

LES CARBURANTS ALTERNATIFS POUR LES TRANSPORTS EN COMMUN URBAINS DE SURFACE

Jean ORSELLI

Conseil général des Ponts et chaussées,
section des Affaires scientifiques et techniques

1674

Les transports en commun de surface sont source de pollutions parfois très importantes au niveau local, même si leur importance est faible à des niveaux globaux.

Le champ est ici restreint aux « transports collectifs urbains de surface » du type « autobus » ou « trolleybus », y compris les « tramways sur pneus guidés » sur tout ou partie de leur trajet. Les transports en site propre, comme le tramway et les transports « hectométriques » utilisant tous comme énergie l'électricité, dont les pollutions sur le plan local sont nulles, ne sont pas concernés.

Une mission parlementaire a fait le point sur ces solutions en 1995 [1] et recensé de très nombreuses solutions opérationnelles, qui diminuent fortement les pollutions dues aux transports en commun de surface. On ne s'attachera pas ici à faire l'inventaire des recherches et prototypes les plus récents, mais à délimiter les grandes options de ce champ.

L'ÉNERGIE DANS LES TRANSPORTS EN COMMUN DE SURFACE

On estime à 800 000 Tep/an la consommation de l'ensemble des autocars et autobus en France dont 97,1 % de gazole.

Les consommations varient fortement selon les types de transports et

sont mal connues. Des enquêtes donnent les chiffres suivants : 40 l/100 km pour les autobus urbains ou scolaires, 24 l/100 km pour les autocars interurbains.

On peut donc grossièrement estimer la consommation :

– des autobus urbains des lignes régulières à 280 000 tep/an ;

– de l'ensemble des trafics « urbains » tous usages confondus à environ 400 000 tep/an.

LES NUISANCES DES TRANSPORTS

Le bruit est, en ce qui concerne les transports urbains de surface de voyageurs, la principale nuisance en

Tableau 1 – Évolution des trafics et consommation des autobus et autocars [2]

	1980	1990	1994
parc	57 000	68 000	77 000
trafic (milliards véhicules.km)	1,8	2,1	2,3
carburants (millions m ³ gazole)	720	900	975

Tableau 2 – Trafic 1993 (millions véhicules.kilomètres y compris à vide) [2]

Autobus urbains réguliers	517
Cars interurbain	387
Autobus scolaires (en majorité urbain)	450
Ramassage entreprises	171
Occasionnel (surtout interurbain)	608
Total	2 133

dehors des pollutions atmosphériques. Le bruit concerne d'ailleurs non seulement les riverains de la voirie, mais aussi les passagers des autobus. La plupart des carburants alternatifs, trolleybus, G.P.L., gaz naturel (GNV), diminuent fortement le bruit, seuls les carburants de biomasse n'ont aucun effet sur le bruit.

LES POLLUTIONS ATMOSPHÉRIQUES DUES AUX TRANSPORTS

On ne reviendra pas ici sur le détail des « polluants et systèmes de pollutions » : voir par exemple [3] [4] et [5], sauf pour un bref rappel.

Les moteurs à combustion interne émettent un très grand nombre de polluants.

- du gaz carbonique (CO_2), actif dans « l'effet de Serre » ;
- du monoxyde de carbone (CO), aux effets nocifs sur la santé ;
- des oxydes d'azote (NO_x), qui sont un précurseur de l'ozone O_3 , aux effets très importants sur la santé. L'un d'eux, l'hémioxyde d'azote N_2O , est un très important gaz à effet de serre ;
- des hydrocarbures « HC » ou « HCNM » (« HC non méthaniques »), émis par les moteurs, le stockage du carburant, les réservoirs, ou bien lors des « pleins », sont aussi un précurseur de l'ozone O_3 , aux effets très importants sur la santé. Les composés hydrocarbonés « oxygénés » ont les mêmes effets : on les regroupe avec les « HC non méthaniques » sous le nom de « COV », « Composés Organiques Volatils » ;
- du méthane (CH_4), dans le cas de moteurs utilisant le Gaz Naturel pour Véhicules (GNV). Il ne produit pas d'ozone localement, du fait de sa stabilité et n'a aucun effet sur la santé. C'est pourquoi on le distingue aux USA des autres hydrocarbures (HCNM et COV). Il intervient en théorie dans l'effet de serre, mais du fait de sa durée de vie relativement courte, de l'ordre de la dizaine d'années, ses émissions actuelles ne compromettent pas l'avenir ;

- certains hydrocarbures HCNM ont des effets particuliers sur la santé, notamment les « Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques » (HAP), de même que certains COV issus de carburants « de biomasse » (notamment les aldéhydes, acroléines etc.) ;
- des particules (moteurs diesels), réputées avoir des effets mal connus sur la santé ;
- du plomb ajouté au supercarburant, problème en voie de disparition car proscrit pour les véhicules neufs par les normes européennes de 1993 ;
- de l'oxyde de soufre (SO_2) : naturellement présent dans le pétrole, il est pratiquement éliminé dans les essences, mais il en reste encore dans le gazole dont il pourrait être pratiquement éliminé selon le degré de raffinage.

Les transports émettent en France la plus grande part du CO (69 %), des COV (59 %) et des NO_x (73 %), ainsi que 30 % du CO_2 , mais seulement 13 % du SO_2 dont 90 % provient de la circulation routière. Aujourd'hui dans le monde, les véhicules particuliers et industriels utilisent à 98,8 % des carburants pétroliers liquides, et à 99,8 % des moteurs à combustion interne à 4 temps. En France, ces pourcentages sont encore plus proches de 100 %.

On distingue classiquement « cinq niveaux » de pollutions aériennes, tous plus ou moins concernés par l'automobile :

- *local* : pollutions dans un parking ou sur une place ou une artère très fréquentée à l'heure de pointe ;
- *zonal* : zone de pollution d'une grosse usine, ou bien différenciation entre tel ou tel quartier à l'intérieur d'une même grande agglomération ;
- *régional*, ou des grandes conurbations : le « grand Los Angeles », l'agglomération parisienne etc. ;
- *transfrontière* : les « pluies acides » en Europe du Nord, ou sur de grandes étendues en Amérique du Nord (Canada) ;
- *planétaire* : ozone stratosphérique, et surtout « effet de serre ».

En moyenne les autobus représentent en France :

- 2 % de l'énergie utilisée dans l'ensemble des transports urbains, dont 1,5 % pour les lignes régulières de transports en commun ;
- 2 % des gaz à effet de serre émis en zone urbaine, et 1 % pour l'ensemble des transports sur le territoire ;
- 2 % des émissions de HCNM, mais 4 à 6 % des émissions de NO_x ;
- 4 à 6 % des particules.

Localement il n'en est pas de même, du fait de la concentration des autobus sur certains itinéraires. Par exemple, s'il y avait des autobus au lieu de trolleybus à Lausanne, les taux de polluants seraient quadruplés place Saint François, cœur de la ville où passent 9 lignes de trolleybus. Les avantages apportés par l'utilisation de certains carburants alternatifs peuvent donc être élevé si l'on se situe aux « niveaux de pollution » « local » ou « zonal ».

Les hauts niveaux « local » et « zonal » de pollution sont liés à des concentrations de circulation sur certains axes ou quartiers. Ce sont les seuls pour lesquels le transport en commun de surface est réellement important.

LA RÉGLEMENTATION

Les autobus actuels obéissent à des normes de pollutions pour les véhicules neufs moins sévères que celles des voitures particulières.

Les normes européennes à venir sont inconnues, aussi est-il commode de se référer aux « normes californiennes évolutives », et notamment :

- à leur niveau le plus sévère pour les moteurs à combustion interne, dit « Ultra Low Emission Vehicle » (ULEV). Cette norme correspondrait à des étapes de la réglementation européenne à envisager vers 2010 pour les véhicules particuliers et plus tard pour les véhicules lourds ;
- au « zero emission vehicle » (ZEV), ou véhicule électrique.

La plupart des divers « carburants » envisagés ci-après pour les autobus

répondent aux niveaux les plus sévères potentiellement :

- le trolleybus répond à la norme ZEV ;
- le véhicule au gaz naturel répond à la norme ULEV ;
- l'hybride électrique répond à la norme ZEV en centre ville et ULEV ailleurs.

Par contre l'utilisation de carburant de biomasse n'apporte pratiquement pas de différence par rapport aux niveaux d'émission du moteur Diesel utilisant du gazole seul (sauf un peu moins de particules).

Les réglementations particulières

Certains pays ont développé l'usage de véhicules à carburant alternatif, par exemple l'Italie pour le gaz naturel. Ils disposent donc d'une **réglementation éprouvée par la pratique**. Ces règles sont « fonctionnelles » : c'est à dire telles qu'elles ont permis un développement effectif de ces carburants et ne comportent donc pas de « goulot d'étranglement » interdisant en pratique l'usage de ce carburant.

Les administrations des pays « novices », dont cette façon de procéder flatte l'idée qu'ils se font de leur importance, sont tentés de développer leurs propres règles ex nihilo, sur des considérations théoriques. Elles sont soutenues par les entreprises, qui désirent surtout éviter que telle technique, où ils sont en retard, soit importée en France trop facilement. Cette façon de procéder a de multiples inconvénients :

- cela peut imposer une condition économiquement ou pratiquement dirimante : un bon exemple en est l'abaissement de la vitesse de remplissage des réservoirs de GNV en France par rapport aux normes italiennes ou des USA, ce qui impose des temps de remplissage difficilement supportables ;
- la recherche se trouve compliquée ;
- cela fait fi de l'harmonisation européenne, qui interviendra tôt ou tard, les pays pratiquant en grand telle technique, confidentielle ailleurs, ayant évidemment toutes

les chances d'imposer leurs normes.

L'alignement « provisoire » sur les normes des pays les plus avancés serait la procédure la plus pratique, favorisant la recherche, les expérimentations et évitant l'apparition de contraintes dirimantes non raisonnables.

COMPLEXITÉ DE LA COMPARAISON DES SOLUTIONS ENVISAGÉES

La comparaison des solutions d'énergies alternatives dans le domaine des transports automobiles est un problème très complexe pour plusieurs raisons.

- 1) L'amélioration apportée par une solution dépend totalement du « niveau de pollution » auquel on se place : telle « bonne » solution sur les plans régional ou local peut n'avoir aucun intérêt pour l'effet de serre et vice versa. Une pondération est donc à faire entre les divers objectifs.
- 2) Même une fois choisi le « niveau de pollution », la multiplicité des polluants à considérer fait que l'on peut améliorer certaines émissions tout en en détériorant d'autres.
- 3) Les situations sont très différentes selon le type de fonctionnement énergétique du pays. Ainsi le trolleybus diminue les émissions aux niveaux local et régional dans tous les cas. Mais il produit plus d'effet de serre qu'un autobus Diesel si l'électricité est faite à partir de combustibles fossiles (cas de l'Italie) et moins si l'électricité est majoritairement nucléaire ou hydraulique (France et Suisse).
- 4) Enfin il peut être beaucoup plus profitable d'utiliser telle ressource énergétique dans un tout autre domaine que l'automobile vis-à-vis de l'effet de serre. C'est le cas de l'énergie de biomasse qui serait bien mieux utilisée pour le chauffage, ou de l'électricité nucléaire utilisée pour remplacer de l'électricité utilisant des combustibles fossiles.

UN GRAND CHOIX DE SOLUTIONS

On peut passer en revue les différentes solutions alternatives aux carburants pétroliers (et au moteur à combustion interne à 4 temps) :

- gaz de pétrole liquéfiés ;
- gaz naturel ;
- gaz « de récupération » ;
- carburants « verts » de biomasse,
- électricité ;
- autres « carburants » (hydrogène, aluminium, essences de synthèse).

Mais d'abord il faut présenter la « solution de référence » pour les autobus en France, le moteur Diesel. Bien entendu cette référence doit être celle des moteurs Diesel modernes, avec les possibilités de dépollution déjà établies. Il paraît illusoire de comparer le moteur Diesel et le moteur à essence dans le cas des autobus.

LE MOTEUR DIESEL DÉPOLLUÉ

L'évolution des normes des moteurs Diesel et des gazoles est rapide. Rappelons que le moteur Diesel est un excellent moteur pour ses qualités antipollutions au niveau « régional » :

- il émet très peu de CO ;
- il émet peu de HC imbrûlés, et avec des simples « pots oxydants », déjà utilisés ailleurs en Europe, il émet moins de HC qu'un moteur à essence à catalyseur trois voies, si on compte l'évaporation.

Ses points faibles sont sa production de NOx et de particules :

- une diminution très forte des niveaux d'émission de NOx dans l'avenir se heurte au type de combustion en excès d'oxygène du Diesel. Les recherches sur le catalyseurs de réduction des NOx en milieu oxydant se poursuivent sans qu'on soit sûr qu'elles aboutissent ;
- il produit des « particules » formées pour moitié d'imbrûlés et pour moitié d'impuretés du gazole (soufre, silicates). Leur production doit beaucoup à la qualité des gazoles.

Quant à l'effet de serre l'utilisation du Diesel est bénéfique par ses plus faibles consommations et émissions de CO₂.

Dans la pratique actuelle les flottes d'autobus utilisent généralement leurs propres stations-service, et achètent directement leur gazole « en gros ». Il leur serait donc facile de se procurer du gazole de meilleure qualité que celui qui correspond juste aux normes. Mais la réalité est très souvent exactement inverse : pour faire des économies, les flottes achètent des gazoles plus polluants que la moyenne des gazoles vendus au grand public.

Cette question va heureusement être bientôt en partie du passé avec le durcissement des normes de teneur en soufre vers 2005 en liaison avec la diffusion des pots catalytiques Diesel (déjà obligatoires sur les véhicules légers). Mais les effets sur la production de particules restera limités (sur les moteurs neufs ou anciens).

Les responsables d'une flotte d'autobus soucieux d'environnement pourraient à l'avenir acheter des gazoles de meilleure qualité que celui qui correspond juste aux normes et utiliser des véhicules disposant de pots catalytiques oxydants, même s'ils ne sont pas obligatoires.

Il est extrêmement souhaitable d'utiliser des moteurs disposant d'un pot oxydant (courant en Europe, mais non obligatoire en France) et un gazole de qualité supérieure aux normes (probablement peu prisé des services publics pour quelques centimes de plus).

LES VÉHICULES AUX GAZ DE PÉTROLE LIQUÉFIÉS (G.P.L.)

Le G.P.L. est constitué des hydrocarbures légers ayant 3 ou 4 atomes de carbone par molécule (propane, butane, leurs isomères et alkènes), liquéfiés par simple augmentation de pression. C'est un excellent carburant, disposant d'un excellent indice d'octane. Sa seule contrainte est celle d'un réservoir sous faible pression (20 bars).

Dans certains pays le G.P.L. représente 5 à 10 % du carburant automobile (Japon, Italie, Pays Bas). Il est notamment très utilisé dans les flottes de taxis de certains de ces pays. Les consommations en 1992 étaient les

suivantes de 25 000 tonnes en France contre 1 250 000 tonnes en Italie pour un parc automobile analogue.

En France le G.P.L. a souffert d'une politique fiscale aberrante, qui vient de changer. On ne peut pas encore dire quels seront les effets de ce changement.

Le G.P.L. est utilisé pour les autobus depuis longtemps dans certains pays :

- Vienne (Autriche) : les autobus de la ville fonctionnent au G.P.L., dont 200 depuis 20 ans ;
- Montpellier : quelques bus fonctionnent au G.P.L. ;
- Sydney (Australie) : Mercedes a remporté un appel d'offres lancé pour le remplacement de la flotte municipale d'autobus. Ils fonctionnent tous désormais au G.P.L.

Le G.P.L. présente des avantages potentiels analogues, quoique un peu plus faibles, à ceux du Gaz naturel pour véhicules (GNV) que nous examinerons ci-après. On atteint facilement les normes LEV et potentiellement ULEV pour les pollutions « locales », « zonales » et « régionales ». En ce qui concerne l'effet de serre, le G.P.L. contient moins de carbone que le gazole à énergie égale, mais plus que le GNV.

Les recherches se poursuivent dans de nombreux pays sur les moteurs spécialement conçus pour le G.P.L. (profitant notamment de son indice d'octane élevé). Avec ces moteurs produiront 20 à 25 % de moins de gaz à effet de serre que les moteurs équivalents à l'essence.

LE GAZ NATUREL POUR VÉHICULES (GNV)

Le gaz naturel, essentiellement constitué de méthane (et d'un peu d'éthane), est un excellent carburant, utilisé de façon absolument analogue au G.P.L. La principale différence tient à la pression plus forte du réservoir, environ 200 bars actuellement, donc d'un poids plus élevé. Les fabricants de kits d'adaptation sont ceux des kits G.P.L.

Le GNV est utilisé depuis longtemps en Nouvelle Zélande, Argen-

tine et en Italie, où il équipe 10 % des véhicules particuliers dans certaines régions. Il se développe très rapidement aux USA, notamment pour les autobus urbains, où il est même parfois utilisé sous forme liquéfiée. En Italie, Argentine, Mexique, aux USA, il existe aussi des flottes d'autobus ayant dépassé le stade expérimental. Beaucoup de pays développent rapidement ce carburant pour les autobus (USA, URSS, Amérique du Sud, P.V.D.).

Le GNV présente des avantages tant pour les « niveaux de pollution » local, zonal et régional, que pour l'effet de serre. En effet la stabilité du méthane fait que les émissions d'imbrûlés n'ont aucun effet localement : il met plusieurs années à se transformer en O_3 . C'est pourquoi les normes des USA ne le comptent pas comme un hydrocarbure (HC).

Compte tenu de son effet de diminution des « déchets valorisés », de sa moindre teneur en Carbone, de l'activité de ses imbrûlés sur l'effet de serre seulement double de celles des HC et enfin des faibles pertes lors de sa distribution, le gaz naturel diminue de 30 % les émissions à effet de serre par rapport aux carburants pétroliers.

Bien que le GNV soit déjà totalement opérationnel, une très vive activité de recherche sur les moteurs au GNV a été déclenchée récemment à la fois en Europe par les normes EURO 1993 et aux USA par les prescriptions d'achat de véhicules dépollués aux flottes publiques faites par l'Energy Policy Act de 1992. Les recherches portent sur des moteurs spécialement conçus pour le gaz (à indice d'octane élevé) et sur des réservoirs allégés (ou à pression réduite par des adsorbants).

On constate que les moteurs au GNV atteignent sans problèmes les normes californiennes LEV et qu'il semble possible d'atteindre les normes ULEV (les plus sévères) sans difficultés technologiques particulières.

Gaz de France et RENAULT V.I. mènent des recherches, des développements et des expérimentations, avec beaucoup de retard sur les réalisations étrangères. Ils n'ont obtenu

que très peu de subvention pour ces recherches.

Concernant les situations et les programmes en ITALIE et aux USA, trois points sont remarquables :

- 1) La volonté politique de développer ces carburants est concrétisée par une *fiscalité très favorable en Italie*.
- 2) Aux USA la volonté politique de développer ces carburants passe par *des impositions aux flottes publiques de « quotas d'achat »* évolutifs de véhicules à carburants alternatifs, ce qui crée des marchés.
- 3) *La recherche et l'industrialisation* découlent de cette volonté politique. A son tour la recherche permet de respecter les « sévérations » des normes à venir, et l'industrialisation abaisse les coûts.

Les administrations françaises ont des exigences pour les véhicules au GNV qui s'éloignent de celles des pays les plus développés comme l'Italie. Ainsi il est anormal d'exiger en France des décélération d'essai des réservoirs de 30 g, alors que l'Italie demande 12 g et les USA 15 g. Idem pour les vitesses de remplissage, les stations-service etc. Ces exigences interdisent d'utiliser des matériels existant déjà à l'étranger, d'où des pertes de temps et des coûts de développements de matériels spécifiques à la France.

Les expériences d'utilisation automobile de « biogaz » de digestion d'ordures ménagères, boues d'épuration de réseaux d'assainissement ou biomasse, sont à la mode. Or le « biogaz » ne diffère guère du gaz naturel fourni par Gaz de France et rien ne le prédispose à une utilisation automobile (au contraire : il est moins contrôlé). L'avenir de ce type de récupération d'énergie ne passe certainement pas par l'automobile. A contrario les échecs successifs d'expérimentations mal conçues de « biogaz » pour l'automobile peuvent discrediter la cause du gaz naturel. Un exemple très typique est celui de l'expérimentation menée à Lille, qui fonctionne très médiocrement, les problèmes d'épuration du biogaz n'étant pas réglés après plusieurs années.

En conclusion l'utilisation du GNV est encore plus intéressante que celle du G.P.L. Sa mise en place avec les techniques connues est facile. Tout est question de volonté politique, exprimée soit par une fiscalité favorable, soit par des impositions de quotas aux flottes publiques.

LES CARBURANTS DE BIOMASSE

On sait depuis longtemps utiliser des alcools ou des huiles végétales comme carburants. On estime que les

petites différences » des municipalités considérées.

Ces carburants sont très onéreux : avec les techniques agricoles actuelles, ces carburants coûtent en réalité 3,5 FHT par équivalent litre d'essence, contre 1,1 FHT pour les carburants pétroliers. A contrario le G.P.L. et le GNV n'entraînent pratiquement pas de surcoût.

Un « écobilan », validé par la « Commission Consultative Pour les Carburants de substitution » (CCPCS), met en évidence les comparaisons suivantes :

mg/kWh	Gazole	Avec 30 % de Diester	Filière Diester
CO ₂	1 060 593	895 448	169 174
SO ₂	1 484	1 128	267
HCNM	2 897	2 647	2 534
particules	876	639	523
NOx	18 547	18 192	20 083
CO	2 615	2 468	2 633
Bruit	idem	idem	idem

techniques agricoles modernes permettraient de produire, en y consacrant toutes les terres disponibles, moins de 5 % des carburants automobiles français. Au niveau européen, cette part tombe à 2 %. La question de l'utilisation de ces produits « purs » ne se pose donc pas : il est suffisant de pouvoir les utiliser en « additif » aux essence et gazole classiques, ce qu'on sait faire depuis 50 ans. Compte tenu de la faiblesse de la ressource, l'utilisation dans les autobus ne se justifie absolument pas par rapport à une utilisation pour l'ensemble des véhicules fonctionnant au gazole.

L'utilisation d'alcools dans le moteur Diesel, qui équipe 95 % des autobus et minibus, pose beaucoup plus de problèmes techniques que celle d'une huile. Aussi une des utilisations les plus développées en France est celle du Diester d'huile de colza.

Il existe plusieurs dizaines de flottes utilisant de tels autobus au Diester, réunies dans le « Club des villes Diester ». Les taux d'addition sont variés, de 5 %, 10 %, 30 % et 33 % sans aucune justification autre que de satisfaire le « narcissisme des

Les avantages sur les pollutions « locales, zonales ou régionale » sont faibles en CO, HCNM, NOx. Les seuls gains nets concernent les émissions de SO₂ et particules¹. En revanche ils produisent des polluants non réglementés mal connus. Pour les moteurs à huiles végétales pures les émissions seraient certainement dégradées avec les techniques actuelles. Pour l'avenir, les degrés élevés de dépollution envisagés pour le Diesel demanderont des techniques qui n'ont rien à attendre de l'utilisation d'additifs de biomasse. Déjà actuellement les émissions de HCNM, NOx, CO après pot catalytique d'un carburant additivé d'huiles végétales sont analogues à celles du gazole.

Le seul « avantage écologique » qu'on peut attacher aux carburants de biomasse est qu'ils ne créeraient pas d'augmentation de l'Effet de Serre.

Les cultures intensives (betteraves, colza) induisent des pollutions des nappes et des eaux libres mal connues par les engrais (nitrates) et pesticides. La production de Diester produit 80 g/kg de déchets, contre 1,57 g/kg pour le gazole : les effets de ces déchets sont mal connus. D'où l'hos-

tilité de certains écologistes à ces produits.

Quand on recherche la meilleure utilisation d'une surface agricole supposée dédiée à une production énergétique, on démontre facilement que la meilleure utilisation (à surfaces égales), en termes de réduction des importations de combustibles fossiles, d'effet de serre, d'emploi, est le bois de chauffage tout simplement. Et ceci dans des rapports 3 à 5. De même les subventions nécessaires pour les ramener aux « prix du marché » sont de l'ordre du tiers des subventions nécessaires aux carburants automobiles.

En conclusion une municipalité désireuse de promouvoir l'énergie de biomasse et d'améliorer ses niveaux de pollutions devrait en tout premier lieu développer le chauffage à la biomasse de ses bâtiments publics avant d'utiliser des carburants additivés dans son parc automobile.

LE TROLLEYBUS

Il existe en Europe une forte tradition d'utilisation massive des trolleybus, alors qu'en France les réseaux sont peu nombreux, et ne représentent localement qu'une faible part des transports en commun de surface. On prendra donc comme exemple de fonctionnement et de devenir d'un réseau de trolleybus celui de Lausanne en Suisse, développé depuis très longtemps (1932), toujours maintenu en service et régulièrement rénové selon les meilleures techniques disponibles.

L'agglomération de Lausanne compte en zone urbaine 200 000 habitants, plus 45 000 habitants de « banlieue rurale ». Les conditions d'exploitation du réseau de transports en commun de surface sont particulièrement dures à Lausanne : voies étroites, avec de très fortes dénivellées, vallées entaillant fortement le centre ville et concentration des axes de transports en commun sur quelques tronçons très chargés dans le centre, climat dur, enneigé, avec des différences au même moment selon les

quartiers dues à la dénivellation de près de 500 mètres entre le haut et le bas de la ville.

Le réseau de trolleybus est le plus important en transports de surface avec 11 lignes, utilisant 119 trolleybus avec 55 remorques², contre 82 autobus avec 9 remorques et 17 autobus articulés plus 5 minibus.

Les trolleybus assurent le service des lignes les plus chargées et offrent, avec leur remorques, une capacité supérieure à celles des autobus. Ils assurent donc, *sur le réseau de transport de surface* :

- 65,3 % des voitures.km parcourus ;
- près de 75 % des PKO (places kilomètres offertes) ;
- plus de 75 % du trafic en voyageurs.km.

La comparaison avec les réseaux français est éloquent : ainsi Lyon dispose de 116 trolleybus, sans remorques, et de 750 autobus. Les trolleybus y assurent moins de 15 % du trafic, en voyageurs.km. La différence est donc grande avec le réseau de Lausanne.

Le principal enseignement du réseau de Lausanne est la possibilité d'exploiter les trois quarts des trafics d'un réseau de surface avec des trolleybus.

Toutes les objections couramment faites au développement des trolleybus ont manifestement trouvées des réponses à Lausanne.

Le manque d'esthétique. Bien que ce ne soit que « notre opinion », Lausanne ne semble avoir rien à envier aux villes françaises sur le plan de l'esthétique urbaine, de la propreté, de l'ordre etc. Pourquoi en France le « câble du tramway » est-il beau, alors que le double câble du trolleybus est inesthétique ? Mystère des goûts et des couleurs...

La rigidité d'exploitation. On reproche couramment aux trolleybus les problèmes inhérents à la rigidité de leurs itinéraires. Mais à Lausanne les difficultés rencontrées en cas de chantier, de pannes de véhicules, d'indisponibilité du caténaire, sont maîtrisés grâce à un certain nombre de dispositions : groupe auxiliaire à moteur thermique permettant de cir-

culer à vitesse réduite et de gravir des pentes à 14 %, itinéraires « de secours » équipés de caténaires (boucles de retournement, tronçons de liaison entre lignes, etc.), secours possibles par autobus avec quelques autobus en attente. Un service de dépannage bien équipé peut intervenir sur place rapidement.

Un SAE (Service d'Aide à l'Exploitation) installé en 1991 permet de suivre très précisément les véhicules, avec lesquels on peut communiquer par radio, afin de déclencher les interventions du service de dépannage dans les meilleures conditions.

Les problèmes climatiques. Les conditions de Lausanne, plus dures que celles de toutes les villes françaises, prouvent qu'il y a des systèmes de dégivrage des caténaires apparemment efficaces.

La difficulté de « dépasser » sur les tronçons chargés. La conformation de la voirie de Lausanne et du tissu urbain a conduit à la création d'un pôle d'échange très important du réseau de surface avec les réseaux du métro « Ouchy-Saint François » et du métro léger (TSOL) dans le centre de Lausanne, place Saint François. En ce point particulier :

- 8 lignes de trolleybus, sur 11, passent sur un tronc commun ;
- il y a un arrêt dans chaque sens pour toutes ces lignes au même endroit ;
- les cadences de passage y approchent 50 véhicules à l'heure de pointe. L'étroitesse des trottoirs complique fortement les arrêts, qui se font en deux fois : descente et montée séparées.

Économie du trolleybus

Les Transports de Lausanne disposent d'une comptabilité analytique très poussée, identifiant chaque ligne et y affectant les coûts d'exploitation des services centraux (entretien notamment). Elle permet donc des comparaisons fiables. Des comparaisons économiques entre trolleybus et autobus ont été faites en 1993/94 à l'occasion de la réfection totale de l'infrastructure d'une ligne peu utilisée.

Avec les hypothèses économiques retenues à Lausanne, et dans les conditions propres aux lignes considérées, on peut estimer que le point d'équilibre entre trolleybus (amortissement d'infrastructures compris) et autobus se situe vers une cadence de 8 autobus simples à l'heure de pointe (4 en heures creuses). Si la charge est plus forte le trolleybus procure des gains d'exploitation. En pratique, à Lausanne, les lignes de trolleybus, sauf peut-être une ou deux, sont toutes moins coûteuses que des lignes d'autobus qui assureraient les mêmes services.

Les trolleybus évoluent avec les progrès de l'électronique de puissance. Lausanne vient de lancer un appel d'offres pour une nouvelle génération de trolleybus auprès de 20 fabricants européens consultés, dont plusieurs d'Europe centrale.

Le Trolleybus guide : le «TVR» et ses concurrents

On consultera sur ce sujet l'excellent article «Les systèmes de transport intermédiaires» de Michel Muffat, TEC N° 148 [6].

Le concept de «trolleybus guidé sur pneus» est à la mode. Tous les trolleybus modernes sont «bi-modes», avec un moteur thermique utilisé le plus souvent «en secours» comme à Lausanne. Ils peuvent donc s'affranchir de la ligne électrique sur certaines portions du parcours. Il existe des trolleybus utilisés réellement en «bimode» : cela économise l'infrastructure d'alimentation électrique sur une partie du parcours. Il suffit de rajouter un *guidage* sur la portion de fonctionnement électrique pour qu'il y fonctionne comme un tramway.

Le «Trolleybus Guidé» est apparu avec le prototype «GLT» («Guide Line Tramway») de «Brugioise et Nivelles» expérimenté à Rochefort en Belgique depuis 1985. Divers concurrents ont suivi :

- Mercedes-Benz avec le «O-Bahn», à Essen en Allemagne et Adélaïde en Australie ;
- en France un dérivé du «GLT» rebaptisé «TVR» («Transport sur

Voie Réservée»), dont les véhicules ont été redessinés pour se rapprocher des formes d'un tramway, avait été proposé pour Caen dès 1991. D'autres projets ont vu le jour depuis [6].

En capacité, et donc en débit, le «GLT» et ses concurrents ont des caractéristiques quasi identiques à celles d'un trolleybus comme celui de Lausanne : 200 passagers pour 24,5 mètres contre 196 passagers pour 23 mètres. Les autres caractéristiques sont comparables : vitesse commerciale, rampe maximum, intervalles etc.

Les promoteurs de ces systèmes en vantent l'originalité, mais il s'agit d'une **adaptation finalement mineure du «trolleybus bimode»**. La seule vraie différence est la possibilité de faire se croiser deux rames sur une largeur plus faible (6 mètres) que sans guidage (7 mètres), et donc de restreindre la largeur d'une double voie réservée pour trolleybus (ou autobus). Les autres avantages avancés portent tous sur des questions «d'image».

Gains pour l'environnement

Les trolleybus de Lausanne assurent une diminution globale d'environ 2 % à 4 % des émissions de NOx par rapport à une solution qui utiliserait des autobus de type moderne (dépollution de niveau Euro 2 par exemple).

Localement, sur un point de concentration comme la Place saint François, c'est presque 75 % des pollutions qui sont économisées par les trolleybus.

Vis-à-vis de l'effet de serre, la situation dépend totalement du type de production d'électricité. En effet les trolleybus consomment 40 % de plus d'énergie fossile qu'un autobus à moteur Diesel si l'électricité est produite thermiquement.

LES NOMBREUSES FILIÈRES DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES

On ne fera pas ici l'exposé des problèmes posés par les diverses filières de véhicules électriques, dont on dis-

tingue une bonne dizaine. On pourra se reporter à [5] pour un exposé d'ensemble sur les diverses filières et à [6] pour les recherches françaises récentes. On ne donnera ici que l'état de l'art en la matière en se concentrant sur trois solutions existant sur le marché : les petits autobus «tout électrique» et les hybrides susceptibles de concurrencer le trolleybus sur certains types de lignes.

Les autobus urbains sont utilisés généralement huit à dix heures par jour, et parcourent 100 à 200 km par jour selon le type de ligne.

L'utilisation d'**autobus «tout électrique»** ne peut donc être envisagée que dans des cas très particuliers, de minibus à faible utilisation. En effet la taille des batteries nécessaires pour fonctionner en «tout électrique» est alors prohibitive, sauf quelques cas de lignes de centre ville (Florence en Italie, Santa Barbara aux USA, Montmartre), ou de parcs d'attraction etc.

La plupart des réalisations connues sont donc des **minibus ou autobus «hybrides monoénergie»**, pouvant fonctionner sur batterie dans le centre et rechargeant les batteries avec le groupe moteur-alternateur sur les portions terminales de la ligne. Certaines réalisations sont fort anciennes comme la flotte de 20 autobus à Stuttgart et Wesel en Allemagne à partir de 1979.

Mais il y a un grand nombre de réalisations très récentes en France, Italie, Allemagne, USA etc. Ce renouveau est dû à plusieurs causes :

- progrès de l'électronique de puissance cités plus haut ;
- recherche récente du «plancher plat» dans les autobus, qui a poussé à créer des transmissions électriques pouvant être utilisées avec un groupe moteur-alternateur sans batterie, ou bien en vrai hybride avec une batterie (sur le marché en Allemagne) ;
- diminution des pollutions locales et zonales en centre-ville.

Des réalisations typiques sont celles d'autobus et minibus par ALTROBUS (IVECO) en Italie. L'autobus de 12 mètres et 85 passagers a les particularités suivantes :

- un moteur Diesel très petit de 2,5 litres, actionnant un alternateur de 30 kW seulement;
- une autonomie de 20 à 25 km en fonctionnement électrique pur sur la batterie électrique au plomb alimentée par cet alternateur;
- un moteur électrique de 128 kW pouvant utiliser l'électricité issue de l'alternateur «et/ou» de la batterie;
- une récupération d'énergie en phase de freinage,

La stratégie choisie permet les deux types de fonctionnement :

- un mode purement électrique, le moteur Diesel étant arrêté, dans le centre ville;
- un mode hybride où le moteur Diesel fonctionne à puissance constante, l'énergie électrique produite servant à charger la batterie et/ou à assurer la traction. Lors des demandes trop importantes de puissance le système de contrôle peut additionner les deux puissances issues de l'alternateur et de la batterie. Cette disposition améliore le rendement en évitant le passage de toute l'électricité par la batterie, et permet de diminuer la puissance du moteur thermique par l'utilisation possible de la somme des deux puissances batterie et moteur.

La dépollution du moteur thermique, opérant toujours à régime constant, est extrêmement facilitée, d'autant plus qu'il s'agit d'un moteur de petite taille, de 2,5 litres, de type

voiture particulière et donc fabriqué en grande série.

Le projet a regroupé un laboratoire universitaire, IVECO pour les moteurs thermiques et les véhicules, une firme spécialisée en traction ferroviaire pour la traction électrique ANSALDO et divers partenaires industriels et exploitants de transports en commun. Il a bénéficié de contrats de recherches de la Communauté Européenne. MERCEDES a des prototypes analogues.

Signalons ici le prototype RVI-ALSTHOM d'autobus à transmission électrique, réalisé début 1998, mais sur lequel on ne dispose pas encore de résultats, notamment sur la façon dont il optimise les émissions polluantes.

LES FLOTTES DE TAXIS ET VÉHICULES LÉGERS

On a des exemples nombreux à l'étranger de flottes très importantes de véhicules légers, notamment de taxis et petits véhicules de livraison, utilisant le G.P.L., le GNV ou l'électricité. Si le véhicule «tout-électrique» est mal adapté à certaines de ces flottes, en cas de forte utilisation (taxis), elles peuvent tous utiliser du gazole additivé de Diester.

Toutes les technologies sont disponibles pour les véhicules légers. Le développement de telles flottes est essentiellement un problème d'incitations financières, ou bien d'imposition comme aux USA.

1. En fait l'addition de Diester diminue surtout l'émission de particules minérales (déjà contenues dans le gazole) et les moins nocives pour la santé. Le taux de soufre du gazole considéré ici est l'ancienne norme abaissée fortement en 1996.

2. Capacité du trolleybus : 93 passagers, capacité de la remorque : 93 passagers, longueur du convoi : 23 mètres. C'est quasi identique à la capacité d'une rame de tramway à deux voitures.

RÉFÉRENCES

Le présent texte s'inspire du Rapport de Claude Birraux [1], à la rédaction duquel l'auteur avait contribué.

- [1] « Sources d'énergie non polluantes pour les transports collectifs », Mission ministérielle de Claude Birraux, député de la Haute Savoie, 15/04/1995.
- [2] « Les transports en 1994 - 32^e Rapport de la commission des comptes des transports », secrétariat OEST.
- [3] « Quelles énergies nouvelles pour l'automobile », P.A. Bernard, TEC N° 119, juillet août 1993.
- [4] « Les énergies nouvelles pour l'automobile », J. Orselli, RTS N° 40, septembre 1993.
- [5] « Énergies nouvelles pour l'automobile », Jean Orselli, 500 pages, Édition Paradigme, 1992.
- [6] « Les systèmes de transport intermédiaires », Alain Muffat, TEC N° 148 juillet août 1998.

REVUE TEC

Pensez à renouveler votre abonnement pour l'année 1999