
Programme canadien de développement d'une batterie électromécanique : Phase de définition

Préparé pour :

Centre de développement des transports
Sécurité et Sûreté
Transports Canada

Préparé par :

Flywheel Energy Systems Inc.
25C Northside Road
Nepean (Ontario) Canada
K2H 8S1

Tél. : (613) 596-0856
Télécop. : (613) 596-6052
C. élec. : fesi@magma.ca
<http://www.magma.ca/~fesi>

Mars 1998

Avis

Le présent rapport reflète les opinions des auteurs et pas forcément celles du Centre de développement des transports.

Le Centre de développement des transports n'approuve pas de produits ni de fabricants. Les noms de marque ou de fabricant figurent dans ce rapport uniquement parce qu'ils sont essentiels pour atteindre les objectifs de ce dernier.

This document is also available in English : "Canadian Electromechanical Battery Development Program: Definition Phase", TP 13212E.

Équipe du projet

R. Flanagan, Ph.D. (Flywheel Energy Systems Inc.)
D. Banicz, P.Eng. (Flywheel Energy Systems Inc.)
L. Menard, P.Eng. (Flywheel Energy Systems Inc.)
J. McArthur (Flywheel Energy Systems Inc.)
M. Lee (Flywheel Energy Systems Inc.)
D. Flanagan (Flywheel Energy Systems Inc.)
J. P. Hobson, Ph.D. (National Vacuum Technology Inc.)
J. Lo, Ph.D. (CANMET, Laboratoire de la technologie des matériaux)
G. Shen, Ph.D. (CANMET, Laboratoire de la technologie des matériaux)
R. Santos (CANMET, Laboratoire de la technologie des matériaux)
M. Tasnon, P.Eng. (Centre de matériaux composites)

Remerciements

La Flywheel Energy Systems Inc. remercie les organismes suivants de leur soutien et de leurs contributions :

Centre de développement des transports, Sécurité et Sûreté, Transports Canada
The Charles Stark Draper Laboratory, Inc.
SL-Montevideo Technology, Inc.
CANMET, Laboratoire de la technologie des matériaux, Ressources naturelles Canada



1. N° de la publication de Transports Canada TP 13212F		2. N° de l'étude 9026		3. N° de catalogue du destinataire	
4. Titre et sous-titre Programme canadien du développement d'une batterie électromécanique : Phase de définition				5. Date de la publication Mars 1998	
				6. N° de document de l'organisme exécutant	
7. Auteur(s) R. Flanagan				8. N° de dossier - Transports Canada ZCD1465-659	
9. Nom et adresse de l'organisme exécutant Flywheel Energy Systems Inc. 25C Northside Road Nepean, Ontario K2H 8S1				10. N° de dossier - TPSGC XSD-6-01102	
				11. N° de contrat - TPSGC ou Transports Canada T8200-6-6516/001-XSD	
12. Nom et adresse de l'organisme parrain Centre de développement des transports (CDT) 800, boul. René-Lévesque Ouest 6^e étage Montréal (Québec) H3B 1X9				13. Genre de publication et période visée Final	
				14. Agent de projet Claude Guérette	
15. Remarques additionnelles (programmes de financement, titres de publications connexes, etc.) Projet coparrainé par le Programme de recherche et de développement énergétiques (PRDE)					
16. Résumé <p>La batterie électromécanique, ou système d'accumulation d'énergie basé sur le volant d'inertie, a réalisé des percées majeures ces dernières années, avec la mise au point de prototypes destinés aux applications spatiales, aux véhicules hybrides et aux dispositifs nécessitant une qualité d'alimentation supérieure. Un groupe motopropulseur hybride comporte des avantages reconnus aux chapitres des performances et des émissions polluantes, avantages qui sont maximisés dans le cas des autobus urbains. Pour ce qui est de la gestion de l'énergie, c'est la batterie électromécanique qui s'est révélée la technologie la plus prometteuse. Les travaux de la présente phase consistaient à mettre au point la base de calcul d'une batterie électromécanique et à en définir les composants ainsi que les fournisseurs potentiels, et à fixer les objectifs des phases ultérieures du projet. Le but ultime étant de développer une batterie électromécanique commerciale intégrée et convenant à des applications fixes ou mobiles.</p> <p>Des modèles dynamique et thermique du volant ont été mis au point et comparés avec les données mesurées. Des analyses ont été effectuées afin de déterminer si les caractéristiques des nouveaux composants sont compatibles avec le maintien du vide. Un sous-ensemble de confinement en cas de défaillance catastrophique a été modélisé, et une analyse des modes de défaillances et de leurs effets a été réalisée. Une recherche a été menée en ce qui a trait aux normes et aux exigences de certification applicables. Des matériaux de substitution pour le moyeu ont été évalués. Les spécifications relatives aux technologies des composants ont été définies et les fournisseurs de ces technologies ont été cotés. Enfin, un plan de développement par étapes a été élaboré en vue d'un projet de démonstration d'autobus urbain équipé d'une batterie électromécanique.</p>					
17. Mots clés Palier grande vitesse, volant d'inertie, dispositif de stockage de l'énergie, confinement, modèle thermique, batterie électromécanique, analyse des modes de défaillances et de leurs effets (AMDE), propulsion électrique hybride			18. Diffusion Le Centre de développement des transports dispose d'un nombre limité d'exemplaires.		
19. Classification de sécurité (de cette publication) Non classifiée	20. Classification de sécurité (de cette page) Non classifiée	21. Déclassification (date) —	22. Nombre de pages v, 11	23. Prix —	



1. Transport Canada Publication No. TP 13212F		2. Project No. 9026		3. Recipient's Catalogue No.		
4. Title and Subtitle Programme canadien du développement d'une batterie électromécanique : Phase de définition				5. Publication Date March 1998		
				6. Performing Organization Document No.		
7. Author(s) R. Flanagan				8. Transport Canada File No. ZCD1465-659		
9. Performing Organization Name and Address Flywheel Energy Systems Inc. 25C Northside Road Nepean, Ontario K2H 8S1				10. PWGSC File No. XSD-6-01102		
				11. PWGSC or Transport Canada Contract No. T8200-6-6516/001-XSD		
12. Sponsoring Agency Name and Address Transportation Development Centre (TDC) 800 René Lévesque Blvd. West 6th Floor Montreal, Quebec H3B 1X9				13. Type of Publication and Period Covered Final		
				14. Project Officer Claude Guérette		
15. Supplementary Notes (Funding programs, titles of related publications, etc.) Co-sponsored by the Program of Energy Research and Development (PERD)						
16. Abstract <p>In recent years, the flywheel battery, or electromechanical battery, has seen significant advancements and prototype development for space, power quality, and hybrid vehicle applications. A hybrid vehicle propulsion system has recognized advantages regarding operating efficiency and emission control. These advantages are most effectively realized in the urban bus application. The energy management device that has shown the greatest promise is the electromechanical battery. In this phase, the goals were to develop the design base and to define the components, suppliers, and phase objectives that would result in commercial, integrated electromechanical battery systems applicable to both stationary and mobile markets.</p> <p>Rotor dynamic and thermal models were developed and correlated with measured data. Vacuum compatibility studies on new components were completed. A catastrophic failure containment subsystem was modelled, and a failure mode and effects analysis completed. Standards and certification strategies were explored. Alternative hub materials were assessed. Component technology specifications were set and sources of these technologies were evaluated. A phased development plan for hybrid urban bus demonstration was outlined.</p>						
17. Key Words High-speed bearing, flywheel, energy storage device, containment, thermal model, electromechanical battery, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), hybrid electric drive				18. Distribution Statement Limited number of copies available from the Transportation Development Centre		
19. Security Classification (of this publication) Unclassified		20. Security Classification (of this page) Unclassified		21. Declassification (date) —	22. No. of Pages v, 11	23. Price —

Table des matières

Introduction	1
Justification du contrat	1
Réalisations	1
Montage d'essai.....	2
Modèle dynamique du rotor	2
Calculs des pertes de la BEM.....	4
Modèle thermique	4
Compatibilité avec le vide	5
Modèle de confinement.....	6
Analyse des modes de défaillance et de leurs effets.....	9
Normes et homologation.....	9
Évaluation de matériaux de rechange pour le moyeu.....	9
Spécifications des éléments	10
Suivi	10
Références.....	11

Liste des figures et tableaux

Figure 1 :	Système de stockage énergétique pour la stabilisation de l'orientation (ACES)...	2
Figure 2 :	Salle de l'équipement d'acquisition des données FESI.....	2
Figure 3 :	Montage d'essai de l'ACES.....	2
Figure 4 :	Éléments rotatifs du système ACES1.....	3
Figure 5 :	Vibrations synchrones mesurées du carter du système ACES1.....	3
Figure 6 :	Vibrations synchrones mesurées du carter du système ACES2.....	4
Figure 7 :	Schéma de la BEM ACES.....	5
Figure 8 :	Températures mesurées des éléments supérieurs en fonction du temps (ACES2 à 25 000 tr/min)	6
Figure 9 :	Températures mesurées des éléments inférieurs en fonction du temps (ACES2 à 25 000 tr/min)	6
Figure 10 :	Mappage thermique modélisé en régime établi (ACES2 à 25 000 tr/min)	7
Figure 11 :	Vitesses modélisées des éléments lors de la défaillance.....	7
Figure 12 :	Pression modélisée exercée sur la structure de confinement lors de la défaillance	7
Figure 13 :	Déformations modélisées des éléments lors de la défaillance.....	8
Figure 14 :	Couple modélisé lors de la défaillance.....	8
Figure 15 :	Énergie modélisée lors de la défaillance.....	8
Figure 16 :	Composantes de base du programme menant à la démonstration d'un autobus hybride	11
Tableau 1 :	Comparaison de la température mesurée de l'ACES2 avec la température modélisée	7

Rapport sommaire

Introduction

Les systèmes de propulsion de véhicules futurs seront probablement une combinaison d'une source d'énergie primaire efficace et d'un dispositif de gestion énergétique. Un système de propulsion hybride a des avantages reconnus : efficacité opérationnelle améliorée et émission réduite de toutes sortes : hydrocarbures, oxydes d'azote, monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, particules et bruit. Ces avantages sont mis en valeur avec le plus d'efficacité dans les cycles de marche et d'arrêt subis par les autobus, les taxis et les camionnettes de livraison. Le dispositif de gestion énergétique le plus prometteur est la batterie électromécanique (BEM). Cependant, avant de déployer un système à BEM dans des véhicules hybrides, il faut régler un certain nombre de problèmes techniques (tels que les vibrations, la chaleur, le vide, la sécurité, le coût et le poids). Ces problèmes doivent être abordés selon un plan de développement à plusieurs phases, mais ils entrent en ligne de compte dans cette phase de définition du programme. Le principal représentant canadien dans cette technologie est la Flywheel Energy Systems Inc. Cette entreprise a une avance technologique dans le domaine des volants d'inertie en composite et cherche à étendre sa base de technologie afin de devenir un intégrateur compétitif de BEM.

Justification du contrat

Vu le potentiel de cette technologie, la Flywheel Energy Systems Inc. (FESI) et le Centre de

développement des transports (CDT) de Transports Canada ont convenu de cofinancer la phase de définition et d'étude préliminaire d'un programme de développement de BEM à plusieurs phases. L'objectif de ce travail est relié au Programme de la technologie des autobus urbains de Transports Canada et du CDT en vue de développer une technologie énergétique efficace et de l'appliquer à la conception, à la construction et à l'exploitation d'autobus urbains. La source de financement de la participation de Transports Canada - CDT à ce projet est le Programme de recherche et de développement énergétiques. Le travail avait pour objet d'élaborer la base de conception et de définir les éléments, les fournisseurs et les objectifs de phase qui donneraient lieu à des BEM intégrés destinés tant aux applications fixes qu'aux applications mobiles.

Réalisation

Les objectifs établis du programme ont été atteints. Des modèles dynamiques et thermiques du rotor ont été développés et mis en corrélation avec les données mesurées. On a effectué des études de compatibilité des nouveaux éléments avec le vide. On a modélisé un sous-système de confinement en cas de défaillance catastrophique et effectué une analyse des modes de défaillance et de leurs effets. On a exploré les normes et les stratégies d'homologation. Des matériaux de rechange pour le moyeu ont été évalués. Des spécifications ont été établies pour les technologies des éléments, et les sources de ces



Figure 1 Système de stockage énergétique pour la stabilisation de l'orientation (ACES)

technologies ont été évaluées. Un plan de développement à plusieurs phases a été structuré pour la gestion du travail de suivi jusqu'à la démonstration d'un autobus urbain hybride.

Montage d'essai

En vertu d'un contrat passé avec le Charles Stark Draper Laboratory, Inc. (CSDL), la FESI a développé et mis à l'essai deux BEM pour le programme de stockage énergétique pour la stabilisation de l'orientation (ACES) des satellites du CSDL. D'autres participants à ce programme étaient la SL-Montevideo Technology, Inc. (SL-MTI) et la Mechanical Technology Incorporated. Les essais de la première unité ACES, illustrée à la figure 1, coïncidaient avec le développement du modèle dynamique et thermique du rotor



Figure 2 Salle de l'équipement d'acquisition des données FESI

entrepris en vertu de ce programme, ce qui a fourni l'occasion rare et hautement souhaitable de mettre les modèles en corrélation avec des données mesurées. Les essais dynamiques ont été effectués à l'interne. L'équipement d'acquisition des données est illustré à la figure 2, et un schéma du montage d'essai, à la figure 3. On a saisi les données de 126 séances d'essai, soit 129 heures de fonctionnement.

Modèle dynamique du rotor

Les volants d'inertie à haute performance fonctionnent à des vitesses supercritiques. La conception doit permettre aux éléments rotatifs de dépasser la première criticité et doit positionner la fenêtre de fonctionnement de la BEM entre les première et deuxième criticités. L'équipement à grande vitesse classique est souvent conçu pour ce mode de fonctionnement, mais il a rarement une fenêtre de fonctionnement de si grande étendue (c.-à-d. de 15 000 à 45 000 tr/min).

Les BEM sont conçues pour stocker de l'énergie et elles font appel à des volants

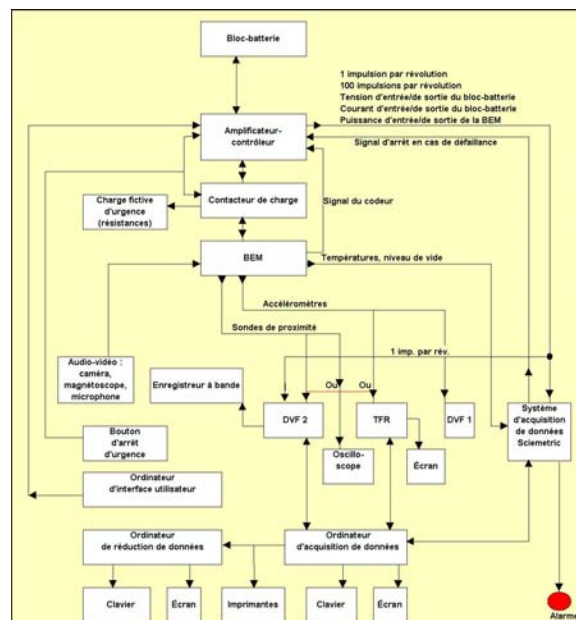


Figure 3 Montage d'essai de l'ACES

d'inertie lourds qui sont soumis à de fortes contraintes et dont les besoins dynamiques dépassent ceux des conceptions faisant appel aux techniques les plus récentes. Un équilibre de grande précision à une vitesse de fonctionnement fixe ou même sur une fenêtre de fonctionnement étroite est facile à réaliser. Cependant, la croissance radiale de l'anneau en composite pose un défi non seulement pour la conception du moyeu, mais aussi pour celle de la suspension dynamique. Le maintien de l'équilibre du rotor sur toute sa vaste gamme de vitesses de fonctionnement était un des objectifs principaux de la conception pour la FESI. On croit que les volants d'inertie FESI sont les volants d'inertie les mieux équilibrés jamais construits. Néanmoins, la conception de la suspension d'une BEM doit tenir compte d'un certain décalage de la masse à l'intérieur de la fenêtre de fonctionnement. En d'autres termes, la suspension doit être conçue pour compenser un certain déséquilibre en fonctionnement normal. De plus, les volants d'inertie FESI sont conçus avec une hiérarchie de modes de défaillance partielle. Ces modes de défaillance partielle entraînent un déséquilibre considérable de l'ensemble rotatif. La conception de la suspension doit être en mesure de compenser ce type de déséquilibre, sans donner lieu à une défaillance plus complète. Par conséquent, la réponse dynamique aux conditions de déséquilibre est une considération essentielle de la conception de la suspension pour le fonctionnement normal et pour le fonctionnement en condition de défaillance.

Pour mieux comprendre la réponse au déséquilibre du système ACES1, on a modélisé les éléments rotatifs du système (figure 4) conjointement avec les éléments de la suspension des roulements et du carter. Un déséquilibre statique a été introduit aux niveaux du volant d'inertie et du moteur. La réponse modélisée au déséquilibre a été capable de reproduire la

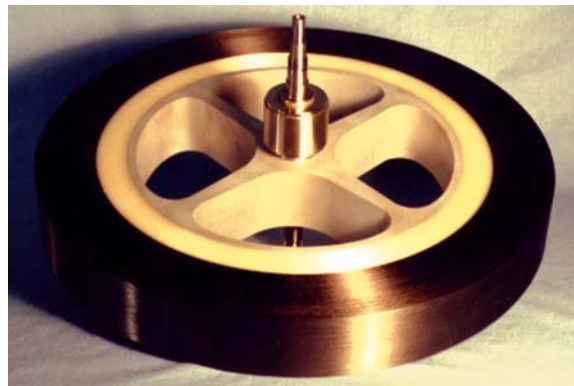


Figure 4 Éléments rotatifs du système ACES1

réponse dynamique mesurée sur le système ACES1. Cette réponse est caractérisée à la figure 5, où les vibrations synchrones de première criticité du carter atteignent leur crête de 0,2 g à environ 11 500 tr/min.

Pour le système ACES2, la suspension a été «accordée» au comportement prédit par le modèle. La figure 6 représente la réponse dynamique plus souhaitable : la crête des vibrations synchrones de première criticité du carter à environ 10 000 tr/min est inférieure à 0,05 g, et la courbe demeure très plate (~0,025 g) sur toute la gamme de fonctionnement de conception de 15 000 tr/min à 30 000 tr/min.

L'utilité de ce modèle aux fins du diagnostic et de la prédiction est évidente.

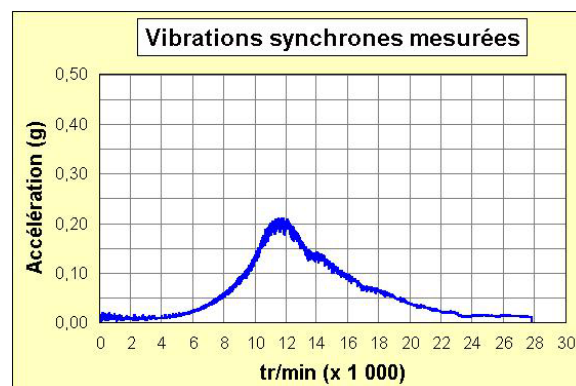


Figure 5 Vibrations synchrones mesurées du carter du système ACES1

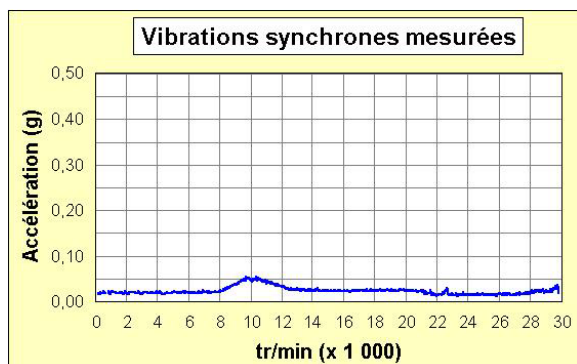


Figure 6 Vibrations synchrones mesurées du carter du système ACES2

Calculs des pertes de la BEM

La connaissance exacte des pertes de la BEM est indispensable à l'analyse thermique. Les principales sources de production de chaleur dans les BEM ACES sont les pertes dans le cuivre et dans le fer du groupe convertisseur, les pertes mécaniques dans les roulements des éléments rotatifs et les pertes aérodynamiques de l'ensemble rotatif. Des données de pertes des roulements déterminées au cours d'expériences ont été fournies par le CSDL. Des données de pertes théoriques pour le groupe convertisseur ont été fournies par la SL-MTI. Pour déterminer les pertes de traînée, on a développé un modèle aérodynamique vérifié à l'aide de données élaborées à l'interne et de données du domaine public. Les pertes ont ensuite été mises en courbe en vue de la représentation à toute vitesse de fonctionnement et à tout taux de charge/décharge. Ces données ont été appliquées au modèle thermique.

Modèle thermique

Un module d'analyse du transfert de chaleur des éléments finis a été ajouté au module d'analyse des contraintes des éléments finis utilisé pour concevoir les moyeux, les rotors de moteur et d'autres éléments. Ce nouveau module permet l'analyse thermique en régime établi et transitoire.

Les propriétés matérielles, nécessaires au modèle d'analyse des éléments finis (AEF) (finite element analysis – FEA), telles que la conductivité thermique, la chaleur massique, l'émissivité et la masse spécifique ont été collectées d'une variété de sources. Ces sources comprennent des périodiques, des manuels de référence, des revues et des fabricants et des fournisseurs tels que SKF, Unique Mobility, SL-MTI, CSDL, Dupont, Owens Corning, Grafil et Toray.

La précision du modèle augmente avec le nombre d'éléments utilisés ou modélisés individuellement. L'attention accordée à ces détails donne également la flexibilité de redéfinir la géométrie des éléments et d'analyser les trajets de chaleur accessoires. Par conséquent, surtout en vue des analyses futures, la géométrie des systèmes ACES a été reproduite de façon assez détaillée. En outre, une attention particulière a été accordée au modèle du système rotatif, y compris les trajets de chaleur et les sources de chaleur d'entrée.

Les systèmes ACES se prêtent bien à la modélisation axisymétrique. Cela réduit la complexité du modèle, ce qui réduit le temps de fonctionnement de l'ordinateur sans sacrifier la précision. Le système se compose principalement de disques, d'anneaux épais et de cylindres. Cependant, il y a quelques exceptions. Pour compenser les géométries complexes, telles que les moyeux à rebord flexible et les roulements, on a utilisé un disque de volume et de trajet de chaleur équivalents. Les anneaux de confinement ont été modélisés par un seul anneau épais.

La représentation géométrique de la BEM ACES comprend vingt et un éléments tirés individuellement, maillés et décodés. On a utilisé un algorithme de maillage automatique. Cet algorithme crée de petits éléments là où il faut une plus grande précision et un maillage moins dense dans

des zones comme celle du carter. Un schéma de la BEM ACES est représenté à la figure 7.

Chaque élément est défini à l'intérieur d'un groupe et une couleur lui est attribuée. Les propriétés matérielles sont définies à l'intérieur du groupe, alors que les couleurs définissent les conditions environnementales (p. ex. radiation, convection, production de chaleur). Un fichier de commandes assemble les éléments dans le modèle AEF. Le modèle assemblé peut alors être analysé soit au moyen du processeur de transfert de chaleur en régime établi, soit au moyen du processeur de transfert de chaleur transitoire. La sortie du modèle est ensuite mise en corrélation avec les données collectées des essais des systèmes ACES.

Le modèle thermique a grandement contribué à identifier et à localiser la chauffe du rotor de moteur non prévue dans le système ACES1 ainsi qu'à identifier un thermocouple défectueux. Des modifications ont été apportées au système ACES2 pour réduire la chauffe du rotor de moteur. Les températures mesurées des éléments supérieurs et inférieurs du système ACES2 en fonction du temps lors d'un essai en régime établi à 25 000 tr/min sont données aux figures 8 et 9, respectivement. La figure 10 représente la sortie du modèle thermique pour les mêmes conditions, et le tableau 1 compare les résultats mesurés avec les résultats modélisés.

L'utilité de ce modèle aux fins du diagnostic et de la prédiction est évidente.

Compatibilité avec le vide

Il y a deux façons de conserver le milieu sous vide nécessaire au fonctionnement à pertes réduites de la BEM : le pompage avec évacuation et le pompage sans évacuation. Conjointement avec M. J. Peter Hobson, la FESI a éprouvé une méthode de pompage sans évacuation pour conserver le vide de la BEM. En juin 1991, un ensemble complet d'éléments de BEM a été scellé sous une cloche en verre. Ce montage expérimental unique a conservé un vide minimal de 3×10^{-5} torr pendant six années avant le démontage nécessaire au déplacement du matériel.

Le fonctionnement initial des unités ACES a indiqué que les charges de gaz étaient plus grandes que voulues, mais probablement traitables par pompage sans évacuation. Bien que les unités ACES ne soient pas prévues pour des méthodes de pompage sans évacuation, le matériel et les éléments sont propres au travail de suivi, de sorte que les charges de gaz sont pertinentes.

Les roulements fournis par le CSDL constituent une divergence par rapport aux roulements à lubrifiant sec du montage expérimental de référence susmentionné. Afin de déterminer si le gaz additionnel était attribuable aux roulements, on a mené une étude de dégazage.

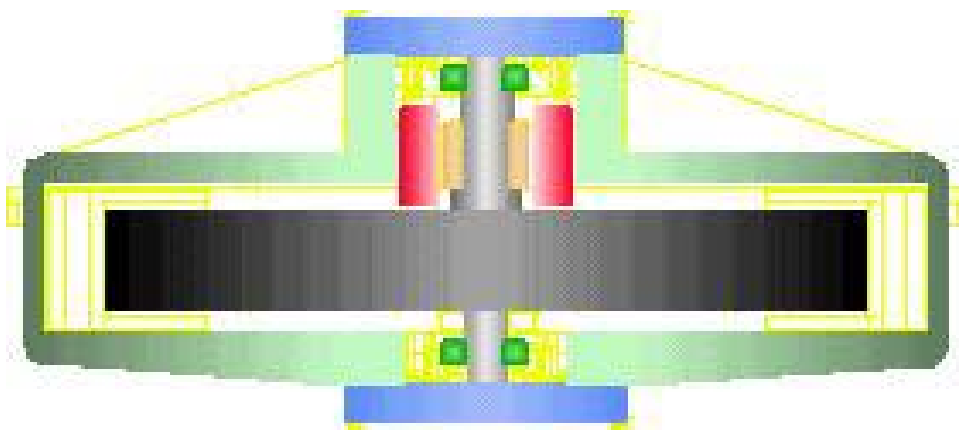


Figure 7 Schéma de la BEM ACES

Cette étude a montré que la plus grande partie des gaz dans le système ne provenait pas des roulements.

Modèle de confinement

Dans toute l'industrie, on s'efforce de développer et de mettre à l'essai des structures pour limiter une défaillance catastrophique des volants d'inertie. La FESI a conçu et modélisé un concept qui possède bien des caractéristiques nécessaires à une structure de confinement efficace : autonome, actionnée passivement, prête à fonctionner, aucun transfert de couple à l'enveloppe extérieure, de poids réduit, peu coûteux, etc.

Le modèle permettait la défaillance en un nombre prescrit de segments annulaires en composite de même taille et prévoyait la séquence de défaillance en temps réel.

Des études paramétriques ont été effectuées en fonction de la taille, du coût, du poids et des jeux nominaux de l'anneau de confinement exprimés en fonction des paramètres de commande. Pendant la défaillance, la chaleur, l'absorption d'énergie, les contraintes et les couples sont surveillés, comme le sont la vitesse et la position des segments annulaires en composite et de la structure de confinement. On a effectué l'intégration numérique au moyen d'un progiciel commercial. Les équations différentielles ordinaires, les forces généralisées, la pression et les contraintes normales, les contraintes de déformation et les calculs de l'énergie ont été programmés comme blocs complexes. Pour les calculs, on a utilisé l'algorithme adaptatif de Runge-Kutta de 5^e ordre, avec des intervalles de 10^{-6} seconde. Les flux de données de sortie ont été stockés et mis en graphique directement aux fins de la visualisation.

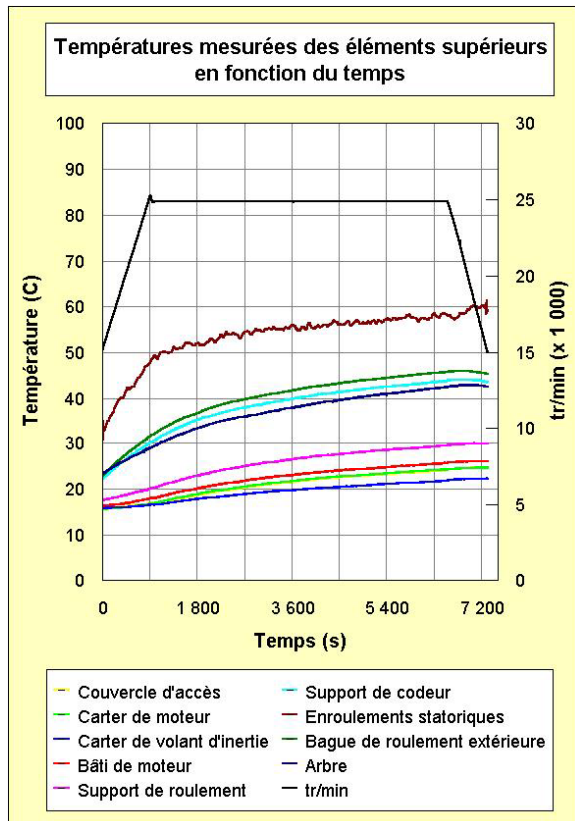


Figure 8 Températures mesurées des éléments supérieurs en fonction du temps (ACES2 à 25 000 tr/min)

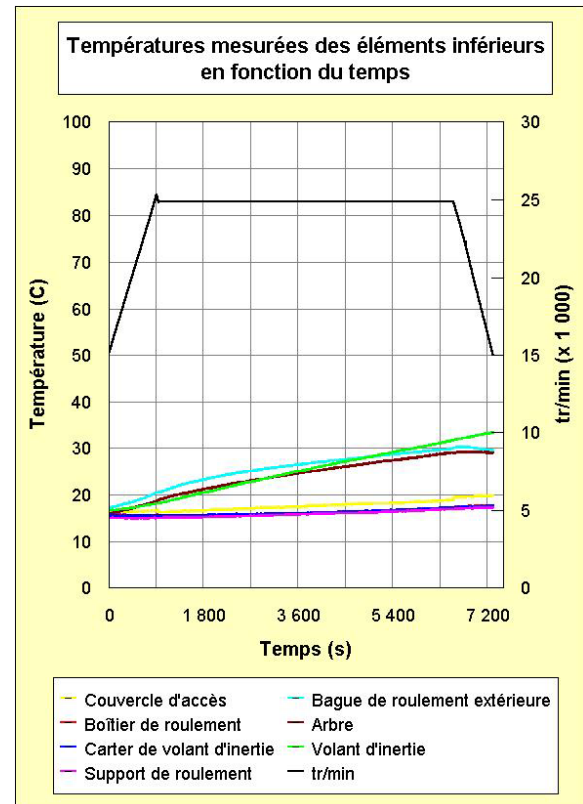


Figure 9 Températures mesurées des éléments inférieurs en fonction du temps (ACES2 à 25 000 tr/min)

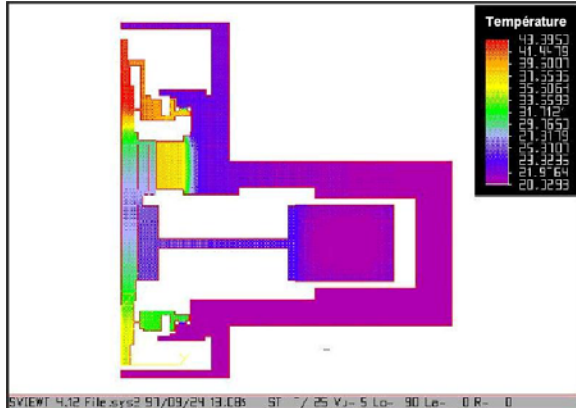


Figure 10 Mappage thermique modélisé en régime établi (ACES2 à 25 000 tr/min)

Pour cette étude, le volant d'inertie sélectionné était le Mk 3 de la série 45 ayant une épaisseur axiale de cinq centimètres (deux pouces) fonctionnant au-dessous de sa vitesse de conception de 45 000 tr/min, soit à sa vitesse nominale de 43 200 tr/min où il stocke 520 Wh.¹

La séquence de défaillance est très rapide. Au moment de la défaillance, les segments annulaires en composite se déplacent tangentielllement pour atteindre une vitesse radiale maximale en un peu moins de 0,3 milliseconde (voir figure 11). La figure 12 donne la pression qui s'exerce sur la structure de confinement et qui augmente rapidement. À un peu moins de 0,6 milliseconde, la déformation radiale de la

Tableau 1 Comparaison de la température mesurée de l'ACES2 avec la température modélisée

Éléments supérieurs	Mesurée (C)	Modélisée (C)	Différence (C)
Arbre	35	42	-7
Carter de volant	22	22	0
Couvercle d'accès	23	22	1
Carter de moteur	23	23	0
Bague de roulement extérieure	38	41	-3
Bâti de moteur	25	23	2
Support de roulement	26	23	3
Support de codeur	37	40	-3
Éléments inférieurs	Mesurée (C)	Modélisée (C)	Différence (C)
Bague de roulement extérieure	26	33	-7
Couvercle d'accès	20	20	0
Support de roulement	20	21	-1
Carter de volant	20	20	0
Volant d'inertie	29	24	5
Boîtier de roulement	20	20	0
Arbre	26	35	-9

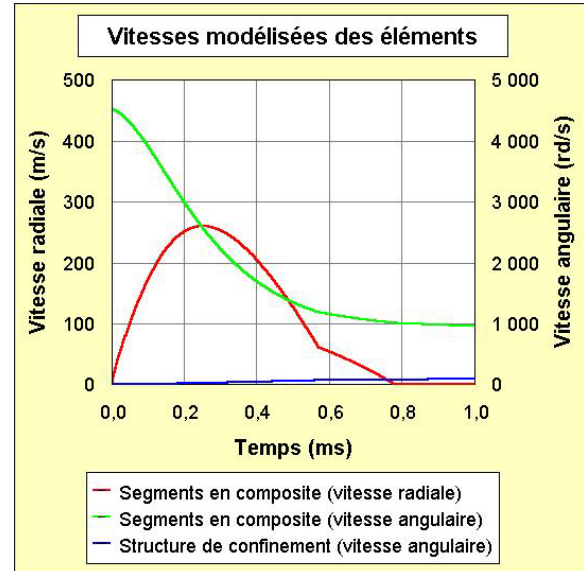


Figure 11 Vitesses modélisées des éléments lors de la défaillance

structure de confinement, représentée à la figure 13, dépasse dix centimètres (quatre pouces), et le couple entre les segments en composite et la structure de confinement atteint un maximum de plus de 400 000 lb-pi (542 400 Nm), comme le montre la figure 14. À ce stade, l'énergie des segments en composite (voir figure 15) a déjà diminué de 83 p. cent. Le mouvement radial des segments en composite (figure 11) est arrêté à environ

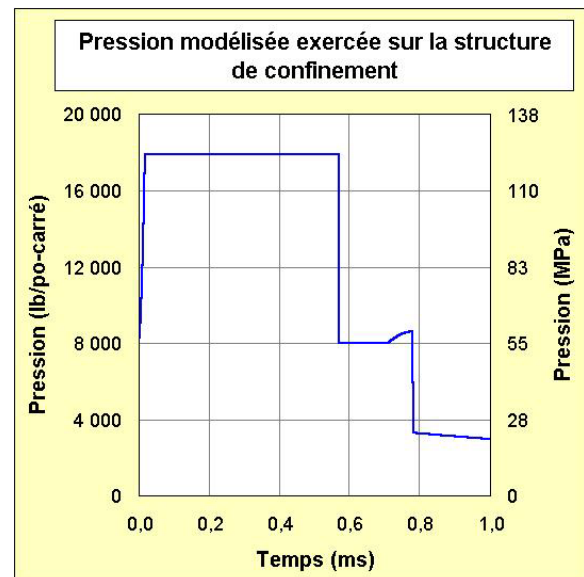


Figure 12 Pression modélisée exercée sur la structure de confinement lors de la défaillance

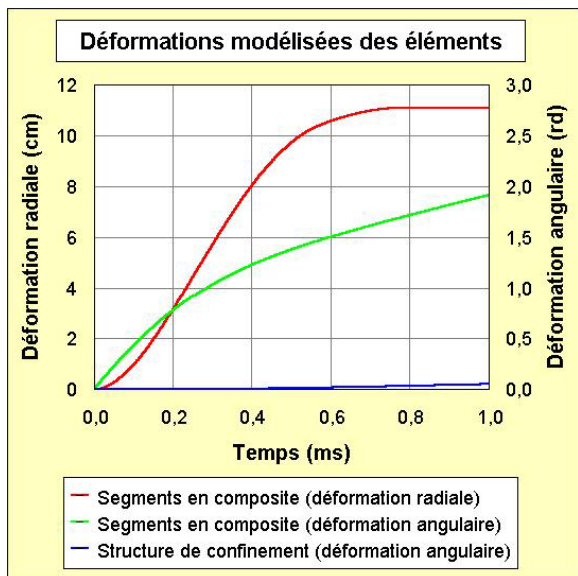


Figure 13 Déformations modélisées des éléments lors de la défaillance

0,8 milliseconde. À ce stade, on peut considérer la période critique de défaillance et de confinement comme étant terminée, bien que les segments en composite tournent encore par rapport à la structure de confinement.

Ce système atteint un régime de rotation stable final de 176 radians par seconde en

légèrement plus de vingt millisecondes, soit 1,4 révolution des segments en composite ou 0,5 révolution de la structure de confinement. L'énergie dans les segments en composite tombe rapidement et, pour les conditions établies décrites plus haut, l'absorption de l'énergie de déformation prédomine. Le modèle indique le confinement efficace des segments du volant d'inertie défectueux. Cependant, cette méthode présente des inconvénients au niveau du volume, du poids et du coût. Le volant d'inertie Mk 3 de la série 45 a une masse en composite de 6,1 kg et un coût en matières premières de 365 \$US. À titre de comparaison, la structure de confinement a une masse de plus de 40 kg et un coût estimé en matières premières de 800 \$US.

Il est évident que la conception d'une structure de confinement en vue de la défaillance catastrophique du volant d'inertie n'est pas une approche logique de la sécurité. Le simple déclassement du volant d'inertie, pour obtenir un facteur de sécurité extrême dans la conception, est plus efficace. D'ailleurs, même si le volant d'inertie était entièrement confiné, on n'a pas encore abordé le problème de la

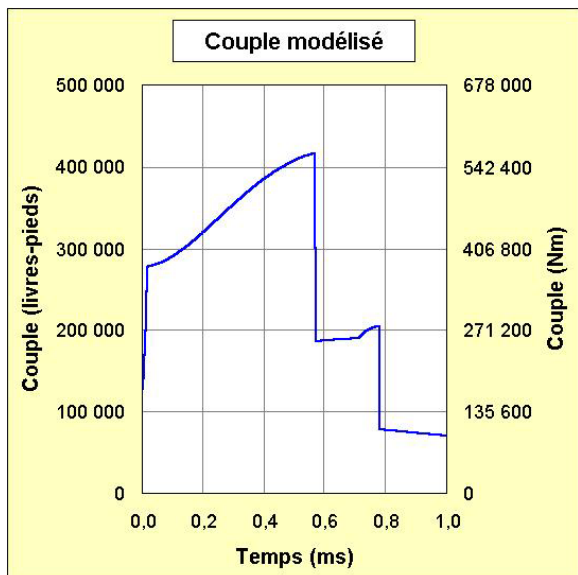


Figure 14 Couple modélisé lors de la défaillance

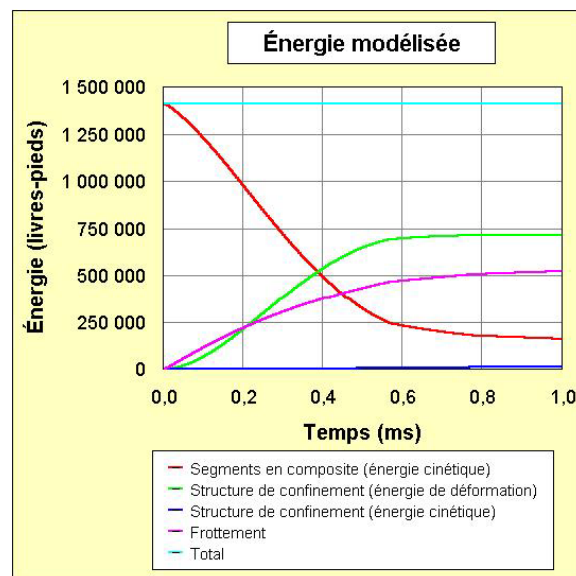


Figure 15 Énergie modélisée lors de la défaillance

sécurité de l'ensemble de la BEM. Cela a donné lieu à une étude des modes de défaillance possibles de la BEM.

Analyse des modes de défaillance et de leurs effets

On a mené une analyse approfondie des modes de défaillance. On a identifié plus de vingt-cinq modes, évalué leurs effets et mis au point des mécanismes de détection et de prévention. Compte tenu de ce résultat, d'autres efforts de développement et d'essai sont recommandés pour déterminer les caractéristiques des signatures d'amorçage de défaillance et pour mettre à l'épreuve les sous-systèmes de sécurité. Un programme de mise en oeuvre a été élaboré en fonction de l'exposition du produit, des possibilités de financement et des réussites aux épreuves.

Normes et homologation

On a mené une enquête pour déterminer l'applicabilité de la conformité aux normes existantes en tant que garantie de l'utilisation de la BEM en toute sécurité. Comme c'est un produit nouveau, la BEM présente des anomalies qui la distinguent des normes en vigueur. Par conséquent, bien qu'il y ait des normes existantes auxquelles la BEM peut être considérée conforme, cette conformité ne garantit pas forcément la sécurité.

L'enquête a révélé l'existence d'un corpus bien établi de normes portant sur du matériel électrique (exigences relatives aux hautes tensions, aux enceintes spéciales, à la mise à la terre, aux moteurs et aux génératrices, à l'équipement de commande industriel, aux alimentations, etc.) et auxquelles la BEM pourrait facilement se conformer.

De plus, l'enquête a révélé l'existence d'un corpus bien établi de normes portant sur les machines (exigences relatives aux

vibrations, à l'accélération, aux chocs, au bruit, à l'équilibrage, aux accouplements flexibles, aux silentblochs, aux symboles d'identification, etc.) et pouvant être utiles pour orienter l'élaboration d'une norme pour la BEM.

L'enquête a également constaté que les pratiques industrielles associées à du matériel semblable (p. ex. rotors de turbine ou pompes à vide turbomoléculaires) ont recours à des programmes exhaustifs de développement du produit, à des techniques d'inspection vigilantes et à des programmes de contrôle de la qualité bien conçus pour une conception axée sur la sécurité. Cette approche de la sécurité des produits est la plus intéressante pour l'industrie des BEM -- compte tenu de l'exposition limitée du produit, du secret commercial et du stade précoce du cycle de vie du produit.

L'enquête a conclu qu'un ensemble de normes existantes, de pratiques existantes et de programmes de développement, d'essai et de contrôle de la qualité peut être utilisé pour élaborer des normes internes pour la BEM. Cependant, avant de lancer un programme d'homologation officiel, la motivation et le désir du secteur industriel, des organismes de réglementation et des utilisateurs du matériel doivent être bien établis.

Évaluation de matériaux de rechange pour le moyeu

Dans le cas des volants d'inertie à haute performance, les contraintes imposées au moyeu augmentent en raison de la vitesse de fonctionnement supérieure et de la plus grande dilatation radiale des anneaux en composite. Bien que ces contraintes soient acceptables pour le moment, il faudra des configurations améliorées du moyeu pour réaliser des réductions additionnelles du coût et des améliorations des performances (c.-à-d. plus de 100 Wh/kg à

10⁵ cycles). Le moyeu FESI à rebord flexible s'est avéré stable, a réussi des essais exhaustifs et, à ce jour, mène l'industrie dans ce domaine.

Cette étude visait une évaluation générale de matériaux de rechange pour la construction du moyeu. Pour faciliter le processus de sélection du matériau, on a mené trois études paramétriques pour déterminer les relations entre les propriétés des matériaux et la dilatation radiale voulue. Cela a donné lieu à une «formule» d'évaluation des matériaux qui permet une évaluation rapide de matériaux de rechange.

Des sous-contrats ont été passés avec le Centre de matériaux composites (CMC) et avec le Laboratoire de la technologie des matériaux (LTM) de CANMET pour élaborer une longue liste de matériaux potentiels composites en fibre et à matrice métallique, y compris une gamme complète de matériaux de renforcement, de matrices et de techniques de fabrication. Les matériaux ont été évalués de la façon indiquée, puis on a établi une courte liste de matériaux pour un supplément d'examen.

Spécifications des éléments

Cette partie du travail avait pour objet d'identifier les entreprises ou entités capables de concevoir, de fabriquer et(ou) de mettre à l'essai certains sous-systèmes constitutifs de la BEM. Les domaines de recherche comprenaient le groupe convertisseur, la conversion de l'énergie, les circuits électroniques de commande et les roulements. De plus, on a demandé aux candidats s'ils étaient prêts à contribuer du soutien sous forme de biens ou de financement aux objectifs du programme de développement. On n'a pas pu trouver de sources nationales pour les éléments du groupe convertisseur à grande vitesse et du régulateur. Toutefois, cet effort a donné lieu à une liste de sources

d'approvisionnement nationales et internationales de rechange.

Suivi

Le programme de développement mis en place est un effort pluriannuel à plusieurs phases qui aboutit à la démonstration d'un autobus urbain à propulsion hybride. Il est clair que le travail entrepris dans le cadre du programme décrit ici, ainsi que les plus de cinquante conclusions et recommandations qui en ont résulté, sont essentiels au travail de suivi. Les composantes de base du programme envisagées sont représentées à la figure 16.

Le développement de la BEM de 1,5 kW à haute performance est en route. Ce système représente un progrès considérable pour l'ensemble de l'industrie : volant d'inertie à haute performance, nombre réduit de pièces, architecture simplifiée des éléments et construction de poids réduit nécessaire pour amener la BEM au stade de production possible. De taille convenant aux applications d'alimentation sans coupure (ASC)(uninterruptible power supply – UPS), le système sert de banc d'essai de nouveaux éléments, de preuve de l'aptitude de la FESI en matière de BEM, de plate-forme de développement de véhicules à propulsion hybride et d'article de démonstration de l'utilisation finale comme ASC. Les éléments du système comprennent un volant d'inertie, un moyeu, un arbre, une suspension de roulement, une enveloppe et un moyen de conservation du vide de la FESI. Le volant d'inertie est le modèle de 95 Wh/kg Mk 3 de la série 45 conçu pour un fonctionnement à 45 000 tr/min. À cette vitesse, il stocke 1 kWh (puissance nette). Le groupe convertisseur 1,5 kW et le contrôleur DSP sont fabriqués par la SL-MTI. Cette phase du travail est cofinancée par le Centre de la technologie de l'énergie (CANMET, Ressources naturelles

Canada), la Flywheel Energy Systems Inc. et la SL-Montevideo Technology, Inc.

La BEM de 50 kW à haute performance est fondé sur la plate-forme de la BEM de 1,5 kW. Il incorpore bien des éléments éprouvés de la BEM de 1,5 kW et vise le fonctionnement à grande puissance. La cible de puissance de 50 kW convient à la propulsion hybride d'une camionnette de livraison ou d'un taxi, et deux de ces systèmes produiraient la puissance de 100 kW nécessaire à la propulsion hybride d'un autobus urbain. À l'heure actuelle, on explore les possibilités de financement de cette phase du travail.

La simulation d'autobus hybride est un montage de laboratoire de tous les éléments du groupe de propulsion dans un environnement d'application simulée. Il peut être souhaitable de développer un véhicule dit «laboratoire roulant», qui aurait également une valeur de démonstration considérable. Cette phase est une première tentative d'interfaçage des nombreux éléments (pas forcément optimisés) du système de propulsion : source(s) d'énergie primaire(s), dispositifs de stockage, moteur(s) d'entraînement et canalisations d'énergie électrique et contrôleurs connexes. Une telle simulation réglerait non seulement les problèmes d'intégration des technologies des éléments, mais permettrait aussi le mappage de l'efficacité et de la réduction des émissions pour des horaires sélectionnés et(ou) pour des parcours d'autobus réels.

L'intégration au véhicule cherche à combiner davantage d'éléments de propulsion optimisés dans une plate-forme de véhicule. Ce stade exigera une plus grande concentration sur l'interface élément/véhicule et sur les techniques de montage, les questions d'intégration matérielle, les sous-systèmes de sécurité et les fonctions de surveillance de la santé.

La démonstration de l'autobus hybride est une série de démonstrations pour sensibiliser le public, les commissions de transport et les investisseurs à la technologie en cause. Des essais sur le terrain détermineront l'acceptation opérationnelle de l'utilisation en service. Le déploiement initial des autobus hybrides à volant d'inertie aura probablement lieu sur des parcours d'autobus urbains soumis à de fortes charges quotidiennes de passagers et à un cycle d'arrêts et de départs fréquents. La stratégie de déploiement vise une exposition maximale du véhicule hybride, silencieux et propre aux passagers et au cycle d'arrêts et de départs fréquents favorisé par la batterie de stockage électromécanique.

Références

1. Flywheel Energy Systems Inc. *Développement de volants à haute performance pour batteries électromécaniques*. Contrat no 23440-4-1191/01-SQ, rapport final, mars 1997.

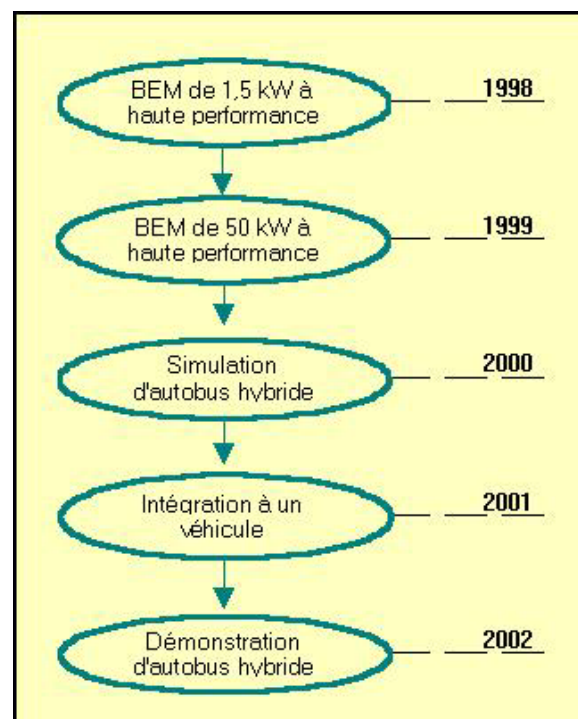


Figure 16 Composantes de base du programme menant à la démonstration d'un autobus hybride