

1661 Liara N°16 Bus à faible émission

LES BUS URBAINS A PROPULSION HYBRIDE

Laurent DAUBY, UITP, Mai 1999

1. PROJET ET CONTEXTE

Dans le cadre de sa politique en matière d'utilisation rationnelle de l'énergie, la Commission européenne dispose d'un instrument d'évaluation des mesures prises dans le domaine des transports : le programme THERMIE.

L'UITP (Union Internationale des Transports Publics) a entrepris, en collaboration avec ENTRAC (Energy Transport Actions Ltd.) et VAG (Verkehrs-Aktiengesellschaft Nürnberg), un projet dans ce cadre afin de photographier l'état de l'art de la technologie hybride-électrique et diesel-électrique dans le champ du transport public.

L'UITP ne vous est pas inconnue puisque vous participez à ce Congrès.

ENTRAC est une société de consultance en ingénierie spécialisée en matière d'énergie, surtout pour les applications de transport. ENTRAC effectue de longue date des études et évaluations pour le compte d'autorités nationales et locales, de grandes entreprises et de la Commission européenne.

VAG, l'entreprise de transport public de Nürnberg, a célébré son 75^{ème} anniversaire en 1998. Cette entreprise est très soucieuse de l'environnement et possède l'une des flottes de bus au gaz naturel les plus importantes d'Allemagne. Elle expérimente actuellement des bus diesels-électriques MAN en conditions d'exploitation réelle.

Objet du projet :

Les objectifs principaux de ce projet sont :

1. d'établir l'état de l'art de la technologie,
2. d'identifier les contraintes et les opportunités techniques et financières,
3. d'étayer ceci par plusieurs études de cas représentatives,
4. de publier et diffuser les résultats et les conclusions.

Ces objectifs ont pu être atteints principalement grâce aux contacts établis notamment avec deux Commissions de l'UITP, celle pour l'Etude des Bus et pour le Management des Bus et lors d'échanges plus larges lors d'ateliers ou de la conférence en décembre 1998.

2. INTRODUCTION

La plupart des villes connaissent des problèmes de circulation grandissants (congestion et émissions) qui détériorent la qualité de vie. L'une des manières les plus efficaces de résoudre ce problème consiste à combiner de manière intégrée l'adoption de technologies plus écologiques et parallèlement, d'encourager un transfert modal de la voiture individuelle au profit des transports publics, de la marche et du vélo. Les véhicules de transport public hybrides pourraient apporter une

réponse aux deux volets en améliorant les technologies de transport public et en offrant un service efficace et une alternative attractive à la voiture privée.

Nous sommes convaincus que les bus urbains de l'avenir circuleront sans émissions. En attendant, les bus hybrides peuvent constituer un premier pas intéressant.

Un bus hybride est mu par un (des) moteur(s) électrique(s) alimenté(s) alternativement par des batteries (ou tout autre système de stockage de l'énergie) ou par l'électricité fournie par un moteur à combustion interne couplé à une génératrice embarquée, une pile à combustible ou des caténaires. Aussi, ces véhicules apportent-ils une parade aux principaux inconvénients des véhicules électriques purs : l'autonomie limitée liée aux batteries ou la nécessité d'une infrastructure fixe d'alimentation. En outre, ils devraient consommer moins et être moins polluants.

Il faut différencier ces hybrides de la traction diesel-électrique pure. Cette configuration n'est pas équipée d'un système intermédiaire embarqué de stockage de l'énergie et ne permet donc pas la récupération de l'énergie de freinage, ni l'écèlement du régime du moteur diesel, ni la conduite en « émission zéro » sur certaines portions du parcours. Toutefois, elle offre la possibilité de mettre au point certains composants (moteurs de roues) qui pourront être intégrés ultérieurement dans des configurations hybrides.

Les avantages théoriques de la technologie ont incité bon nombre de villes, sociétés de transport et constructeurs de véhicules européens (quelques 50 bus DE et 50 hybrides en Europe occidentale), mais aussi américains (14 projets identifiés aux USA) et d'ailleurs à développer et tester au cours de ces dernières années une large gamme de véhicules hybrides-électriques et diesels-électriques. En Europe, la plupart de ces activités ont bénéficié du soutien du programme THERMIE de la Direction générale pour l'Energie de la Commission européenne (DG XVII).

Toutefois, l'innovation n'est pas un but en soi : elle doit correspondre à des besoins non couverts. Aussi, la traction alternative a plusieurs justifications :

- Répondre au renforcement de la législation en matière d'émissions (Euro 3 et 4)
- Améliorer l'image du bus qui représente en moyenne 70 % des de la production de TP.
- Répondre aux attentes de la clientèle de plus en plus exigeante (plancher bas, douceur de conduite etc.)
- Réaliser des économies d'énergie, une fois la technologie maîtrisée
- Créer une nouvelle plate-forme technologique prête à recevoir la prochaine « révolution » attendue dans les technologies énergétiques (pile à combustible, supercapacités, etc.).
- Exigence ponctuelle de circulation sans émission, notamment pour la traversée des hypercentres

3. LA TECHNOLOGIE HYBRIDE

Les aspects abordés dans cette section sont très largement de nature théorique. Des études de cas montrent qu'il convient d'être prudent quant au fossé qui existe encore entre la théorie et la pratique de l'exploitation de bus hybrides-électriques et diesels-électriques.

3.1 Aspects techniques

Nous n'envisageons que les hybrides en série car la configuration en parallèle conserve de nombreuses contraintes de conceptions et est peu utilisée. Dans la configuration en série, le moteur à combustion interne entraîne la génératrice qui charge les batteries et/ou fournit l'électricité au(x) moteur(s)-roue(s). L'offre à ce niveau commence à mûrir et à se diversifier.

La plupart des bus hybrides utilisent une génératrice diesel ou essence comme source d'énergie primaire. Cependant, la nouvelle génération de trolleybus à Bâle et à Lausanne peut être qualifiée de «hybride» et des essais avec des alimentations par pile à combustible sont en cours à Chicago ou à Vancouver.

La technologie hybride présente des avantages par rapport à la chaîne de transmission mécanique classique. Grâce aux batteries qui absorbent les variations de charge à court terme au freinage et à l'accélération, il est possible de régler le moteur à combustion interne à un régime optimal constant en sorte d'éviter les changements rapides de régimes qui provoquent des « pointes » de consommation et, partant, d'émissions polluantes et sonores. En effet, lorsque le bus est davantage sollicité (accélération, relief etc.), l'appoint en électricité est fourni par les batteries. En outre, l'absence de batterie nécessite un surdimensionnement considérable du moteur diesel afin de permettre des accélérations adéquates pour une exploitation en « stop and go ». En configuration hybride, la charge de pointe étant fournie par la batterie, une exploitation performante est possible avec une unité moteur/génératrice assez petite et donc moins coûteuse et plus économique. Toutefois, un certain surdimensionnement de la génératrice par rapport à la valeur optimale théorique permet de pallier dans de bonnes conditions aux éventuelles ratés de la batterie embarquée...

Tout l'art de la mise au point de ce type de véhicule consiste à trouver la bonne équation entre le dimensionnement du moteur thermique et de l'unité de stockage intermédiaire d'énergie en fonction du rythme de l'exploitation du véhicule.

3.1.1 Gestion de la puissance

Les bus hybrides peuvent circuler de trois manières différentes :

- puissance de traction fournie exclusivement par le système de stockage embarqué (c.-à-d. électrique pur).

- puissance de traction fournie exclusivement par le moteur à combustion interne via l'unité génératrice (en vitesse de croisière), avec même possibilité de charge des batteries par le surplus d'électricité fourni,
- puissance de traction fournie par les deux sources (lors des sollicitations plus fortes).

A titre indicatif, voici un trajet typique d'un bus hybride dans la ville d'Aalborg (Danemark) :

Mode d'exploitation	Temps (%)
Moteur thermique – Charge des batteries à l'arrêt	15
Moteur thermique – Charge des batteries en conduite	29
Moteur thermique – Conduite avec batteries chargées	22
Récupération de l'énergie de freinage	9
Conduite électrique pure	25

Pendant 44% du temps, le système hybride permet de rentabiliser partiellement l'énergie qui, sans possibilité de la stocker, aurait été perdue!

En Europe, on note empiriquement l'utilisation de 2 moteurs 50/60kW pour les bus standard de 12m. L'enjeu majeur consiste à trouver la bonne équation entre la taille de la génératrice et celle des batteries pour permettre d'alimenter les moteurs de traction. C'est ici qu'intervient la notion de degré d'hybridisation du véhicule qui est le rapport exprimé en pour cent entre la puissance produite par les batteries et la puissance totale requise. Une traction diesel-électrique pure correspond à l'hybridisation "zéro"; Selon le contexte de l'exploitation, toutes les combinaisons entre la taille des batteries et celle de la génératrice sont possibles, jusque *in fine*, l'option "tout électrique".

	Diesel- électrique	Hybrides			Electrique
Exploitation	"suburbains"	"suburbains"	"mixte"	"centre-ville"	"centre-ville"
Groupe moteur/gén.	180/200 kW	160 kW	100/120 kW	40/60 kW	
Batteries		40 kW	60/80 kW	120 kW	180 kW

Combinaisons typiques pour un bus standard de 12 m (sources Siemens)

En fait, de nombreux facteurs doivent être pris en considération lors du paramétrage de la configuration hybride: les rendements relatifs de divers composants du système, le ratio poids/puissance, la topologie du réseau etc. Il est néanmoins essentiel de ne pas sous-estimer la puissance du moteur thermique. La taille des batteries sera inversement proportionnelle à celle du moteur thermique et en forçant le trait, au volume des émissions.

3.1.2 stockage de l'énergie

Le stockage intermédiaire de l'énergie électrique est le talon d'Achille de la technologie hybride et le succès de cette technologie dépend des solutions qui seront apportées à ce problème.

La majorité des véhicules hybrides actuels utilisent des batteries classiques plomb-acide. Or celles-ci ne sont pas satisfaisantes au point de vue de leur densité énergétique (quantité d'électricité stockée par rapport au poids de la batterie) ni de leur durée de vie (en termes de cycles de charge et de recharge). Pour des applications de traction, les batteries sont toujours extrêmement sollicitées, avec une succession rapide de périodes de charge et de décharge, ce qui affecte fortement leur durée de vie et donc leur économie (coût de maintenance et de remplacement). Leur poids est également un inconvénient, ce qui a inévitablement des répercussions sur le bilan énergétique du bus. De plus, en matière de bilan écologique, il convient de ne pas négliger la mise au rebut ou le recyclage des batteries.

C'est pourquoi les constructeurs suivent de près les progrès en matière de batteries à haute densité. Pour réaliser une véritable percée, les batteries devraient être fiables, avoir une durée de vie plus longue, une densité énergétique plus élevée et être moins chères. Actuellement, d'autres types de batteries sont déjà disponibles : nickel-cadmium, nickel-hydrure de métal. Les recherches sur les batteries lithium ions et au lithium-cobaltite sont prometteuses, mais ces nouvelles générations de batteries restent très onéreuses et ne sont pas envisageables actuellement à large échelle pour des applications de transport urbain.

Mais les batteries ne sont pas la seule option pour le stockage de l'énergie électrique. Le stockage par volant d'inertie est une autre option qui commence timidement à percer. Celle-ci était jusque récemment l'apanage de Neoplan/Magnet Motor; L'entreprise CCM aux Pays-Bas a entamé une expérimentation (volant à 15.000t/min) sur un bus urbains de NZH équipé d'un volant d'inertie CCM. Ce système de stockage cinétique a un rapport puissance/énergie élevé, ce qui convient pour les accélérations, mais ont une capacité de stockage d'énergie moindre que les batteries; le grand avantage de ce système par rapport aux batteries réside dans le nombre illimité de cycle de charges/décharges possible, ce qui le rend donc particulièrement indiqué pour une exploitation de type urbain. Toutefois, ce type de système reste encore expérimental

Les supercapacités sont également en cours d'élaboration et progressent rapidement. Il s'agit de condensateurs à très grande capacité qui permettent d'absorber de grande quantité de puissance (10.000 W/kg contre 1000 pour les batteries au plomb) peuvent supporter plus de 500.000 cycles de charges/décharges (contre 1000 pour les batteries) et sont plus légères que les batteries et ne requièrent pas de maintenance. Elles devraient ainsi être très efficaces en exploitation de type "stop & go", mais au stade actuel du développement, elles ne permettent pas encore de remplacer les batteries traditionnelles.

	batterie Pb	supercapacité	Volant d'inertie
Energie (Wh/kg)	10-100	1-10	5
Puissance (W/kg)	1000	10.000	500
Cycle (charge-décharge)	1000	500.000	Ø
Rendement	0,7-0,8	0,85-0,90	0,7-0,88

En fin de compte, le stockage idéal pourrait être la combinaison de batteries et de supercapacités ou d'un volant d'inertie. Le surcoût de ces supercapacités devrait largement être compensé par la durée de vie et les réductions de consommation d'énergie que l'industrie nous promet (40%).

Il apparaît nettement que c'est au niveau du stockage interne de l'énergie que réside l'un des principaux enjeux technologiques de ce type de traction.

3.1.3 Conception des véhicules

La traction électrique en général et en particulier les moteurs montés sur les moyeux permettent de libérer l'inventivité des concepteurs de véhicules puisque le couplage mécanique fixe entre le moteur, la boîte à vitesses, l'arbre de transmission et l'essieu et remplacé entièrement ou en partie par un simple câble électrique. Le moteur et la génératrice peuvent donc être positionnés librement, les batteries placées sur le toit (attention à l'équilibre et à la résistance de la structure!) ou sous le plancher. Le moteur de traction est idéalement incorporé dans les moyeux des roues reliés par des essieux portiques, ce qui permet davantage de configurations de plancher bas intégral. Les bus de Luxembourg, équipés d'un système d'agenouillement, ont une garde au sol de 6 cm aux arrêts!

3.1.4 Rendement énergétique global

L'efficacité énergétique de la configuration hybride dépend du bilan final des facteurs entraînant une plus grande consommation d'énergie et des facteurs permettant une économie d'énergie par rapport aux bus diesels classiques.

FACTEURS SUSCEPTIBLES D'AUGMENTER LA CONSOMMATION D'ENERGIE	FACTEURS SUSCEPTIBLES DE DIMINUER LA CONSOMMATION D'ENERGIE
Poids des éléments de stockage et de gestion de l'énergie électrique	Gain de poids dû au moteur plus petit et à l'absence de certains éléments mécaniques
Pertes d'énergie lors des transformations en énergie électrique	Efficience accrue de la traction électrique
Perte de rendement due à la multiplication des éléments de la chaîne cinématique	Efficience accrue du régime constant optimal de la génératrice thermique
	Possibilité de récupération de l'énergie

	de freinage
	Rentabilisation de l'énergie produite lors des arrêts

La possibilité de récupération de l'énergie de freinage est limitée par les capacités dynamiques d'absorption d'énergie par les éléments de stockage de l'énergie électrique. La technologie de la récupération de l'énergie est éprouvée en mode ferré ou chez les trolleybus lorsque le courant électrique produit au freinage peut être renvoyé dans le réseau, mais il en va tout autrement avec un circuit fermé! Les batteries doivent en effet être aptes à absorber instantanément jusqu'à 500 ampères à une tension de 300 volts (dans le cas de 2 moteurs de 75 kW), ce qui, dans l'état actuel de la technologie, affectera sérieusement la durée de vie de la batterie. Cette problématique est la raison pour laquelle la technologie hybride ne peut pas encore être considérée comme achevée à l'heure actuelle.

Ces facteurs contribuent à une réduction de la consommation. Ces promesses ne peuvent être réalisées que si le système complexe de gestion des flux énergétiques est bien configuré et réglé! Un bus hybride mal réglé consommera plus que son homologue au diesel. Les expériences suggèrent une économie de consommation réelle d'au moins 20%. Il est difficile d'interpréter ces chiffres issus de tests de prototypes. En outre, des cycles de mesures adéquats pour véhicules routiers à récupération d'énergie de freinage sont nécessaires parce que l'effet de celle-ci ne peut pas être simulé en atelier. En outre, il faudrait tenir compte d'éventuels autres sources d'énergie comme par exemple la recharge « classique » des batteries à l'arrêt ou l'alimentation par caténaire.

Les tests effectués à Nürnberg avec des bus diesels-électriques sans stockage intermédiaire concluent que la traction diesel-électrique pure ne permet pas d'escompter de gains de consommation en raison de :

1. de l'impossibilité de la récupération de l'énergie de freinage
2. de l'impossibilité de stocker l'énergie produite à l'arrêt,
3. la nécessité d'installer un moteur diesel classique de taille normale
4. la multiplication des pertes de rendements dues à l'ajout d'auxiliaires supplémentaires dans la chaîne cinématique

3.1.6 Impact écologique

Ces réductions de consommations escomptées devraient se traduire par une réduction des émissions. Globalement, le couple supplémentaire fourni par les batteries lors des accélérations permet d'écarter les pointes de puissance demandées au moteur thermique et donc de réduire significativement le NOx et les particules pour atteindre des performances égales à celles du gas naturel. Localement, la possibilité de circuler sans émission sur des trajets plus ou moins longs est un avantage considérable. Aalborg a observé 88% de réduction sur le NOx, 30% pour le CO et 100% pour les particules; Gênes suggère une réduction globale des émissions de 25% par rapport au diesel. Toutefois, ces valeurs doivent encore

être étayés par des données comparables et confirmées sur base de mesures effectuées en exploitation et sur des flottes plus importantes.

Les bus hybrides sont également moins bruyants que les bus diesel, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur. Gênes a mesuré une baisse du niveau sonore de 3 dB(A) et Stuttgart 5dB(A) à l'extérieur du véhicule et un niveau égal à l'intérieur.

L'introduction des normes EURO3 et EURO4 renforcera les contraintes qui pèsent sur la technologie diesel, et la traction hybride pourrait se profiler en tant qu'alternative technologique intéressante dans ce cadre. Toutefois, les progrès de la technologie ont jusqu'à présent permis aux moteurs diesels de respecter les plafonds légaux.

3.2 Données d'exploitation

3.2.1 fiabilité

La fiabilité et le taux de disponibilité des véhicules sont des facteurs cruciaux pour les exploitants. Dans les projets étudiés, la disponibilité oscille entre 50% (Aalborg) à >90% (Stuttgart). Plutôt que d'y voir des chiffres décevants, il faut considérer qu'il s'agit ici de prototypes, dont certains ont déjà des performances très honorables! Outre la fiabilité des composants mécaniques et électriques, un élément clé est la fiabilité des équipements électroniques ou du système de gestion de l'énergie. Dans nos études de cas, les exploitants ont collaboré longuement avec les constructeurs pour améliorer les taux de disponibilité insuffisants des débuts. A Stuttgart, par exemple, il a fallu 18 mois pour améliorer la technologie et obtenir une disponibilité de 90%.

3.2.2 Maintenance

Les expériences menées jusqu'à présent indiquent que, moyennant une formation adéquate des mécaniciens, la maintenance courante ne pose pas de problème. Le freinage électrique permet de réduire considérablement les frais de maintenance des pièces de freinage mécanique (qui reste évidemment installé en tant que système de freinage auxiliaire). Le diagnostic assisté par ordinateur est essentiel pour ce type de véhicule, mais les réparations peuvent s'avérer extrêmement complexes, surtout en ce qui concerne l'électronique de puissance, et il est peu probable qu'elles puissent être effectuées dans les propres ateliers de l'exploitant. Le succès de la nouvelle technologie dépendra alors aussi de l'évolution des méthodes de gestion dans les entreprises exploitantes.

3.2.3 Acceptation par le personnel et le public

La formation des chauffeurs est vitale car le type de conduite et les attitudes affectent directement les performances énergétiques, la fiabilité du véhicule et l'acceptation par les usagers. Ces bus diffèrent des bus classiques en de nombreux points, mais

semblent être bien acceptés par le public. En particulier les accélérations plus douces dues à l'absence de transmission mécanique et le plancher bas intégral sont des améliorations reconnues par la clientèle. Les passagers apprécient également la conduite silencieuse, même s'ils s'étonnent parfois du niveau sonore perçu comme élevé lors des arrêts puisque le moteur tourne à régime constant. Les riverains, eux, apprécient la conduite émissions zéro et l'absence de hurlement des moteurs diesel lors des accélérations.

3.3 Gestion, aspects financier et autre

Nous avons passé en revue la technologie, mais la question qui se pose est de savoir si cette traction pourra réaliser une percée sans subventions. Quand pourra-t-on envisager une exploitation économiquement viable?

3.3.1 Disponibilité, risque industriel

Un autre projet européen, SAGITTAIRE, a tenté de démontrer la viabilité économique de la technologie hybride. Or, la plupart des partenaires du consortium, à l'exception de la Ville de Luxembourg, n'ont pas encore trouvé une offre industrielle satisfaisante. Seuls cinq constructeurs ont répondu à l'appel d'offre lancé et deux seulement estimaient pouvoir répondre aux exigences du cahier des charges du consortium, mais seulement à l'horizon de l'an 2000. En outre, après un an et demi de résultats pourtant plutôt satisfaisants et prometteurs, la société DELPHI, filiale de GM, qui produisait les batteries employées à Luxembourg a décidé de se retirer de ce marché... De quoi éveiller des questions! Comment opter pour cette technologie sans être certain de la pérennité de l'offre?

Les exploitant ne s'engageront sur la voie de la technologie hybride que lorsque les constructeurs seront capables de garantir des taux de disponibilité économiquement viables et surtout un service après vente durable.

3.3.2 Coûts et Marchés

Les bus hybrides actuellement disponibles sont entre 25% et 100% plus chers à l'achat que leurs équivalents diesels Ceci est en partie dû au fait qu'ils sont encore tous au stade pré-commercial. Il faudrait peut-être relativiser ces coûts en tenant, dans le budget de l'exploitant, du coût total du cycle de vie (LCC) qui est potentiellement moins élevé pour le bus hybride, grâce à la longévité des éléments électriques (sauf la batterie), bien que ceci ne puisse pas encore être confirmé. Dans le budget de l'autorité organisatrice, la réduction des coûts externes liés à la pollution et au bruit grâce à la technologie hybride doit également être prise en compte.

En fin de compte, les coûts de la technologie ne baisseront pas de manière significative et ne pourront pas être comparés valablement avant que ces véhicules ne soient produits en série et ceci ne pourra se produire que lorsque la technologie sera davantage éprouvée. Quelques générations de prototypes et de présérie seront

probablement nécessaires, avant que ce stade de maturité technologique et commerciale ne soit atteint.

Le bus hybride a la vocation de concurrencer le bus diesel classique sur la plupart des réseaux urbains. Si le progrès et la maturation technologiques le permettent, des segments commerciaux de plus en plus larges devraient être dégagés pour ce type de véhicule, sans imposer de coûts ni de risques indus aux différents acteurs impliqués. Le marché des trolleybus constitue une telle extension du marché de la technologie hybride puisque le trolleybus hybride ne se distingue du bus diesel-hybride que par les caténaires et une génératrice diesel « de secours » plus petite. Bien que les trolleybus n'aient en principe pas besoin de stockage d'énergie intermédiaire, la présence de tels systèmes dans les véhicules permet d'exploiter un plus grand nombre de véhicules sur un réseau donné sans augmentation de la capacité du système électrique. Ceci s'applique aux nombreux réseaux de trolleybus en Suisse, mais le plus grand marché existe dans les pays de l'Europe centrale et orientale ou dans les ex-républiques soviétiques où des dizaines de réseaux de trolleybus sont menacés et pourraient connaître une renaissance grâce à cette nouvelle conception de trolleybus hybride. En outre, des trolleybus ainsi équipés peuvent parcourir une certaine distance sans ligne aérienne, par exemple de grands carrefours ou des gares routières.

Outre les coûts d'investissement, il faudrait pouvoir disposer de données sur les frais d'exploitation. Les économies de carburant théoriques ou "proto-mesurées" permettent d'envisager une réduction des coûts d'exploitation à condition que les batteries soient moins chères. Il faut toutefois considérer que l'exploitation en mode « zéro émission » a un prix. Il suffit de comparer les coûts d'exploitation des trolleybus et des bus ordinaires pour s'en rendre compte: en moyenne 15 % de plus. Mais ce prix est politique : pour le métro léger, des coûts de traction supérieurs sont acceptés; il en va de même pour les bus au gaz. Il s'agit donc d'une décision politiquement motivée de savoir si on souhaite obtenir des parcours en émissions zéro.

4. PERSPECTIVES

Le bilan nuancé présenté aujourd'hui révèle que nous avons affaire à une technologie encore largement à l'état de prototype. Il serait donc injuste de comparer sur base des données actuellement disponibles la technologie hybride au bus diesel classique. Il a également fallu du temps pour mettre parfaitement au point le moteur diesel, et celui-ci continue d'évoluer. Nous pouvons tenter une estimation concernant les prochaines étapes de l'évolution du marché:

- 1997/1998 Prototypes de bus hybrides
- 2000 Hybrides en moyennes séries / piles à combustible prototypes
- 2001/2005 maturité du marché
- 2006/2008 Piles à combustible en séries

Carburants et sources d'énergie alternatifs

En outre, de nouvelles recherches identifient des sources d'énergie alternatives pour les véhicules hybrides comme par exemple le gaz naturel, les biocarburants ou les piles à combustibles. Dans bon nombre des projets aux USA la génératrice est entraînée par un moteur au gaz (Alameda, Chatanooga/Tennessee, Cleveland, Indianapolis airport, etc.) Théoriquement, ces alternatives peuvent toutes être insérées dans le modèle hybride de base, mais ce processus serait facilité par une utilisation plus vaste de composants standardisés. De plus, allier les difficultés techniques des hybrides avec "les incertitudes" d'autres motorisations moins éprouvées que le diesel complique encore la tâche.

Mesures de construction

Un des grands inconvénients des bus hybrides et diesels-électriques est le poids plus élevé par rapport aux véhicules classiques. Le recours plus systématique à des matériaux légers pourrait remédier à cela, mais aurait automatiquement des répercussions en terme de coûts. Ici également, la production de masse est attendue. La ville d'Amsterdam a coordonné un consortium industriel et a réalisé un prototype en éléments sandwichs d'aluminium et de matériaux composites.

5. CONCLUSIONS

La technologie hybride existe et les évolutions actuelles sont prometteuses. Il existe des perspectives de changements profonds du concept classique de bus urbain tant du point de vue de la technologie motrice que de celui de la conception des véhicules. A l'heure actuelle, pour l'exploitant la technologie hybride est encore au stade expérimental. Pour franchir le cap de la production commerciale, il faut résoudre une série de difficultés : disponibilité, fiabilité, coût. Même si des prototypes et de petites flottes de démonstration circulent, il reste encore du chemin à parcourir avant d'atteindre la maturité de ce concept séduisant.

Il faut la production de séries plus importantes de bus innovants dont la fiabilité soit sensiblement meilleure et le coût plus bas. Si des investissements massifs avaient été consentis dans le domaine de la traction des bus - comme cela a été le cas pour le matériel de métro léger ou pour le secteur automobile, la technologie serait probablement bien plus avancée.

L'un des éléments clés en matière de fiabilité sera le système de stockage et de gestion des flux énergétiques qui sont le cœur même du fonctionnement du système hybride. En outre, il n'existe pas encore de données éprouvées et comparables en matière de consommation et d'émissions. Des procédures satisfaisantes de tests se font encore attendre. Elles contribueraient également à la mise au point de composants standardisés, à une analyse de la consommation énergétique, des émissions et des coûts sur la durée de vie et fournirait par conséquent des données équitables pour toute comparaison avec des bus classiques.

Pour obtenir les gains écologiques escomptés, il est indispensable d'envisager toutes les options pour optimiser l'utilisation de l'énergie primaire. La technologie hybride

est l'une des pistes envisageables, mais beaucoup d'investissements de recherche doivent encore y être consacré.

Par rapport aux hypothèses de justifications de départ, on constate :

- Emissions : les avantages théoriques restent à confirmer
- Amélioration de l'image du bus, confort etc. : objectif atteint
- Economies d'énergie : restent à confirmer
- Exigences ponctuelles de ZEV : objectif atteint
- Plate-forme pour développement futurs : objectif atteint

UTP