

Les Systèmes d'Aide à l'Exploitation SAE dans le transport collectif de surface : vers une gestion multimodale

■ par G. SCEMAMA, INRETS

2507

Mots-clés

Transport collectif
Systèmes d'aide
à l'exploitation
Transferts
d'informations

L'exploitation urbaine d'une flotte de véhicules peut être optimisée, tant du point de vue de l'exploitant que des usagers, par les SAE : systèmes d'aide à l'exploitation. Eclairage sur ces systèmes bien utiles.

1. Introduction

Les technologies de traitement de l'information et des communications ont été introduites très tôt au niveau du transport public de surface avec la mise en place progressive de systèmes informatisés de gestion des flottes fondées sur la localisation continue (SAE). A ce titre, les SAE ont anticipé les développements plus récents des systèmes dits de *Transport Intelligent* et sont à cet égard riches d'enseignement sur les réels progrès obtenus grâce à ce type de système. Au niveau informatique, les progrès concernent plus le *niveau de l'information* (nouveaux systèmes de localisation, de représentation cartographique, standardisation des données, nouvelles interfaces avec les clients/usagers, les régulateurs, les

conducteurs) que celui de la *décision* qui reste le domaine privilégié de l'intervention humaine et constitue un enjeu majeur à résoudre pour la nouvelle génération de ces systèmes [1].

Cet article a pour but de présenter un bilan sur le développement de ces systèmes, d'en décrire les principaux apports dans le domaine de l'exploitation et de l'information des usagers. Après une partie introductive consacrée à une description fonctionnelle et structurelle des SAE, l'article fait le point des évolutions récentes ou attendues de ces systèmes. Au niveau de la décision nous présentons les besoins des régulateurs et les fonctions avancées de diagnostic et d'aide à la décision. Enfin, les deux parties suivantes font le point sur l'information des usagers et la gestion intégrée des modes de transport.

L'ESSENTIEL

- Les Systèmes d'aide à l'exploitation permettent d'optimiser la gestion du transport par une localisation en temps réel des positions des véhicules. Les premières générations de ces systèmes ont vu le jour dans les années 1980 pour répondre à l'accroissement de la complexité de l'exploitation urbaine.
- Les SAE comprennent des équipements à bord des véhicules reliés par radars à une station centrale et des équipements sur l'infrastructure aux arrêts et aux feux notamment. L'ensemble autorise une bonne communication des données, dont la plus importante : la localisation.
- Les données transmises, dynamiques, peuvent améliorer le service offert à l'utilisateur : optimisation des temps de transport, services personnalisés, gestion multimodale.

SYNOPSIS

- Operation control systems improve the management of public transport networks by monitoring the positions of vehicles in real time. The first systems were installed in the early eighties in response to the increasing complexity of urban transport systems.
- The systems make use of on board equipment that communicates with a central processor via transponders at stops and traffic lights. The system is optimized for high speed data transfer, particularly in relation to vehicle positions.
- The availability of real-time positional data results in a number of advantages including improved passenger service, reduced journey times and the opportunity for personalized services.

Revue de l'électricité et de l'électronique
n°6 Juin 2000

2. Description des SAE

2.1 Les fonctions de base

Les SAE[2] (ou AVM, Automatic Vehicle Monitoring system) ont pour but une meilleure gestion du transport par une localisation en temps réel des positions des véhicules. Les premières générations de ces systèmes ont vu le jour dans les années 1980 pour répondre à l'accroissement de la complexité de l'exploitation urbaine. Ces derniers ont été élaborés afin de mieux garantir la réalisation du plan de transport représenté par une information théorique sur le réseau des lignes et des itinéraires, les horaires de passages aux arrêts, les services agents et voitures,...

Le suivi en temps réel des bus

L'information en temps réel concerne le suivi automatique des véhicules permettant leur localisation spatiale (sur leur itinéraire) et temporelle (par rapport au tableau de marche). Par la comparaison de cette information théorique avec l'information réelle, le SAE tente d'adapter l'offre aux conditions réelles de l'exploitation. Au niveau du diagnostic, il fournit un certain nombre d'alarmes primaires : avance/retard, prochain départ non assuré, train de bus, respect des correspondances.

La régulation des bus

Au niveau de la **régulation**, certaines procédures automatiques basées sur la régulation des départs ou la régulation des intervalles peuvent être appliquées. La gestion des correspondances peut également être abordée en retardant le départ de certains véhicules. Toutefois ces procédures sont limitées pour faire face aux perturbations rencontrées, qui sont liées aux aléas de la demande, aux conditions de circulation, ou à des problèmes de gestion des ressources (panne matérielle, indisponibilité humaine).

La sécurité des passagers et des conducteurs

En cas d'accident ou d'agression, une alarme silencieuse peut être transmise. La connaissance de la position exacte du véhicule permet d'envoyer les moyens appropriés. Le véhicule est mis automatiquement sur écoute. Des expériences ont été conduites pour transmettre des images en provenance de caméras installées à bord des bus afin de dissuader les agresseurs éventuels.

L'évaluation statistique et l'adaptation à la demande

Enfin, les SAE remplissent une fonction d'évaluation des résultats d'exploitation du réseau (temps de parcours, demande voya-

geur). Le SAE met en œuvre un plan de production (tableau de marche) qui peut s'avérer inadapté aux variations de la demande et des conditions de circulation. Ainsi les fréquences de passages des véhicules, les horaires théoriques peuvent ne plus correspondre à la réalité. Par la connaissance des temps de parcours et des temps aux arrêts, du nombre de passagers, le SAE permet d'adapter l'offre aux variations de la demande.

2.2 La structure de SAE

Les SAE comprennent des équipements à bord des véhicules reliés par radars à une station centrale, des équipements sur l'infrastructure (aux arrêts/aux feux).

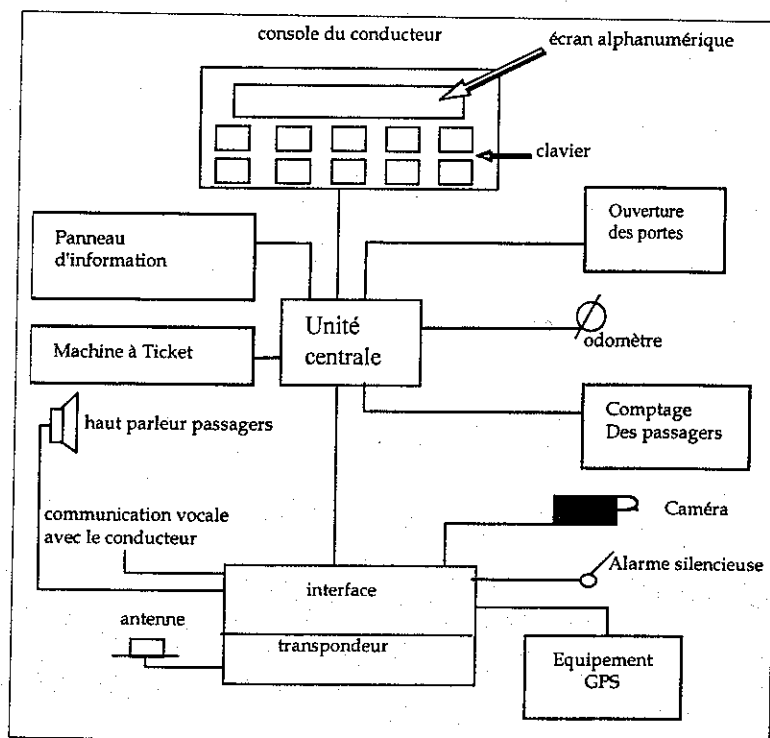
Équipement à bord des véhicules

Ces équipements (figure 1) permettent :

- de calculer la distance parcourue par un odomètre (compteur de tour de roue avec recalage aux arrêts),
- de stocker des données telles que (kilomètres parcourus, nombre de passagers, validation de tickets, consommation, alarmes),
- de transmettre et recevoir des données (attente/départ, avance/retard, attente de connexion du véhicule),
- de gérer les procédures de transmissions en marche normal ou d'urgence.

Équipement du Poste Central

Un système informatique assure les fonctions suivantes :



1. Équipements embarqués (en noir : nouveau).

- interrogation à distance des véhicules (plusieurs cycles d'interrogation pour obtenir la position des véhicules, les comptages, incidents, la transmission des informations (appel phonique),
- affichage de la position du véhicule et des données pour le régulateur,
- traitement algorithmique des actions de régulation,
- main courante (incidents...)
- enregistrement des données d'exploitation (passage aux arrêts, service réel des agents, suivi des matériels pour la maintenance.

Équipement sur l'infrastructure

Ils comportent :

- des émetteurs/récepteurs pour les données et la voie,
- des équipements pour la priorité bus dans le contrôleur de trafic,
- des balises infra-rouges (éventuellement) pour le positionnement des véhicules.

3. Evolution des SAE

3.1 La localisation

La technologie de localisation la plus répandue repose sur une communication avec des balises infra-rouges couplées avec un odomètre permettant de suivre l'avancée du bus entre deux balises. On peut citer également l'utilisation de boucles au sol en liaison radio avec des badges électroniques à bord des véhicules. La nouvelle génération de ces badges peut transmettre des informations dynamiques sur l'identité du bus, son itinéraire et son écart par rapport à l'horaire. La localisation basée sur le satellite GPS (Global Positioning System) représente la technique la plus sophistiquée. En appliquant des corrections différentielles (présence de 3 satellites), le GPS permet d'estimer la position des bus avec une précision de l'ordre de 5 mètres (DGPS). Il ne requiert aucun détecteur au sol et, par voie de conséquence, de maintenance de ces équipements. Toutefois, le GPS peut être perturbé par la présence de hauts bâtiments pouvant générer des pertes ou des réflexions du signal. C'est pourquoi ces systèmes continuent à être couplés avec des odomètres.

L'information de localisation est par la suite acheminée à un système central. Le problème de communication constitue souvent le goulot d'étranglement. Les procédures de communication reposent sur des interrogations cycliques (cycle de l'ordre de 20s à 30s) ou événementielle, le véhicule ne transmettant sa position par exemple qu'au passage à l'arrêt ou que s'il est en décalage par rapport à son horaire théorique.

Certains SAE reposent sur une gestion individualisée au niveau de chaque bus. Le système embarqué télécharge sa course théorique au passage au terminus. En liaison

avec les systèmes de localisation et de détection, il assure à bord du véhicule des fonctions de suivi en temps réel de sa course, d'information de ses passagers, de gestion des tickets et de priorité bus.

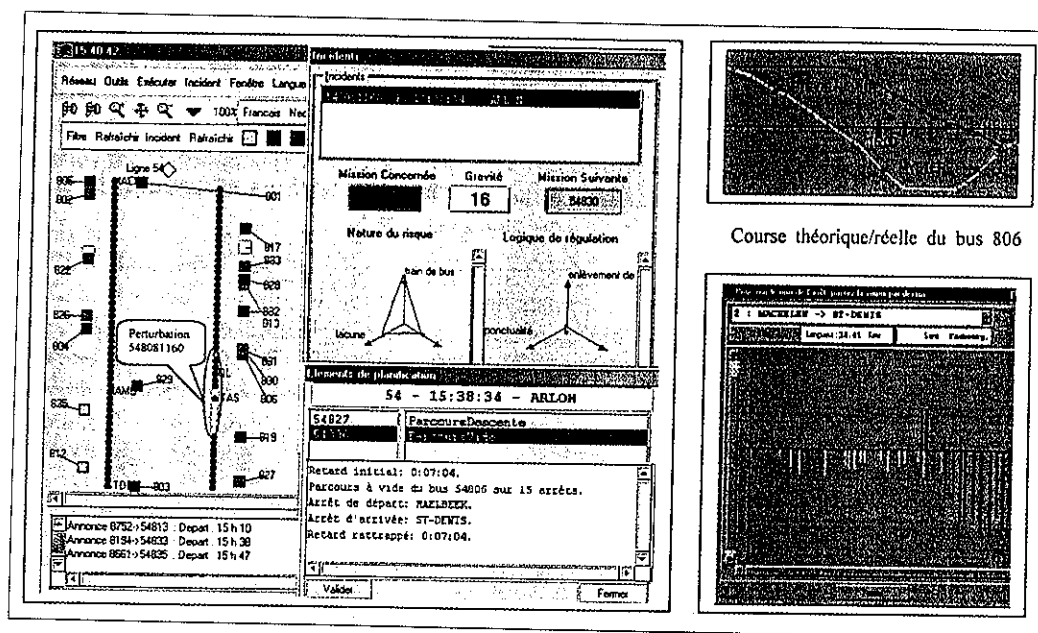
3.2 Interfaces homme-machine et représentations cartographiques

Le poste opérateur traditionnel restitue essentiellement une image ligne qui permet de suivre le déplacement des bus avec des indications sur leur écart par rapport à l'horaire théorique. Les nouvelles interfaces permettent à partir de la désignation d'un bus de naviguer à travers l'ensemble de la base données du SAE et de connaître tout le détail de sa mission.

Ces représentations ne tiennent pas compte des positions réelles des arrêts. Les systèmes de représentation cartographique commencent à être introduits dans la nouvelle génération des SAE. Ils permettent de suivre le véhicule sur une carte vectorisée provenant des bases de données géographiques. Cette représentation est utile afin de mieux intégrer les contraintes du lieu et de mettre en place des procédures de déviation suite à certains événements particuliers rendant inaccessible l'usage de la voirie. La cartographie permet aussi de repérer un lieu précis en cas d'intervention d'urgence comme une agression. Elle est amenée à jouer un rôle dans le développement du bus à la demande qui s'appuie sur les concepts de tournée pour effectuer le déplacement depuis une origine vers une destination.

3.3 Normalisation des modèles de données de référence

Les modèles conceptuels de données sont à la base de la conception des systèmes informatiques et des bases de données. Depuis 1989, d'importants travaux ont été accomplis dans le cadre des programmes de Recherche et Développement européens (DGXIII). Ils ont débouché sur la conception du TRANSMODEL[3] en voie de normalisation CEN 278 (Road transport and Traffic telematics) groupe 3 (transport public) (<http://titan.gulliver.fr/>). Ce modèle de données dans sa version 4.1.1 couvre des domaines comme la planification des services des conducteurs et des véhicules, la gestion du personnel, la régulation, l'information des passagers, la billettique, la gestion des statistiques. Des travaux sont en cours pour faire évoluer ce modèle essentiellement bus vers les problématiques de l'intermodalité dans le transport public (projet SITP à l'initiative de la Direction des Transports Terrestres). Le TRANSMODEL qui repose sur le modèle entité-association a fait l'objet d'une transcription dans un modèle orienté objet appelé SIORS++ [4] par la RATP dans le cadre du projet européen TITAN. L'INRETS a utilisé ses travaux dans la réalisation du système d'aide à la décision qui sera présenté dans la suite de cet article et pour la modélisation de nouveaux systèmes de gestion conjointe de la voiture particulière et du transport public.



2. Interface homme-machine de SATIR.

3.4 L'aide à la décision

L'importance des développements présentés dans le paragraphe précédent ne suffit pas à garantir un niveau de service satisfaisant du système du fait de la complexité du système à gérer. Ce niveau de service dépend en grande partie des hommes (graphiqueurs, régulateurs, dispatcheurs) qui en ont la charge face et ce notamment face aux perturbations grandissantes qui affectent le service. Au niveau de l'aide à la décision, le SAE reste un outil assez limité qu'il est nécessaire d'améliorer si on veut assurer une maîtrise de l'exploitation.

L'aide à la décision s'inscrit dans le cadre d'une coopération homme-machine afin de fournir une aide active et intelligente tant sur le plan du diagnostic que celui de la décision par la proposition de diverses procédures susceptibles de les traiter.

3.4.1 Spécification des besoins pour la décision

Le régulateur joue un rôle fondamental afin d'adapter le plan de production face aux nombreux événements imprévisibles. L'analyse du poste de travail des régulateurs révèle un grand nombre de difficultés dans les tâches de diagnostic et de décision qui leur sont confiées.

Importance de la communication et de l'information

On note l'importance des tâches de communication avec les conducteurs (50% du temps) et du temps passé en termes de recherche et de vérification de l'information, alors qu'on aurait pu penser a priori que la localisation automatique aurait contribué à diminuer notablement cette activité.

Nécessité d'une vision globale

La décomposition de la surveillance par ligne ainsi que le nombre important de lignes à surveiller (chaque régulateur suit 13 lignes sur lesquelles circulent de 5 à 20 bus durant la journée) ne sont pas favorables au développement d'une vision globale au niveau du réseau.

Aspect spatio-temporel de l'analyse

Les alarmes primaires sur les avances/retards de chaque bus (suivant un code de couleur) fournissent une image trop instantanée de l'état d'une ligne. Le suivi des ces alarmes dans leur évolution spatio-temporelle est pratiquement inaccessible à l'échelle humaine et conduit à une surcharge de l'opérateur.

Aspect prédictif et multicritère de la décision

Toute décision nécessite une projection dans l'avenir afin de prévoir le lieu et l'instant des actions correctrices. Il faut également disposer des éléments relatifs aux services des agents et des véhicules. Le régulateur joue également un rôle important de coordination des différentes actions entreprises.

Aspect multicritère de la décision

La décision doit tenir compte de divers critères qui peuvent être contradictoires :

- logique d'enlèvement des voyageurs (heures de pointes, sortie d'école),
- logique de ponctualité (ligne à horaire intervalle supérieur à 12'),
- logique de correspondance (échange entre lignes ou avec autre mode de transport),

- logique de gestion du personnel (respecter la réglementation, répartir la charge de travail).

3.4.2 Recherche sur un système d'aide à la décision

Un prototype de recherche SATIR a été élaboré dans le cadre de recherche en partenariat avec la STIB qui est l'opérateur de transport en commun de la ville de Bruxelles[5]. Ce système :

- possède un modèle spatio-temporel de la perturbation au niveau des points du réseau et non au niveau des bus comme dans les systèmes conventionnels, ce qui permet de revenir au concept de base de la demande de transport car les points du réseau représentent les lieux d'attente des voyageurs.
- effectue un calcul dynamique des horaires ce qui permet au modèle des perturbations d'être contextuel et non plus relatif à un tableau horaire prédéterminé.
- suit le déroulement du tableau de marche en temps réel et compare la trajectoire réelle de chaque véhicule avec sa trajectoire théorique pendant la journée.
- gère des historiques des avances/retards réels en chaque point ou des retards moyens au niveau d'une ligne.
- propose et évalue diverses procédures de régulation parmi les plus courantes comme : les parcours en descente ou à vide, les transbordements de voyageurs, les demi-tours, les injections de bus de réserve, les modifications des départs en terminus, les déviations totales ou partielles (délestage).
- présente au régulateur via l'IHM (figure 2) l'ensemble des bus susceptibles d'être utilisés pour le traitement d'une perturbation avec un classement multi-critères.

Le développement du système SATIR repose sur les technologies orientées objets tant en ce qui concerne la conception du logiciel que son implémentation dans le langage C++. Un modèle multi-agents, représentant les bus, les arrêts, les perturbations, est utilisé pour la gestion dynamique des horaires, le monitoring des perturbations et la résolution collective par les "agents eux-mêmes" du problème.

Les recherches sur ce système devraient se poursuivre afin de compléter la prise de décision par le suivi des actions et de mieux prendre en compte l'aspect réseau (impact des perturbations et de leur traitement au niveau du réseau) avec notamment les problèmes de gestion des correspondances.

4. Information des usagers

La développement de l'information sur les déplacements est une clé pour le succès du transport public car il permet à l'usager d'optimiser son déplacement et d'améliorer son confort et sa confiance dans le service offert [6]. Les tendances dans le domaine de l'information des usagers concernent le passage :

- d'une information statique vers une information

dynamique,

- d'une information modale à une information multimodale,
- d'une information collective vers une information personnalisée.

4.1 Information dynamique

L'avantage du SAE est de gérer une information dynamique qui peut être rendue accessible :

- à bord des véhicules (annonce du prochain arrêt, correspondance, messages provenant du PC),
- aux arrêts (temps d'attente, temps de passage du prochain véhicule, perturbations) par des panneaux d'information dynamique,
- sur les lieux publics de correspondance ou privés (tableaux horaires, planification du déplacement) par consultation de borne interactive, de serveur Minitel ou Internet.

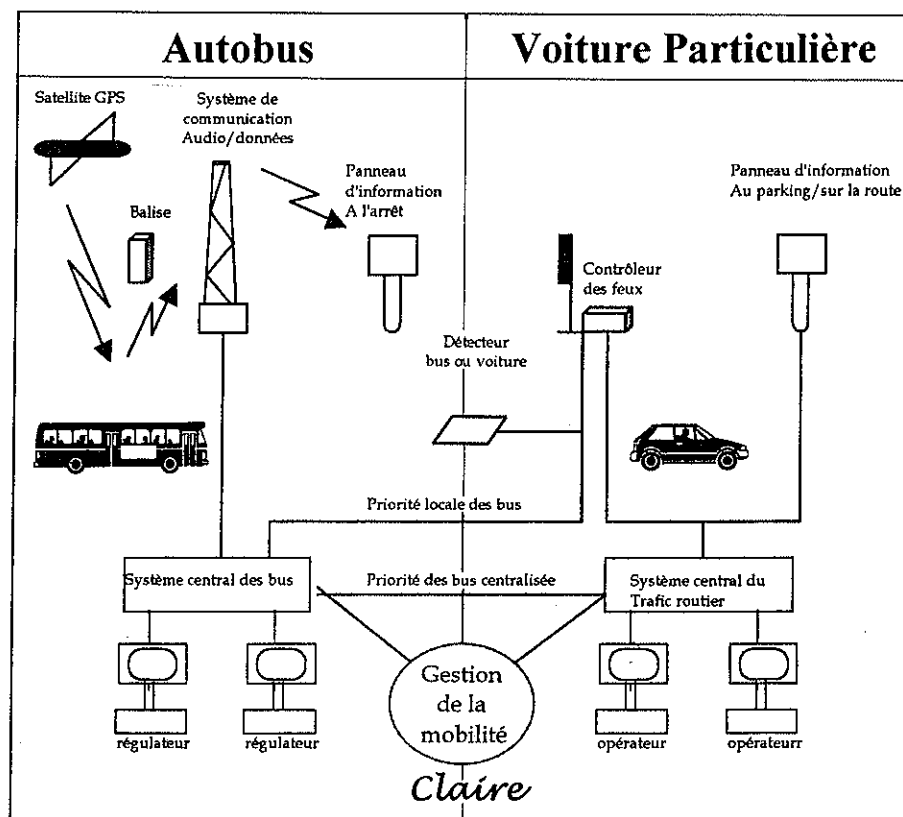
4.2 Information intermodale et multimodale

Quand l'information est disponible au niveau d'un point de connexion entre plusieurs modes de transport, elle est utile pour maintenir la correspondance en retardant au besoin les départs. Ce problème peut aussi concerner l'interface avec le mode routier en complétant par exemple le trajet par une réservation de taxi effectuée à bord du transport en commun. Le bus à la demande, par le biais de réservations, serait capable de concurrencer le mode de la voiture par l'offre d'un service "porte à porte". Toutefois, il ne s'applique pas pour le transport de masse. Les systèmes multimodaux de paiement électronique sont susceptibles de s'étendre dans les prochaines années. Leur développement peut être également une source de données relatives aux mouvements des passagers.

L'information est particulièrement pertinente si elle peut être fournie avant le choix modal. Des systèmes de recherche d'itinéraires multimodaux commencent à se développer. Pour être complets, ils nécessitent la disponibilité de données relatives à l'ensemble des modes (train, tram, métro, bus, véhicule particulier, air, ferry). Outre le problème de la fiabilité et de la maintenance de ces informations, ces systèmes se heurtent pour leur mise en place à des barrières institutionnelles et organisationnelles concernant le partage et l'exploitation des données communes. En Europe, un faible nombre de tels sites se sont constitués avec l'appui des programmes européens comme à Munich, Marseille (projet INFOTEN) ou Southampton (projet ROMANSE).

4.3 Information personnalisée

De collective, l'information peut être acquise de façon personnalisée par le biais d'équipement comme les *paggers* (système INFOBUS), les téléphones portables (messages SMS, WAP) ou les ordinateurs personnels. Dans ce cas des réflexions sont nécessaires pour que l'interface per-



3. Architecture informatique d'un SAE (partie gauche) et Gestion intégrée des modes VP et TC.

mette de répondre au besoin précis de la personne. L'idée est de fournir l'information en un lieu, à un moment et à la personne qui en a besoin. Des projets sont en cours pour développer ce type de service d'accès à une information à la fois dynamique, multimodale et personnalisée. A partir de son téléphone portable, il sera possible d'interroger un serveur pour obtenir une information précise, faire une recherche d'itinéraire ou être alerté automatiquement en temps réel en cas de problème avant ou pendant le déroulement de son trajet multimodal.

5. Gestion intégrée des modes VP et TC

5.1 Priorité aux feux

La priorité aux feux peut revêtir différentes formes suivant que la communication s'établit directement avec le contrôleur de carrefour ou entre les deux systèmes de gestion des bus et du trafic routier (figure 3). On parle alors de priorité au niveau local et au niveau centralisé. Indépendamment de la façon dont est acheminée la demande de priorité, il convient de distinguer l'échelle de temps de la commande des feux.

La micro-régulation de priorité des bus permet de prolonger la phase verte ou d'écourter la phase rouge d'un feu afin de faire passer le véhicule. Cette priorité peut tenir compte de la course réelle du bus et ne s'appliquer

que si le bus est en retard. Cette priorité peut être absolue comme pour le tramway à Strasbourg. La macro-régulation de priorité centralisée des bus consiste à appliquer globalement des commandes de plan de feux favorisant statistiquement les voiries supportant des trafics bus et ce à partir d'une demande envoyée par le SAE.

5.2 Gestion intégrée

La gestion intégrée des modes est une autre solution pour développer une macro-régulation de priorité bus. Elle consiste à définir un niveau supérieur de *gestion de la mobilité* au-dessus de chacun des deux systèmes de gestion des bus et du trafic routier (et d'autres systèmes comme les systèmes de gestion du parking). Pour le transport de surface, le système indépendant CLAIRE [7] de supervision de la congestion se situe à un tel niveau. Il pourrait appliquer une macro-régulation de priorité bus de façon beaucoup plus différenciée. A partir d'états symboliques représentatifs des conditions de la circulation des bus (baisse de la vitesse commerciale) et de la voiture particulière (état saturé) sur les différents arcs du réseau, il serait possible d'appliquer des actions-favoriser/retenir dans le cadre de stratégies coopératives représentatives des intérêts des différents opérateurs concernés.

Les travaux autour de gestion globale de la mobilité concentrent les recherches actuelles. Des sites comme Toulouse (projet CLAIRE-SGGD), Turin (QUARTET+), Munich (projet MOBINET), Cologne (projet ENTERPRICE [8]) sont des agglomérations pionnières.

6. Conclusion

Cette article a présenté les principales évolutions attendues dans le domaine des systèmes d'aide à l'exploitation. L'introduction des technologies de l'information et des communications ne garantit pas une amélioration de l'exploitation du transport public. En particulier, la complexité du système de transport et des nombreuses perturbations qui l'affectent, soulèvent le problème de la maîtrise de ces systèmes. Le domaine de l'aide à la décision constitue un enjeu majeur pour les opérateurs qui éprouvent les plus grandes difficultés à agir. La gestion conjointe des modes de transport de surface ouvre une voie importante qui pourrait s'avérer fructueuse à condition que les problèmes institutionnels et organisationnels soient résolus.

Références

- [1] SCEMAMA G. et GAUDIN E., 1998, "Informatisation de la Décision dans l'Exploitation du Transport, Atouts des Technologies Avancées du Traitement de l'Information", Recherche Transport Sécurité, 61
- [2] HOUPERT M., 1983, "Système d'aide à l'exploitation des transports urbains", Rapport de synthèse, CETUR.

- [3] ROACH H., 1993, "EUROBUS/Transmodel project : Public Transport Data Modelling", Conference of Advanced Transport Telematics, EEC DG XIII, Brussels
- [4] RIZZI M. et GUICHOUX B., 1997, "Système d'Information Objet pour l'Exploitation des Réseaux de Surface", Régie Autonome des Transports Parisiens Report.
- [5] SCEMAMA G. et al., 2000, "Real-time aid to decision system for bus operators, Tenth international IEE Conference on Road Transport Information and Control, April 2000.
- [6] WILKINSON et al., "Review of telematics relevant to public transport", TRL Report 342, 1998.
- [7] SCEMAMA G., 1995, "CLAIRE: An independent, AI-based supervisor for congestion management", Traffic Engineering+Control, p 604-612, November 1995.
- [8] RIEGELHUTH G. et al., 1997, "The ENTERPRICE project: a step towards information and mobility management", Mobility for every one 4th World congress on intelligent transport system, October 1997, Ertico editor.

Les auteurs

Gérard SCEMAMA est directeur de recherches, responsable de l'unité de recherche GRETA de Génie des Réseaux de transport et d'Informatique Avancée de l'INRETS. Il est responsable d'un module d'enseignement intitulé « Systèmes Informatiques dans les transports » dans le cadre du Mastère sur les Systèmes de Transport Intelligent de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC). Il est également membre du conseil scientifique de la ZELT (Zone Expérimentale Laboratoire du Trafic).

Ses travaux de recherche couvrent la thématique des Systèmes d'Aide à la Décision dans le domaine de l'exploitation pour différents modes de transport (transport routier, public, maritime, de marchandises).

Bimodalité énergie appliquée aux transports collectifs urbains : captation / énergie embarquée

Mots-clés

Transports collectifs, Bimodalité, Batteries, Volant d'inertie, Supercondensateurs.

■ par Claude SOULAS, *INRETS-LTN*

La bimodalité énergie permet de conserver un mode de captation traditionnel sur la plus grande partie d'une ligne de transport collectif urbain électrique, et de ne supprimer les fils aériens d'alimentation que là où ils sont les plus gênants.

1. Introduction

Nous traitons ici de la bimodalité pour les systèmes de transport collectif urbain tels que par exemple trolleybus, tramway et systèmes intermédiaires, en nous focalisant plus particulièrement sur l'utilisation de l'énergie électrique. D'une certaine manière le remplacement de lignes d'autobus traditionnellement Diesel par de nouveaux systèmes guidés (tramways modernes sur fer ou systèmes intermédiaires sur pneus) pourrait être l'occasion d'augmenter la pénétration de l'électricité dans les transports collectifs urbains, dans un contexte où pour l'instant ni le trolleybus classique ni les bus ou minibus tout électrique (en l'occurrence à batteries) n'ont réussi à se diffuser en grandes quantités. Toutefois, dans les années

à venir, deux facteurs pourraient être de nature à ralentir cette tendance générale à l'électrification qui apporte par ailleurs de gros avantages en termes de performances, de réduction des nuisances en ville, et de diversification énergétique :

- une acceptation moins facile des lignes aériennes, bien que leur intrusion visuelle puisse être rendue moins gênante par une meilleure intégration esthétique (et d'autres pays comme l'Allemagne misent sur l'augmentation de la tension d'alimentation à 1500 V pour diminuer la section des caténaires) ;
- le développement de nouvelles solutions de Diesel plus ou moins dépollué, de motorisations au gaz, voire de la pile à combustible.

L'ESSENTIEL

- Malgré diverses expérimentations réalisées ces dernières années avec la bimodalité tout électrique (notamment prototypes de trolleybus bimodes à batteries), jusqu'à présent les rares diffusions commerciales significatives ont été effectuées avec la bimodalité captation/moteur thermique.
- Maintenant, les perspectives offertes par les divers types de batteries, les volants d'inertie et les supercondensateurs permettent de nouvelles possibilités pour la bimodalité électrique sur tramway, systèmes intermédiaires ou trolleybus.
- Les composants de stockage embarqué envisageables pour une bimodalité électrique seront d'autant plus compétitifs qu'ils ont l'occasion d'être développés pour d'autres applications : véhicules électriques, véhicules hybrides, applications stationnaires.

SYNOPSIS

- In spite of the numerous experimental all-electric systems demonstrated in recent years, including prototypes of trolley busses with internal batteries, the few systems to have entered commercial service have all used hybrid vehicles combining electrical power with an internal combustion engine.
- Recent developments in battery technology, flywheel energy storage and ultra-high value capacitors have opened up new opportunities for all-electric dual power vehicles for tramways, guided vehicle systems and trolley busses.
- The success of the various energy storage systems proposed for dual power vehicles will depend on their suitability for use in other applications including electric vehicles, hybrid vehicles and stationary applications.

La bimodalité pourrait être un bon compromis pour conserver l'alimentation en énergie électrique et ne supprimer les lignes aériennes que là où elles sont les plus gênantes.

La bimodalité n'est que très partiellement concurrente de la captation par le sol (voir article de Zoubir Khatir dans ce même numéro), et pourrait même de deux manières être complémentaire de cette solution :

- on peut envisager dans un même système l'association de la captation par le sol et de la bimodalité, comme c'est le cas actuellement du projet STREAM en Italie ;
- de manière plus générale, on peut envisager une complémentarité entre les créneaux d'application de la bimodalité et de la captation au sol en fonction des distances à franchir sans fils aériens, des puissances demandées et des bilans économiques qui dépendent des coûts d'investissements, du nombre de véhicules, des coûts d'exploitation intégrant entre autres paramètres les possibilités de récupération d'énergie.

2. Problématique de la bimodalité

Nous pouvons définir la bimodalité comme l'utilisation successive de deux modes de fonctionnement, et pour les transports collectifs urbains nous distinguerons plusieurs concepts :

- bimodalité de guidage : fonctionnement en mode routier et en mode guidé ;
- bimodalité énergie : deux modes d'alimentation en énergie ;
- bimodalité de motorisation : deux motorisations alimentées par des sources d'énergie différentes ;
- bimodalité de conduite : mode manuel et mode automatique ;
- bimodalité d'insertion : en site banal et en site propre.

Dans le cadre de cet article nous nous focalisons sur la bimodalité énergie, mais nous évoquerons en marge ses interactions avec la bimodalité de guidage.

La bimodalité énergie, liée parfois à la bimodalité de motorisation, peut être réalisée avec des solutions technologiques diverses, notamment :

- bimodalité thermique/électrique : captation/moteur thermique, ce dernier pouvant soit entraîner directement les roues, soit entraîner un générateur de courant alimentant les moteurs de traction électrique (solution actuelle) ;
- bimodalité "tout électrique" :
 - captation/batteries d'accumulateurs,
 - captation/supercondensateurs,
 - captation/batteries d'accumulateurs associées à des supercondensateurs,
 - par extension nous considérons ici également la bimodalité captation/volant d'inertie, dans la mesure où des machines électriques intégrées à l'ensemble volant permettent une conversion directe de l'énergie cinétique en énergie électrique.

La bimodalité captation/pile à combustible pourrait en principe être prise en compte également, mais dans la mesure où elle deviendra mûre pour une diffusion industrielle, cette solution pourra aussi s'utiliser soit seule, sans nécessiter une association avec une captation, soit dans le cadre d'une hybridation.

Contrairement à la bimodalité, l'hybridation suppose une utilisation simultanée et non successive des deux sources d'énergie. L'hybridation peut donc être utilisée soit avec un groupe thermique/électrique embarqué (avec moteur diesel ou au gaz), soit avec une pile à combustible fonctionnant à puissance relativement constante, en association avec un autre composant prenant en charge les pointes de puissance. L'hybridation peut utiliser les mêmes composants que la bimodalité (batteries, volants d'inertie, supercondensateurs) mais dans un autre contexte, le cas échéant avec un dimensionnement différent. Dans certains cas on pourrait considérer que ces deux concepts de bimodalité et d'hybridation se recoupent partiellement, dans la mesure où le moyen de stockage choisi pour assurer une bimodalité peut aussi contribuer à assurer les pointes de puissance au démarrage après avoir récupéré de l'énergie au freinage.

Les systèmes concernés sont les suivants, en évoluant progressivement de l'absence totale de guidage vers le guidage le plus fort :

- 1) trolleybus ;
- 2) systèmes intermédiaires totalement bimodes en guidage ; c'est le cas du TVR prévu pour Nancy, ainsi que des projets Translohr SE et CIVIS ;
- 3) systèmes intermédiaires bimodes exceptionnellement (toujours guidés en exploitation sauf situation particulière) ; c'est le cas du TVR prévu pour Caen ;
- 4) systèmes intermédiaires toujours guidés (sauf le cas échéant à l'intérieur du dépôt) ; c'est le cas actuellement du projet Translohr STE. Dans cette catégorie il s'agit de véritables *tramways sur pneus*, sachant que ce terme est parfois aussi utilisé par abus de langage pour les systèmes de la catégorie 3, voire de la catégorie 2, qui ont des fonctionnalités différentes ;
- 5) tramway (sur fer).

On voit que la bimodalité de guidage (cas 2 et 3) peut induire la bimodalité énergie, dans la mesure où le système intermédiaire est alimenté par caténaire (moins d'intrusion visuelle que le double fil trolley) : sur les tronçons sans guidage il n'y a plus le rail au sol qui assure aussi la fonction retour de courant. Si le tronçon non guidé est d'une longueur trop importante pour les moyens de stockage électriques, le cas 2 de la bimodalité totale peut inciter à choisir la bimodalité thermique/électrique ou bien la captation type trolleybus en continu ; dans ce dernier cas la bimodalité tout électrique reste alors envisageable en complément de la captation type trolley.

A l'inverse pour les systèmes toujours guidés des cas 4 et 5, il n'y a pas l'argument de la bimodalité de guidage

pour choisir la bimodalité énergie, mais on peut y trouver plusieurs avantages, de même d'ailleurs que pour le cas 1 du trolleybus :

- suppression des lignes aériennes dans les secteurs où elles sont les plus gênantes, par exemple sur un tronçon du cœur historique des villes ;
- simplification des dépôts ;
- suppression des lignes aériennes sur le tronçon entre le terminus (ou autre point de la ligne) et le dépôt ;
- amélioration de la disponibilité en cas de panne de l'alimentation en énergie (et/ou de ce fait moindre dimensionnement des sous-stations) ;
- le cas échéant, réduction du gabarit hauteur des tunnels lorsque des courts passages en dénivelés s'imposent ;
- dans le cas de la bimodalité tout électrique, possibilité d'améliorer le taux de récupération en stockant à bord l'énergie de freinage qui ne peut pas toujours être utilisée en ligne par un autre véhicule qui tracte.

3. Les tentatives effectuées dans le passé

3.1 Le trolleybus bimode

Dès les années 1970, la bimodalité énergie a été étudiée pour le trolleybus, en France et dans d'autres pays européens, notamment la bimodalité captation/batteries. L'Allemagne avait misé sur les batteries au plomb qui se sont avérées de performances insuffisantes. La France avait misé sur les batteries au Cadmium-Nickel qui étaient nettement plus performantes, mais à l'époque d'un coût très élevé. Parmi les travaux de R et D effectués par les constructeurs avec le soutien financier du ministère des transports et le suivi technique de l'IRT (prédécesseur de l'INRETS), nous retiendrons :

- les essais d'endurance au banc de batteries Cadmium-Nickel dans ces conditions de cyclage représentatives de l'utilisation en fonctionnement bimode ;
- la réalisation et les essais du prototype de trolleybus bimode tout électrique ER 180.

Même s'il n'y a pas eu alors de débouchés pour des raisons économiques, la preuve était faite de la faisabilité de la bimodalité captation/batterie. Un élément essentiel était la démonstration que le Cadmium-Nickel permet un nombre de cycles considérable lorsque la profondeur de décharge est faible. Les simulations de l'époque (vers 1980) montraient que des tronçons sur autonomie de l'ordre de 4 à 5 km étaient envisageables pour des lignes de trolleybus bimodes ; pour un cahier de charges relativement sévère, la batterie de l'époque pesait environ 2,5 tonnes. Cette solution n'étant pas mûre industriellement lorsque la ville de Nancy a fait son choix, c'est le trolleybus bimode thermique PER 180 qui a alors été retenu.

Jusqu'au début des années 1980, le trolleybus bimode (tout électrique ou bien thermique) a été un objet d'investigation important, et il a donné lieu au niveau européen à un programme COST (Coopération Scientifique et



1. Une expérience maintenant ancienne : le prototype du trolleybus bimode tout électrique ER 180 qui a été développé vers 1980.

Technique) : le COST 303, d'ailleurs au même titre que le véhicule électrique routier qui a donné lieu alors au COST 302.

Ces rappels sont importants pour montrer qu'on ne part pas de zéro avec les nouvelles investigations sur la bimodalité pour les transports collectifs urbains.

Parmi les raisons qui avaient freiné l'aboutissement de la bimodalité pour le trolleybus, nous retiendrons :

- pour la filière tout électrique, le coût élevé des batteries performantes à l'époque ;
- pour la filière thermique (qui a eu quand même un "demi-succès"), la complexité plus grande du véhicule par rapport à une solution non bimode ;
- pour les deux filières : un engouement modéré dans les villes européennes pour la solution trolleybus, peut-être aussi l'échec du développement de l'emperchage automatique en marche : seul un emperchage automatique à l'arrêt a été commercialisé.

3.2 Autres tentatives

Une expérience a été réalisée en Allemagne il y a une dizaine d'années pour réaliser un tramway bimode à batteries. Un besoin était apparu pour le tramway d'interconnexion de Karlsruhe afin de circuler par endroits sur des emprises ferroviaires non électrifiées. Une expérimentation a été réalisée avec un tramway bimode prototype équipé d'une batterie Sodium-Soufre de 4,8 tonnes dimensionnée pour une autonomie de 20 km. Cette expérience n'a pas eu de suite à cause des difficultés rencontrées par la batterie Sodium-Soufre (quelles que soient les applications).

Par ailleurs, depuis une quarantaine d'années, des expérimentations ponctuelles de véhicules avec volants d'inertie ont été réalisées, mais pas forcément dans le contexte d'une bimodalité ; ainsi par exemple le premier *Gyrob* a été construit par Oerlikon en 1957 avec un

	Batteries Na-NiCl ₂	Batteries* Ni-MH	Volant d'inertie	Volant d'inertie*	Super-* condensateurs
Energie massique Wh/kg	70	42	3,5	10	2,5
Puissance massique W/kg	70	163	260	500	aprox.2000
Durée de vie sur bus	Max.3 ans	???	illimité	illimité	illimité
Nécessité de maintenance	oui	oui	oui	oui	non

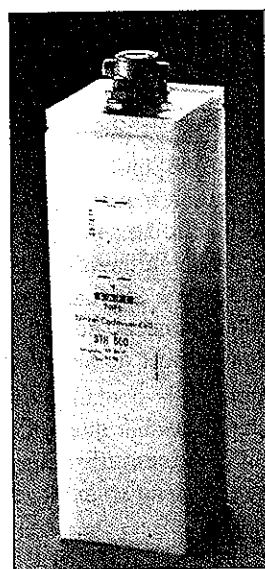
* Nouveau développement

Tableau 1 : Valeurs indicatives très prudentes issues d'une publication allemande concernant les applications sur autobus (source VDV : « Linienbusse » 1999)

volant d'inertie en acier de 3,5 tonnes tournant à 3000 tours/mn en stockant 3 kW/h.

4. Diverses solutions techniques envisageables

Du point de vue des caractéristiques techniques, les composants envisageables pour réaliser une bimodalité tout



2. Élément STH800 : l'un des types de batteries Cadmium-Nickel disponibles dès maintenant pour réaliser une bimodalité. Photo SAFT, Peet Semard.

électrique (batteries, volant d'inertie, supercondensateurs) se distinguent avant tout par le couple de paramètres puissance et énergie. Ainsi les batteries offrent la plus forte énergie massique, mais ont traditionnellement la plus faible puissance massique. Les volants d'inertie ont une puissance massique plus forte au prix d'une énergie massique plus faible. Les supercondensateurs permettent d'aller plus loin que les volants d'inertie dans l'augmentation de la puissance massique, mais en réduisant sensiblement l'énergie massique. Il s'agit là bien sûr d'une approche simplifiée, dans la mesure où il peut y avoir des différences notables au sein du même

type de composant. Ainsi, les batteries futures ont des puissances massiques bien supérieures à celles des batteries traditionnelles, et par ailleurs le même couple électrochimique peut être réalisé de diverses manières et une forte augmentation de la puissance massique peut être obtenue au prix d'une réduction de l'énergie massique. A titre d'exemple nous remarquerons qu'au sein des batteries Cadmium-Nickel de la SAFT, il y a une augmentation progressive de la puissance massique quand on passe du STM au STH puis au STX, de même pour différents types de batteries Lithium-Ion.

Par ailleurs, ces trois types de composants se différencient par d'autres caractéristiques comme le rendement, la durée de vie (ou le nombre de cycles), les procédures de maintenance, la facilité d'intégration et le coût objectif qui est largement tributaire des quantités de production envisagées. Il y a une grande difficulté à comparer de manière objective les caractéristiques au sein d'un même tableau, dans la mesure où les horizons de maturité industrielle ne sont pas toujours les mêmes. Avec cette réserve, nous citerons à titre d'illustration le tableau n°1 extrait d'une récente publication allemande pour un contexte particulier d'application, qui cite dans l'ensemble des chiffres prudents (si on se réfère aux travaux les plus récents, des valeurs plus élevées sont souvent citées, y compris pour l'énergie massique des supercondensateurs), et nous indiquerons que pour d'autres pays les batteries prises en considération seraient différentes : batteries classiques au Nickel-Cadmium, batteries avancées Lithium-Ion ou Lithium-Polymère, batteries au plomb améliorées.

	Nickel-Cadmium		Plomb	Lithium-Ion		Ni-MH
Energie massique Wh/kg	55	35	35	120	70	65
Puissance massique W/kg	120	400	200	300	1 300	200

Tableau 2 : Ordres de grandeur indicatifs concernant quelques batteries à l'ordre du jour (valeurs variables en fonction du type, de l'horizon de fabrication et de divers paramètres d'utilisation).

4.1 Les batteries

Les batteries représentent le composant pour lequel la situation est la plus complexe, vu le grand nombre de couples électrochimiques, même si une certaine décantation s'est effectuée.

Les retombées des travaux effectués sur le véhicule électrique routier (ou voiture électrique) ont d'une part induit une certaine réduction du coût des batteries Cadmium-Nickel pour les applications à très court terme, d'autre part débouché sur des recherches-développements de batteries plus performantes (Nickel Métal Hydrure, batteries au Lithium, ...) qui peuvent être envisagées pour la bimodalité dans les années à venir. Les batteries au plomb elles-mêmes progressent et compte-tenu de leur coût modéré au kWh, après validation de leurs performances améliorées, certains types de fabrication pourraient aussi convenir à des applications bimodalité dans les prochaines années.

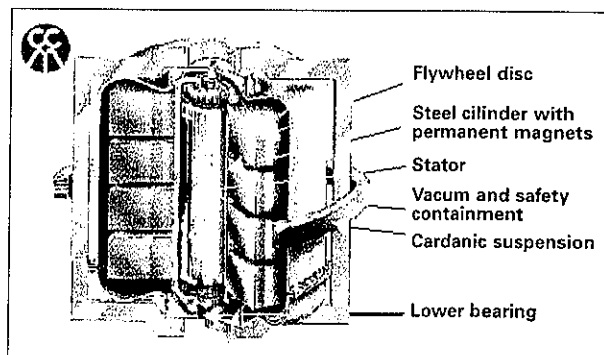
4.2 Les volants d'inertie

Plusieurs évolutions technologiques permettent de remettre ces composants à l'ordre du jour :

- les matériaux composites qui autorisent une vitesse de rotation beaucoup plus rapide que pour l'acier, et donc des performances massiques bien supérieures, malgré une densité du matériau nettement plus faible (à titre d'exemple on pourrait dire que malgré une densité cinq fois plus faible les volants en composite permettent de stocker cinq fois plus d'énergie que les volants en acier de même masse) ;
- les nouveaux paliers céramique, voire les paliers magnétiques. Jusqu'à présent, des paliers traditionnels en acier ont été utilisés (notamment sur des trolleybus de Bâle), ce qui entraîne des interventions de maintenance plus fréquentes ;
- les machines synchrones à aimants permanents néodyme-fer-bore ;
- les progrès en électronique de puissance avec les convertisseurs à IGBT.

4.3 Les supercondensateurs

Une nouvelle technique d'élaboration de matériau d'électrode a permis de concevoir une famille de condensateurs, les supercondensateurs, atteignant des valeurs de capacité beaucoup plus élevées (au moins 100 fois plus) que les condensateurs électriques traditionnels. D'une certaine manière les supercondensateurs sont des dispositifs de stockage d'énergie intermédiaires entre les accumulateurs électrochimiques et les condensateurs classiques. Le principe physique est d'augmenter la surface des électrodes ; le matériau utilisé est obtenu à partir de carbone élaboré avec une phase de "cracking" qui fait apparaître un réseau de connexion d'innombrables micropores dont l'effet est de multiplier par plusieurs facteurs



3. Exemple de réalisation de volant d'inertie chez l'un des fournisseurs européens. Photo CCM.

d'échelle les surfaces en regard. Il s'agit de la technologie dite de "double couche". Les valeurs atteintes sont de plusieurs farads par gramme de matière.

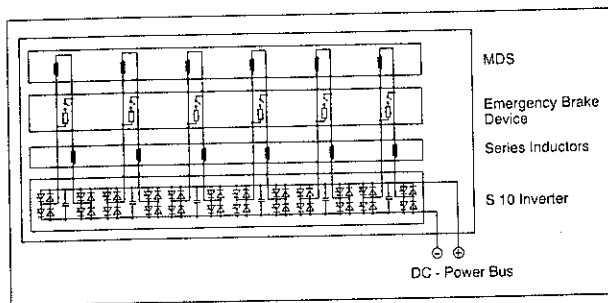
Ces supercondensateurs sont réalisés depuis de nombreuses années pour des applications spéciales, principalement militaires. L'événement récent porte sur l'intérêt de cette technologie pour le stockage d'énergie dans le domaine des transports, principalement l'automobile. En effet ces dispositifs présentent des caractéristiques avantageuses telles que : un très bon rendement (faible résistance série), une réponse immédiate à de très fortes impulsions de courant (pas ou peu d'effet faradique), une durée de vie aux cycles de charge-décharge très élevée, une connaissance précise de l'énergie disponible par la mesure de la tension ; enfin la fabrication met en œuvre des matériaux courants et peu polluants. Les inconvénients sont une tension d'élément limitée à environ 2,5 volts, une densité d'énergie stockée 10 à 20 fois plus faible que dans les batteries actuelles, la nécessité d'une interface avec une électronique de puissance.

Ces dispositifs sont très bien adaptés à la demande de pointes de puissance de courte durée jusqu'à quelques dizaines de secondes et devront pour certaines utilisations être associés à une batterie.

4.4 Electronique de puissance

Tous les composants de stockage d'énergie cités ont en commun le besoin d'une électronique de puissance, parfois assez complexe, mais qui peut maintenant être réalisée dans des conditions satisfaisantes d'encombrement et de masse grâce au développement des modules IGBT :

- chargeurs de batteries embarqués (pour la recharge sous lignes aériennes) adaptés à chaque type de couple électrochimique considéré ;
- onduleurs associés à la machine synchrone à aimants permanents intégrée au volant d'inertie pour résoudre le problème de la variation de vitesse dans une très large plage (en l'occurrence avec des fréquences de commutation élevées), voir figure 4 ;
- hacheurs associés aux supercondensateurs afin d'assurer les cycles de charge-décharge.



4. Exemple d'électronique de puissance associée à un volant d'inertie. Origine MagnetMotor

5. Expérimentations en cours, perspectives

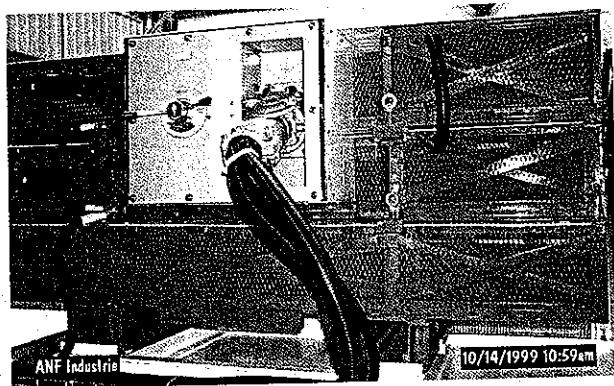
Il convient de distinguer d'une part quelques expérimentations de systèmes bimodes avec des composants disponibles dès aujourd'hui, d'autre part les perspectives offertes par l'évolution des composants.

5.1 Expérimentation de véhicules

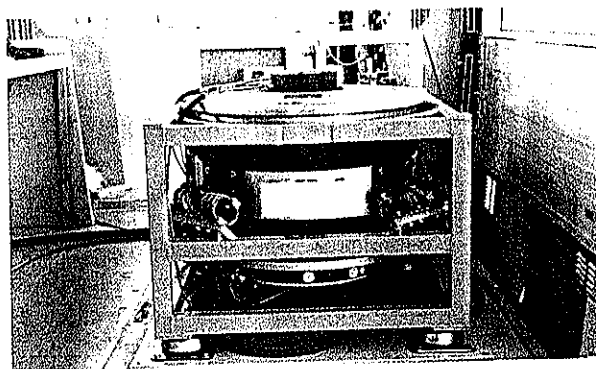
Depuis plusieurs années une dizaine de trolleybus articulés Neoplan fonctionnent à Bâle avec des volants d'inertie Magnetmotor de première génération tournant à 12000 tours. L'objectif est de supprimer les fils aériens sur de courtes distances et d'améliorer la récupération d'énergie sur l'ensemble de la ligne : un gain de 25% de la consommation totale est annoncé.

Dans l'ensemble, parmi les trolleybus actuellement en service dans le monde, peu sont véritablement bimodes comme le PER 180 déjà cité mais un certain nombre disposent d'une source auxiliaire de puissance réduite sous forme diesel, ou parfois batterie : des trolleybus fonctionnent en Italie et au Canada avec des batteries SAFT du type STH.

Les systèmes intermédiaires déjà évoqués expérimentent une bimodalité énergie. Le TVR de Bombardier a été exploité de manière expérimentale sur le site du Transval de Marne en Région Parisienne à l'aide d'un groupe diesel fonctionnant en dehors du tronçon guidé électrifié,



5. Ensemble batteries plomb du type Genesis de Hawker pour expérimentation sur un système intermédiaire: le TVR. Photo Bombardier.



6. Expérimentation sur muet tramway d'un volant d'inertie de la génération actuelle (équivalent à ceux en service sur le trolleybus de Bâle), sur le site Alstom de La Rochelle.

par ailleurs sur le site de Crespin des essais ont débuté avec un prototype équipé d'une batterie au plomb améliorée, de l'ordre de 1,5 t. Le Translohr STE de LOHR Industrie (tramway sur pneu toujours guidé) en est au stade des essais sur le site de l'usine, et est pour l'instant équipé d'une batterie Genesis de 900 kg au plomb.

En matière de tramway, ALSTOM a réalisé à l'automne 1999 sur le site de l'usine de La Rochelle une expérimentation d'un muet avec un volant d'inertie de première génération comparable à ceux en service sur les trolleybus de Bâle. Cela a permis de montrer l'utilisation d'un volant d'inertie comme seule source d'énergie entre deux stations, avec recharge pendant le temps d'arrêt (de l'ordre de 15 à 20 s). Ces essais préliminaires (avec un volant pas développé spécifiquement pour l'application tramway) valident l'objectif d'entraînement d'un véhicule de l'ordre de 40 à 50 t à des vitesses de 40 à 50 km/h sur une interstation typique de 500 m.

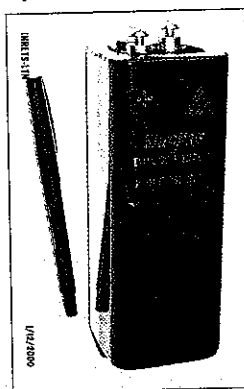
5.2 Evolution des composants

5.2.1 Les batteries

Le programme horizontal SIVTHEC subventionné par le PREDIT (Simulation d'un Véhicule de Transport Hybride Electrique Collectif) a pour objectif d'analyser

les potentialités de plusieurs filières de batteries actuellement à l'ordre du jour pour des applications sur véhicules bimodes ou hybrides : Nickel-Cadmium (STM, STH et STX de SAFT), plomb amélioré (batterie Genesis de Oldham), Lithium-Ion de SAFT, Lithium-Polymère de Bolloré-EDF.

Ce programme transversal piloté par l'INRETS-LTE regroupe les fabricants de ces diverses batteries, un laboratoire d'essais (ARMINES), la



7. Exemple d'une première génération de composant supercondensateur 2700 F sous 2,5 V.

RATP, et des constructeurs de matériels de transport collectif : systèmes intermédiaires et tramway. Le projet déborde des seules applications bimodalité et associe aussi d'autres partenaires intéressés à divers titres par les batteries : EDF, PSA.

Un logiciel est développé comme aide au dimensionnement de ces divers types de batteries, en tenant compte des conditions économiques représentatives d'une utilisation réelle. Contrairement au Nickel-Cadmium qui bénéficie de travaux antérieurs importants, dans le cadre de ce programme les batteries au lithium et au plomb amélioré font l'objet d'essais de cyclage longue durée.

5.2.2 Les volants d'inertie

Contrairement aux batteries et aux supercondensateurs, les volants d'inertie ne bénéficient pas actuellement de l'effet d'entraînement d'applications potentielles sur véhicules électriques, mais très récemment un regain d'intérêt a eu lieu en Allemagne pour ce composant, pour divers types d'utilisation dans les transports collectifs :

- une expérimentation d'un volant stationnaire a lieu dans une sous-station des tramways de Cologne afin d'améliorer la récupération d'énergie, dans le cadre d'un programme associant Siemens et MagnetMotor ;
- des volants d'inertie embarqués sont à l'ordre du jour dans le cadre de plusieurs programmes de réalisation de véhicules ferroviaires légers hybrides.

Ainsi les progrès réalisés sur ces composants pour d'autres applications pourraient aussi profiter à la bimodalité.

5.2.3 Les supercondensateurs

L'année 1999 a marqué le lancement de la fabrication industrielle de ces composants du fait de l'engagement de Siemens, avec sa filiale EPCOS, dans une unité de fabrication annoncée comme pouvant atteindre une capacité de 6000 unités par jour en 2000 (unité de 2700 F-2,3 V).

En France des supercondensateurs sont en cours de développement par l'industriel SAFT dans le cadre d'un projet PREDIT, et par ailleurs des essais de caractérisation de performances sont réalisés pour divers types de composants par l'INRETS-LTN.

6. Conclusion

On assiste actuellement à une diversification des matériels de transport collectif urbain, notamment des TCSP (Transports Collectifs en Site Propre de surface), dans la mesure où le développement de nouveaux systèmes guidés sur pneus dits intermédiaires n'est pas contradictoire, bien au contraire, avec la diffusion du tramway classique sur fer qui est ainsi stimulé pour évoluer. De même, en matière d'alimentation en énergie, il y a une juxtaposition d'études et d'expérimentations de solutions très variées ; il est difficile de prévoir la diffusion respective de chacune de ces solutions dans la mesure où leur pertinence dépendra non seulement des évolutions technologiques mais également de décisions de nature politique, par exemple quant à la non acceptation des fils aériens qui pourrait intervenir dans certaines villes pour des distances plus ou moins longues.

Compte tenu de la diversité des contextes, les travaux sur la captation par le sol, sur la pile à combustible, sur le diesel-électrique, le cas échéant associé à une hybridation, n'enlèvent rien à l'intérêt de la bimodalité énergie qui permet d'associer la solution classique de la captation avec une source embarquée. A l'intérieur même du concept de bimodalité énergie on peut envisager des solutions technologiques différentes en fonction des cahiers des charges, et il peut y avoir une compétition entre plusieurs dispositifs de stockage d'énergie électrique.

Les auteurs



Claude Soulas a obtenu un diplôme d'ingénieur IDN-Centrale Lille en 1974, et a occupé depuis 1978 plusieurs postes dans le domaine des transports. Actuellement Directeur de Recherche au Laboratoire des Technologies Nouvelles de l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS), il intervient plus particulièrement dans les transports collectifs urbains.