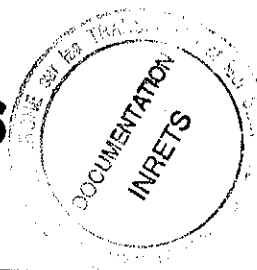


Traction électrique et transports publics



Bertrand DUPONT,
division Technologies nouvelles de l'IRT

Après l'abandon progressif, à partir des années 50, des trolleybus et tramways dans de nombreux réseaux de transport collectif, la situation, stabilisée dans les années 70, tend à se retourner et l'on assiste à un renouveau de la traction électrique, tant en France qu'à l'étranger.

Parmi les nombreux systèmes nouvellement développés, deux types font appel à l'utilisation de batteries d'accumulateurs comme source d'énergie autonome : ce sont le trolleybus bi-mode électrique et l'autobus électrique.

L'auteur présente ces deux catégories de matériel, les compare à leurs équivalents thermiques et conclut que l'utilisation de batteries de traction dans les transports urbains est parfaitement réaliste. Dans cette optique il est tout aussi réaliste de penser que cette utilisation se développera dans les années à venir.

Renouveau de la traction électrique

De nombreux arguments militent en faveur de la traction électrique. Ils se situent à différents niveaux :

— **Pour l'usager** : l'importante réduction du niveau sonore, le contrôle des « jerks », la continuité de l'accélération et la limitation des vibrations (surtout à l'arrêt) concourent à procurer un réel confort à l'usager.

— **Pour le riverain** : l'absence de bruit et de pollution est particulièrement sensible dans les zones piétons autorisées. Et dans l'état actuel de la technique, elle compense largement l'intrusion visuelle occasionnée par les lignes aériennes pour laquelle le phénomène d'accoutumance intervient rapidement.

— **Pour l'exploitant** : la longévité du matériel, les économies réalisées en coût d'entretien et en coût énergétique doivent permettre d'équilibrer les surcoûts d'investissement. De plus, l'adoption de la traction électrique facilite l'insertion d'axes lourds en centre-ville et rend plus aisée la pénétration des transports collectifs dans les zones piétonnes.

— **Pour la collectivité** : bien que son effet ne puisse être limité, l'adoption de la traction électrique contribue au très important effort national destiné à limiter les importations pétrolières.

Ces différents avantages doi-

vent bien évidemment être modulés en fonction des systèmes impliqués et en ce sens il faut distinguer les deux grandes catégories de matériels que sont les systèmes guidés et les systèmes routiers. A l'exception des autobus guidés étudiés depuis plusieurs années en Allemagne Fédérale et en exploitation commerciale à Essen, tous les systèmes guidés utilisent la traction électrique. Le guidage implique en effet une infrastructure sur laquelle il est aisé de greffer un dispositif de captage de courant.

Du métro au tramway en passant par les modes nouveaux, un grand nombre de solutions ont

été adoptées qui laissent malgré tout la part belle au moteur à courant continu commandé par hacheur.

Dans ces conditions, les avantages de la traction électrique ne constituent qu'un argument supplémentaire à l'adoption de tel ou tel système et non un critère de choix déterminant.

A l'inverse pour les systèmes routiers, qu'ils soient trolleybus ou autobus électriques, les avantages énumérés ci-dessus prennent tout leur poids dans la mesure où les caisses et l'usage qui est fait des véhicules sont directement comparables à leurs équivalents thermiques.

Le trolleybus bi-mode électrique en essai (perches repliées) sur la piste électrifiée de RVI à Vénissieux.



Le trolleybus bi-mode électrique

Constituant une des filières des modes nouveaux, au même titre qu'ARAMIS, le VAL et POMA 2000, le bi-mode disposait à l'origine de la double bi-modalité : guidage et captage en site propre, conduite manuelle et traction autonome en site banal.

Un programme de développement était lancé par la direction des Transports terrestres, dont le suivi technique était confié à l'Institut de recherche des transports. Les trois industriels concernés sont la TREGIE du groupe Renault, TCO et SAFT.

Malgré les résultats satisfaisants d'un système de guidage mécanique réalisé en 1976 sur la base d'un SC10, des conclusions d'études économiques ont conduit à abandonner le principe du guidage, le rabattement d'autobus sur la ligne de tramway s'était en effet avéré plus intéressant.

Il subsistait, néanmoins, la bi-modalité, limitée à la motorisation qui permet entre autre :

- de supprimer les lignes aériennes là où elles sont indésirables : en centre-ville et lors de la traversée de sites classés ; en périphérie, là où le trafic est insuffisant pour justifier leur investissement ; au dépôt enfin,
- de donner de la flexibilité au trolleybus en cas de travaux ou d'accident de circulation sur la ligne,
- de maintenir le service, pendant environ une heure, en cas de coupure d'alimentation électrique (EDF ou sous-stations),
- de disposer de la traction électrique pendant tout le temps de roulage du véhicule et donc d'offrir le même niveau de confort en captage et en autonomie.

Les batteries

Pour assurer l'autonomie électrique au véhicule, deux types de batteries étaient disponibles *. Ils conduisent à deux types d'exploitation différents :

- Les batteries au Plomb dont la faible puissance massique oblige à une recharge lente donc extérieure au véhicule (échange de batteries, plusieurs jeux de batteries par véhicule).
- Les batteries Cadmium-Nickel qui acceptent des régimes de charge et de décharge élevés et permettent donc la recharge en ligne.

Les deux courbes des figures 1

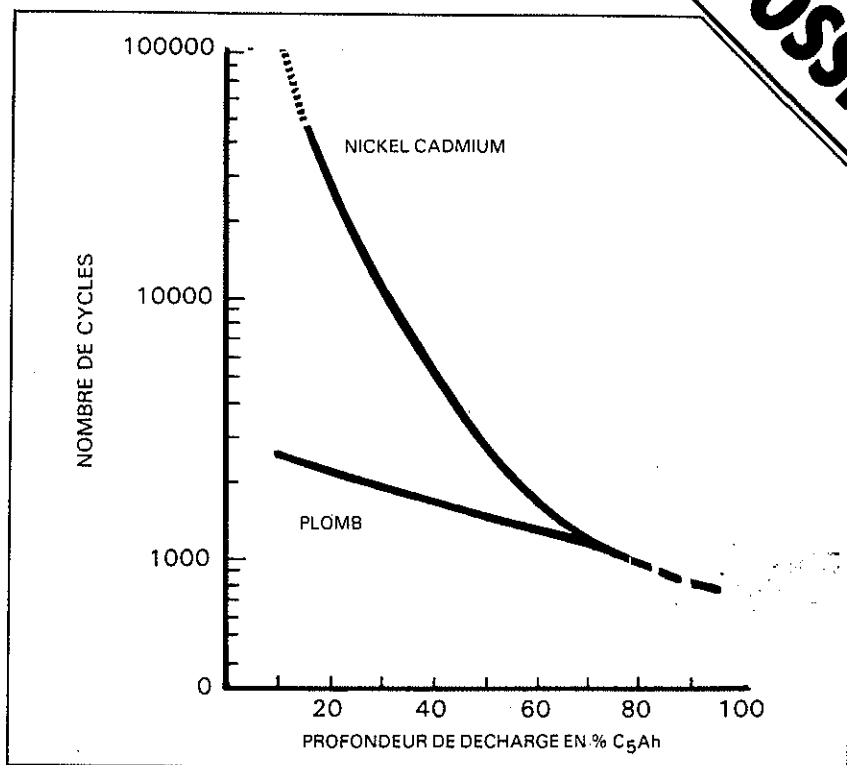
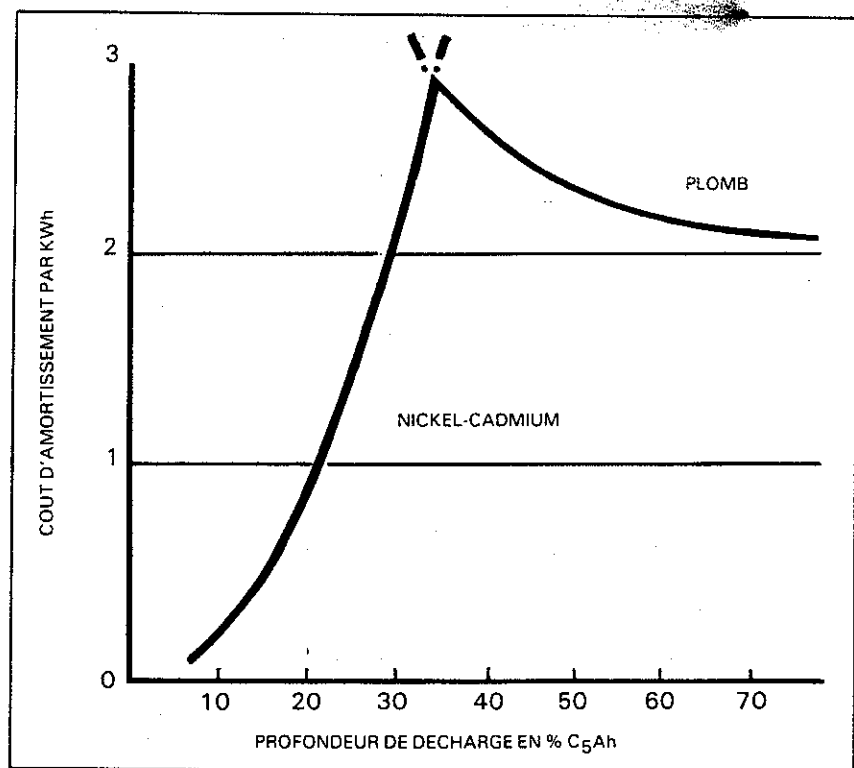


Figure 1 : Durée de vie des batteries en fonction de la profondeur de décharge (source : SAFT)

Figure 2 : Coût d'amortissement des batteries de même puissance en fonction de la profondeur de décharge (source : SAFT)



et 2 montrent pourquoi le Cadmium-Nickel a été retenu. En limitant la profondeur de décharge des batteries, on augmente considérablement leur durée de vie, ce qui conduit à un équilibre économique entre les deux couples électrochimiques pour une profondeur de décharge de 30 %.

En dimensionnant les batteries

de telle manière que 5 km d'autonomie correspondent environ à une profondeur de décharge de 20 %, on assure un bilan économique positif et une facilité d'exploitation (aucune manipulation de batterie n'est nécessaire).

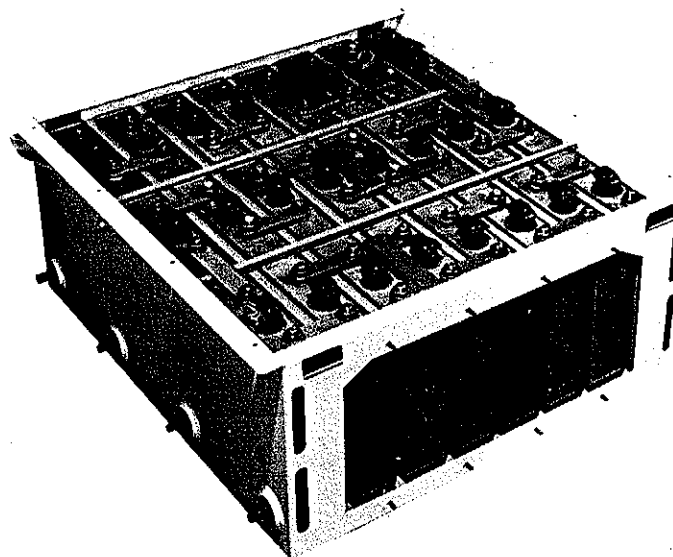
* (Les accumulateurs tels que les volants d'inertie ne pouvaient être envisagés à l'époque).

dent à un fonctionnement normal des auxiliaires à l'exception du chauffage non branché.

— **La recharge des batteries :** Quatre itinéraires ont été parcourus pendant ces deux mois. On a pu noter une grande disparité sur les distances nécessaires à la recharge des batteries suivant la tension ligne elle-même liée à la puissance installée et la fréquentation des sections d'alimentation traversées.

En effet, si la tension nominale de la batterie est de 400 V, la tension de fin de charge avoisine 500 V. Avec les chutes de tension dans le hacheur, sitôt que la tension ligne descend en-dessous de 550 V, le régime de charge devient très faible.

Ainsi, suivant les cas, la distance de recharge est comprise entre 70 % et 150 % de la distance d'autonomie.



14 coffres identiques à celui-ci constituent la batterie du trolleybus bi-mode électrique.

Bi-mode thermique ou bi-mode électrique ?

Le bi-mode thermique a été largement présenté dans ces colonnes à deux reprises**.

On peut tenter d'analyser les avantages des deux formules en précisant qu'il s'agit avant tout de trolleybus et que les avantages de l'une ou l'autre formule de bi-modalité seront essentiellement liés à la configuration du réseau et à l'usage prévu pour les véhicules.

— **Confort :** Le bi-mode électrique présente un confort constant en captage et en autonomie à l'inverse du thermique pour lequel le passage du mode trolley au mode thermique peut être mal perçu.

— **Conduite :** Avec le bi-mode électrique, le passage d'un mode de traction à l'autre se fait automatiquement, instantanément (1/10 seconde) et sans à-coup.

Tous les problèmes liés au démarrage du moteur thermique sont donc supprimés. Un autre avantage de conduite lié à cette automatisation intervient quand le réseau est très chargé : quand la tension ligne tombe en-dessous de 460 V, la batterie prend le relais instantanément, délestant ainsi le réseau. Cette particularité doit permettre de mieux dimen-

sionner la puissance installée et par là de diminuer la prime fixe annuelle.

— **Entretien :** Les batteries nécessitent un entretien périodique. Dans leur configuration actuelle, une remise à niveau de l'électrolyte est nécessaire tous les 5 000 kilomètres environ. Un dispositif de remplissage semi-automatique permet d'effectuer l'opération en moins de deux heures. Dans l'avenir, l'adoption de nouveaux bouchons permettra le remplissage centralisé, avec un minimum d'intervention extérieure. De plus, chaque année, un cycle dit de contrôle immobilise la batterie pendant 48 heures.

Ces interventions ne requièrent pas un niveau de qualification élevé mais nécessitent un local et du matériel spécifique que les réseaux ne possèdent pas à l'inverse du matériel nécessaire à l'entretien et la réparation du moteur thermique.

Situation présente et à venir des bi-modes

Le renouvellement du matériel roulant dans les cinq réseaux français de trolleybus se termine ; 300 trolleybus ER 100 de RVI équipés pour la plupart d'un groupe thermique de secours ont été, ou seront, livrés à Lyon, Grenoble, Saint-Etienne, Marseille et Limoges. Des commandes de trolleybus articulés ont également été passées. Parallèlement, de nouvelles lignes ou extensions ont été réalisées dans ces réseaux.

Le réseau de Nancy s'apprête à

mettre en service avant la fin de l'année, 48 trolleybus bi-modes thermiques de type ER 180. D'autres réseaux pourraient, d'ici peu, suivre l'exemple de Nancy et s'équiper de trolleybus bi-mode, thermique ou électrique.

A l'étranger, de nombreux pays étudient le trolleybus bi-mode.

L'autonomie est le plus souvent assurée par un moteur thermique (bi-bus de Mauri en Italie, Mercedes OE305 et OE305G d'Esslingen en RFA) mais aussi par des batteries au Plomb (Mercedes OE 305 d'Esslingen) ou par volant d'inertie (projet General Electric).

Au niveau européen, une évaluation comparative des différents systèmes en développement constitue l'objectif de l'action de coopération scientifique et technique COST 303. Les conclusions de cette action, qui vient de commencer, devraient être disponibles d'ici deux ans.

L'autobus électrique

Les deux filières

Pour assurer l'autonomie complète à un autobus, les deux formules de batteries Plomb et Cadmium-Nickel sont encore concurrentes. Ici encore, l'utilisation de l'une ou l'autre solution conduit à des contraintes d'exploitation spécifiques.

• **Autobus au Plomb :** Pour assurer son service journalier, l'autobus doit, dans la plupart des cas, disposer de plusieurs jeux de batteries qui seront échangés en cours de journée.

** Voir «Transport public», janvier 1981, page 31 : «Le trolleybus articulé bi-mode thermique de Renault» — et — «Transport public», février 1981, page 37 : «Le trolleybus articulé Heuliez-Bus - MTE».

• **Autobus au Cadmium-Nickel :** La forte puissance massique du Cadmium-Nickel permet le «biberonnage» sans pénaliser la vitesse commerciale : au terminus le véhicule recharge ses batteries en quelques minutes sans qu'aucune manipulation ne soit nécessaire.

Réalisation et projets en France

Ces deux filières sont actuellement étudiées chez Heuliez et TREGIE. Le véhicule Heuliez, utilise des batteries au Plomb et est présenté dans l'article page 34.

Pour sa part, le véhicule TREGIE utilisera des batteries Cadmium-Nickel et n'a pas encore donné lieu à la réalisation d'un prototype. Dans les deux cas, il s'agit de minibus de centre-ville.

Il est clair en effet que le surcoût occasionné par l'utilisation de batteries ne peut pas dans le cas d'un véhicule entièrement autonome, être compensé par les coûts d'exploitation. Ainsi la justification de base de ces véhicules réside dans leur caractère non-polluant et à ce titre ils se placent très bien dans la desserte de zones piétonnières par de courtes lignes de centre-ville.

Les caractéristiques comparées des deux véhicules sont présentées dans le tableau 2.

Le choix entre les deux filières

Le choix entre les deux filières dépend du service prévu et est directement lié au rapport de coût entre les deux types de batteries (1 pour le Plomb, 3 pour le Cadmium-Nickel).

— Kilométrage quotidien

Avec les performances actuelles des batteries, qui permettent les autonomies indiquées dans le tableau 1, on peut distinguer trois cas d'exploitation relatifs à trois gammes de kilométrage quotidien parcourus en mode électrique.

• **Inférieur à 60 km** — Ce peut être le cas d'un service limité (véhicule ne circulant que l'après-midi par exemple) ou encore, si le véhicule est bi-mode, d'un service où le fonctionnement électrique est limité à 60 km, le reste du kilométrage quotidien étant parcouru en mode thermique. Alors aucun échange de batterie ne sera nécessaire dans la version Plomb qui s'avérera la plus intéressante. Elle conduira en effet à des coûts d'acquisition nettement inférieurs et à aucune contrainte d'exploitation.

• **Supérieur à 120 km** - Trois jeux de batteries par véhicule seront nécessaires dans la version Plomb ainsi que la mise en circulation d'un véhicule supplémentaire pour compenser le retrait du véhicule effectuant l'échange de batterie. Le choix du Cadmium-Nickel s'impose.

• **Compris entre 60 et 120 km** - Les contraintes d'exploitation liées à chaque formule seront déterminantes. Ce sera essentiellement pour le Plomb la disponibilité d'un local d'échange de batterie aussi proche que possible de la ligne pour éviter des temps morts coûteux. Pour le Cadmium-Nickel ce sera la possibilité d'implanter aux terminus des chargeurs rapides relativement volumineux et pour lesquels le coût du raccordement au réseau moyenne tension EDF peut être important.

— Longueur de la ligne

Plus la distance entre deux points de recharge diminue dans la version Cadmium-Nickel, plus cette formule devient intéressante, (voir courbes des figures 1 et 2). Le point d'équilibre, dans le cas où l'on utilise deux jeux de batteries en version Plomb, se situe autour de 4 kilomètres.

Perspectives

Le marché de ces véhicules est nécessairement limité. Néanmoins, suivant l'exemple de la ville de Tours qui doit recevoir avant la fin de l'année, cinq Coyotte électriques, d'autres réseaux sont ou seront nécessairement intéressés par le minibus électrique.

D'ores et déjà, sont à l'étude des autobus standard électriques, extrapolation directe du Coyotte et de l'ER 20H (bi-modalité et remorque pousseuse en version Plomb, batteries embarquées et biberonnage en version Cadmium-Nickel).

L'apparition de couples électrochimiques possédant une plus grande énergie massique pourrait modifier, à moyen terme, les données du problème.

Le Nickel-Fer, en principe disponible d'ici cinq ans, devrait permettre de doubler l'autonomie par rapport au Plomb, tout en possédant une durée de vie largement supérieure.

Ultérieurement, le Nickel-Zinc permettra d'assurer le service-journée sans échange ni biberonnage mais à un coût certainement plus élevé.

TABLEAU 2
COYOTTE ÉLECTRIQUE HEULIEZ ET ER 20 H TREGIE

	Coyotte électrique HEULIEZ	ER 20 H TREGIE
Longueur	8,31 m (avec remorque)	5,950 m
Rayon de balayage		7 700
Masse à vide	3 980 kg	2 380 kg
P TAC	5 550 kg	3 900 kg
Nombre d'essieux	3	2
Capacité (personnes)	22	19
Caractéristiques moteur	180 V, 25 kW Excitation séparée 4 800 tr/mn maxi	110 V, 18 kW Excitation séparée 3 200 tr/mn maxi
Commande	Hacheur à thyristors	Hacheur à thyristors
Batteries	Plomb 216 V - 135 Ah 1 100 kg	Cadmium-Nickel 110 V - 100 Ah 500 kg
Bi-modalité	Oui Moteur thermique 69 CV	Non
Autonomie	60 km sur batteries	5 km pour PdD* = 20 %
Durée de la recharge	8 heures	3 minutes
Infrastructure	Eventuellement : centre d'échange de batteries	Chargeur rapide de terminus + local batteries au dépôt
Durée de vie des batteries ... (100 km par jour)	2 à 3 ans (2 jeux de batteries par véhicule si les 100 km sont parcourus en mode électrique).	de 3 ans (PdD* = 20 % = 5 km) à 20 ans (PdD* = 10 % = 2,5 km)

* PdD : Profondeur de Décharge

Quels préalables à la réalisation de nouveaux réseaux de tramways ?

Patrice MALTERRE, ingénieur chargé de mission
à la Société centrale d'équipement du territoire - SCET

Si nous devions en deux phrases porter une appréciation sur la politique de développement des transports collectifs menée depuis une douzaine d'années dans les villes françaises de province, nous dirions, en prenant nos risques, qu'elle a donné satisfaction à la clientèle «non-automobile» et qu'elle a assuré à tous les citadins la mobilité répondant aux exigences de la vie actuelle. Nous ajouterions aussitôt qu'elle est restée neutre, c'est-à-dire inopérante, face à la voiture particulière qui s'est attribuée une part prépondérante, et nous reprendrions l'heureuse expression de M. SOULET (1) : le transport en commun reste la prothèse des personnes privées de voiture.

Certes, des exceptions seraient brandies : observons qu'il s'agit soit de grandes métropoles où l'on a investi dans des systèmes en site propre, soit de villes plus petites où l'on a effectivement remis en cause l'affectation de la voirie dans le centre avec un fort développement du réseau de transport public. Ces exceptions fort instructives confirment la règle, illustrée par ces indications que sont le nombre de voyages annuels par habitant (2), le pourcentage d'habitants utilisant réellement l'autobus et le taux de répartition des déplacements entre modes : pour le public de province, un système de transport collectif «tout autobus» n'est pas crédible face à la voiture particulière; il l'est en tant que service social.



La rue principale de Karlsruhe (RFA), où passent toutes les lignes du réseau de tramways, est dévolue aux tramways et aux piétons.

Automobile : la part trop belle

Les inconvénients de la part trop belle faite à l'automobile en milieu urbain sont bien connus, qu'ils soient d'ordre qualitatif (la pression exercée par la voiture sur le centre est incompatible avec son fonctionnement harmonieux) ou quantitatif (l'usage irrationnel de l'espace urbain enchérit le coût de la fonction transports, la croissance rapide des charges d'exploitation du réseau de transports collectifs ne constituant que la part visible de l'iceberg). Ces inconvénients s'entre-tiennent les uns les autres et point n'est besoin d'être grand clerc pour deviner que les seuils «d'insupportabilité» sont proches, même si le répit pétrolier tend à endormir la vigilance. Cantonner le transport public dans un rôle d'excellent service social sera probablement de moins en moins une attitude «porteuse».

Le remède est lui aussi connu : le transport public doit retrouver une qualité de service suffisante pour que l'automobiliste actuel puisse l'utiliser sans péjorer ses conditions de vie et sans régresser dans son statut social. Dans les agglomérations importantes,

ce remède prend la forme du couple «site propre — système à grande capacité» et on sait fort bien que le tramway peut dans bien des cas fournir la bonne réponse.

Qu'il existe sur tout cela un consensus intellectuel, on ne peut en douter : la vogue actuelle du tramway en fait foi. Mais il faut tirer les conséquences logiques de cette analyse et de la nécessité d'une réduction du rôle joué par l'automobile en milieu urbain. Dans le raisonnement il existe des conditions préalables à la maturation des projets de réseaux de tramways, entraînant la prise d'options qui permettent ensuite de surmonter des difficultés à première vue insolubles.

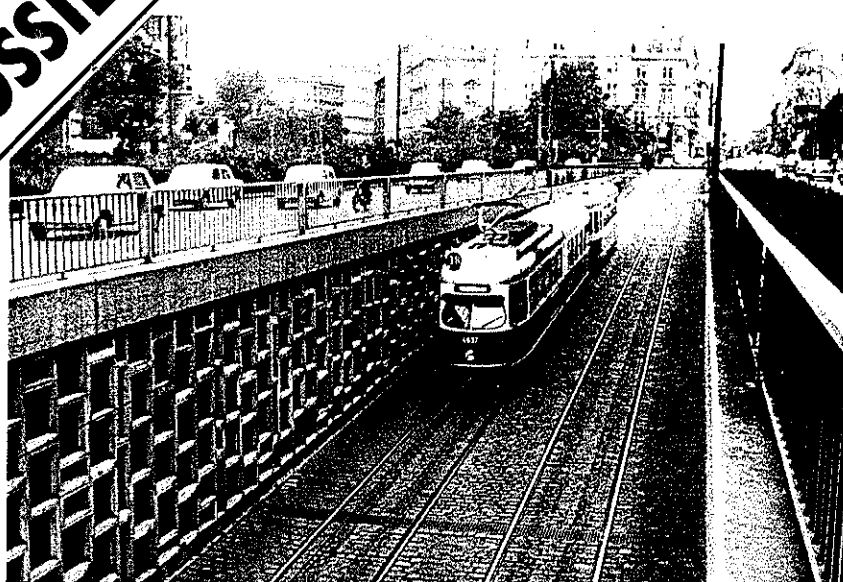
Tramway ? Trois conditions préalables

Nous citerons trois conditions préalables qui nous paraissent fondamentales :

- Souci d'obtenir une très forte augmentation du trafic des transports publics (si l'on s'en réfère aux niveaux observés à l'étranger, l'objectif d'un doublement n'a rien d'irréaliste);
- Implantation du site propre en

(1) «Réflexions sur la politique des transports urbains», *Transport public* N° 786 (septembre 1981) p. 30.

(2) Ce chiffre dépasse rarement 100 dans les agglomérations françaises de plus de 100 000 habitants (moyenne de l'ordre de 90); il atteint 200 dans les agglomérations allemandes équivalentes et 300 dans les villes suisses (400 à Zurich), où cependant le taux de motorisation est identique à celui relevé en France.



La localisation des trémies d'émergence, qui introduisent une coupure dans le tissu urbain de plus de 100 m, n'est pas toujours aussi facile qu'ici à Vienne (Rooseveltplatz).

surface (le plus possible) par remodelage de la voirie;
— Acceptation du principe d'une refonte du réseau d'autobus.

Vouloir vraiment un transfert de clientèle

Le souci d'obtenir une **très forte augmentation du trafic**, première justification de l'investissement consenti, est en effet indissociable de celui de voir réduire le rôle de l'automobile, en particulier en centre-ville. C'est de ce transfert que doit venir la nouvelle clientèle. C'est un moyen d'amorcer le redressement économique des transports collectifs, cette clientèle étant attirée par la qualité du service alors que, dans un passé récent, les gains de trafic ont surtout été obtenus par le développement coûteux d'une prestation non compétitive.

Ce transfert de clientèle est également nécessaire pour soulager le centre de la pression automobile et pour entreprendre un nouvel aménagement urbain reprenant des espaces jusqu'alors attribués à l'automobile. Il est souhaitable que la réalisation du réseau de tramways soit accompagnée de mesures de contrôle du stationnement, où les résidents devraient être favorisés par rapport aux migrants. Convenons qu'il y aurait quelque incohérence à créer un système de transport public efficace et puissant sans corriger quelques errements laxistes en ce domaine.

Site propre de surface et remodelage de la voirie

L'insertion du site propre le plus possible en surface procède

de la même logique. La réduction de la capacité de voirie, souvent opposée à ce principe, n'a rien qui puisse choquer sur des artères radiales puisqu'au total la capacité en personnes transportables croît singulièrement et puisque l'accessibilité du centre est facilitée. De plus, dans la zone la plus centrale, l'implantation du site propre en surface peut mener à la création de rues «piétons + tramways» dont chacun s'accorde à reconnaître la réussite partout où elles existent.

Bien entendu, le souterrain peut tenter. Mais il fait perdre cette opportunité de remodelage — sauf si, comme à Lyon, il est implanté à fleur de sol et surmonté de voies piétonnes. — Son coût est élevé (le rapport entre surface et souterrain varie, selon les cas, de un à trois à un à six) et rien ne garantit la subvention d'Etat couvrant 50 % de l'investissement. Enfin et surtout, le souterrain entraîne une tentation constante d'allonger l'ouvrage pour régler de proche en proche les problèmes d'insertion et de localisation des trémies d'émergence. Cette dérive trouve son aboutissement logique dans la transformation du projet de tramways en un projet de métro... dont les problèmes de financement et d'adaptation aux besoins réels se posent en termes tout différents.

Certes, il se trouvera des cas où, soit en raisons d'obstacles physiques, soit en raison du trafic escompté, cette solution se justifie. S'agissant de villes moyennes, de tramways et non de métros, il faut rester prudent. N'oublions pas qu'il existe d'innombrables variantes d'implantation du site propre,

avec des niveaux de protection bien différents. On peut trouver dans les villes étrangères et maintenant françaises un catalogue de solutions qui fonctionnent à la satisfaction de tous, riverains, piétons, commerçants et entreprises exploitantes.

Etre logique : refondre aussi le réseau d'autobus

Dernier point, la **refonte du réseau d'autobus**. Ordinairement, en province, les autobus des lignes de banlieue pénètrent jusqu'au centre de la ville. — là où veulent aller les voyageurs — où ils font terminus dans des installations en général mal commodes, après avoir parcouru les derniers kilomètres à petite allure en faisant doublon avec les autobus des lignes urbaines. Dans un système «tout autobus», où la correspondance est toujours mal ressentie du public, il n'est guère concevable de s'organiser autrement. Par contre, dans un système «autobus - tramways (ou métro)», dans lequel un site propre permet d'accéder au centre avec des rames à grande capacité, l'intérêt devient grand de rabattre les autobus de banlieue sur le système ferré dans des gares d'échange établies en lisière du centre, et de systématiser cette solution dès lors qu'elle procure un gain de temps au public. Bien entendu, il convient de traiter avec tout le soin nécessaire les questions relatives aux installations de correspondance, à la coordination des horaires et à la structure tarifaire pour que le système soit commode.

Les avantages en sont nombreux. Le voyageur y gagne en confort, régularité et rapidité : les installations de terminus en centre-ville peuvent être abandonnées à fin de réaménagement; et surtout, les moyens libérés par la suppression des tronçons centraux, où l'autobus fonctionnait dans les conditions les plus médiocres, sont réinjectables en périphérie sous forme de navettes courtes et rapides. Les études s'accordent à montrer qu'ici se situe une des principales sources d'économies apportées par la création d'un réseau de tramways.

Par contre, si l'on se contente de plaquer le tramway sur le réseau d'autobus existant, non seulement on se prive de ces économies, mais on utilise mal la capacité de transport du système en site propre et on organise une auto-concurrence dont le résultat peut être une aggravation du

bilan d'exploitation par rapport à la situation antérieure. C'est dire l'importance d'une question dont le bon sens suggère d'ailleurs la solution.

Certes, cette refonte du réseau d'autobus met en cause les habitudes de la clientèle existante et on a pu nourrir des inquiétudes sur ses réactions. C'est ici que l'expérience acquise à Lyon et Marseille, où l'ouverture du métro a été accompagnée d'une systématisation des rabattements, doit être mise à profit. On a vu en effet que la clientèle ancienne a très vite mesuré l'avantage de la nouvelle organisation et n'a nullement manifesté la réserve qu'elle éprouvait envers les correspondances entre autobus.

Quant à la clientèle nouvelle, elle a fait ses comparaisons par rapport à la voiture particulière et non pas par rapport aux anciennes lignes d'autobus qu'elle dédaignait. Cette acceptation du rabattement s'est traduite concrètement par une augmentation extraordinaire — allant jusqu'au doublement — du trafic des lignes d'autobus de banlieue ainsi traitées (3). Il est possible d'affirmer que les recettes de ce succès sont transposables sans difficultés réelles dans d'autres agglomérations.

De l'intention à la réalisation

Tels sont, à notre sens, ces points de passage obligé qui se trouvent sur l'itinéraire de tout

WA

**Imprimerie
WOELFFLÉ
Anzin.**

89, Av. A. France
59410 ANZIN
☎ (27) 43-60-00



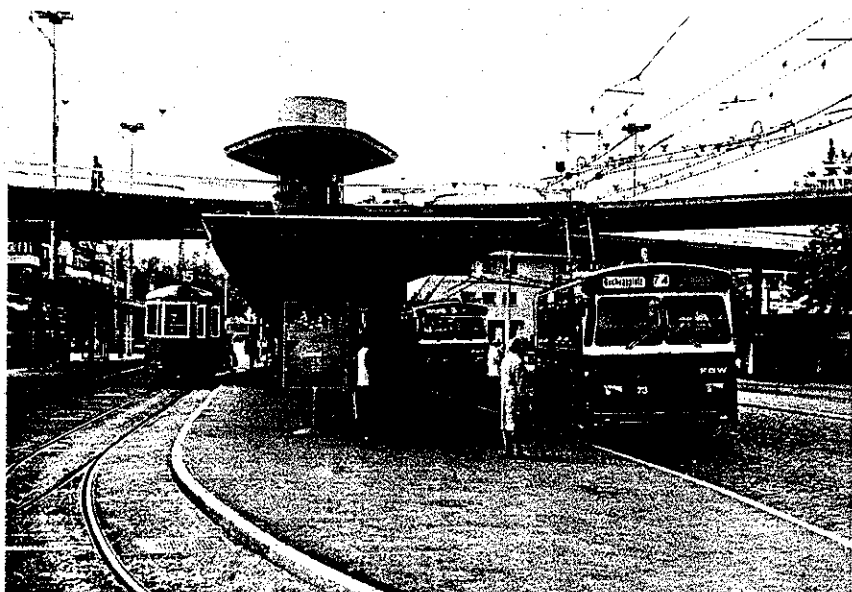
**Spécialiste
des TICKETS
de TRANSPORTS**

Tous les titres de transports.
Toutes les présentations.

projet de tramway entre le stade de l'intention, de la spéculation intellectuelle, et celui de l'étude d'exécution et de la réalisation. Le système a sa logique, qui ne se laisse pas facilement violenter.

Bien évidemment les décisions qui s'y rapportent sont du seul ressort des responsables politiques. Selon la vieille règle, le rôle du technicien est d'informer, d'expliquer, de mettre en lumière des enjeux : nous n'avons pas eu dans cette note d'autre ambition.

L'acceptation de la correspondance « tramway-bus » par le public dépend de la qualité des installations d'échange. Exemple : la Bucheggplatz à Zurich avec des rabattements de trolleybus sur le réseau tramway.



(3) Le trafic des lignes d'autobus desservant Vaulx-en-Velin, Décines et Meyzieu, rabattues sur le terminus Laurent-Bonnevay du métro (ligne A), avait augmenté de 65 % au bout de 6 mois. Il a doublé au bout de 4 ans alors que l'augmentation de la prestation, exprimée en kilométrage roulé, n'a été que de 80 % (augmentation obtenue par redistribution des moyens libérés en centre-ville par le métro). Il est intéressant de comparer les taux d'accroissement du trafic sur ces lignes (voyageurs en correspondance) et celui relevé pour les voyageurs n'utilisant que le métro : par rapport à la situation antérieure on observe un doublement dans les 2 cas, c'est-à-dire que le métro d'une part, et l'organisation métro + bus d'autre part, ont recueilli le même succès. Au total, tous types de trafics confondus, la ligne A transporte 180 000 voyageurs par jour alors que les 2 lignes d'autobus, qui avaient le même itinéraire, n'en transportaient que 30 000 ... (chiffres d'origine TCL).

La traction électrique à Saint-Etienne

Sylvain PERNIN,
directeur de la Société des transports
de l'agglomération stéphanoise - STAS

Le choix du tramway

A Saint-Etienne, comme dans beaucoup d'autres villes françaises, le début du siècle a vu se développer des tramways électriques qui succédaient aux locomotives à vapeur tirant les wagons de voyageurs.

De cette mutation résultèrent de nombreux avantages qui, curieusement, sont encore

aujourd'hui des atouts par rapport à l'autobus diesel :

- absence de pollution,
- diminution du bruit pour les utilisateurs et les riverains,
- amélioration des conditions de conduite pour le personnel.

Ce nouveau mode de propulsion reçut un accueil favorable et acquit « droit de cité » pendant de longues années dans de nombreuses villes et actuellement encore à Saint-Etienne.

Située entre 500 et 650 mètres d'altitude, Saint-Etienne connaît des hivers généralement rigoureux avec d'abondantes chutes de neige.

La ville s'étend en une ellipse allongée sud-nord dont le grand axe est représenté par la Grande Artère en légère pente du nord au sud. De part et d'autre de cet axe, aussi bien à l'est qu'à l'ouest, se rencontrent des collines. Pratiquement toutes sont urbanisées. Les rampes des voies d'accès atteignent 6, 8 et même 12 %. Il en résulte des conditions d'exploitation difficiles aggravées par l'étroitesse des rues dans le centre. Toutes raisons qui ont fait prévaloir le maintien de la traction électrique alors que se dessinait un peu partout ailleurs son déclin devant les contraintes qu'elle impose. En effet, la construction et l'entretien des sous-stations et des lignes aériennes, la maintenance du matériel roulant électrique nécessitent pour l'exploitant la formation d'un personnel très spécialisé.



L'arrivée des trolleybus

Dès 1942, à Saint-Etienne, est mise en service la ligne de trolleybus Raspail-Dorian prolongée en mai 1944 pour devenir la ligne Raspail-Le Soleil (7,5 km AR) qui marque le premier effacement du tramway devant le trolleybus.

Six autres lignes subissent par la suite cette même mutation. Une gare d'échange permettant les correspondances quai à quai entre sept lignes est créée en plein centre-ville sans qu'aucun problème de pollution atmosphérique ne se pose en ce lieu grâce à la très forte proportion de véhicules électrifiés, malgré le passage et l'arrêt de 57 véhicules de transport collectif pendant les demi-heures de pointe.

Au cours des années suivantes, deux prolongements de lignes de trolleybus sont créés tandis que de

nombreux travaux de lignes aériennes sont réalisés pour maintenir le trolleybus et l'adapter aux évolutions de la circulation.

Pendant toute cette période de création puis de maintien de l'exploitation en trolleybus, 80 km de lignes aériennes et trois sous-stations sont construites tandis qu'une quatrième est entièrement renouvelée.

Le maintien du tramway «rajeuni»

En 1955, seule la ligne de la Grande Artère reste exploitée en tramways. Leur gabarit de 2 mètres et le guidage précis que procure la voie ferrée leur permet de desservir dans les deux sens l'hypercentre. Ceci malgré l'étroitesse de la voirie (7,4 m entre trottoirs) et tout en laissant libre une largeur suffisante à l'arrêt des véhicules qui assurent la desserte des commerces riverains, tandis que la circulation générale — qui est à sens unique — se fait en partie sur le site du tramway.

L'attrait de ce mode d'exploitation et les services qu'il rend sont concrétisés par le taux de fréquentation qui sur cette ligne dans les années 1950-1955 est toujours de 22 voyageurs/km.

Aussi la décision de maintenir le tramway s'impose et un matériel nouveau plus rapide, plus silencieux et plus confortable est acquis et mis en service en 1958-1959.

La fréquence du service (2 à 4 minutes dans la journée), la rapidité et la fiabilité de ces tramways, la qualité de leur roulement qui donne l'impression de glisser sur le rail procurent des conditions de transport telles que l'on peut affirmer que ce mode d'exploitation fait aujourd'hui l'unanimité à Saint-Etienne.

Les qualités de ce matériel de construction Franco-Belge du type PCC américain n'ont été altérées ni par le million de kilomètres parcourus par chaque tramway à ce jour, ni par les 15 à 20 millions de voyageurs transportés annuellement.

Seule une cure de rajeunissement esthétique est apparue nécessaire à la STAS (filiale de Transxel qui exploite le réseau depuis le 1^{er} janvier 1981).

De nouvelles teintes et découpes, un habillage intérieur en moquette sur plafond et sur les panneaux inférieurs des baies vitrées, un éclairage diffus disposé en ligne continue à la partie supérieure des longs pans, un habillage en tissu velours rend ces motrices encore plus accueillantes aux voyageurs de



Trolleybus ER 100, Cours Fauriel

cette ligne qui maintenant sur plus de moitié de sa longueur est en couloir réservé ou sur plateforme indépendante.

La modernisation du parc de trolleybus

Les trolleybus bien que postérieurs aux tramways PCC résisteront moins bien à l'épreuve du temps, leur obsolescence nuisait à l'image de marque du réseau et leur renouvellement s'imposait.

Vingt-cinq trolleybus Berliet TCO ER 100, qui conservent le principe de fonctionnement rhéostatique, commencèrent dès 1979 la relève

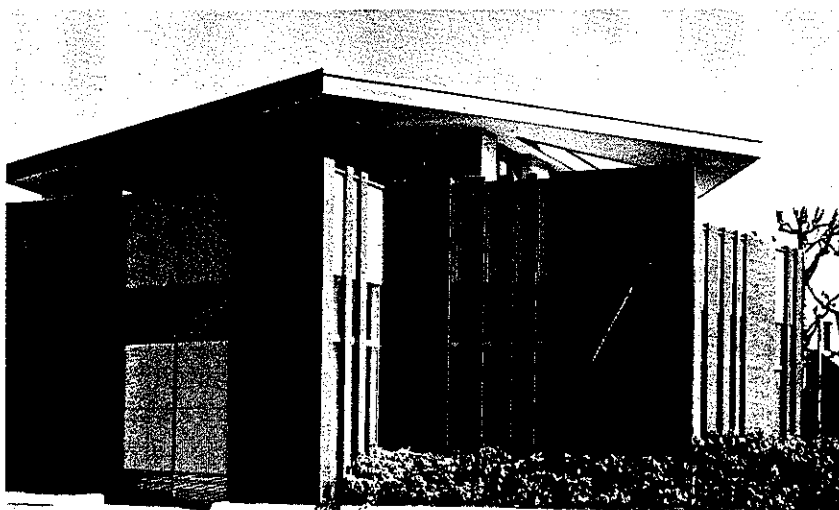
de l'ancien matériel.

Actuellement vingt-cinq autres trolleybus sont progressivement mis en service. Il s'agit de véhicules ER 100 H RVI dont l'équipement électrique est réalisé par Alsthom-Atlantique.

Un hacheur de courant refroidi au fréon procure une économie d'énergie de près de 50 % provenant d'une part de la suppression des pertes pendant les temps de démarrage, d'autre part de la production d'énergie que procure le freinage électrique efficace jusqu'à 2 km/h.

Ces vingt-cinq derniers trolleybus sont de plus équipés d'un groupe d'autonomie diesel électrique autorisant un fonctionnement à performances réduites.

Sous-station Bergson



Tramways + trolleybus = deux tiers des voyageurs transportés

Bien sûr Saint-Etienne possède aussi de nombreuses lignes exploitées en autobus diesel, mais le rôle dominant revient à la traction électrique puisque tramways et trolleybus assurent le transport des deux tiers des usagers de l'ensemble du réseau.

Les améliorations apportées aux tramways depuis 1981, la modernisation du parc trolleybus font déjà sentir leur effet favorable puisque les premiers sondages effectués en 1982 font apparaître une augmentation de fréquentation de 23 % sur le tramway et de 10 % en moyenne sur les trolleybus.

Il faut noter aussi que d'autres facteurs tels que l'adoption du billet horaire ont également contribué à cette augmentation du trafic.

Les résultats encourageants obtenus jusque-là justifient la poursuite de l'effort entrepris.



STAS

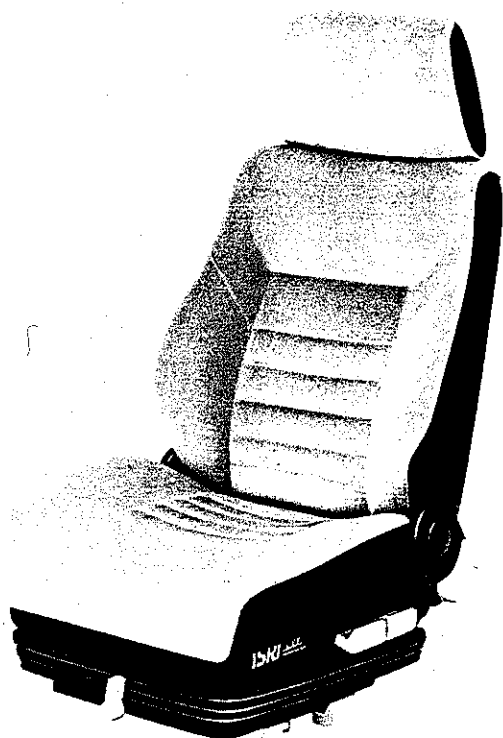
Les projets 1982

Huit trolleybus articulés ER 180 H viendront compléter en fin d'année le parc de trolleybus. Ces véhicules équipés du même moteur diesel que l'autobus seront donc en bimode intégral.

Fin 1982, la perception au sol du type «Suisse» sera instaurée sur la ligne tramway, tandis que début 1983 sera mis en service un prolon-

gement de 3 km AR au-delà du terminus actuel de Bellevue de façon à desservir le quartier de Solaure situé à la limite sud-ouest de la commune.

Lorsque, comme ici à Saint-Etienne, la traction électrique s'adapte, se modernise et s'étend, elle rencontre un accueil très favorable auprès des usagers tout en contribuant grandement à l'amélioration de la qualité de la vie dans la cité.



Type ISRI 6500/515

ISRINGHAUSEN

SIEGES ISRI®

à **SUSPENSION PNEUMATIQUE**
avec réglage automatique
selon le poids du conducteur

ISRI-France S.à r.l.
Merkwiller-Pechelbronn F-67250 Soultz-sous-Forêts
Tél. (88) 80.46.00 · Télex: 870.775

Les consommations d'énergie de traction du métro de Lyon

Jacques PERNOT, chef du service Métro
Société lyonnaise de transports en commun — TCL

Le métro de Lyon a été conçu au début de la décennie 1970-1980, à une époque où les problèmes d'énergie ne se posaient pas avec l'acuité que l'on connaît depuis les deux «chocs pétroliers» que notre pays a dû subir. Malgré cela, un certain nombre de choix techniques ont permis l'intégration au projet d'éléments porteurs d'économies d'énergie substantielles.

Au moment de sa mise en service, diverses publications ont laissé entendre que le métro de Lyon était un gros consommateur d'énergie. Le présent article a pour objet de faire le point sur cette question, compte tenu des résultats acquis sur plus de trois années pleines d'exploitation. Puis, pour donner une plus grande ouverture au problème posé, des précisions seront données sur les progrès enregistrés ainsi que sur les axes de recherche poursuivis en matière d'économie d'énergie.

L'évolution des techniques et des technologies a permis d'intégrer au moment des choix directeurs du projet du métro de Lyon un certain nombre de novations permettant des économies d'énergie substantielles par rapport à un métro conventionnel :

- L'adoption de hacheurs de courant pour la commande des moteurs de traction. Ce dispositif, purement statique, réduit les pertes au moment du démarrage des trains aux seules pertes propres des semi-conducteurs et permet de récupérer une bonne partie de l'énergie cinétique des trains au moment du freinage.

- Le choix de la technologie aluminium pour la construction des caisses de voiture. Ce procédé d'exécution a permis de gagner au moins 1,5 tonne de tare par véhicule et partant d'obtenir une réduction de la consommation spécifique des trains.

- L'implantation de postes redresseurs, de puissance unitaire limitée, a été dictée, entre autres, par le souci de limiter les chutes de tension en ligne sur le réseau de distribution 750 V continu, donc les pertes en ligne.

- L'exploitation s'effectue à tun-

nel éteint dans la mesure où les projecteurs des trains suffisent aux conducteurs pour observer la voie. Ce dispositif d'éclairage n'est activé qu'en cas d'urgence ou de travaux particuliers en tunnel.

- La régulation automatique d'intervalle entre les trains procède de façon classique par variation des paramètres de marche

des trains tels que l'accélération et la vitesse. L'algorithme de régulation consiste à partir de la détection des écarts horaires à opérer une affinité sur le profil de vitesse de base et sur les accélérations au démarrage. Les diagrammes de marche de base — et a fortiori les diagrammes moins tendus — sont déterminés essentiellement par le compromis vitesse commerciale/coût d'énergie de traction. Les diagrammes les plus tendus permettant de compenser les retards comportent toujours une phase de marche sur l'erre.

- Citons enfin, pour mémoire, l'absence totale de dispositifs de chauffage ou de climatisation tant à bord des trains que dans les stations.

Les résultats bruts des années d'exploitation 1979 à 1981

Les consommations facturées au réseau pour l'énergie électri-

Une rame à la Part-Dieu (Ligne B)



que de traction métro* sur les lignes A et B sont celles indiquées au tableau 1.

Compte tenu des distances totales parcourues par l'ensemble du parc, nous pouvons dégager le premier indicateur qui est la consommation spécifique des trains (voir tableau 2).

On notera une stabilité assez remarquable des consommations spécifiques des trains. Cette stabilité masque cependant des écarts en plus et en moins, compte tenu de l'accroissement de la fréquentation du métro et, parallèlement, de l'amélioration des performances en matière de récupération d'énergie de traction.

Analyse des résultats

Pour rapporter les consommations d'énergie de traction au niveau d'activité de transport et au niveau d'utilisation, il est commode de calculer les ratios PKO et

TABLEAU 1
CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE MÉTRO*

	1979	1980	1981
<i>Consommation totale en énergie de traction en millions de kWh</i>	13,333	14,722	16,383
<i>Écarts par rapport à 1979</i>	—	+ 10,4 %	+ 22,9 %

TABLEAU 2
CONSOMMATIONS SPÉCIFIQUES DES TRAINS

	1979	1980	1981	Valeurs 1978 pour le début d'exploitation du métro
<i>Distances totales parcourues en millions de km</i>	1,377	1,506	1,675	—
<i>Consommation spécifique en kWh/train . km C_{st}</i>	9,678	9,775	9,777	10,7
<i>Consommation spécifique en kWh/voiture . km C_{sv}</i>	3,226	3,258	3,259	3,567
<i>Écarts par rapport à 1979</i>	—	+ 1 %	+ 1 %	—

TABLEAU 3
CONSOMMATIONS UNITAIRES PKO ET PKT*

Lignes A & B	1979	1980	1981	Valeurs 1978 pour le début d'exploitation du métro
<i>Distances parcourues en exploitation en millions de km</i>	1,297	1,388	1,636	—
<i>Capacité offerte en millions de PKO (sur la base de 384 places par rame, tous sièges occupés et 4 voyageurs debout au m² de plancher disponible)</i>	498	532	628	—
<i>Cu/PKO en gep/PKO</i>	6,1	6,2	6,1	6,7
<i>Nombre total de voyageurs transportés, en millions</i>	38,087	43,584	51,023	—
<i>Nombre total de voyageurs/km effectués</i>	87,9	116,4	141,8	—
<i>Coefficient de remplissage</i>	17,7 %	21,9 %	22,6 %	16,4 %
<i>Cu/PKT en gep/PKT</i>	34,4	28,1	27,2	41

PKT** exprimés en équivalent énergétique (voir tableau 3).

On remarque, au niveau des consommations unitaires par place/kilomètre offerte, une quasi-stabilité des résultats enregistrés de 1979 à 1981. Il est clair que le ratio considéré dépend essentiellement, lorsqu'on a défini la capacité unitaire des trains dans les conditions standards de confort*** (à Lyon, tous les sièges occupés et pour les voyageurs debout 4 personnes au m² de plancher disponible), de la consommation spécifique du type de matériel roulant et des paramètres d'exploitation donnés par la commande centralisée.

A cet égard, les valeurs enregistrées sur les trois dernières

* Il est utile de préciser que ces consommations réputées de « traction » intègrent la consommation des auxiliaires du train ainsi que les pertes de transformation, redressement et livraison; les comptages sont effectués au niveau livraison EDF en 20 000 volts alternatifs.

** Cu/PKO = consommation unitaire par place/kilomètre offerte
Cu/PKT consommation unitaire par voyageur/kilomètre

années semblent beaucoup plus significatives que la référence 1978; celle-ci reflète, en réalité, une période de mise au point du matériel roulant et de la régulation.

Le ratio exprimant la consommation unitaire par voyageur/km n'a cessé de décroître entre 1979 et 1981 alors que le coefficient de remplissage passait de 18 % à 23 % environ.

La valeur de cet indicateur dépend essentiellement, pour un matériel donné, de l'adaptation de l'offre de transport à la demande : une offre sous-dimensionnée conduira à des consommations unitaires par PKT moindres car la sensibilité de la consommation vis-à-vis de la charge voyageur est faible, la tare des véhicules étant de loin prépondérante.

Ainsi, si le coefficient moyen de remplissage avait été de 30 %, ce qui n'aurait pas manqué de poser de graves problèmes de capacité aux heures de pointe (avec un diagramme de charge journalier équivalent), au lieu de 22,6 % en 1981, cela aurait amené la consommation unitaire par PKT à 20,5 gep/PKT environ, améliorant ainsi ce résultat de 25 %.

Investigations sur la consommation d'énergie des trains

Depuis la mise en service du métro en 1978, nous avons tenu à effectuer chaque année une campagne de mesure pratique des consommations des trains. Nous poursuivons, à cet égard, un triple objectif :

— suivre nos consommations en analysant les écarts d'une année

sur l'autre de façon à réagir en cas de constat d'une dérive anormale,

— déterminer la part d'énergie économisée du fait des choix technologiques initiaux et vérifier ainsi la conformité aux estimations théoriques,

— apprécier la sensibilité de la consommation des trains aux paramètres de marche, plus généralement aux paramètres d'exploitation, ainsi qu'à certains réglages purement techniques.

La dernière campagne, en 1981, a permis de faire un bilan très complet; ses résultats pourraient faire en eux-mêmes l'objet d'un article particulier. Nous nous contenterons pour l'instant d'extraire les éléments qui permettent d'expliquer la structure de la consommation des trains (voir les figures 1 et 2).

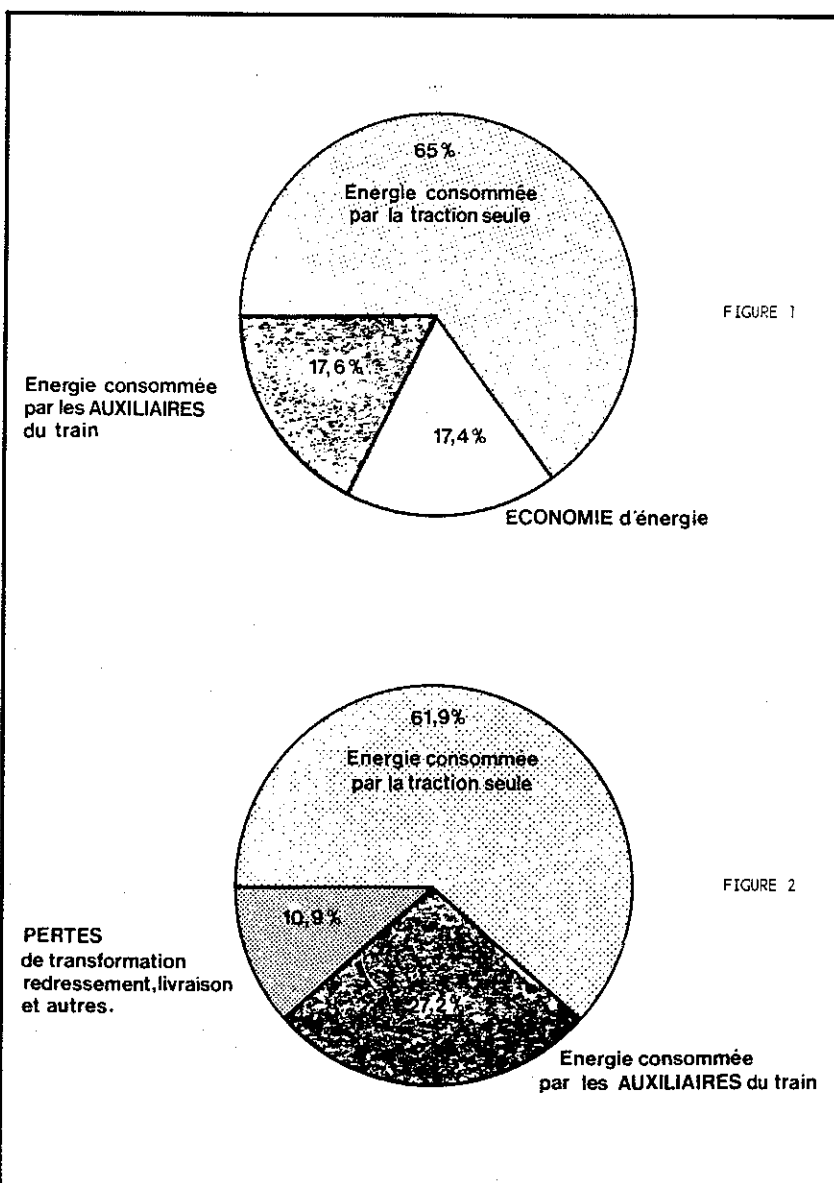
Citons maintenant quelques ordres de grandeur qui permettent de se faire une idée de la corrélation entre les consommations globales vues au niveau de la livraison d'énergie au métro et les consommations intrinsèques du matériel.

Nous avons vu précédemment que les consommations globales moyennes étaient de l'ordre de 9,7 kWh/train-km. Les investigations faites au niveau du train donnent une consommation spécifique moyenne de 8 kWh/train-km.

L'écart relatif est de 17 %; son importance montre bien qu'il est impératif de préciser ses hypothèses, surtout s'il s'agit de compa-

Figure 1 : Economie d'énergie du fait du freinage électrique par récupération

Figure 2 : Part de l'énergie consommée réellement par les trains dans l'énergie livrée au métro à destination des trains



*** NOTA : à cet égard, la comparaison entre les résultats de différents métros peut être complètement faussée si les standards de confort adoptés sont différents. Le fait de passer de 4 voyageurs debout au m² à 6 améliorerait d'environ 23 % la consommation unitaire par PKO.

De ce point de vue toujours, il convient de noter qu'un matériel offrant une densité de sièges élevée est défavorisé. En effet, dans les conditions standards de confort, un voyageur assis occupe une surface au sol sensiblement double de celle occupée par un voyageur debout. Si le pourcentage de voyageurs assis n'était que de 32 % au lieu de 42 % actuellement, la consommation unitaire par PKO serait réduite de plus de 3 %.

raisons entre plusieurs matériels et, a fortiori, plusieurs réseaux.

Cet écart résulte :

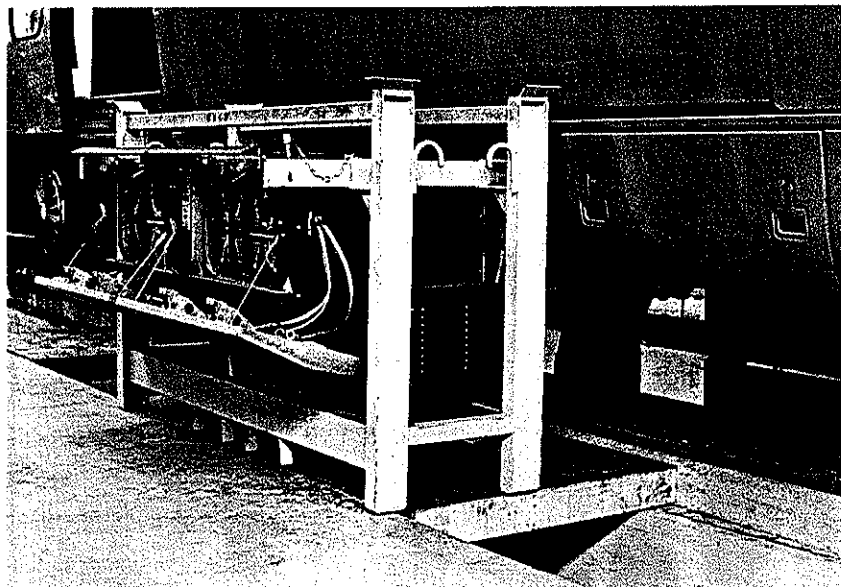
- pour partie, comme on l'a vu précédemment, des pertes totales dissipées dans le réseau d'acquisition, transformation/redressement et livraison d'énergie,

- pour partie, du taux d'utilisation du freinage par récupération qui dépend de la disponibilité technique du frein électrique et de la possibilité effective de récupérer l'énergie, laquelle n'est pas assurée aux heures creuses où les trains sont peu nombreux en ligne,

- pour partie, des sujétions propres à une exploitation de type métro; les trains en dehors de toute exploitation voyageurs consomment de l'énergie par leurs auxiliaires alors que, garés en terminus ou aux ateliers, ils attendent d'être injectés en ligne. Des utilisations occasionnelles, tel que le chauffage électrique des voies et aiguilles aux ateliers, viennent également s'ajouter aux consommations d'énergie non imputables aux trains, sans que l'on puisse pour l'instant les individualiser par comptage.

Perspectives de progrès

La diminution des consommations unitaires d'énergie (par PKO et par PKT) dépend de plusieurs facteurs de progrès :



Un hacheur de traction (1ère génération) déposé sur fosse de visite aux ateliers

- l'amélioration du coefficient de remplissage des voitures qui résulte de l'adaptation entre la capacité de transport offerte compte tenu de l'accroissement du trafic voyageur,

- la diminution des consommations spécifiques de trains qui passera par des étapes successives :

- Accroissement de la disponibilité du frein électrique par récupération (il convient de noter que l'augmentation de la capacité offerte sur une ligne conduit naturellement à un meilleur taux de récupération).

- Réduction des pertes diverses et notamment celles dues aux

stationnements prolongés de trains activés.

- Optimisation des paramètres de marche donnés par la commande centralisée du point de vue énergétique.

- Modifications techniques propres à réduire la consommation spécifique intrinsèque des trains, (rapport entre la vitesse de définition du véhicule et la vitesse effectivement atteinte en ligne), ou à accroître le taux de récupération (report de freinage des véhicules non moteurs sur les véhicules moteurs). Cette catégorie de mesure fait l'objet actuellement d'études technico-économiques propres à nous donner dans le courant de l'année des éléments de choix.

Une rame au terminus Laurent-Bonnevay, de la ligne A



Les résultats obtenus sur trois années pleines d'exploitation montrent, sur le plan énergétique, la justesse des choix faits quant aux options techniques et technologiques de base. Ils démontrent néanmoins que malgré une amélioration sensible obtenue au fil de ces trois années, la recherche d'économie d'énergie est une politique délibérée où l'on doit développer des efforts incessants en fonction d'objectifs nettement délimités et quantifiés. Ceci suppose, au préalable, une analyse fine du système et de sa sensibilité vis-à-vis des paramètres de fonctionnement.