec leurs températures associées T_f .

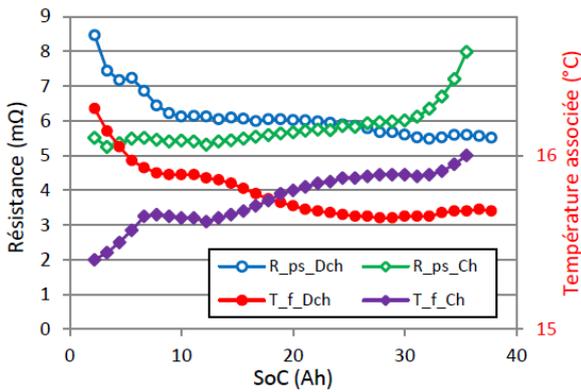


Figure 9 : Valeurs de résistance pseudo-stationnaire obtenues en décharge, puis en charge à 1C dans une enceinte à 15°C, avec leurs températures associées.

R_{ps} vaut entre 5.5 et 6 mΩ sur une majorité de la plage de SoC de la cellule et elle augmente significativement en fin de charge et en fin de décharge. Au vu des évolutions des autres paramètres (non représentés ici), cette dépendance au SoC provient essentiellement de la résistance de diffusion R_{diff} . Comme attendu, les températures associées suivent la même tendance, puisqu'une résistance plus importante entraîne davantage de pertes électriques durant la caractérisation. Les T_f sont de 0.4 à 1.3 °C supérieurs aux 15 °C de l'enceinte climatique dans ce cas. Cette augmentation de température est d'autant plus grande que le régime est élevé et que la température est basse. Elle devient particulièrement importante dans les plages de fonctionnement limites de la batterie.

Les résultats obtenus à 1C, 15 °C, pour la constante de temps de polarisation ont été représentés sur la figure 10 en fonction du SoC exprimé en Ah. La majorité des valeurs de τ_{diff} est comprise entre 20 et 30 s, sans qu'il y ait de tendance nette. Au vu des résultats à différents points de fonctionnement, il semblerait que le paramètre proposé τ_{diff} soit indépendant de l'état de charge. Cela ouvre des perspectives de simplification des tables de paramètres, ce qui permettrait d'accélérer les simulations. Quant aux températures associées T_{tau} , elles ne sont que de 0.1 à 0.3 °C supérieurs aux 15 °C de l'enceinte climatique, ce qui reste faible.

Il faut noter que la valeur de la résistance de diffusion R_{diff} ne peut pas être obtenue directement par l'équation (4), car les valeurs de R_{ps} , R_e et R_{ct} sont

généralement associées à des états physiques différents. De plus, les variations de SoC et de température de la cellule durant la caractérisation dépendent du point de fonctionnement, ce qui empêche d'intégrer directement les valeurs des paramètres dans une table ayant un quadrillage préétabli en SoC, courant et température.

Il est donc nécessaire d'exprimer tous les paramètres à des valeurs de SoC et de température identiques pour pouvoir les exploiter, ce qui nécessite un ré-échantillonnage.

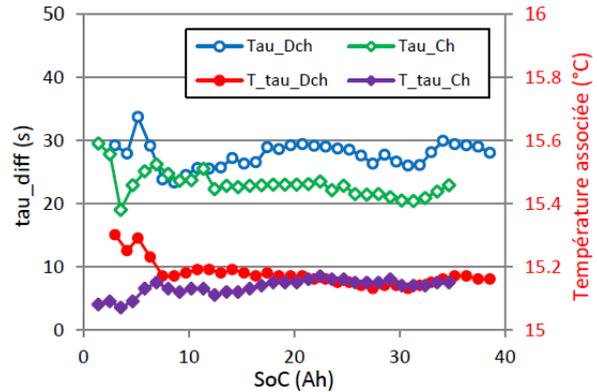


Figure 10 : Valeurs de constante de temps de polarisation obtenues en décharge, puis en charge à 1C dans une enceinte à 15 °C, avec leurs températures associées.

4.3. Ré-échantillonnage des paramètres en SoC et en température

Les dépendances en température et en SoC des paramètres sont considérées comme a priori inconnues, il n'est donc pas trivial de déterminer comment les ré-échantillonner sans les altérer. Dans cette étude, il est supposé que la température associée à un paramètre ne varie pas significativement d'un créneau de courant à l'autre, ce qui implique que les variations d'un paramètre sont uniquement dues aux variations de SoC. Il est alors possible d'utiliser une interpolation linéaire pour obtenir les valeurs des paramètres aux valeurs de SoC désirées. En parallèle de cela, il faut aussi prendre soin de déterminer les températures associées à ces nouvelles valeurs de paramètres.

L'augmentation de la température pendant un créneau est proportionnelle à la génération de chaleur (Eq. 5). Pour rappel, cette dernière est composée essentiellement de la chaleur entropique et des pertes électriques. Ces deux termes sont supposés varier linéairement avec le SoC entre deux créneaux. De ce fait, la température associée peut être interpolée linéairement en SoC, de la même manière que les paramètres électriques.

Les caractérisations réalisées à basse température ou à fort courant ne permettent généralement pas d'effectuer des mesures à des SoC proches de 0% ou 100%, car les valeurs limites en tension sont atteintes avant. Dans ces situations, il peut être nécessaire d'utiliser des extrapolations linéaires pour disposer de valeurs sur l'ensemble de la plage de SoC des futures tables de paramètres.

Une fois ce ré-échantillonnage en SoC effectué, il est possible d'exprimer tous les paramètres (et les températures associées) pour des valeurs de SoC et de courant identiques. Il ne reste alors qu'à ré-échantillonner les paramètres en température. La figure 11 illustre ce ré-échantillonnage pour la résistance pseudo-stationnaire de la cellule étudiée, considérée à 50% de SoC et en décharge à 2C. Les mesures ont été réalisées dans une enceinte climatique réglée successivement à 5 °C, 15 °C, 25 °C et 45 °C.

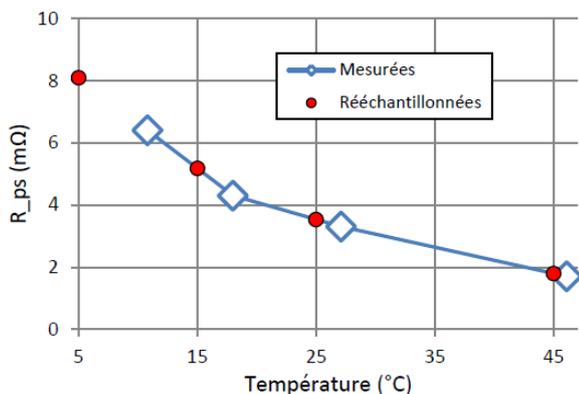


Figure 11 : Valeurs de résistance pseudo-stationnaire R_{ps} mesurées en fonction de leurs températures associées et valeurs de R_{ps} ré-échantillonnées.

La température associée est généralement plus élevée que celle de l'enceinte. Dans le cas de la mesure en enceinte à 5 °C, la température associée est de 11 °C pour une valeur de R_{ps} mesurée à 6.4 mΩ. Après ré-échantillonnage, R_{ps} est estimé à 8.1 mΩ, soit 27% d'augmentation. Cette différence aurait fortement altéré la qualité des simulations si elle n'avait pas été corrigée par la méthode proposée.

Après ces ré-échantillonnages en SoC, puis en température, les paramètres sont tous exprimés dans des tables selon les mêmes valeurs de SoC, de courant et de température. La table de résistance de diffusion R_{diff} peut être enfin obtenue grâce à la relation (4). Une fois ces tables de paramètres intégrées au modèle électrique, ce dernier peut être couplé au modèle thermique présenté dans la section 2 pour simuler le comportement du pack batterie pour un dimensionnement et un profil donnés.

5. VALIDATION EXPÉRIMENTALE

Afin de valider les modèles développés ci-avant, ainsi que leur couplage, un essai a été réalisé sur une cellule dans des conditions approchant celles du centre d'un pack batterie (Fig. 12).

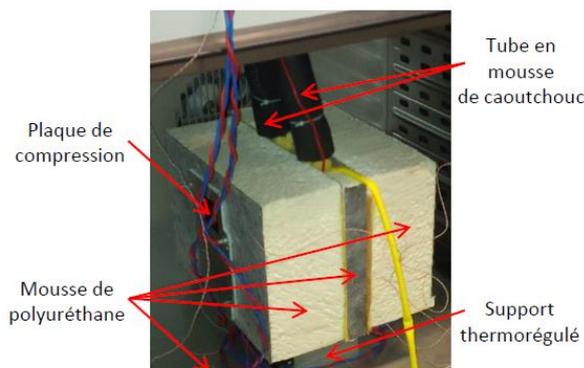


Figure 12 : Montage expérimental sur cellule approchant les conditions au centre d'un pack.

Des plaques de mousse de polyuréthane ont été placées sur les faces latérales, les câbles d'alimentation ont été entourés de mousse de caoutchouc sur 1met la face supérieure et la connectique de la cellule ont été enveloppées de laine de verre. La face inférieure est posée sur un support thermo-régulé avec un gel thermique qui permet d'améliorer le contact thermique.

La cellule a été connectée à un Digatron (BTS 600) qui a servi de source de courant, ainsi que de mesure de courant et de tension (précision de 0.1 % sur une pleine échelle de ± 100 A ± 20 V). Le support thermo régulé a été réglé à 5 °C et l'air ambiant a été réglé à 26 °C à l'aide d'un climatiseur. Après que la cellule ait atteint son équilibre thermique, elle a été soumise au protocole suivant :

- complètement déchargée à 2C (environ 30 min) ;
- laissée au repos pendant 30 min ;
- complètement rechargée à C/2 par le protocole CCCV (environ 2 h) ;
- laissée au repos pendant 1 h.

Le même essai a été simulé à l'aide des modèles thermiques et électriques couplés comme l'illustre la figure 2. A chaque pas de calcul, la surtension a été déterminée par le modèle électrique en lui injectant le profil de courant et la température prédite par le modèle thermique. Les pertes électriques et la chaleur entropique ont ensuite été calculées à l'aide de l'équation (1) avant d'être utilisées par le modèle thermique pour prédire la température à l'instant suivant.

Les pertes électriques ont été reportées sur la figure 13 (en bleu). A titre de comparaison, les pertes estimées en comparant une mesure de tension et une estimation de l'OCV ont été ajoutées sur le graphe (en rouge), ainsi que la simulation de la chaleur générée totale, combinant pertes électriques et chaleur entropique.

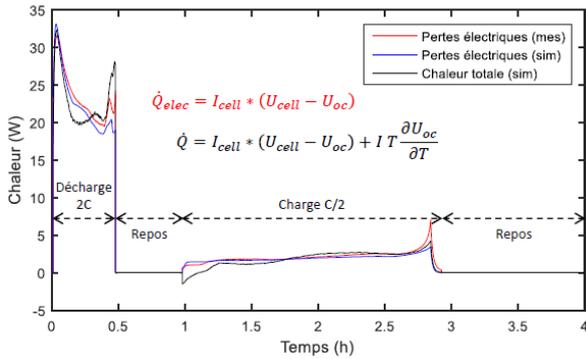


Figure 13 : Pertes électriques mesurées et simulées durant le profil de validation et chaleur générée totale simulée.

Comme attendu, il y a davantage de pertes électriques durant la décharge à 2C que pendant la recharge. Il y a trois zones où les pertes électriques sont plus importantes : au début de l'essai parce que la cellule est encore « froide » (entraînant des résistances plus élevées), puis à la fin de la décharge et à la fin de la charge, à cause de l'augmentation de la résistance de diffusion R_{diff} dans ces zones. Cet essai permet ainsi d'observer les effets des dépendances au courant, à la température et au SoC des paramètres électriques.

La chaleur entropique a un impact secondaire, mais significatif. Elle est particulièrement élevée à bas SoC (Fig. 4), ce qui se traduit par un fort dégagement de chaleur en fin de décharge et par une forte consommation de chaleur en début de charge, qui va jusqu'à refroidir la cellule durant quelques minutes.

L'écart entre les pertes électriques simulées et estimées à partir de la mesure de la tension a été reporté sur la figure 14 (en noir). Seul l'écart durant la décharge à 2C a été sélectionné, car c'est là qu'il est le plus important. Les pertes électriques sont essentiellement sous-estimées, avec une valeur quadratique moyenne de 1.4 W (soit quelques pourcents d'erreur relative).

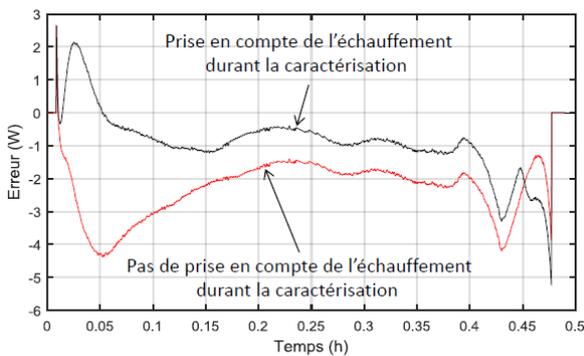


Figure 14 : Erreurs entre les pertes électriques mesurées et simulées durant la décharge à 2C. Résultats avec des paramètres électriques déterminés en prenant en compte ou non le couplage électrothermique durant la caractérisation.

L'erreur maximale est atteinte en fin de décharge, ce qui peut s'expliquer par les rapides variations d'OCV dans cette plage de SoC. En effet, l'estimation de la surtension est alors moins précise, ce qui impacte la qualité de la caractérisation. Le même effet peut être observé en fin de charge sur la figure 13.

Une autre simulation a été effectuée en utilisant un autre jeu de paramètres électriques. Ces derniers ont été déterminés en utilisant la CTIDL, mais en supposant que la température de la cellule restait constante durant la caractérisation. L'écart entre les pertes électriques simulées et « mesurées » apparaît en rouge sur la figure 14. Les pertes sont encore plus sous-estimées et l'écart quadratique moyen passe à 2.7W. (71% plus grand qu'en prenant en compte le couplage électrothermique).

Comme attendu, l'écart est inversement proportionnel à la température (Fig. 15), car l'échauffement de la cellule est plus important au cours des caractérisations à basse température. La figure 14 illustre bien l'intérêt de prendre en compte le couplage électrothermique durant la caractérisation électrique.

L'évolution des températures en différents points de la cellule apparaissent sur la figure 15 :

- $T_{cœur}$: le cœur actif (simulée) ;
- T_{surf} : la grande face dans la direction x (mesurée et simulée) ;
- T_{air} : l'air ambiant (mesurée) ;
- T_{inf} : la face inférieure (simulée) ;
- $T_{support}$: le support thermo régulé (mesurée).

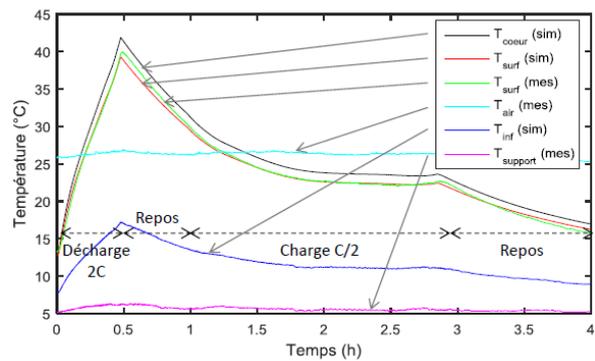


Figure 15 : Simulation et mesure de la réponse en température de la cellule étudiée lors d'un cycle comprenant: une décharge à 2C, 30 min d'OCV, une charge à C/2, 1 h d'OCV

Au cours de ce test, la cellule fonctionne dans des régimes transitoires et stationnaires. A cause du fort dégagement de chaleur durant la décharge, la température de cœur augmente rapidement de 18 °C à 42 °C. Les températures simulée et mesurée au niveau de la grande face étant en bon accord, cela valide la valeur de la capacité thermique du modèle thermique. Durant la première phase de repos, le refroidissement est également bien représenté, ce qui valide la constante de temps thermique du modèle. Enfin, la précision des résistances thermiques est elle aussi validée au cours de la phase à température quasi-constante entre 2 h et 2.5 h.

Les températures simulées prédisent un écart maximal de 2.5 °C entre le centre du cœur actif et la grande face de la cellule, ce qui dénote une bonne homogénéité thermique de la matière active. La face inférieure du boîtier est plus froide, ce qui est la signature d'un transfert important de calories par le boîtier vers le support thermo régulé. La différence significative entre T_{inf} et $T_{support}$ est due au fait que la

résistance de contact entre ces deux organes reste importante malgré l'ajout d'un gel thermique.

Un second essai a été réalisé sur un pack batterie de la société E4V afin de valider les modèles proposés sur un cycle de roulage de type NEDC (New European Driving Cycle). Celui-ci a été posé sur un support thermo-régulé réglé à 15 °C. Dans cette configuration, comme illustré par la figure 1, il est supposé que la cellule centrale du pack batterie n'est refroidie que par sa face inférieure. Un thermocouple a été placé sur l'une de ses petites faces latérales (direction y sur la figure 3) pour mesurer la température $T_{côté}$.

Le pack batterie a été soumis à des cycles NEDC successifs jusqu'à épuisement complet de sa capacité. La tension minimale a été atteinte au 6ème cycle, puis un 7ème cycle partiel a été appliqué avant de laisser le pack batterie refroidir en circuit ouvert (Fig. 16). Le même profil a été utilisé en entrée des modèles proposés afin de simuler la réponse en température de la cellule centrale du pack batterie.

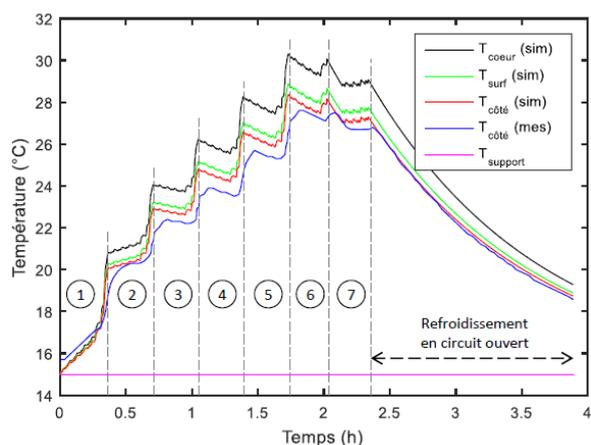


Figure 16 : Simulation et mesure de la température d'une cellule centrale d'un pack batterie commercial durant un profil NEDC répété jusqu'à épuisement de sa capacité.

A la fin de chacun des cycles, il y a un fort dégagement de chaleur qui correspond au roulage en zone extra-urbaine des cycles NEDC. Durant les phases de roulage en zone urbaine, en revanche, le pack batterie a plutôt tendance à refroidir car les puissances demandées sont relativement faibles.

Il y a une bonne correspondance entre les températures $T_{côté}$ mesurée et simulée. Les échauffements et refroidissements lors des phases en zones urbaines et extra-urbaines sont bien représentés, tout comme le refroidissement en circuit ouvert. Il apparaît un retard de quelques minutes de la mesure par rapport à la simulation, qui est imputé à la chaleur de mélange. Ce terme correspond à la création (resp. relaxation) de gradients de concentration internes qui consomme (resp. dégage) de la chaleur [10]. Ce terme étant nul en moyenne, il est généralement négligé. Son influence reste visible sur les mesures, mais il n'influence pas significativement les températures atteintes. Les modèles proposés peuvent donc bien être

utilisés pour le dimensionnement thermique d'un pack batterie.

Les simulations sont en accord avec les mesures effectuées sur cellule et sur pack batterie, avec des sollicitations dynamiques et à courant constant. Cela valide les modèles proposés ainsi que les méthodes développées pour la détermination de leurs paramètres. La précision des prédictions de température est meilleure que 1 °C sur l'ensemble des tests bien que les plages de fonctionnement en courant, en température et en SoC soient importantes.

6. CONCLUSIONS

Des modèles thermiques et électriques ont été couplés pour simuler les pertes électriques et l'évolution en température d'une cellule. Ces modèles sont ici utilisés dans le cas d'une cellule située au centre d'un pack batterie en vue de son dimensionnement thermique. Cette cellule particulière a été identifiée comme étant la plus chaude et donc comme la plus critique en termes de vieillissement. Afin d'améliorer la précision des simulations, cette étude est focalisée sur la prise en compte du couplage électrothermique lors de la modélisation et de la caractérisation des pertes électriques.

Il a été montré que l'évolution de la tension de la batterie était à la fois due à sa dynamique électrique et aux variations en SoC et en température de la cellule. Basés sur de précédents travaux, la dynamique de diffusion a été assimilée à celle d'un phénomène de diffusion limitée. L'impédance équivalente à cette dynamique a été décrite à l'aide de deux nouveaux paramètres, à savoir la « résistance de diffusion » R_{diff} - qui est caractéristique du fonctionnement en régime pseudo-stationnaire - et la « constante de temps de polarisation » τ_{diff} - qui caractérise la dynamique de la diffusion durant la polarisation.

Une méthode de détermination de ces deux paramètres de diffusion limitée a été proposée. Celle-ci tient compte du fort couplage entre les phénomènes thermiques et électrochimiques afin d'améliorer la précision des valeurs obtenues. Celle-ci consiste notamment à associer un état physique réaliste (SoC, température) à chacun des paramètres déterminés. La qualité des paramètres de diffusion est particulièrement améliorée à basse température et à fort régime.

Les résultats présentés pour R_{diff} et τ_{diff} ont permis d'illustrer l'évolution de ces paramètres vis-à-vis du SoC. Notamment, aucune nette dépendance au SoC n'a été observée pour la constante de temps de polarisation, ce qui ouvre des perspectives intéressantes de simplification.

Les prédictions des modèles couplés ont été validées sur cellule et sur pack batterie avec une précision de 1 °C, pour des profils mettant en jeu des sollicitations constantes ou encore typiques d'un roulage de véhicule électrique. En comparant les pertes électriques simulées avec celles estimées à partir de la tension mesurée sur cellule, il a été montré que l'erreur de simulation est réduite de moitié lors d'une décharge à 2C à basse température (environ 15 °C). La précision du modèle de

pertes électriques proposée a été améliorée significativement pour les régimes de fonctionnement extrêmes et pour des temps de simulations en accord avec des roulages de plusieurs heures.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la société E4V, qui a contribué à cette étude en finançant la thèse CIFRE de M. Nicolas Damay et acceptant que les mesures sur l'un de ses packs batteries y soient publiées.

RÉFÉRENCES

- [1] Mihet-Popa, L., Camacho, O. M. F., & Norgard, P. B. (2013). Charging and discharging tests for obtaining an accurate dynamic electro-thermal model of high power lithium-ion pack system for hybrid and EV applications. In 2013 IEEE Grenoble Conference (pp. 1–6).
- [2] Ibrahim, M., Jemei, S., Wimmer, G., & Hissel, D. (2016). Nonlinear autoregressive neural network in an energy management strategy for battery/ultracapacitor hybrid electrical vehicles. *Electric Power Systems Research*, 136, 262–269.
- [3] Vetter, J., Novák, P., Wagner, M. R., Veit, C., Möller, K.-C., Besenhard, J. O., . . . Hammouche, A. (2005). Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 147(1-2), 269–281.
- [4] Cordoba-Arenas, A., Onori, S., & Rizzoni, G. (2015). A control-oriented lithium-ion battery pack model for plug-in hybrid electric vehicle cyclelife studies and system design with consideration of health management. *Journal of Power Sources*, 279, 791–808.
- [5] Pruteanu, A., Florean, B. V., Moraru, G. M., & Ciobanu, R. C. (2012). Development of a thermal simulation and testing model for a superior lithium-ion-polymer battery. *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, IEEE, 947–952.
- [6] Damay, N., Forgez, C., Bichat, M.-P., & Friedrich, G. (2015). Thermal modeling of large prismatic LiFePO₄/graphite battery. Coupled thermal and heat generation models for characterization and simulation. *Journal of Power Sources*, 283, 37–45.
- [7] Samba, A., Omar, N., Gualous, H., Firouz, Y., Van den Bossche, P., Van Mierlo, J., & Boubekour, T. I. (2014). Development of an Advanced Two-Dimensional Thermal Model for Large size Lithium-ion Pouch Cells. *Electrochimica Acta*, 117, 246–254.
- [8] Gagneur, L., Driemeyer-Franco, A. L., Forgez, C., & Friedrich, G. (2013). Modeling of the diffusion phenomenon in a lithium-ion cell using frequency or time domain identification. *Microelectronics Reliability*, 53(6), 784–796.
- [9] Li, J., Cheng, Y., Jia, M., Tang, Y., Lin, Y., Zhang, Z., & Liu, Y. (2014). An electrochemical-thermal model based on dynamic responses for lithium iron phosphate battery. *Journal of Power Sources*, 255, 130–143.
- [10] Thomas, K. E., & Newman, J. (2003). Heats of mixing and of entropy in porous insertion electrodes. *Journal of Power Sources*, 119-121, 844–849.
- [11] Forgez, C., Vinh Do, D., Friedrich, G., Morcrette, M., & Delacourt, C. (2010). Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄/graphite lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, 195(9), 2961–2968.
- [12] Reynier, Y. F., Yazami, R., & Fultz, B. (2004). Thermodynamics of Lithium Intercalation into Graphites and Disordered Carbons. *Journal of The Electrochemical Society*, 151(3), A422–A426.
- [13] Eddahech, A., Briat, O., & Vinassa, J.-M. (2013). Thermal characterization of a high-power lithium-ion battery : Potentiometric and calorimetric measurement of entropy changes. *Energy*, 61, 432–439.
- [14] Schmidt, J. P., Weber, A., & Ivers-Tiffée, E. (2014). A novel and precise measuring method for the entropy of lithium-ion cells : S via electrothermal impedance spectroscopy. *Electrochimica Acta*, 137, 311–319.
- [15] Watrin, N., Ostermann, H., Blunier, B., & Miraoui, A. (2012). Multiphysical Lithium-Based Battery Model for Use in State-of-Charge Determination. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(8), 3420–3429.
- [16] Raël, S., & Hinaje, M. (2013). Using electrical analogy to describe mass and charge transport in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 222, 112–122.
- [17] Kuhn, E., Forgez, C., & Friedrich, G. (2004). Modeling diffusive phenomena using non integer derivatives. *The European Physical Journal Applied Physics*, 25(3), 183–190.
- [18] Kuhn, E., Forgez, C., Lagonotte, P., & Friedrich, G. (2006). Modelling Ni-MH battery using Cauer and Foster structures. *Journal of Power Sources*, 158(2), 1490–1497.
- [19] Roscher, M. A., & Sauer, D. U. (2011). Dynamic electric behavior and open-circuit-voltage modeling of LiFePO₄-based lithium ion secondary batteries. *Journal of Power Sources*, 196(1), 331–336.
- [20] Amiribavandpour, P., Shen, W., Mu, D., & Kapoor, A. (2015). An improved theoretical electrochemical-thermal modelling of lithium-ion battery packs in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 284, 328–338.
- [21] Heubner, C., Schneider, M., & Michaelis, A. (2015). Investigation of charge transfer kinetics of Li-Intercalation in LiFePO₄. *Journal of Power Sources*, 288, 115–120.
- [22] Piller, S., Perrin, M., & Jossen, A. (2001). Methods for state-of-charge determination and their applications. *Journal of Power Sources*, 96(1), 113–120.

Limitation thermique et paramétrage d'un moto-variateur pour véhicule électrique

ARNAUD SIVERT¹, FRANCK BETIN¹, BRUNO VACOSSIN¹, THIERRY LEQUEUR² :

- (1) U.P.J.V Université de Picardie Jules Verne, Institut Universitaire de Technologie de l'Aisne GEII, 02880 SOISSONS
Laboratoire des Technologies innovantes (L.T.I.), équipe Énergie Électrique et Systèmes Associés (EESA)
arnaud.sivert@u-picardie.fr
- (2) Université François Rabelais de Tours – 60 rue du Plat d'Étain – 37020 Tours.

Résumé : Lors de la réalisation d'un véhicule faible consommation, il faut que la masse du véhicule soit la plus faible possible et que la motorisation puisse fournir une puissance maximale. Cela entraîne une élévation de la température du moteur et de son variateur, sachant que sur un véhicule le déplacement permet de faire office de refroidissement forcé. Or quelles sont les limitations thermiques d'un moteur et d'un variateur ? Donc quelles sont les limitations de puissance, de courant, de vitesse à paramétrer dans le variateur ? De plus, pour un certain confort de conduite, des rampes d'accélération et de vitesse doivent être respectées, donc le paramétrage du correcteur de régulation de la boucle de vitesse est crucial. Pour protéger, la motorisation, est-il possible de réaliser une boucle de régulation de température ? Réduire la puissance du moteur lorsque sa température est trop importante permettrait de pouvoir continuer à rouler en mode dégradé.

La réponse à ces questions permet de dimensionner convenablement une motorisation et de pouvoir passer à différents modes de fonctionnement du véhicule (« super boost », « boost », « cool »). D'ailleurs, les dynamiques sont fortement influencées par l'écart entre la puissance maximale et la puissance nominale. L'objectif de cette étude est de faire les bons choix en utilisant pleinement les possibilités des moto-variateurs sans risque de destruction et sans surdimensionnement. Le but est aussi de savoir comment gérer le pilotage en fonction de la température des systèmes électriques.

1. Introduction

Avec une motorisation électrique la puissance maximale peut être de 2 à 4 fois la puissance nominale. En effet, la puissance nominale en fonctionnement continu d'un ensemble moto-variateur dépend de ces limitations thermiques en fonction du type de refroidissement (naturel ou forcé). La température ambiante, la température initiale, la vitesse du véhicule entrent donc en compte dans la valeur des pertes que peut dissiper la motorisation. La puissance maximale est limitée aussi par la possibilité que peut fournir la batterie et ses constantes thermiques. L'étude thermique de la batterie a été largement développée dans l'article [1]. La batterie est surdimensionnée par rapport à la motorisation dans les véhicules faible consommation [3, 6, 7] qui vont être présentés.

La puissance maximale possible dépendra de sa durée donc de la constante de temps thermiques du moto-variateur. Par conséquent, on peut envisager les différents modes de fonctionnement (« super boost », « boost », « cool ») qui influencent les dynamiques du véhicule.

Ces trois modes ne correspondent pas à une stratégie de minimisation de la consommation d'énergie [2] mais à un confort pour pouvoir passer un carrefour dangereux, assurer un dépassement rapide....

Dans un premier temps, la caractérisation de la demande de puissance sera brièvement rappelée ainsi que l'échauffement de la motorisation. La modélisation électrique et thermique sera effectuée en fonction des différentes régulations du variateur vitesse, puissance,

courant moteur et de leurs limitations avec une présentation du paramétrage du correcteur de vitesse pour optimiser la dynamique du véhicule.

Ces essais répondront à la question suivante : peut-on protéger la motorisation électrique contre toute surchauffe en limitant la puissance ?

Enfin, le freinage électrique à force constante sera présenté du point de vue thermique.

2. Caractérisation d'un véhicule

En régime établi de vitesse, la puissance résistive correspond à l'équation suivante [3, 7] :

$$P_{\text{résistive}}(W) = k_{\text{Aero}} \cdot V^3 + (k_{\text{roul}} + k_{\text{pente}}) \cdot V(\text{km/h}) \quad (1)$$

Avec $P_{\text{résistive}}$ (W), V (km/h), k_{Aero} (W/(km/h)³) correspondant à l'aérodynamique du véhicule, k_{roul} correspondant aux frottements des pneus et de la transmission et k_{pente} correspondant à la force de gravitation et de la masse M et la pente de la route.

$$K_{\text{pente}}(W/\text{km/h}) = M \cdot g \cdot \text{pente}(\%) / (3.6 \cdot 100) \quad (2)$$

Sur un parcours donné, la consommation énergétique en Wh du cycle motorisé peut être déterminée approximativement par l'équation suivante (3) :

$$E(W.h) = \left(\frac{P_{\text{résistive}}(V_{\text{moy}})}{\eta_{\text{motor}}} - P_{\text{humain}} \right) \cdot \frac{(\text{distance} - D^-)}{V_{\text{moy}}(\text{km/h})} + \frac{M \cdot g \cdot D^+}{3.6}$$

Avec la vitesse moyenne en km/h, $D+$ le dénivelé positif et la distance en km, η le rendement. Maintenant, nous allons présenter les véhicules de test.

3. Présentation des véhicules

Ce sont des véhicules ultralégers de 30 kg sans la motorisation électrique et 50 kg avec la motorisation. Grâce à leurs faibles masses [3], la consommation moyenne est de 5 à 7 Wh/km avec des autonomies de 200 km en fonction du dénivelé. Les coefficients aérodynamiques et de roulement avec le rendement du moteur valent respectivement :

$$k_{Aero1} = 0,0018 \text{ W}/(\text{km/h})^3$$

$$k_{roulement1} = 5 \text{ W}/(\text{km/h}).$$

Avec ces valeurs, le véhicule peut atteindre 100 km/h dans une descente de -5%. Les différentes batteries lithium utilisées ont des chimies différentes mais avec une tension de 72V et une capacité de 20 Ah.



fig 1: Différentes réalisations de cycles électriques motorisés entièrement carénés (de 50 kg à 85 kg) [2, 3]

La vitesse de pointe permet aux tricycles carénés d'atteindre 80 km/h sur du plat avec l'électrification et 100 km/h dans certaines descentes.

Les moteurs roues sont des brushless HS3540 Crystalyte, 7kg 350€ ($k_v=0.92\text{V}/\text{km/h}$, résistance équivalente 0.22Ω , $I_{moteur\ max}=90\text{A}$ 38 secondes à 15km/h, $R_{TH} 0.187^\circ\text{C}/\text{W}$ en dessous de 15km/h, $C_{TH}=770 \text{ J}/^\circ\text{C.kg}$, $\tau_{TH}=2.4\text{min}$

La puissance dissipable et le courant nominal en fonction de la vitesse correspond aux données du tableau suivant :

Vitesse (km/h)	Intensité nominale (A)	puissance dissipable (W)
< 15 km/h	40A	350W
30km/h	56A	800W

Tableau 1 : caractéristiques nominales moteur

Le rendement en régime établi de vitesse en fonction de la poignée d'accélération est représenté sur la courbe suivante pour le moteur HS3540, avec une pente de 0 et de 5%.

Le rendement avoisine 77% à 50% en fonction de la poignée d'accélération, comme on peut l'observer sur la figure suivante où les courbes en pointillés correspondent aux données avec la pente à 5%.

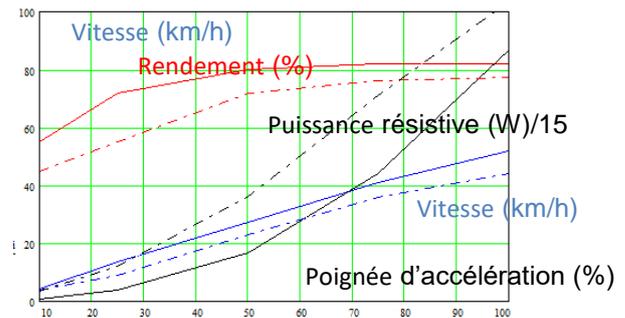


fig 2: Performances du moteur HS3540 en fonction de la poignée d'accélération avec une pente de 0% et 5% [7]

En conséquence, avec un moteur-roue électrique à entraînement direct, il ne faut pas solliciter le moteur à des vitesses trop faibles, ceci afin de garder un bon rendement et un faible échauffement du moteur et du contrôleur. De plus, il ne faut pas chercher à avoir une vitesse trop importante dans les montées car la puissance résistive devient trop importante, ce qui provoque une puissance dissipable au-delà des limites de la motorisation.

Pour améliorer la dissipation thermique du moteur, 7ml de ferrofluide (20 €) peut être utilisée pour améliorer la conduction thermique et avoir une résistance thermique divisée par 2 d'un moteur comme on peut l'observer sur la figure suivante :

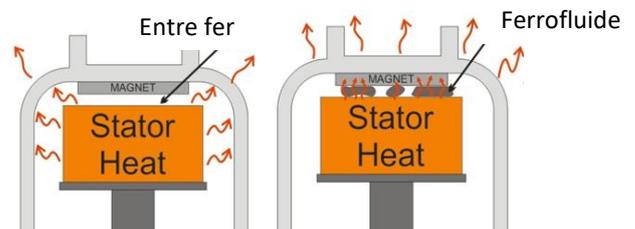


fig 3: Ferro fluide entre la bobine et les aimants [8]

Pour améliorer le rendement pour les vitesses faibles, il est possible de mettre une boîte de vitesse entre le moteur et la roue [7], mais cette solution ne permet plus d'avoir un freinage électrique dans les descentes.

Peut-on estimer la température du moteur au travers de la mesure du courant moteur et programmer un relais thermique équivalent ?

La protection thermique classique du moteur par l'intégration du courant permet de protéger le moteur mais ne prend pas en considération le refroidissement lié à la vitesse du véhicule.

Une solution est de faire un algorithme d'un relais thermique numérique prenant en considération la vitesse du véhicule et le courant moteur.

Mais, la solution plus simple et une protection par l'intermédiaire de la mesure de température du moteur et du variateur.

Mais comment varie la température de la motorisation en fonction de la vitesse et des pertes dans le moteur ?

4. Modélisation thermique motorisation

Par simplification, on considère que le moteur brushless se comporte comme un moteur DC avec une résistance équivalente. Par conséquent, les pertes électriques et son échauffement correspondent aux équations suivantes (4, 5)

$$Perte_{motor} (W) = R_{motor\ equivalent} \cdot I_{motor} (A)^2$$

$$\theta_{motor} (^{\circ}C) = (Perte \cdot R_{TH}(V) + \theta_{amb}) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R_{TH}(V) \cdot C_{TH}}}) + \theta_{init} \cdot e^{-\frac{t}{R_{TH}(V) \cdot C_{TH}}}$$

Avec R_{TH} correspondant à la résistance thermique qui varie en fonction de la vitesse et C_{TH} la capacité thermique du moteur, la température ambiante T_{amb} et T_{init} la température initiale.

Nous considérons que la résistance thermique diminue hyperboliquement en fonction de la vitesse de véhicule, dès que celle-ci dépasse 15 km/h.

Pour une certaine puissance résistive, le courant augmente à partir de l'équation suivante :

$$I_{motor} = P_{resistive} / (U_{batt} \cdot X\% \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{contrôleur}) \quad (6)$$

Avec $X\%$ correspondant à la poignée d'accélération. Mais, le courant moteur peut être aussi déduit de l'équation suivante (7) :

$$I_{motor} \approx (I_{batterie} \cdot Vitesse_{max\ vehicule}) / (Vitesse_{vehicule} \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{contrôleur})$$

Si le moteur est un élément crucial à protéger thermiquement, le variateur a lui aussi une déperdition thermique. De plus, à l'intérieur du velomobile celui-ci profite moins du flux d'air du déplacement pour dissiper ces pertes. La constante thermique du variateur est plus faible que celle du moteur à cause de la petite taille du radiateur. Malgré le surdimensionnement des 12 transistors MOSFET IRF 4110 du variateur utilisé pour alimenter le moteur brushless, les pertes du variateur ne sont pas négligeables et correspondent à l'équation suivante :

$$Perte_{variateur} (W) = R_{DSequivalent} \cdot I_{motor} (A)^2 \quad (8)$$

Avec une $R_{DSequi}=10\ m\Omega$ et un courant $I_{Dmax} = 360A$, les transistors en boîtier TO220 sont montés sur radiateur aluminium de 150*40*20mm. La limite du courant est de I_{Drain} en 40A en continu et $I_{Drain\ max}=80A$ pendant 2 minutes. La capacité thermique est de $C_{TH}=160\ J/^{\circ}C$ avec le boîtier du variateur. La résistance thermique en fonction de la vitesse correspond au tableau suivant :

Vitesse(km/h)	$R_{TH} (^{\circ}C/W)$
<15 km/h	2,5
40km/h	1,25

Tableau 2 : caractéristiques nominales variateur

A partir de l'équation 6 et des données thermiques, un exemple va être effectué pour bien comprendre l'influence de la vitesse sur l'échauffement du variateur.

Exemple : pour un courant de batterie de 5.8 A correspondant à une puissance consommée sur la batterie de 400 W et pour une vitesse de 15 km/h, le courant moteur est de 25 A. Les pertes dans les transistors sont de 6 W et donc l'augmentation de la température du variateur est de 15°C. Par contre à 35 km/h, pour ce même courant batterie, le courant moteur sera de 10,7 A. Les pertes seront alors de 1,2 W et l'incrément de température n'est que de 1,5°C.

Pour démontrer cette influence, 2 essais en montée avec une pente d'environ 5% ont été effectués avec 2 vitesses (environ 15 km/h et 35 km/h) sans pédalage et sont présentés sur les 2 figures suivantes. La température du variateur a atteint 53,3°C au bout de 360 s à 15 km/h, alors que pour 35 km/h la température a atteint 45°C au bout de 154 s. La vitesse à 35 km/h demande un temps plus court pour la même distance donc la température en régime établi n'est pas atteinte.

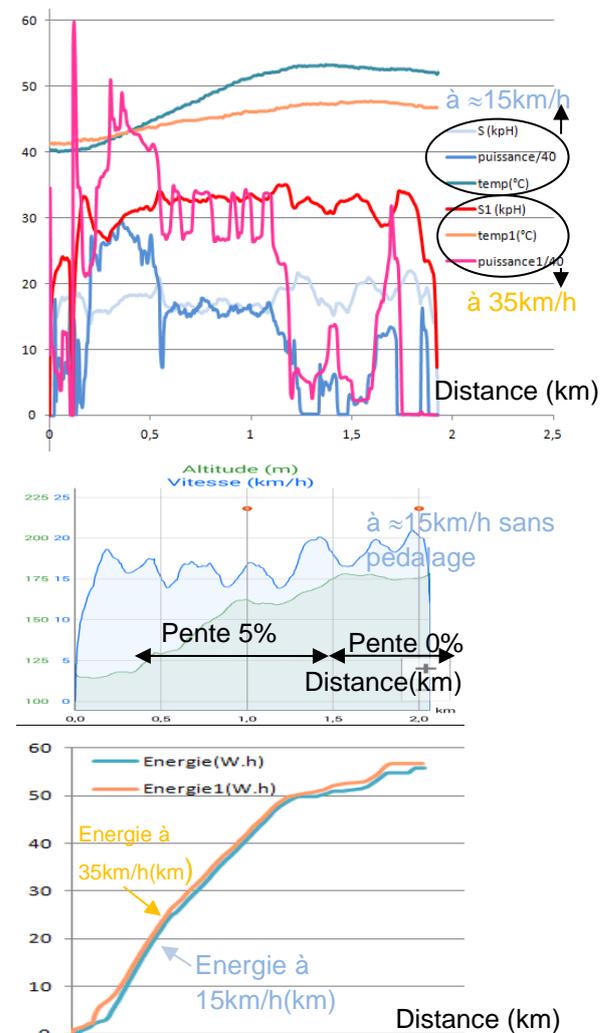


fig 4: Température du variateur, puissance, vitesse, énergie, altitude à 35 km/h et 15 km/h en fonction de la distance sans pédalage avec une température ambiante de 33°C.

Sur la figure précédente, on peut observer que l'énergie consommée à 15 km/h et à 35 km/h est identique. Cette énergie est calculée en appliquant l'équation suivante :

$$E(W.h) = (P_{absorbée}(V_{moy}) \cdot \frac{(distance)}{V_{moy}(km/h)} + \frac{M \cdot g \cdot D^+}{3,6 \cdot \eta_{moteur}}) \quad (9)$$

avec D⁺, la somme du dénivelé positif.

A 15 km/h la puissance absorbée est faible, environ 80 W pour l'avancement plus 350 W due à la pente moyenne de 4%. Avec un rendement moto-variateur de 65%, l'énergie dépensée est de 57 Wh. Elle est donnée par application numérique suivante :

$$E(W.h) = (80W \cdot \frac{2km}{15km/h} + \frac{140kg \cdot 9,81 \cdot 0,08km}{3,6 \cdot 0,65}) = 10 + 47W.h = 57W.h$$

Pour 35 km/h, la puissance absorbée (1) est de 252 W pour l'avancement plus 670 W due à la pente. Avec un rendement de 80%, l'énergie dépensée théorique est de 52 Wh.

$$E(W.h) = (252W \cdot \frac{2km}{35km/h} + \frac{140kg \cdot 9,81 \cdot 0,08km}{3,6 \cdot 0,8}) = 14,4 + 37,5W.h = 52W.h$$

Avec une puissance de pédalage de 200 W, on peut augmenter la vitesse dans la montée à 40 km/h pour la même énergie et pratiquement la même puissance dépensée que dans l'essai précédent.

$$E(W.h) = (315W - 200) \cdot \frac{2km}{40km/h} + \frac{140kg \cdot 9,81 \cdot 0,08km}{3,6 \cdot 0,8} = 5,75 + 37,5W.h = 43$$

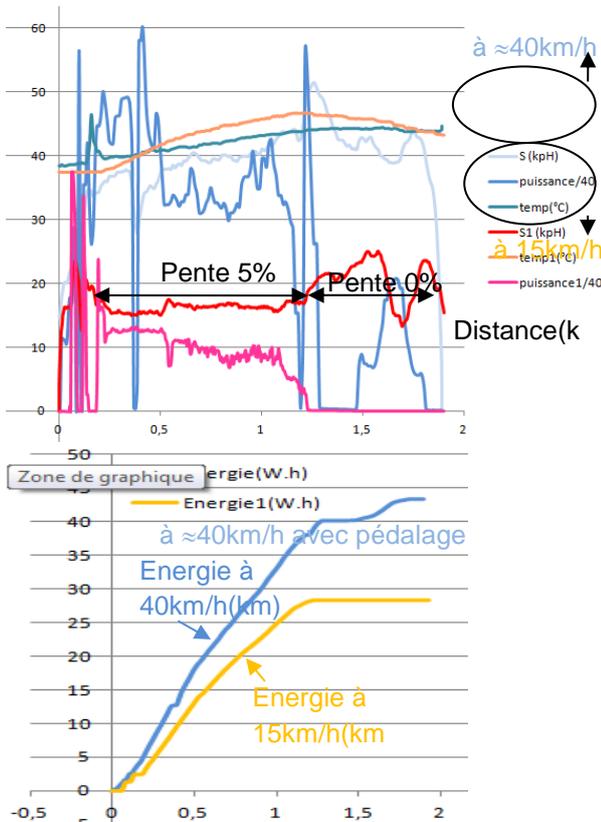


fig 5: Température du variateur, puissance, vitesse, énergie, altitude à 40km/h et 15km/h en fonction de la distance avec pédalage avec une température ambiante de 33°C

Pour une vitesse de 15 km/h, la puissance absorbée sur le plat est négative donc l'énergie demandée diminue fortement dans la montée :

$$E(W.h) = (80W - 200W) \cdot \frac{2km}{15km/h} + \frac{140kg \cdot 9,81 \cdot 0,08km}{3,6 \cdot 0,65} = -16 + 47,5 = 31$$

Malgré cela, la température à 15 km/h atteint 46°C alors que pour 40 km/h, elle sera seulement de 43°C.

Ces 2 essais démontrent que diminuer la puissance en diminuant la vitesse lors d'une montée ne permet pas de diminuer les pertes et l'échauffement thermique du moteur et du variateur. Ainsi, une boucle de régulation classique de température pour protéger thermiquement le moto-variateur n'est pas viable en montée. Il faut donc augmenter le refroidissement avec une ventilation forcée sur le variateur qui se déclencherait à une certaine température (60°C par exemple) et/ou mettre des ailettes sur les flasques du moteur pour mieux dissiper les pertes électriques à faible vitesse mais qui créeront des pertes par frottement aérodynamiques à hautes vitesses. D'ailleurs, il est possible d'utiliser le même ventilateur que celui du chargeur embarqué pour la ventilation forcée sur le variateur. En effet, pour réduire la masse du dissipateur du chargeur un ventilateur est utilisé. Ces caractéristiques sont les suivantes : 7 pales tournant à 2800 tr/mn, alimentation en 12 V, consommation 0,25 A soit 3 W.

La consommation en fonction de la pente et de la vitesse est observable sur la figure suivante. Dès qu'il y a une pente supérieure à 3%, une valeur optimale pour minimiser les pertes et la consommation existe.

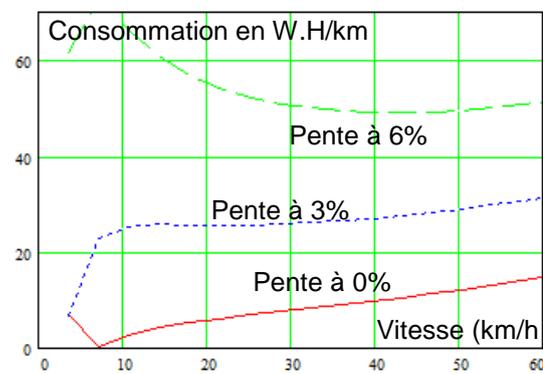


fig 6: Simulation de fonctionnement du moteur Crystalte HS3540 pour le vélo [6].

La durée de certaines montées pouvant être supérieure aux constantes de temps thermiques du moto-variateur, c'est le fonctionnement continu qui doit être utilisé pour connaître les limites du système électrique.

Mais il faut tenir compte aussi des accélérations. Certes elles ont une durée relativement faible, mais les puissances appliquées sont bien supérieures à la puissance nominale du moteur.

Donc, quelle sera la puissance maximale en fonction des températures limites, du temps d'accélération et de la périodicité des accélérations ?

5. Puissance maximale et température

Grace aux constantes de temps thermiques relativement grandes, il est possible d'avoir des puissances accélératrices très importantes. Le courant dans la batterie est limité par la capacité énergétique à 2C (dans notre cas) donc le moteur fonctionnera à puissance constante pendant l'accélération.

La limitation de la puissance accélératrice dépend aussi de la mécanique donc du couple que peut supporter l'axe de la fourche oscillante. De plus, l'accélération est limitée par le grip du pneu à une valeur de 10m/s² sur route sèche à température de 25°C de la gomme. Pour une masse de 140 kg et une vitesse de 45 km/h, la puissance maximale correspond environ à l'équation suivante :

$$P_{acc} \approx M \cdot v \cdot \frac{dv}{dt} = 140kg \cdot \frac{45km/h}{3.6} \cdot 10m/s^2 = 17.5kW \quad (10)$$

Une accélération de 1,71 m/s² est suffisante pour s'insérer dans le flux de la circulation quotidienne donc une puissance de 3 kW sera utilisée. Avec cette puissance constante, le temps théorique pour atteindre la vitesse désirée correspond approximativement à l'équation suivante car la puissance résistive a été négligé (11) :

$$t_{acc} \approx \frac{M \cdot v^2}{2 \cdot P_{limit} \cdot \eta_{motor}(v)} = \frac{140kg}{2 \cdot 3000W \cdot 0.5} \cdot \left(\frac{45km/h}{3.6}\right)^2 = 7.8s$$

Pendant l'accélération, l'incrément de température sera de :

$$\Theta(^{\circ}C) \approx \Theta_{mit} + \frac{P_{erte}}{C_{TH}} \cdot t_{acc} \quad (12)$$

S'il y a une périodicité qui est proche de la durée d'accélération, alors la température moyenne atteindra la valeur suivante :

$$\theta_{varia}(^{\circ}C) = (Perte \cdot \frac{t_{acc}}{T_{periode}} \cdot R_{TH} + \theta_{amb}) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R_{TH} \cdot C_{TH}}}) \quad (13)$$

En l'absence de saturation du courant moteur, plus la puissance maximale est importante, plus le temps d'accélération est faible, mais plus l'incrément de température augmente comme on peut l'observer sur la figure suivante. Cette figure démontre que le temps d'accélération de 8,9 s pour 3 kW est un bon compromis.

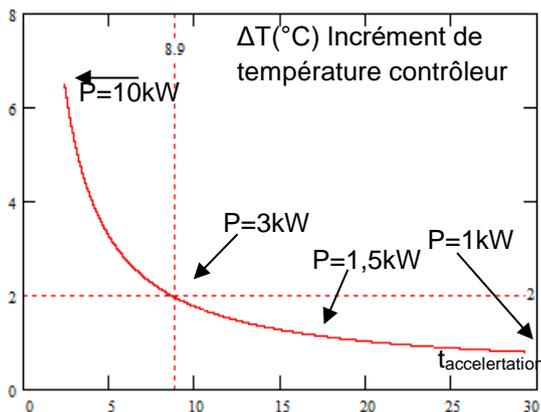


fig 7: Incrément de température lors d'une accélération en fonction du temps d'accélération pour atteindre 45km/h

Mais comment paramétrer la régulation de vitesse avec une commande avec limitation de la puissance pour avoir une bonne dynamique ?

6. Paramétrage régulation de vitesse

La régulation de vitesse permet de ne pas trop avoir de diminution de vitesse lorsque le courant moteur augmente. De plus, cette régulation permet de limiter la vitesse à une valeur désirée (ACC : adaptative ou « Auto Cruise Control »). Le schéma simplifié de la boucle de régulation de vitesse est représenté sur la figure suivante. En effet pour la simulation complète, il faut ajouter la boucle de régulation de puissance et du courant moteur qui est limité à 80 A pour protéger les transistors.

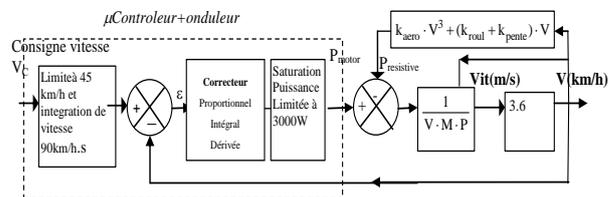


fig 8: Synoptique la régulation de vitesse avec commande à puissance constante.

Une étude théorique au travers de la modélisation et de simulations permet de gagner du temps en préparant au mieux les essais réels qui prennent plus de temps à exploiter.

6.1. Simulation régulation de vitesse

Le modèle utilisé prend en compte la résistance du moteur et les pertes thermiques. La rampe de consigne a été paramétré à 90 km/h/s dans le variateur pour ne pas influencer les dynamiques du véhicule. La simulation permet de mieux comprendre l'algorithme du microcontrôleur. En effet, à cause de la saturation de la puissance le choix des valeurs des paramètres du correcteur PID n'est pas traditionnel et la méthode du réglage sera utilisée pour sa simplicité.

Par conséquent, avec la valeur intégrale nulle ; l'action proportionnelle est définie de manière à obtenir une certaine saturation autour de 10 km/h de la vitesse finale désirée donc correspondant à l'équation suivante : $K_p = \text{Puissance limite} / \Delta_{erreur} = 3000W / 10km/h = 300$ (14)

On peut observer sur la figure suivante que pour 35 km/h, la puissance du moteur diminue pour atteindre la puissance résistive et qu'il y a une erreur statique lorsque la puissance résistive augmente avec une pente de 5% à 40 s. L'incrément de température du variateur est relativement faible 2°C, mais il faudra environ 2 fois la constante de temps thermique du refroidisseur (5 min) pour dissiper cet incrément de température dû à l'accélération.

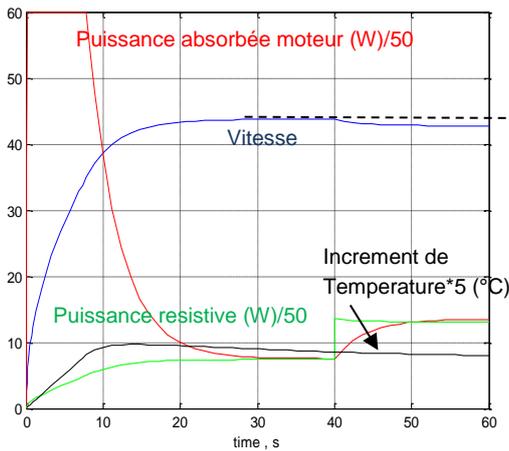


fig 9: Dynamique du velomobile $k_p=300, k_i=0$ avec une pente à 5% à 40s et limitation de puissance moteur à 3000 W.

L'action intégrale qui permet d'annuler l'erreur statique de vitesse est importante lorsque l'ACC est activé. Par contre, en pilotage manuel de la vitesse, l'erreur statique est corrigée avec une variation de la consigne. En effet, si la vitesse du véhicule diminue trop fortement, alors le pilote corrigera la consigne. Par contre, l'action intégrale importante ne doit pas provoquer un dépassement important de la consigne. D'ailleurs, la sortie du calcul intégral à un anti emballement « anti Wind-up » à la valeur de 1500W de façon arbitraire.

Lorsque l'on augmente le coefficient intégral au-dessus de la valeur 3, un léger dépassement sur la vitesse apparait. Mais pour une valeur intégrale de 8, ce dépassement est observable sur la figure suivante, mais reste acceptable.

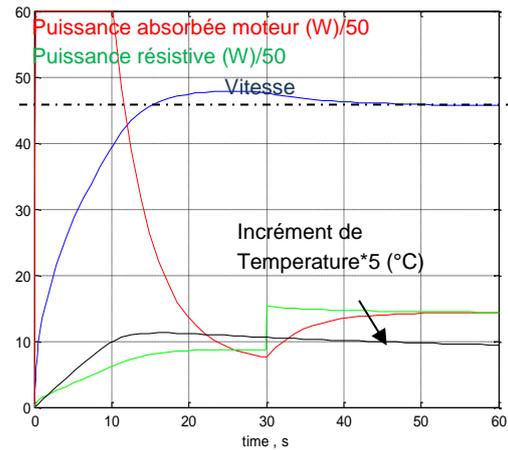


fig 10: Dynamique du velomobile $k_p=300, k_i=8$ avec une pente à 5% à 30s et limitation de puissance moteur de 3000 W.

L'action dérivée n'est pas très utile lors des changements brusques de consigne à cause de la limitation de puissance maximale sachant qu'il n'y a pas de puissance inférieure à 0.

Par contre pour les petites variations de vitesse l'action dérivée permet d'anticiper la commande.

S'il y a de nombreuses accélérations avec une période inférieure à 10 fois la constante de temps de temps thermique, la température va augmenter progressivement jusqu'à un régime établi de température moyenne correspondant à l'équation (13). On peut observer sur la figure suivante ce régime établi de température avec une période de 60s et un rapport cyclique de 50%. Avec une limitation du courant moteur à 80A pendant l'accélération, l'application numérique de l'élévation de température correspond à la valeur suivante :

$$\theta_{moy}(\text{°C}) - \theta_{amb} = \frac{1.25\text{°C} / \text{W} \cdot 0.01\Omega \cdot 80\text{A}^2}{60\text{s}} \cdot 13\text{s} = 17\text{°C}$$

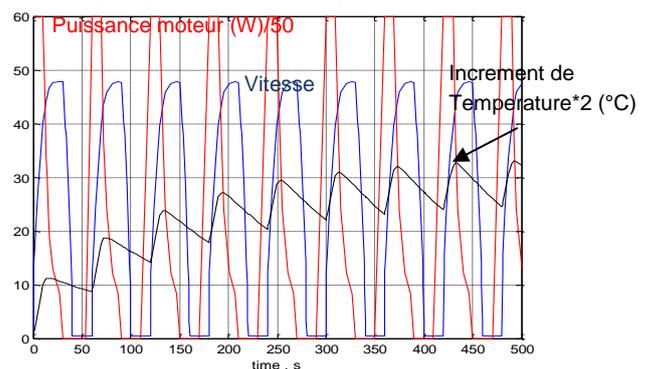


fig 11: Régime établi de température avec une période de 1 minute et un fonctionnement de 50% ($k_p=300, k_i=4, \text{pente}=0\%$)

La température de jonction maximale des transistors de 140°C et correspond à une température de 100°C sur le dissipateur du variateur.

Par conséquent, quand la température dépasse 70°C, il faut réduire les accélérations en limitant la puissance à 1500 W ce qui minimisera l'incrément de température comme cela a été démontré à partir de la figure 6. Sur la figure suivante avec une puissance limitée de 1500 W,

on peut observer que l'incrément de température n'est plus que de 1°C mais que le temps de démarrage est bien plus long que pour 3000 W.

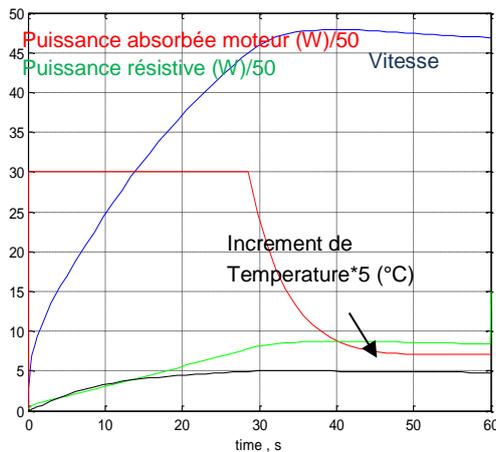


fig 12: Dynamique du velomobile $k_p=300$, $k_i=8$ avec une limitation de puissance moteur de 1500 W.

Si on ajoute une intégration au niveau de la consigne alors la puissance maximale du moteur sera plus faible. Mais cela ne minimise pas trop l'incrément de température comme on peut l'observer sur la figure suivante avec une rampe de 30 s pour atteindre 45 km/h.

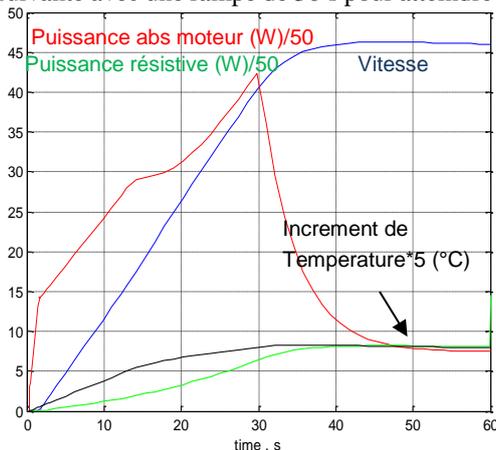


fig 13: Rampe de consigne de vitesse 1.5km/h.s avec $k_p=300$, $k_i=8$ avec une limitation de puissance moteur de 3000 W

L'utilisation d'une intégration sur la consigne n'est pas utile car elle ne permet pas d'avoir une accélération importante pour traverser rapidement un croisement dangereux.

Pour pouvoir simuler, il faut modéliser le système donc faire des tests réels. La simulation permet de vérifier les dynamiques désirées et vérifier les limites de fonctionnement du groupe moto-variateur sans destruction de matériel. Mais il y a toujours de petite différence car le modèle a toujours des imperfections telles que la chute de tension de la batterie et celle due aux transistors, les variations de résistance en fonction de la température...

6.2. Régulation de vitesse expérimentale

Un « data logger » (enregistreur de données) permet d'enregistrer toutes les secondes, la vitesse, la puissance absorbée, la température du variateur [5]. On peut observer sur la figure suivante la dynamique de la vitesse avec une consigne de 45km/h et une puissance limitée de 3000W ainsi que la puissance de freinage et celle récupérée par la batterie.

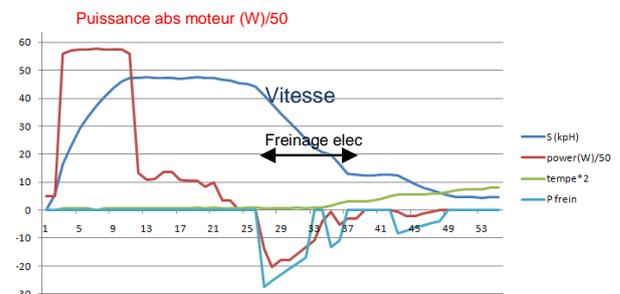


fig 14: Dynamique du velomobile $k_p=300$, $k_i=0$ avec une limitation de puissance moteur de 3000 W et freinage électrique

Avec une valeur intégrale de 9, il y a un léger dépassement qui provoque une valeur nulle de la commande donc de la puissance. Dès que la vitesse devient inférieure à 44km/h alors la puissance revient. Cette valeur intégrale provoque des à-coups de puissance qui sont pénibles pour le pilote lorsque l'on utilise le « ACC ».

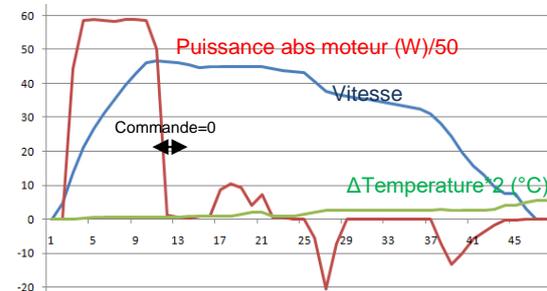


fig 15: Dynamique du velomobile $k_p=300$, $k_i=9$ avec une limitation de puissance du moteur de 3000 W.

Avec une puissance limitée à 1500 W, le temps d'accélération passe à 17 s. On peut observer sur la figure suivante que l'accélération entre 0 et 20 km/h est de 1,4 m/s² (ce qui est faible), puis entre 20 et 45km/h celle-ci est de 0,53 m/s² à cause de la puissance résistive qui augmente. Ce phénomène est moins marqué sur les 2 figures précédentes car la puissance résistive est faible par rapport à la puissance du moteur.

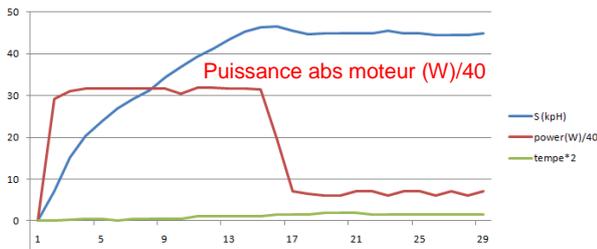


fig 16: Dynamique du velomobile $k_p=300$, $k_i=5$ avec une limitation de puissance du moteur de 1500 W.

Si la puissance absorbée provoque un échauffement, les freinages électriques provoquent aussi un échauffement important au niveau du moteur et du variateur. Le freinage électrique est déclenché dès que l'on touche au freinage mécanique par un poussoir placé sur le frein.

Mais quelle est la force de freinage à paramétrer ? Quelle est la puissance maximale de freinage possible et acceptée thermiquement ?

6.3. Freinage électrique

Sur un tricycle, il ne faut pas avoir un trop grand freinage à l'arrière sans freinage sur l'avant car cela provoquera un « drift » (dérapage de la roue arrière). De plus, il faut que la batterie puisse accepter le courant de recharge. En limitant ce courant à 1C pour une batterie de 20 Ah en 72V, la puissance au freinage est de 1440 W donc de 185 N à 40 km/h.

La force de freinage a été limitée à une valeur constante à 80 N dès que l'on actionne le frein, ce qui provoque une puissance de freinage de 1180 W à 40 km/h et une puissance récupératrice de 880W car le rendement en fonction de la vitesse est autour de 75%. Le rendement en génératrice peut être observé sur la figure suivante après un essai en freinage.

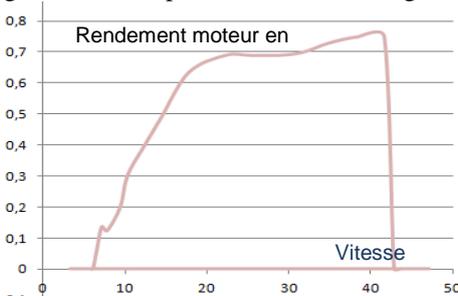


fig 17: Rendement en fonction de la vitesse déterminée en freinage du moteur HS3540 pour une force de 80N

Le pilote peut augmenter cette puissance à 1440 W ce qui correspond à la valeur préconisée de 1C de la recharge maximale préconisée par le constructeur.

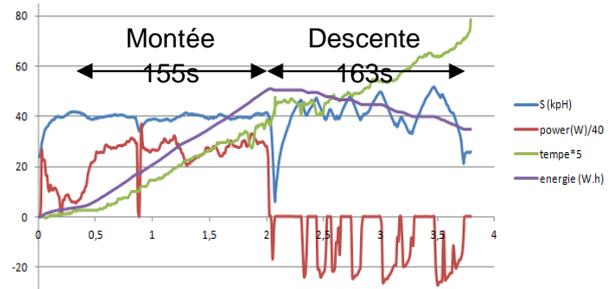


fig 18: Test en montée et descente pour un dénivelé de 86m avec 6 virages qui demandent une vitesse de 40km/h pente moyenne de 5%

Lors de la descente, le freinage électrique est fonction de chaque virage, donc la puissance restituée est fortement hachée avec une énergie restituée de 15,4 Wh qui est retrouvée par l'équation suivante (15) :

$$E(W.h) = 315W \cdot \frac{2km}{40km/h} - \frac{140kg \cdot 9,81 \cdot 0,08km \cdot 0,7}{3,6} = 5,75 - 21,3W.h = 15,5$$

La puissance moyenne de freinage restituée est de 340 W.

Etant donné que la force de freinage est constante quelle que soit la vitesse de descente, le courant moteur correspond à l'équation suivante :

$$I_{moteur} = \frac{Force \cdot Vitesse_{max}}{U_{batt} \cdot 3,6} \quad (16)$$

Donc, pour une force de 80 N, le courant moteur est de 20 A. Les pertes dans le variateur à chaque freinage sont de 4 W et l'incrément de température du variateur atteindra 10°C.

Par contre, pour une force de 185 N, le courant moteur est de 47 A. Les pertes dans le variateur sont de 22 W et l'incrément de température atteint 55°C : la température limite des transistors est atteinte si la température ambiante est de 35°C.

En conséquence, si la température du groupe moto-variateur est trop importante, il faut plutôt utiliser le freinage mécanique que le freinage électrique. Mais l'étude de l'échauffement des freins mécaniques est aussi cruciale pour la sécurité. Par conséquent, une surveillance de la température des freins par infrarouge est souhaitable [4].

7. Conclusions

Cet article démontre qu'il est possible d'appliquer une puissance bien supérieure à la puissance nominale de la motorisation lors des accélérations à condition de surveiller la température, surtout si la périodicité de cette puissance maximale est inférieure à la constante de temps thermique des convertisseurs électriques.

D'ailleurs pour seulement 1 kg supplémentaire, un variateur 72V-90A avec une puissance maximale de 6400W pourrait être utilisé avec ce même moteur. Cette puissance permettrait d'avoir des accélérations très importantes. Mais dans ce cas, il faut impérativement mesurer la température du moteur pour que celle-ci ne dépasse pas la température de 100°C que peut supporter le bobinage.

A l'inverse avec le variateur utilisé (80V-40A) un moteur plus léger que le HS3540 pourrait être utilisé.

Donc dans tous les cas, la minimisation des pertes et l'amélioration des rendements du système électrique est important. Mais pour cela il faut souvent augmenter la masse des systèmes.

Avec une augmentation de la tension batterie, la puissance maximale peut être plus importante. En effet, plus la tension est importante et plus le courant moteur sera faible en régime établi de vitesse donc moins il y aura de pertes joules. Mais il y a un compromis à faire sur le nombre de cellule de la batterie embarquée.

Cet article a présenté le paramétrage de la régulation de vitesse et son implication sur l'incrément de température. Cette régulation de vitesse devrait être relativement simple pour un étudiant en Génie électrique. Pourtant, il y a souvent une confusion entre la puissance du régime établi de vitesse et le régime intermittent de la puissance demandée au moteur ainsi que sur l'incrément de température. De plus, cet article démontre qu'il n'est pas possible de protéger le groupe moto-variateur d'un véhicule à partir de la mesure de température en limitant la vitesse du véhicule dans les montées.

Le freinage électrique permet d'avoir une récupération d'énergie mais il provoque un échauffement supplémentaire sur le groupe moto-variateur par rapport à un fonctionnement en roue libre.

L'étude de l'échauffement de la motorisation électrique est donc cruciale pour optimiser la masse d'un véhicule et pour savoir si le pilote peut utiliser un mode « boost » ou pas. Si la gestion de la vitesse en fonction de la température et de la puissance n'est pas facile, des perspectives d'études par un correcteur flou ou neuronal peuvent être envisagées.

Bien évidemment, cette étude de limitation de puissance et température peut être transposée à n'importe quel véhicule électrique sachant que pour une voiture électrique la masse des systèmes est moins problématique.

8. Références

- [1] A. Sivert, F. Betin, T. Lequeu, B. Vacossin « Etat de santé, diagnostic, durée de vie des batteries Lithium – Application à l'estimation de l'autonomie d'un véhicule électrique » Revue Technologie N°84, Avril 2016
- [2] A. Sivert, F. Betin, T. Lequeu, B. Vacossin « Différentes Stratégies de pilotages pour Véhicule Electrique Optimisation : puissance moteur, énergie véhicule, temps » Revue 3EI N°86, Oct 2016,
- [3] A. Sivert, F. Betin, T. Lequeu, B. Vacossin « Optimisation de la masse en fonction de la vitesse, puissance, autonomie, prix, centre de gravité, frein, d'un Véhicule électrique à faible consommation (vélo, vélo-mobilité, voiture électrique) Estimateur de consommation sur un parcours » Revue 3EI N°80, Avril 2015, page 47 à 57 et WSEAS 2015
<http://www.wseas.org/multimedia/journals/education/2015/a225810-158.pdf>
- [4] A. Sivert, J. Claudon, F. Betin, B. Vacossin , « Véhicule électrique à faible consommation Problématique mécanique des tricycles carénés

caractérisation avec Smartphone » Revue Technologie N°199, octobre 2015, page 26 à 38 et WSEAS 2016
<http://www.wseas.org/multimedia/journals/education/2016/a065810-178.pdf>

[5] A. Sivert, F. Betin, T. lequeu « Instrumentation d'un véhicule motorisé électrique faible consommation de type « éco marathon » Revue 3EI N°81, Juillet 2015, page 52 à 60

[6] A. Sivert, F. Betin « Gestion et dimensionnement de l'énergie embarquée pour un véhicule électrique à faible consommation » Symposium de Génie électrique SGE 2014

[7] A.Sivert, B.Cauquil, E.Morel, F.Bailly « Véhicules à faible consommation énergétique (Challenge SUNTRIP) » Revue 3EI N°85, Juillet 2016 [Le blog de ma balade en vélo couché 2012](http://www.cheminfaisant.fr)
<http://www.cheminfaisant.fr>

<http://www.sunrider.fr/>

[8] <http://www.ebikes.ca/product-info/statorade.html>

[9] voyages en velomobile :

<http://velorizontale.bbfr.net/t21362p400-velomobile-electric-leiba-x-stream-iut-aisne-suite>

<http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/actualites/7465/7465-inscription-journee-3ei-du-30-juin-2016.pdf>



fig 19: Velomobile à la Journée 3EI entre industriels, enseignants et étudiants sur le thème de la mobilité électrique le 30 juin au CNAM Paris 2016 [9]



fig 20: Politique et enjeux environnementaux dans les grandes villes. Le velomobile est une des solutions...



fig 23: Une salle de prototype pour les véhicules faibles consommations énergétiques de l'IUT De Soissons



fig 21: Fête de la science 2016 (Soissons et Compiègne)

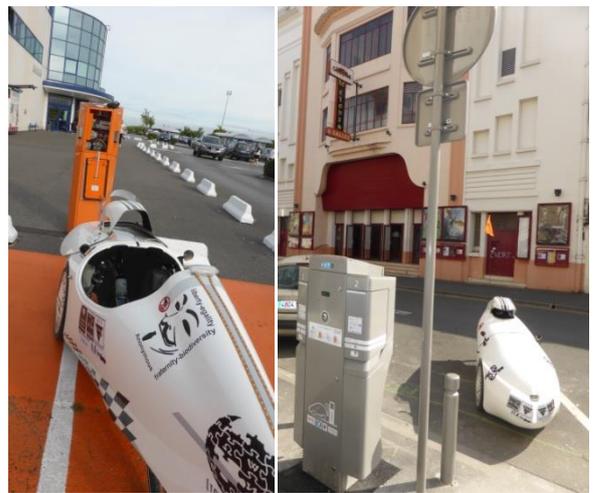


fig 24: L'infrastructure des bornes électriques peuvent être utilisée par les vélos électriques (chargemap.com). Mais la non compatibilité des prises et des services de paiement font parfois ce n'est pas facile.



fig 22: Eco marathon 2016



fig 25: Le vélo électrique peut être aussi pour le transport de marchandise, mais la masse demande un super boost.

Gestion du trafic routier dans un tunnel à l'aide de LabView

KAMAL BOUDJELABA, JEAN-MARC ROUSSEL, L.A. GONZALEZ PEREZ, CLARISSE NOVELLO

IUT de l'Indre, Département GEII, 2 avenue François Mitterrand 36000 CHATEAUROUX

Courriel : kamal.boudjelaba@univ-orleans.fr

jean-marc.rousseau@univ-orleans.fr

Résumé : L'article propose une maquette de gestion du trafic routier dans un tunnel à l'aide du logiciel LabView de National Instruments, en utilisant la carte d'acquisition myDAQ. Cette maquette gère d'une manière automatique les différents capteurs et commandes (actionneurs) de la maquette et les données sont reçues en temps réel.

Mots clés : Acquisition de données, LabView, Gestion du trafic routier.

1. Introduction

Le logiciel LabView est une plate-forme de conception de systèmes de mesure par acquisition de données, de contrôle d'instruments et de l'automatisme industriel. Les systèmes de transport intelligents participent pleinement à la gestion du trafic routier au travers des moyens et équipements dynamiques.

Le but de cet article est de présenter une maquette de TP d'informatique industrielle du semestre 3 du DUT GEII, réalisée à l'aide de LabView pour la gestion du trafic routier dans un tunnel. La partie matérielle de la maquette est composée d'un tunnel opaque en plexiglas contenant les différents capteurs et composants électroniques de la maquette. Ces différents composants sont reliés à la carte d'acquisition qui est elle-même reliée à un ordinateur équipé d'un logiciel LabView.

2. LabView

LabView est un langage de programmation graphique par flux de données. Les programmes LabView sont appelés Instruments Virtuels (Virtual Instruments : VIs), et ils sont constitués d'une interface graphique appelée Front Panel (face avant) et d'un Bloc Diagramme (ou face arrière) contenant le code.

Le front panel est constitué de contrôles et d'indicateurs qui sont les entrées et les sorties interactives du VI. Le bloc diagramme contient des structures et des fonctions issues de bibliothèques LabView.

2.1. Exemple

Dans cet exemple, nous présenterons un programme pour calculer les racines d'une équation de 2nd degré ($ax^2+bx+c=0$). Ce programme doit traiter tous les cas possibles en fonction des coefficients a, b et c et des

différentes valeurs du discriminant (solutions réelles ou complexes conjuguées).

Algorithme de calcul des solutions d'une équation de 2nd degré :

Début

Si $a = 0$

Si $b = 0$

Si $c = 0$

$\forall x \in \mathbb{C}$ est solution de l'équation

Sinon ($c \neq 0$)

L'équation n'admet pas de solutions

Sinon ($b \neq 0$)

$x = \frac{-c}{b}$ L'équation admet une seule solution (équation de 1^{er} degré)

Sinon ($a \neq 0$)

$\Delta = b^2 - 4 * a * c$

Si $\Delta \geq 0$

L'équation admet des solutions réelles (doubles ou distinctes)

Si $\Delta > 0$

$x_1 = \frac{-b-\sqrt{\Delta}}{2*a}$, $x_2 = \frac{-b+\sqrt{\Delta}}{2*a}$

(Deux solutions réelles distinctes)

Sinon ($\Delta = 0$)

$x_1 = x_2 = \frac{-b}{2*a}$ (Solution réelle double)

Sinon ($\Delta < 0$)

$z_1 = \frac{-b-i\sqrt{-\Delta}}{2*a}$, $z_2 = \frac{-b+i\sqrt{-\Delta}}{2*a}$

(Deux solutions complexes conjuguées)

Fin

Le front panel contient 3 contrôles (a, b et c) et 5 indicateurs (figure 1). Le front panel contient aussi un

commentaire encadré pour décrire le but du programme et des boutons actifs au relâchement : Bouton "DELTA" pour calculer le discriminant, Bouton "RACINES" pour calculer les racines de l'équation et un bouton "Fin de programme" pour arrêter l'exécution du programme. Le programme (figure 2) est réalisé en utilisant une structure événement incluse dans une boucle while pour permettre la modification des paramètres d'entrée a , b et c lors de l'exécution.

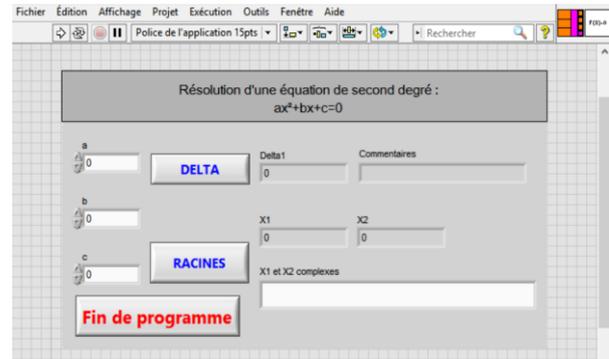


Figure 1 : Front panel (interface graphique)

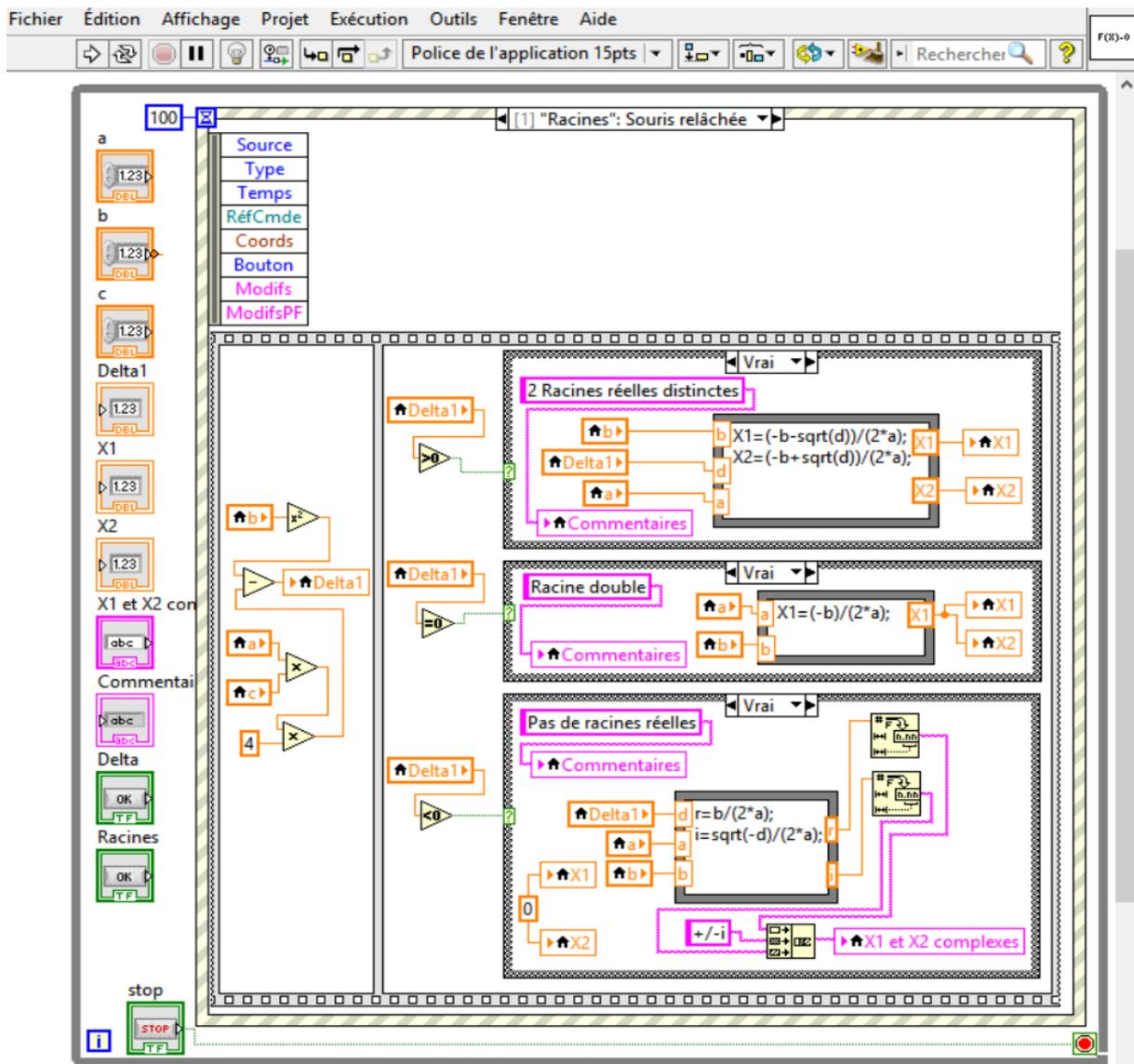


Figure 2 : Bloc diagramme

3. La maquette

La connexion entre l'ordinateur et la maquette est assurée par une carte d'acquisition NI myDAQ. Cette maquette servira l'année prochaine pour réaliser des TP d'instrumentation programmable (et/ou informatique

industrielle) pour les étudiants de 2^{ème} année DUT GEII.

La maquette est de dimensions $L=1.30$ m, $l=0.35$ m, $h=0.23$ m. La partie basse de la maquette représentant la

route est en bois et les parois sont en plexiglas. Le tunnel a la forme d'un parallélépipède rectangle en plexiglas de dimensions $L=1$ m, $l=0.25$ m, $h=0.23$ m (Figure 3).



Figure 3 : Maquette du tunnel routier

L'objectif principal s'articule autour de la gestion du trafic routier dans un tunnel à l'aide du logiciel LabView. Le trafic, les capteurs et les actionneurs seront pilotés automatiquement à l'aide de l'interface réalisée sous le logiciel LabView.

Les éléments électriques devront si possible être protégés d'une possible erreur de programmation de la part des étudiants lors des travaux pratiques.

La maquette contient deux barrières (une à chaque extrémité du tunnel) qui s'ouvriront ou se fermeront en fonction du trafic et des données fournies par les différents capteurs. Les extrémités du tunnel seront aussi équipées de feux tricolores. Le trafic à l'intérieur du tunnel sera surveillé grâce à deux capteurs/compteurs. Le tunnel est équipé d'une sonde de température, trois ventilateurs, des LEDs blanche à l'intérieur pour l'éclairage et d'un capteur de luminosité.

Liste détaillée des différents composants de la maquette:

Eclairage	- 11 LEDs blanches
Feux tricolores	- 2 LEDs rouges - 2 LEDs jaune - 2 LEDs vertes
Barrières	- 2 servomoteurs
Aération et anti-incendie	- 3 ventilateurs - 1 sonde de température
Comptage	- 2 capteurs/compteurs
Carte d'acquisition	- 1 carte NI myDAQ

Tableau 1 : Composants de la maquette

Les deux servomoteurs piloteront les barrières (ouverture et fermeture). La sonde de température à

l'intérieur du tunnel permettra de relever la température (et détecter un éventuel incendie), ce qui devra immédiatement être suivi par la mise en marche des ventilateurs, et éventuellement la fermeture du tunnel dans le cas d'un incendie (passage des feux tricolores au rouge uniquement) et les barrières seront ouvertes pour permettre aux véhicules de sortir du tunnel. L'accès au tunnel sera aussi fermé si le nombre de véhicules à l'intérieur atteint une certaine limite.

3.1. Carte d'acquisition de données

Le dialogue entre les différents capteurs (lumière, température, présence ...) et les différents actionneurs (ventilateurs, feux, barrières ...) est établi depuis la carte d'acquisition de données NI myDAQ.

NI myDAQ est un périphérique portable d'acquisition de données qui utilise des instruments logiciels basés sur LabView, pour permettre de mesurer et d'analyser des signaux physiques. NI myDAQ est idéale pour récupérer les données fournies par des capteurs. En l'utilisant sous LabView, on peut analyser et traiter des signaux acquis et contrôler des processus simples à tout moment et n'importe où.

Cette carte comporte diverses entrées et sorties :

- 8 entrées ou sorties numériques
- 2 entrées analogiques
- 2 sorties analogiques
- une sortie d'alimentation en +15V et -15V et une sortie d'alimentation en +5V
- une entrée audio
- une sortie audio
- 2 ports de branchement ampèremètre/ohmmètre/voltmètre

3.2. Paramètres de contrôle

Tout d'abord, le programme doit être capable de gérer toute la maquette de manière automatique et l'interface utilisateur doit être facile à comprendre. Cela est réalisé à l'aide des paramètres de contrôle. Les programmes sont réalisés avec la version 2015 du logiciel LabView.

3.2.1. Paramètres de la température

Si la température dans le tunnel est inférieure à un certain seuil (10° C), la vitesse des ventilateurs va être réduite afin de permettre juste l'évacuation des particules générées par les voitures, les feux sont au vert et les barrières sont ouvertes. À chaque fois que la température augmente, la vitesse des ventilateurs va augmenter aussi. Par contre, si la température est supérieure ou égale à un certain seuil (30° C), la vitesse

des ventilateurs sera élevée, les feux passeront au rouge. Les feux repasseront au vert dès que la température dans le tunnel descend de 5 degrés de la température limite, dans ce cas 25 degrés. Les barrières seront fermées dans le cas où la température dépasse 30° C et qu'aucun véhicule ne se trouve à l'intérieur du tunnel.

Le capteur de température utilisé est le capteur LMT85. Ce capteur est un composant de technologie CMOS pour mesurer la température et il fournit en sortie une tension analogique qui est inversement proportionnelle à la température. Ses caractéristiques le rendant approprié pour de nombreuses applications de détection de température. Ce capteur peut fonctionner en étant alimenté avec une tension de 1.8 V et avec une consommation de 5 μ A, il est donc idéal pour les dispositifs alimentés par batterie.

Sa gamme de fonctionnement est comprise entre -50°C et +150°C avec une proportion de -8.2mV/°C s'il est alimenté avec une tension comprise entre de 1.5V et 5.5V.

3.2.2. Paramètres de la lumière

Le contrôle de la lumière est réalisé en prenant en compte la tension fournie par des capteurs photoélectriques (photorésistances). Par exemple, si la

lumière est supérieure ou égale au seuil maximal (80% de l'éclairage du jour), seulement les lampes qui se trouvent au milieu du tunnel vont être allumées pour éclairer le tunnel. Par contre, si la lumière est faible (<30% par exemple) toutes les lampes du tunnel vont être allumées.

Une photorésistance est un composant dont la valeur en Ohms dépend de la lumière à laquelle elle est exposée. On la désigne aussi par LDR (Light Dependent Resistor = résistance dépendant de la lumière). La principale utilisation de la photorésistance est la mesure de l'intensité lumineuse (appareil photo, systèmes de détection, de comptage et d'alarme...).

Pour l'éclairage dans le tunnel, on a utilisé des diodes électroluminescentes de couleur blanche. Une diode électroluminescente (DEL) et en anglais : Light-Emitting Diode (LED), est un dispositif optoélectronique capable d'émettre de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique. Une diode électroluminescente ne laisse passer le courant électrique que dans un seul sens (le sens passant, comme une diode classique) et produit un rayonnement monochromatique ou polychromatique non cohérent à partir de la conversion d'énergie électrique en lumière.

La partie du programme qui gère la lumière est donnée dans les figures ci-dessous (figure 4 et 5).

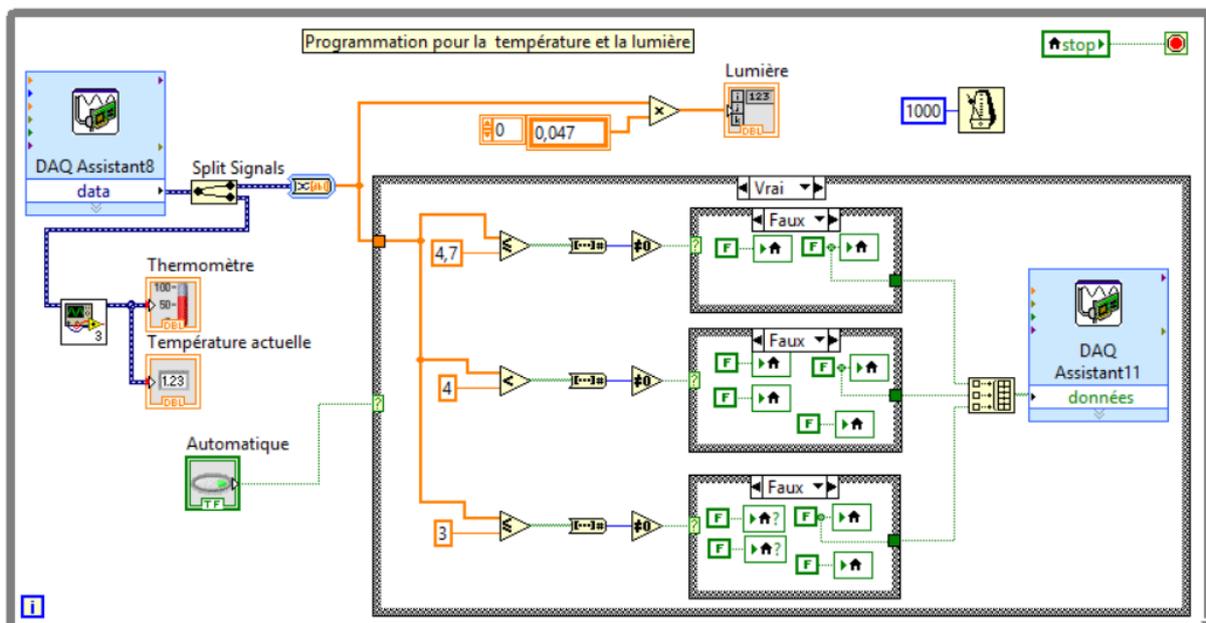


Figure 4 : Gestion de l'éclairage (gestion automatique)

La gamme de tension fournie par le capteur de lumière est divisée en trois intervalles distincts. Le premier intervalle commande l'allumage de deux LEDs situées au centre du tunnel, le second intervalle

commande l'allumage de 6 LEDs (les 2 précédentes et 4 autres LEDs réparties tout au long du tunnel) et le troisième intervalle commande l'allumage de toutes les LEDs.

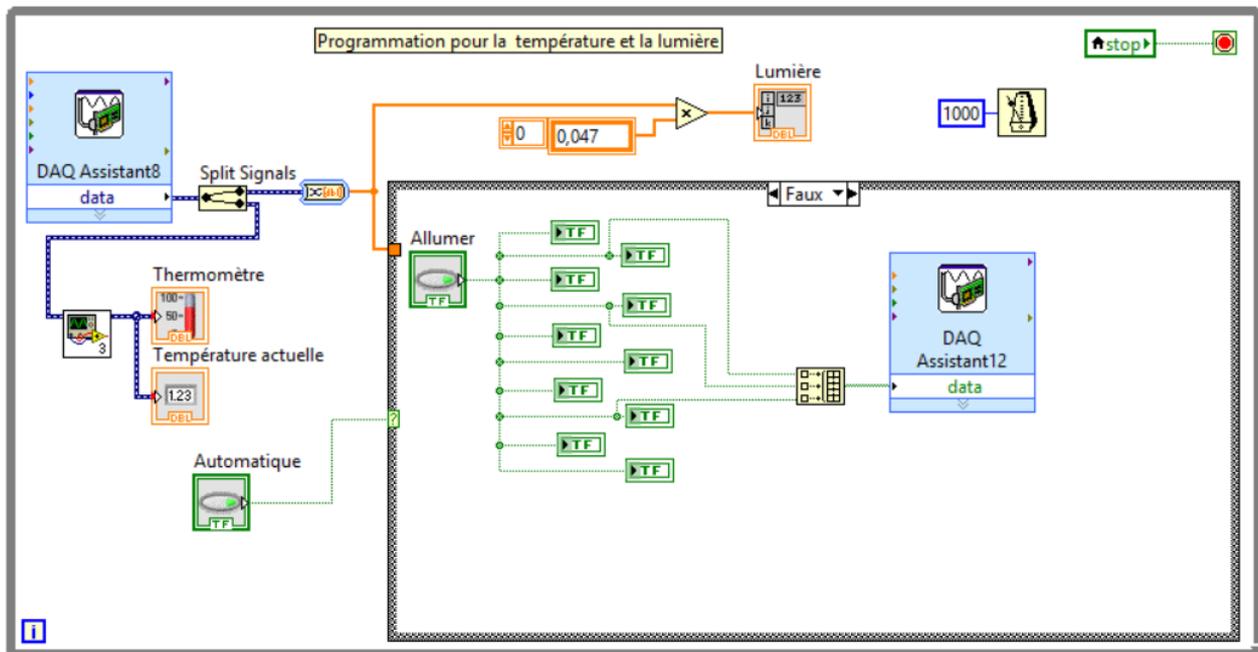


Figure 5 : Gestion de l'éclairage (gestion manuelle)

3.2.3. Ventilateurs

Les ventilateurs utilisés sont de type axial et permettent d'aspirer l'air et de le propulser parallèlement à l'axe de rotation du ventilateur.

Caractéristiques des ventilateurs :

Tension d'alimentation de fonctionnement : 3 à 6 V dc

Direction : sens opposé des aiguilles d'une montre

Température de fonctionnement : -10 à +70°C

Comme la carte d'acquisition ne fournit pas un courant suffisant pour faire fonctionner les ventilateurs, il a été nécessaire de connecter une source extérieure de tension avec un transistor N2222. Le transistor N2222 fonctionne en commutation (comme une porte logique).

3.2.4. Servomoteurs

Pour commander l'ouverture et la fermeture des barrières, on a utilisé deux servomoteurs.

Un servomoteur est un système qui a pour but de produire un mouvement précis (action mécanique) en réponse à une commande externe (tension PWM).

Un servomoteur est composé :

- d'un moteur à courant continu
- d'un axe de rotation
- un capteur de position de l'angle d'orientation de l'axe (très souvent un potentiomètre)

- une carte électronique pour le contrôle de la position de l'axe et le pilotage du moteur à courant continu

Un servomoteur est capable d'atteindre des positions prédéterminées en fonction de la tension qui lui est

appliquée (consigne) et de les maintenir indéfiniment. Le servomoteur a l'avantage d'être asservi en position angulaire, cela signifie que l'axe de sortie du servomoteur respectera la consigne appliquée à son entrée. Pour un ajustement précis de la position, le moteur et son réglage sont équipés d'un système de mesures qui détermine la position courante.

Pour cette maquette, on a utilisé un servomoteur d'aéromodélisme numérique.

Les servomoteurs sont commandés par l'intermédiaire d'un câble électrique à trois fils qui permettent d'alimenter le moteur et de lui transmettre des consignes de position sous forme d'un signal codé en largeur d'impulsion (PWM).

Un signal à modulation de largeur d'impulsion (PWM) est une méthode qui permet de générer un signal analogique en utilisant une source numérique. Un signal PWM est constitué de deux composantes principales qui définissent son comportement : un rapport cyclique et une fréquence. Le rapport cyclique décrit la durée pendant laquelle le signal est à l'état haut (actif) en pourcentage de la durée d'un cycle complet. La fréquence détermine la vitesse à laquelle le signal PWM effectue un cycle (par exemple, 1000 Hz serait 1000 cycles par seconde) et par conséquent à quelle vitesse il passe de l'état haut à l'état bas et vice versa.

3.2.1. Feux tricolores (LED's de couleur)

Pour les feux tricolores, on a utilisé des diodes électroluminescentes de couleurs rouge, orange et vert.

La gestion des ventilateurs, des barrières et des feux tricolores est gérée essentiellement par les données fournies par le capteur de température. Comme on peut

le voir sur la figure 6, une "séquence déroulée" a été utilisée pour optimiser la gestion des différentes commandes.

Si la température est inférieure au seuil limite, les ventilateurs tournent à une vitesse modérée afin de permettre de maintenir la température ambiante à des valeurs modérées et permettre aussi l'extraction des particules générées par le trafic routier.

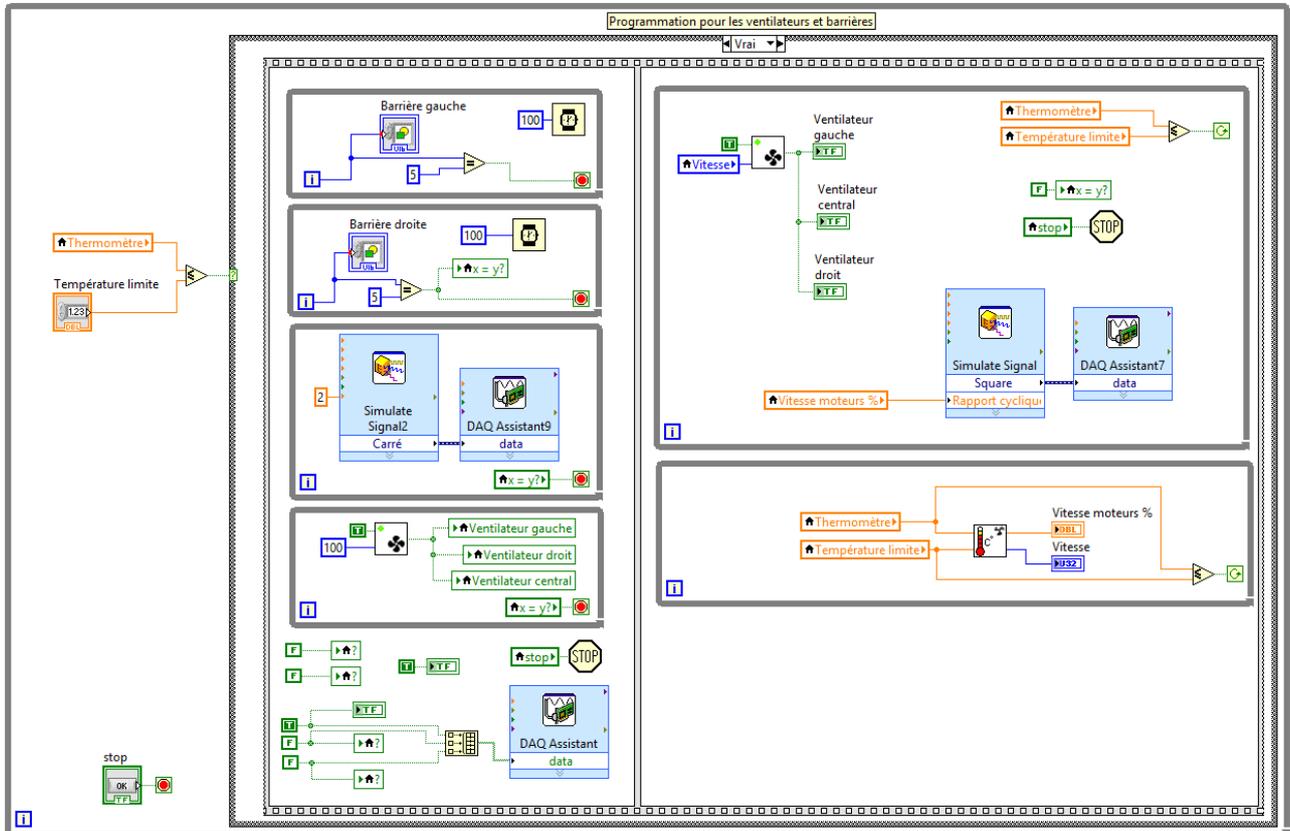


Figure 6 : Gestion de la barrière, des feux tricolores et des ventilateurs (cas où la température est inférieure à la température limite)

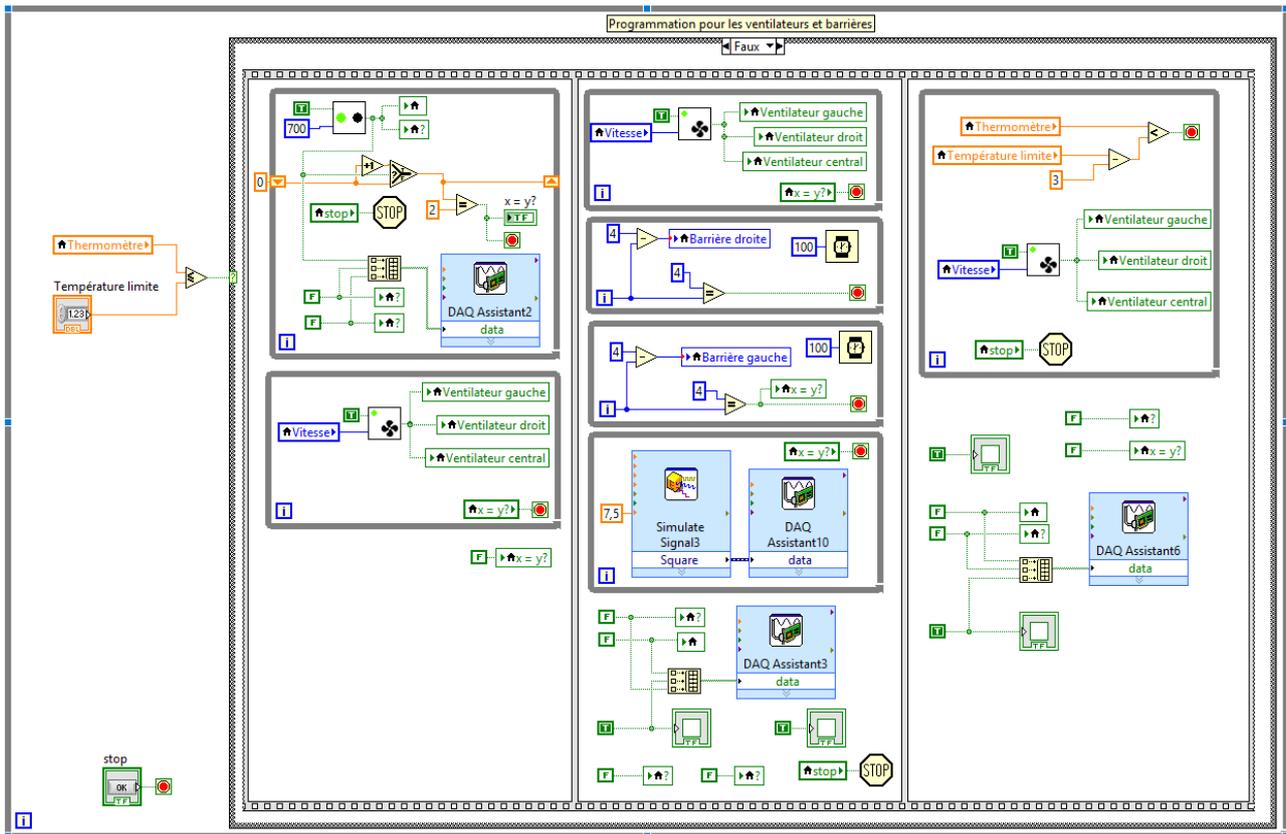


Figure 7 : Gestion de la barrière, des feux tricolores et des ventilateurs (cas où la température est supérieure à la température limite)

Dans le cas où la température est supérieure au seuil limite (figure 7), les ventilateurs tournent à une vitesse élevée et les feux tricolores passent au rouge.

4. Interface utilisateur

Cette interface utilisateur est une interface réalisée sous LabView qui permet à l'utilisateur de manipuler les paramètres de contrôle du tunnel (Figure 8). Elle coordonne les interactions entre les capteurs, les actionneurs, la carte d'acquisition de données et l'utilisateur.

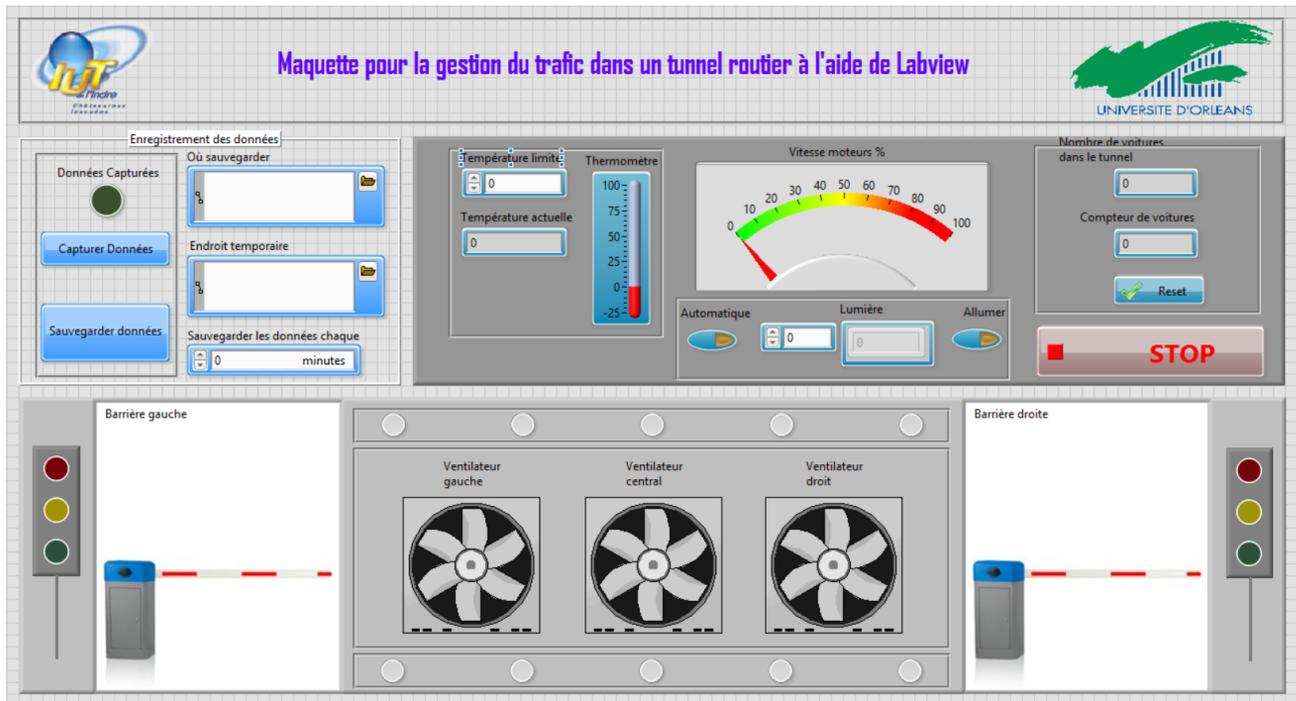


Figure 7 : Vue générale de l'interface graphique

5. Conclusion

Nous avons présenté ici une gestion complète du trafic dans un tunnel routier à l'aide du logiciel LabView. Le tunnel routier est simulé par une maquette réalisée en bois et plexiglas et une interface graphique conviviale a été mise en œuvre pour superviser le trafic et contrôler en temps réel les différents paramètres du tunnel. Ce travail sera intégré, dès l'année prochaine, dans les TP d'informatique industrielle pour les étudiants de 2ème année DUT GEII.

6. Références

- [1] Francis Cottet, Michel Pinard, Luc Desruelle, *LabVIEW : Programmation et applications*, Technique et Ingénierie, Dunod, 2015 - 3ème édition
- [2] Rick Bitter, Taqi Mohiuddin, Matt Nawrocki, *LabView: advanced programming techniques*, Taylor & Francis Group, 2007, second edition
- [3] <http://www.ni.com/pdf/manuals/321190e.pdf>
- [4] http://www.ni.com/pdf/manuals/373427j_0114.pdf
- [5] <http://www.ni.com/product-documentation/14031/fr/>
- [6] <http://www.ni.com/mydaq/f/>

Récupération d'énergie dans un réseau d'irrigation par pico-génération

VALLIAMEE Jean-Luc, PAYET Jean-Frédéric

Lycée Roland Garros

Le Tampon 97430 Réunion

Jean-Luc.Valliamee@ac-reunion.fr

Résumé : Dans le cadre de l'épreuve de projet dans la série Sciences et Technologies de l'Industrie et du développement durable STI2D, une équipe de 4 élèves de terminale en option énergie et environnement, sous la conduite d'une équipe d'enseignants de la spécialité au lycée Roland Garros a présenté un projet visant à améliorer les conditions de production d'une exploitation de canne à sucre. L'objectif principal était de permettre à l'agriculteur de s'affranchir des tâches afférentes à l'arrosage de son champ de cannes démunis d'énergie électrique et d'apporter un éclairage de sécurité lors de la récolte des produits maraîchers sous serre. L'équipe de 4 élèves a remporté le premier prix de la série STI2D aux olympiades de l'ingénieur académiques de La Réunion.

1. Introduction

Dans le cadre de l'épreuve de projet dans la série Sciences et Technologies de l'Industrie et du développement durable STI2D, une équipe de 4 élèves de terminale en option énergie environnement, sous la conduite d'une équipe d'enseignants de la spécialité au lycée Roland Garros s'est présentée et a remporté le premier prix de la série STI2D aux olympiades de l'ingénieur académiques de La Réunion.

Il s'agissait de répondre aux problématiques d'un agriculteur qui souhaitait s'affranchir des tâches afférentes à l'arrosage de son champ de cannes démunis d'énergie électrique et d'apporter un éclairage de sécurité lors de la récolte des produits maraîchers sous serre. En développant ce projet les élèves ont analysé des problématiques et des enjeux environnementaux, techniques et économiques. La solution adoptée a permis de tirer profit de l'énergie présente dans le réseau d'irrigation. Ils ont donc structuré, dimensionné la chaîne énergétique et mis en place la chaîne d'information pour automatiser l'arrosage et assurer un éclairage de sécurité sur le site agricole. Ils ont réalisé une maquette commandée par smartphone permettant d'illustrer les fonctionnalités attendues.

2. Les étapes du projet

La conduite de projet extraite du guide d'accompagnement STI2D est consignée ci-dessous :

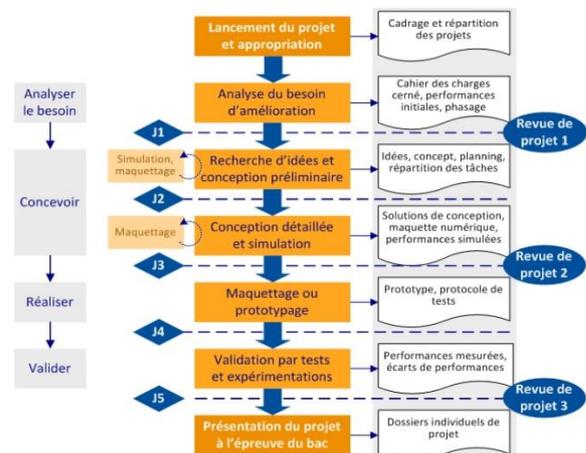


Figure 1 : synoptique de la conduite de projet extraite du guide d'accompagnement STI2D

Phase 1 : analyser le besoin, analyser un problème

L'objectif est de cerner les usages de l'exploitation, d'analyser le besoin, les solutions actuelles et les attendues, d'identifier les enjeux environnementaux, économiques, techniques, les aspects normatifs et réglementaires du site. Les élèves ont donc été amenés à rencontrer l'agriculteur et un travail préparatoire à cette rencontre a été mené par le groupe pour optimiser les échanges.

Il en résulte que :

- L'exploitation agricole est dépourvue de source d'énergie électrique, en effet il n'y a pas de réseau de distribution d'énergie publique à proximité.
- Le champ de cannes est équipé de 4 vannes manuelles par réseau d'irrigation doté d'un débit de $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, d'une

pression de 6 bars et de 8 arroseurs. Le jet d'eau a une portée de 40 m.

- La serre a une surface de 3000 m². L'exploitation de la zone sous serre s'avère délicate notamment lors des phases de récolte qui ont lieu très tôt le matin à 3h avant la distribution des produits sur les différents marchés de l'île. La récolte dans ces conditions se fait avec des éclairages de poche et toutes les contraintes liées à l'utilisation des piles ou des accumulateurs.
- L'agriculteur se déplace deux fois par jour pour aller irriguer son champ de cannes à sucre (ouvrir et fermer les vannes) et il reste mobilisé sur son champ pendant la durée d'arrosage. Il parcourt donc pour cette tâche en moyenne 50 km par jour.
- L'agriculteur souhaite avoir un fonctionnement en mode automatique et à l'occasion en mode manuel. Il pourra choisir les parties du champ à arroser.

Phase 2 : imaginer des solutions

Les élèves dans cette phase doivent porter leur réflexion sur les solutions qui mettent en œuvre des énergies renouvelables. L'objectif est d'identifier et de caractériser les potentiels énergétiques du site. L'énergie du soleil, du vent et l'énergie hydraulique sont des énergies renouvelables présentes sur le site. Ils doivent répondre aux problématiques suivantes :

Comment tirer profit des énergies présentes sur le site ? Quelles solutions pour capter ces énergies et comment les utiliser ?

Les élèves font donc une étude des gisements énergétiques (solaire, éolienne, hydraulique), ils imaginent l'organisation des différentes chaînes d'énergie.

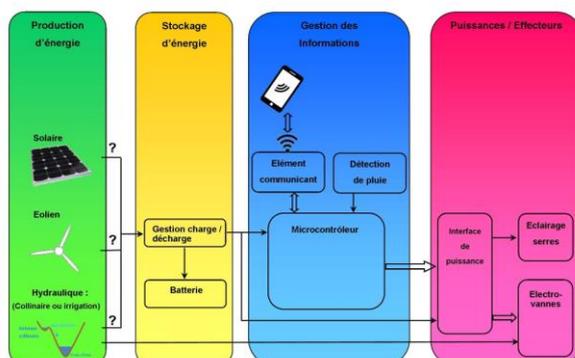


Figure 2 : organisation des chaînes d'énergie

L'énergie solaire directe cumulée par jour est de 7070 Wh.m⁻² en été et en hiver austral de 5950 Wh.m⁻² selon PERENE Réunion (PERformance ENergétique des bâtiments à la Réunion).

Concernant l'énergie éolienne des données sont disponibles sur le site <http://www.meteo-rdc.net> pour l'année 2015 :

- rafale la plus élevée : 46,7 km.h⁻¹,
- vent moyen : 1,5 km.h⁻¹,
- secteur dominant : Sud.

L'analyse des données météorologiques du site, permet de revoir les notions de valeurs moyennes avec le professeur de mathématiques :

- pluviométrie mensuelle la plus élevée : 285,2 mm,
- pluviométrie maximale en une journée : 120,2 mm,
- précipitations totales sur l'année : 1197,2 mm.

Phase 3 : choisir, formaliser et réaliser une solution

Il s'agit d'établir les critères de choix de la chaîne d'énergie sur le plan fonctionnel, technique, économique et environnemental... Des pondérations sont définies et affectées à chaque critère afin d'opérer un choix rationnel.

Le choix retenu est l'exploitation de l'énergie hydraulique. Le réseau d'irrigation étant présent sur le site, l'originalité consiste à tirer avantage de cette énergie. Cependant dans les phases de discussion avec l'agriculteur, ce dernier précise que la solution adoptée ne devra pas diminuer de 10% la distance de projection du jet d'eau des arroseurs. Ce point sera détaillé dans le paragraphe suivant.

Phase 4 : évaluer des performances (valider)

Dans cette phase les élèves vérifient le niveau de satisfaction du cahier des charges. Ils doivent pour cela établir les critères de performances pertinents, proposer et mettre en œuvre des protocoles d'évaluation des fonctions et de ces performances.

3. Détermination de la vitesse minimale du jet

La solution de la turbine hydraulique implique une perte de charge qui aura pour conséquence la diminution de la vitesse de sortie du jet donc la diminution de la distance du jet d'eau. Il convient donc à ce stade de déterminer la vitesse de sortie minimale du jet et d'en déduire la perte de charge provoquée à la turbine et donc l'énergie extractible.

Cette énergie s'exprime par la relation suivante :

$$E = \Delta P \cdot Q \cdot \Delta t$$

où ΔP est la perte de charge engendrée par la turbine exprimée en Pascals, Q le débit en m³.s⁻¹ et Δt la durée d'extraction en secondes.

La démarche mobilise des connaissances dans le domaine de la physique et de la mécanique des fluides.

Elle est simplifiée pour être en adéquation avec les exigences de la filière STI2D.

Les équations horaires du jet d'eau sont établies afin de déterminer la vitesse de sortie minimale du jet d'eau.

On considère une petite masse d'eau de masse m dans le plan (O,x,y) . La buse est à une hauteur notée Y_0 .

On appelle $\vec{V}_0 = V_{0x} \cdot \vec{x} + V_{0y} \cdot \vec{y}$ la vitesse initiale et on applique le principe fondamental de la dynamique à cette masse. On négligera la poussée d'Archimède de l'air et les frottements dans l'air.

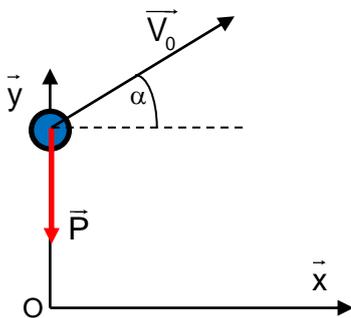


Figure 3: schéma des conditions initiales du jet

$$\sum \vec{F}_{ext} = m \cdot \vec{a} \quad \text{où } \vec{a} \text{ désigne l'accélération et } \vec{a} = -g\vec{y}$$

$$\text{A } t = 0, x(0) = y(0) = Y_0.$$

On primitive l'accélération on obtient :

$$\vec{V}_0 = V_0 \cdot \cos(\alpha)\vec{x} + (-gt + V_0 \sin(\alpha)) \cdot \vec{y}$$

On primitive à nouveau pour obtenir la position dans le plan.

$$x(t) = V_0 \cdot \cos(\alpha)t$$

$y(t) = -\frac{g}{2}t^2 + V_0 \cdot \sin(\alpha)t + Y_0$, en éliminant le temps on obtient alors l'équation de la trajectoire de la masse d'eau :

$$y(t) = -\frac{g}{2(V_0 \cdot \cos(\alpha))^2} x^2 + \tan(\alpha)t + Y_0$$

C'est l'occasion pour cette application d'impliquer le professeur de mathématiques et de sciences physiques (représentation de courbes, calcul d'angle optimal, hauteur maximale du jet et distance projetée).

Cette équation permet donc d'obtenir la vitesse de sortie du jet pour une distance projetée sur x de 40 mètres avec $Y_0 = 3$ mètres et $\alpha = 30^\circ$. On aboutit à une vitesse V_0 de 20 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Sachant que l'on ne doit pas

diminuer la distance projetée de 10% alors il vient $V_0 = 18,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

4. Détermination de la perte de charge engendrée par la turbine

Les équations de Bernoulli formulées sur une ligne de courant de la sortie de la turbine jusqu'à la hauteur Y_0 placée à la limite de la sortie du jet dans l'atmosphère permettent d'écrire :

$$P_0 + P_s + \frac{1}{2}\rho V_s^2 = P_0 + \rho g Y_0 + \frac{1}{2}\rho V_0^2$$

Si on a P_e la pression relative à l'entrée de la turbine, il en résulte

$$\Delta P = P_0 - P_s = P_e - \rho \left(g Y_0 + \frac{1}{2} V_0^2 \right) + \frac{1}{2} V_s^2$$

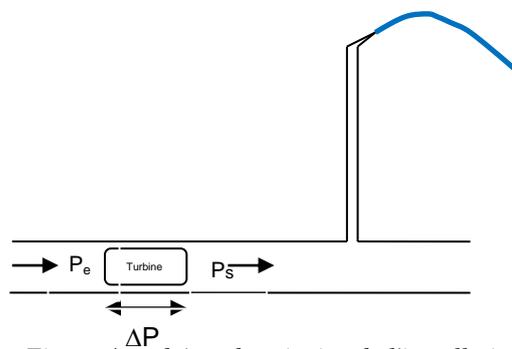


Figure 4: schéma de principe de l'installation hydraulique

On peut déterminer ΔP en tenant compte des 8 arroseurs. On aboutit à une puissance extractible d'environ 460 Watts. Dans la pratique on peut espérer prélever une puissance moins importante. En effet les pertes de charges singulières et régulières n'ont pas été prises en compte ainsi que le rendement de la génératrice entraînée par la turbine hydraulique. La génératrice est une machine à courant continu dans notre cas.

5. Bilan énergétique et dimensionnement des éléments de stockage

Les élèves font le bilan énergétique du site afin d'optimiser les usages, et d'opter pour des solutions les moins énergivores notamment dans le domaine de l'éclairage. Les énergies mises en jeu pour ouvrir et fermer les vannes, et alimenter la partie commande sont négligées devant l'énergie nécessaire à l'éclairage de la serre.

Les élèves sont amenés à aborder les aspects réglementaires et normatifs pour les grandeurs photométriques pour la zone de travail afin de définir le nombre de point lumineux et leur implantation ainsi que la puissance en watts à installer. C'est l'occasion de mettre en œuvre des logiciels de simulation tels que Dialux pour l'éclairage.

Ce bilan de puissance terminé, ils peuvent ainsi déterminer l'énergie nécessaire pour une journée W_{uj} en fonction du cahier des charges fixé par l'agriculteur soit 3 heures de fonctionnement.

$W_{uj} = NP\Delta t$, où N est le nombre de luminaires, P la puissance et Δt la durée de fonctionnement.

La capacité Q de la batterie de stockage est calculée en tenant compte des différents rendements la chaîne d'énergie de la manière suivante :

$$W_{ub} = \frac{W_{uj}}{\prod_i \eta_i} = U_b Q_{ub},$$

avec

- η_i rendement des différents constituants impliqués dans la chaîne d'énergie (régulateur, câbles...),
- U_b la tension aux bornes de la batterie
- et Q_{ub} la capacité utile de la batterie.

La capacité nominale Q_b de la batterie à installer sera : $Q_b = \frac{Q_{ub}}{PD}$ où PD est la profondeur de décharge.

6. La programmation de l'environnement matériel

Dans ce projet, la programmation de l'environnement matériel fait appel aux connaissances acquises par les élèves tout au long de leur cursus scolaire. En effet, depuis la seconde jusqu'à la terminale, ces élèves acquièrent des compétences en programmation au travers de différents enseignements comme les « Sciences de l'Ingénieur », « Création et Innovation Technologique » et l'« Enseignement Transversal ». Ils ont travaillé sur différents langages et environnements logiciels, ce qui leur permet la possibilité de l'approche logicielle même si ce n'est pas leur formation première.

Au fur et à mesure de l'avancement de leur projet, deux axes de programmation se dégagent :

- la gestion des entrées/sorties du microcontrôleur dans le respect du cahier des charges,
- la gestion à distance (par smartphone) de l'irrigation et de l'éclairage de l'exploitation agricole.

Bien sûr, ces 2 environnements programmés devront pouvoir communiquer.

6.1. La gestion des entrées/sorties du microcontrôleur

Le microcontrôleur est le cœur du système puisque c'est lui qui :

- prendra en compte les données arrivant du capteur et de l'élément communicant,

- activera / désactivera les sorties du système (électrovannes, luminaires).

La technologie de communication retenue a été le Bluetooth puisque disponible sur la plupart des smartphones. Lorsque l'agriculteur se rend sur son exploitation, il peut configurer le fonctionnement à ce moment-là. Le réseau de données cellulaires (3G) n'est pas toujours très bon (voire inexistant) sur les exploitations éloignées.

Après avoir réfléchi sur un fonctionnement du système qui respecte le cahier des charges, les élèves ont obtenu l'architecture suivante :

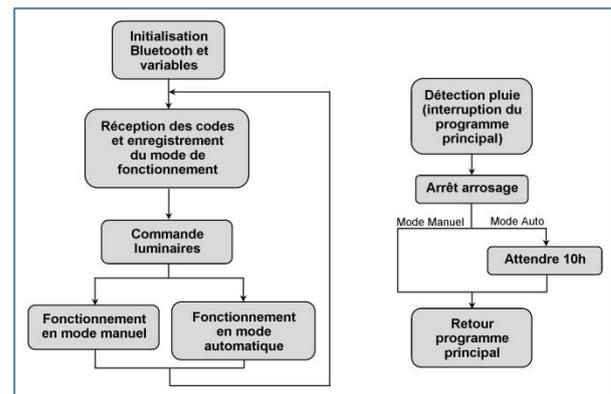


Figure 5 : synoptique de la programmation

Au niveau de la programmation, les élèves se sont orientés vers les microcontrôleurs « picaxe » (microcontrôleur de chez *Microchip* avec un jeu de commandes didactisées) et son logiciel « Logicator ». Cet environnement de programmation a été utilisé en Enseignement Transversal en début d'année de Terminale.

Les différentes parties de l'architecture précédente ont été programmées et testées. Au final, le tout rassemblé dans un programme unique, transféré vers un Shield « Picaxe » didactisé (lui aussi utilisé en cours d'année).

Nous avons consigné ci-dessous des exemples d'algorigrammes.

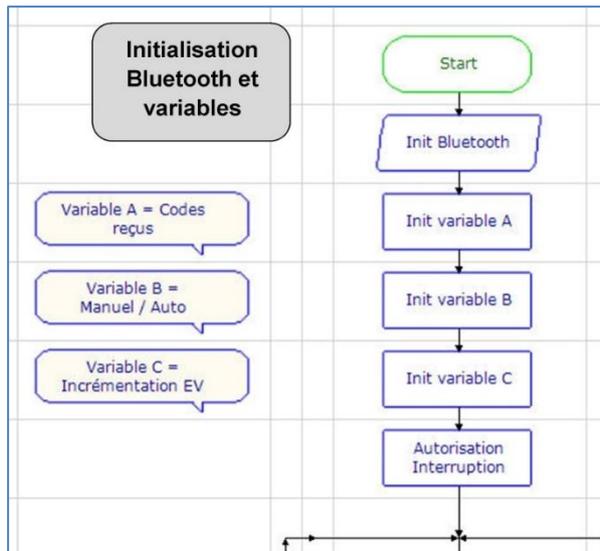


Figure 6 : exemple d'algorigramme

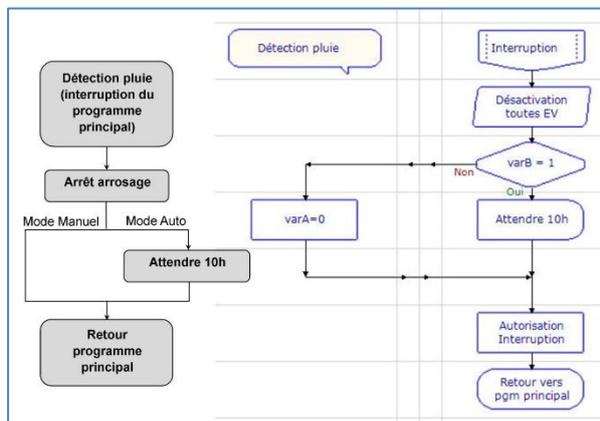


Figure 7 : exemple d'algorigramme

6.2. La gestion à distance par smartphone

Au niveau de l'application sur smartphone, le logiciel « créateur d'application App Inventor » à disposition sur le site du MIT a été choisi par les élèves. App Inventor a été utilisé par certains élèves en Enseignement d'Exploration CIT en classe de seconde. App inventor permet de créer des applications fonctionnant sous Android.

Toujours dans le but de respecter la demande de l'agriculteur (respect du cahier des charges), les élèves ont réfléchi à l'architecture de l'application.

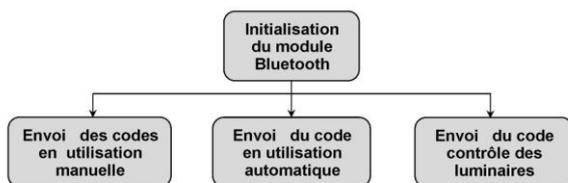


Figure 8 : architecture de l'application

La programmation dans le « créateur d'application App Inventor » se déroule en deux étapes :

- création de l'interface utilisateur (ce que voit l'utilisateur à l'écran),
- programmation des différentes fonctions (boutons) sous forme de blocs.

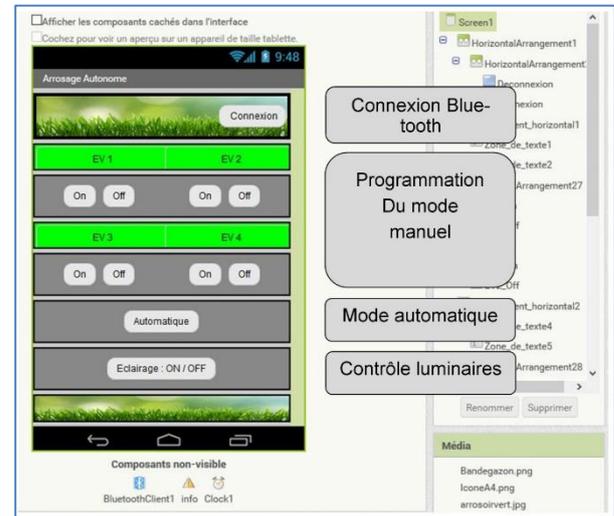


Figure 9 : Interface utilisateur

7. Mise en œuvre d'une maquette du système

En plus des maquettes numériques, les élèves ont aussi réalisé une maquette réelle permettant d'illustrer les fonctionnalités et l'interfaçage des deux environnements.

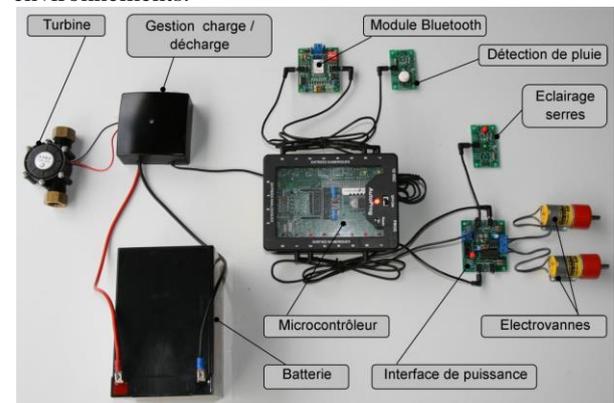


Figure 10 : maquette réelle

8. Conclusion

Dans le cadre du projet STI2D la capacité à rendre opérationnelle des solutions sur le terrain est relativement faible. Néanmoins le caractère concret de ce projet a permis aux élèves de donner du sens à leurs activités. Ils se sont sentis utiles.

En effet ce projet cadre parfaitement avec les enjeux du développement durable en optimisant l'utilisation de la ressource en eau, en limitant le recours aux engrais ainsi que les déplacements de

l'agriculteur (impact carbone). Ce dernier a donc plus de liberté pour une meilleure vie sociale.

La démarche de projet implique que l'on mette en place une progression et des stratégies pédagogiques qui visent à développer à terme les compétences du programme et de les valider dans le cadre de l'évaluation de l'épreuve du baccalauréat.

Le projet doit donc être réfléchi en amont par l'équipe pédagogique afin de prévoir les difficultés auxquelles les élèves seront confrontés et d'être en mesure de mettre en place des stratégies pour les aborder voire les contourner.

Cette réflexion permet à l'équipe pédagogique de définir d'une part sa faisabilité et d'autre part de calibrer la durée de chaque phase. La conduite de projet s'en trouve ainsi améliorée.

Le projet exprime toute sa dimension pédagogique en donnant sens à des concepts Matière / Energie / Information de l'enseignement technologique transversal. Il doit être un espace de convergence des différentes disciplines comme les mathématiques et la physique, car il fédère l'ensemble des matières par la mobilisation des connaissances et des compétences. Cela participe au décroisement des matières du côté des enseignants comme des élèves.

Bien que ce projet ait été développé sous un angle énergétique, il a la dimension pour être exploité dans les autres spécialités, dans une démarche collaborative de projets.

Enfin nous avons noté une émulation et une motivation particulière de nos élèves avec la participation aux olympiades des sciences de l'ingénieur.



Bâtiment intelligent et efficacité énergétique

Optimisation, nouvelles technologies et BIM

Karim Beddiar, Jean Lemale

DUNOD

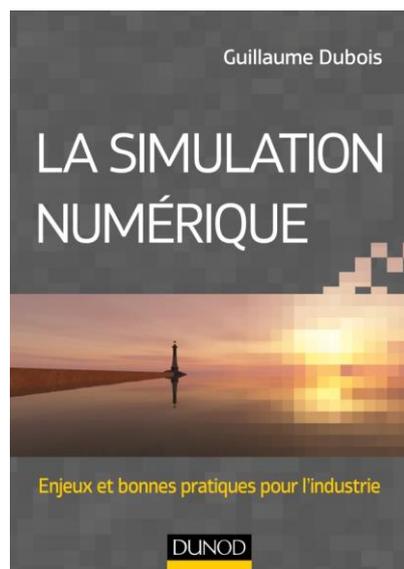
L'efficacité énergétique d'un bâtiment regroupe les technologies et les pratiques permettant de diminuer la consommation d'énergie pour un niveau de performance et de confort optimal. Son amélioration dans le secteur du bâtiment représente un enjeu crucial. Inspiré de la révolution numérique, le bâtiment intelligent constitue aujourd'hui une des clés incontournables pour réussir la transition énergétique.

À l'aide de nombreuses illustrations et de cas réels analysés, cet ouvrage propose des solutions d'optimisation énergétique dans le bâtiment : quels sont les postes de consommation d'énergie ? Comment réduire les besoins énergétiques dans l'existant et le neuf ? Comment les nouvelles technologies, comme le BIM, contribuent-elles à la rationalisation des besoins énergétiques ?

Véritable outil d'analyse, cet ouvrage sert de point d'appui méthodologique aussi bien aux étudiants qu'aux parties prenantes du projet de bâtiment intelligent : architectes, urbanistes, BET, maîtres d'ouvrage, etc.

Points forts

- *Un état des lieux complet sur la notion de bâtiment intelligent*
- *Mise en avant du lien entre bâtiment intelligent, BIM et efficacité énergétique*
- *Nombreuses illustrations et schémas explicatifs*
- *Cas réels de bâtiments intelligents décryptés et analysés*



La simulation numérique

Enjeux et bonnes pratiques pour l'industrie

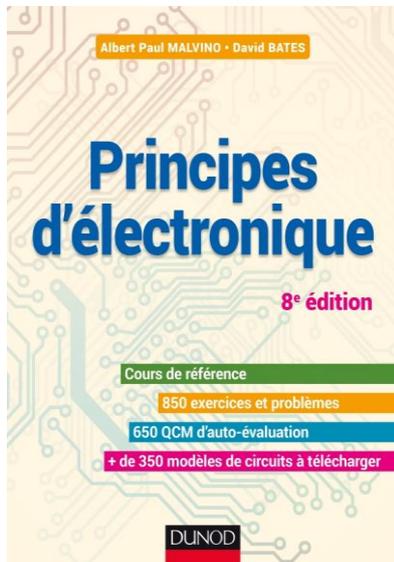
Guillaume Dubois

DUNOD

En plus de 60 ans d'existence, la simulation numérique s'est constamment renouvelée et a révolutionné les secteurs majeurs de l'industrie. Son déploiement et ses mutations sont encore aujourd'hui porteurs de grands changements. Mise à la portée de l'ensemble des entreprises, quels que soient leur secteur et leur taille, elle est un outil majeur de progrès technique et de gain économique.

Qu'est-ce que la simulation numérique ? Quels sont ses apports et ses limites ? Quelles sont les bonnes pratiques techniques et organisationnelles à appliquer ?

L'objectif de cet ouvrage synthétique et transversal est d'apporter des réponses claires à ces questions ; afin que les ingénieurs, managers et directeurs puissent aborder les changements à venir, non comme une menace, mais comme une opportunité.



Principes d'électronique

Cours et exercices corrigés

Albert Paul Malvino, David J. Bates

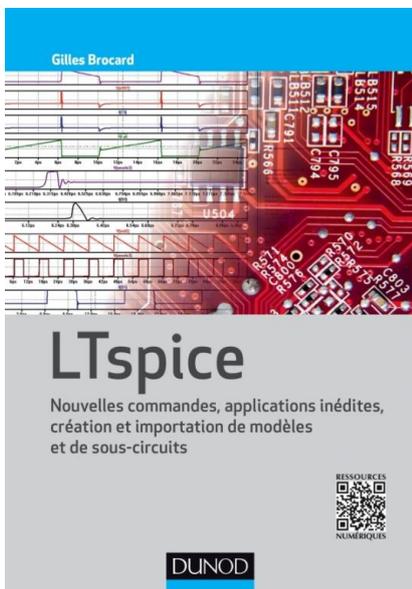
DUNOD

Cet ouvrage est la traduction de la 8e édition de l'ouvrage de référence américain «Electronic principles». L'approche pédagogique repose sur une acquisition progressive des savoirs. Des exercices et des problèmes corrigés, regroupés par sujet, complètent des questionnaires à choix multiples et constituent un ensemble d'outils d'auto-évaluation efficaces. Cette huitième édition s'enrichit de compléments en ligne.

Cet ouvrage, destiné aux étudiants qui suivent leurs premiers cours en électronique, est devenu une référence.

Son approche pédagogique est axée sur une acquisition progressive du savoir et de sa pratique grâce à des méthodes et des exemples concrets qui ponctuent le cours.

Les concepts fondamentaux de l'électronique analogique sont étudiés avant d'être appliqués aux circuits et appareils électroniques les plus couramment utilisés dans le monde industriel.



LTspice

Nouvelles commandes, applications inédites, création et importation de modèles et sous-circuits

Gilles Brocard

DUNOD

Cet ouvrage est conçu pour ceux qui souhaitent se perfectionner dans la connaissance de LTspice, découvrir les nouvelles commandes apparues récemment et tirer le meilleur parti des évolutions apportées aux commandes existantes.

Il s'adresse aux utilisateurs de LTspice, aux designers, ingénieurs ou techniciens, ainsi qu'aux élèves ingénieurs et étudiants en électronique.

Il complète un premier volume du même auteur paru en 2011 sous le titre Le simulateur LTspice IV.

Avec, 3,6 millions d'utilisateurs dans le monde, LTspice, est aujourd'hui le simulateur professionnel le plus utilisé.

Points forts :

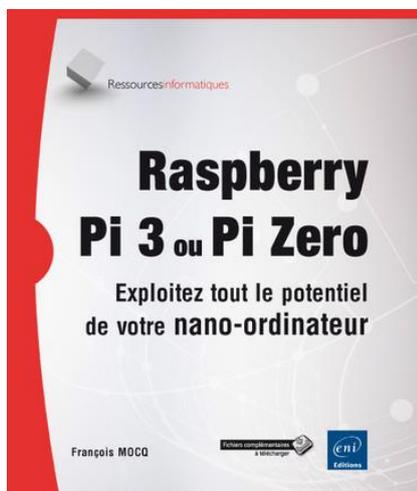
Les commandes cachées, améliorées ou nouvelles.

Les nouvelles astuces et les méthodes statistiques.

Une lecture facilitée, illustrée de 540 figures et 40 tableaux synthétiques.

Des réponses détaillées aux questions recueillies au cours des sessions de formation LTspice.

Un index exhaustif de 1 500 entrées.



Raspberry Pi 3 ou Pi Zero

Exploitez tout le potentiel de votre nano-ordinateur

François Mocq

ENI

L'objectif de ce livre est de fournir au lecteur débutant des bases solides pour explorer les ressources offertes par le Raspberry Pi tant du point de vue du système d'exploitation que du développement et de l'interface physique. Les modèles Raspberry Pi 3 et Raspberry Pi Zero sont traités dans cet ouvrage. Aucun prérequis en Linux, en programmation ou en électronique n'est nécessaire.

Après une présentation physique du Raspberry Pi, vous aurez un aperçu des systèmes d'exploitation compatibles avec cet ordinateur. Vous serez guidé pour installer rapidement le système d'exploitation de votre choix sur une carte micro SD et rendre votre Raspberry Pi opérationnel. L'utilisation de NOOBS, outil d'installation d'un système, de récupération de la carte micro SD et de gestion du multiboot est expliquée en détail. La présentation du nouveau bureau graphique de Raspbian Jessie PIXEL est suivie de l'utilisation de Linux en ligne de commande. Après une initiation au réseau, vous apprendrez comment vous connecter à distance sur le Raspberry Pi avec VNC. Vous verrez comment utiliser des mémoires de masse externes (clé USB, disque dur USB) et faire démarrer le Raspberry Pi sans carte micro SD sur un support de stockage externe. Vous apprendrez à utiliser les environnements de développement disponibles pour le Raspberry Pi : en Scratch et en Python. La description du GPIO suivie d'exemples d'utilisation des ports d'entrée-sortie du Raspberry Pi et de mise en oeuvre de cartes d'interface ouvre la voie à des applications dans lesquelles le Raspberry Pi interagit avec le monde physique. Vous apprendrez comment transformer votre Raspberry Pi en poste bureautique avec la suite LibreOffice (édition et impression), en média-center avec LibreELEC, en serveur web avec httpd et WordPress ou en caméra de vidéosurveillance capable de détecter un mouvement et de vous en avertir par email.



Le guide pratique de la maison connectée

Sécurité, confort, éclairage

Fabrice Neuman

EYROLLES

Grâce aux objets connectés, votre habitation peut devenir tout à la fois plus confortable, plus pratique, plus sécurisée, bref plus intelligente. Dans ce guide, vous découvrirez comment choisir les objets qui vous rendront service et aussi tous les nouveaux usages auxquels vous n'aviez peut-être pas pensé. Suivez nos conseils pour les installer facilement et les intégrer à la vie quotidienne de toute la famille.

Sécurité : Caméras, détecteurs de mouvement, capteurs d'ouverture : surveillez et protégez votre maison.

Confort : Thermostats connectés et capteurs environnementaux : maintenez le confort en toutes circonstances.

Éclairage : Ampoules et bandeaux colorés connectés : maîtrisez l'ambiance lumineuse de votre intérieur.

Simplicité : Des conseils à toutes les pages pour choisir vos objets et les installer en quelques minutes.

160 pages d'aide et de conseils pour tous !

15 ans d'archives 3E.I en DVD

La SEE vous propose d'acquérir le DVD « archives » 3E.I regroupant tous les articles des numéros 0 à 59, de mai 1994 à décembre 2009, sous forme numérique (PDF scannés/ vectoriels).

Pour toute commande merci de remplir le bulletin joint ci-dessous et de l'envoyer à l'adresse indiquée :



BON DE COMMANDE

Raison Sociale :
Adresse :
Ville :
Tel. :
E-mail :

Nom du contact : M/Mme
Pays :
Fax :

	France et pays de l'Union Européenne	Hors Union Européenne
Tarif individuel	60 €	70 €
Tarif collectivité (CDI, laboratoires...)	100 €	110 €

MONTANT TOTAL DE LA COMMANDE :€ HT soit€ TTC (TVA 20%).

REGLEMENT:

- Par chèque bancaire à l'ordre de la « SEE »
- Par virement bancaire :
BNP Paribas, Paris Associations (02837)

RIB: 30004 00274 00010336242 58
IBAN: FR76 3000 4002 7400 0103 3624 258
BIC: BNPAFRPPAA

Date, Lieu

Cachet, Signature
(Précédés de la mention "lu et approuvé")

Contact : Aurélie BAZOT

Tél : 01.56.90.37.17 – aurelie.bazot@see.asso.fr

Société de l'Electricité, de l'Electronique et des Technologies de l'Information et de la Communication

17, rue de l'Amiral Hamelin

75783 Paris Cedex 16

www.see.asso.fr



