

# Bilan énergétique des trains à grande vitesse (TGV)

Autor(en): **Ousten, J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **75 (1984)**

Heft 18

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-904469>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Bilan énergétique des trains à grande vitesse (TGV)

J. Ousten

Dans tous les modes de transport, la vitesse coûte cher en consommation d'énergie. Comment se fait-il, dans ces conditions, que la réalisation des lignes nouvelles à grande vitesse puisse conduire à d'importantes économies d'énergie et de produits pétroliers pour la collectivité?.. des économies annuelles évaluées à environ 140 000 tonnes de produits pétroliers à l'horizon 1985-1990. Ces résultats seront atteints grâce à la conjonction des principaux éléments suivants: faible consommation unitaire du chemin de fer, diminution de la résistance à l'avancement, raccourcissement des distances par des tracés plus directs, évolution du trafic voyageurs et nouvelle répartition entre les modes de transport (rail, route, avion) et dépendance décroissante de l'énergie électrique vis-à-vis du pétrole.

Bei jeder Art des Verkehrs kostet Geschwindigkeit Energie. Wie ist es dann möglich, dass die Einführung der neuen Hochgeschwindigkeitslinien des TGV zu bedeutenden Einsparungen an Energie und an Erdölprodukten führt? Einsparungen, die für den Zeitraum 1985 bis 1990 auf rund 140 000 Tonnen Erdölprodukte pro Jahr veranschlagt werden können?

Diese Ergebnisse werden durch das Zusammenwirken der folgenden wichtigen Elemente erreicht: geringer spezifischer Energieverbrauch der Bahn, Verminderung der Fahrwiderstände, Verkürzung der Distanzen durch direktere Linienführung, Entwicklung des Reiseverkehrs und neue Aufteilung auf die einzelnen Verkehrsträger (Bahn, Strasse, Flugzeug) sowie abnehmende Abhängigkeit der elektrischen Energie vom Erdöl.

## 1. Consommations unitaires des différents modes de transport

Pour la route, la consommation spécifique moyenne des voitures particulières de milieu de gamme, sur routes et autoroutes, devrait se situer aux environs de 6,5 l/100 km, soit 55 gep<sup>1</sup> au km, en admettant que les progrès technologiques réalisés au cours de la décennie 80 se traduiront par une réduction de 15% de la consommation.

Pour l'avion, les consommations unitaires dépendent de la relation et du type d'avion; elles<sup>2</sup> varient, en tenant compte de 15% de réduction pour progrès techniques à l'horizon 1990, d'un coefficient de remplissage de 65%, de 45 gep/vk<sup>3</sup> (cas de l'Airbus sur Paris-Marseille) à 64 gep/vk (cas du Fokker 27 sur Paris-Lorient ou Paris-La Rochelle ou Paris-Agen, par exemple).

Pour le fer, les consommations unitaires s'établissent, en tenant compte de leur occupation réelle à:

- 12,7 gep/vk pour les trains classiques
- 10,9 gep/vk pour les voyageurs en place assise de 2<sup>e</sup> classe
- 15,9 gep/vk pour les voyageurs en place assise de 1<sup>re</sup> classe en train de jour
- 21,7 gep/vk pour les trains TEE<sup>4</sup>)
- 15,9 gep/vk pour les voyageurs en TGV (13,2 en 2<sup>e</sup> cl., 20,8 en 1<sup>re</sup> cl.)

La figure 1 confirme que le fer est le plus économe en énergie des moyens de transport de voyageurs et fait apparaître en faveur du TGV, par exemple, pour les quantités d'énergie primaire consommée:

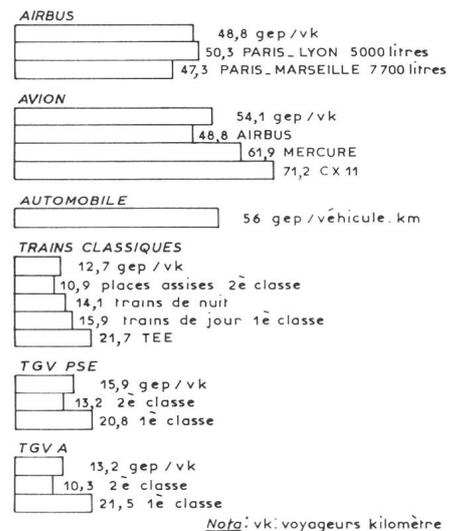


Fig. 1 Axes Paris Sud-Est et Paris-Atlantique  
Consommations unitaires des différents modes de transport (à l'horizon 1985)

- un rapport de 3,4 avec l'avion
- un rapport de 3,5 avec l'auto (1 passager)
- un rapport de 1,7 avec l'auto (2 passagers)

En ce qui concerne les coûts de l'énergie consommée, ces rapports sont, bien entendu, plus élevés, en raison de la nature des énergies réellement consommées: pour l'avion, carburacteur (rapport de l'ordre de 7 actuellement); pour l'auto, de l'essence ou du super (rapport de l'ordre de 5 actuellement); pour le TGV, de l'énergie électrique.

Ce tableau révèle également que la SNCF a relevé le défi qu'elle s'était lancé en étudiant le TGV: d'essayer de construire un train qui ne consomme pas plus d'énergie à 270 km/h qu'un train classique à 200 km/h.

Par voyageur transporté, la consommation d'énergie du TGV est semblable à celle d'un train de jour 1<sup>re</sup> classe et même inférieure à celle d'un

<sup>1</sup>) 1 litre = 850 grammes d'équivalent pétrole (gep)

<sup>2</sup>) source rapport de décembre 1979 du Ministère des Transports

<sup>3</sup>) vk: voyageur kilomètre transporté

<sup>4</sup>) TEE: Trans Europ Express

### Adresse de l'auteur

J. Ousten, SNCF, Direction du Matériel, Département Construction, 15, rue Traversière, Paris 12<sup>e</sup>

train TEE (ancien Mistral auquel il se substitue par exemple).

## 2. Diminution de la résistance à l'avancement

A quels progrès la diminution de la résistance à l'avancement de ces nouvelles rames est-elle due?

De façon générale, la résistance à l'avancement R, en palier et en alignement, est donnée en fonction de la vitesse V, par l'expression:

$$R = A + BV + CV^2$$

Le terme A représente la résistance au roulement des roues et des paliers d'essieux; il est proportionnel à la masse totale de la rame et inversement proportionnel à la racine carrée de la masse par essieu. Alors que dans les solutions classiques, chaque véhicule est porté par 2 bogies, dans la solution originale des TGV, les caisses reposent sur 1 bogie et s'appuient sur la caisse précédente: ainsi les 8 caisses du tronçon articulé du TGV-PSE<sup>5)</sup>, entre motrices, ne comportent que 9 bogies (11 pour les 10 caisses du tronçon TGV-A<sup>6)</sup>. Il en résulte, par rapport à une rame classique, une diminution notable de la masse totale, du nombre de bogies et du nombre des essieux dont la charge reste toujours inférieure à 17 t et à donc, un terme A particulièrement faible.

Le terme CV<sup>2</sup> exprime la résistance de l'air qui résulte:

- de la pression sur la face frontale du véhicule;
- de l'écoulement des filets d'air le long des parois (surface mouillée);
- de la dépression sur la face arrière du train;
- des turbulences dues aux césures entre véhicules, entre voie et dessous de la rame;
- des tourbillons créés par les imperfections aérodynamiques.

La géométrie externe, la continuité de la rame, les formes d'extrémités, le carénage des organes placés sur la toiture ou sous caisse ont été déterminés à partir d'essais très complets, réalisés dans la soufflerie à veine longue de l'Institut Aérotechnique de Saint-Cyr.

<sup>5)</sup> TGV-PSE: TGV Paris Sud-Est empruntant la Ligne Nouvelle n° 1 Paris-Lyon (LN1)

<sup>6)</sup> TGV-A: TGV Atlantique empruntant la Ligne Nouvelle n° 2 Paris-Tours et Paris-Le Mans (LN2)

### Résistance à l'avancement

Tableau I

	Résistance à l'avancement en palier et en alignement (avec vent et conditions atmosphériques standard)
TGV-PSE masse en charge normale: 418 t 386 places offertes longueur: 200 m puissance: 6400 kW	$R_{daN^*)} = 254 + 3,344 V + 0,0572 V^2$
TGV-A masse en charge normale: 483 t 504 places offertes longueur: 237 m puissance: 6400 kW	$R_{daN^*)} = 292 + 3,84 V + 0,0633 V^2$
Rame classique composée de: - 2 locomotives 22 200 - 6 voitures Corail, dont 1 voiture-bar masse en charge normale: 456 t 424 places offertes longueur: 188 m puissance: 2x3800 kW	$R_{daN^*)} = 462 + 3,90 V + 0,0894 V^2$

\*) Résistance en déca-newtons

L'emplacement des bogies entre caisses a permis d'abaisser d'environ 30 cm la toiture par rapport à une rame ordinaire et de réduire maître couple et surface mouillée, de réduire le porte-à-faux habituel des extrémités de voitures, et donc la césure entre caisses et les tourbillons correspondants.

Le terme BV dépend essentiellement de la qualité du guidage des véhicules;

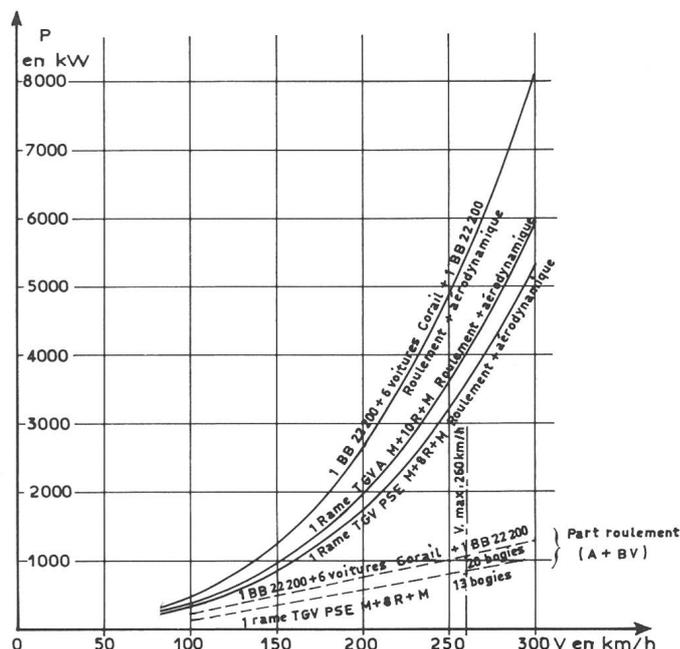
celle-ci est excellente pour le TGV comme l'a montré le record établi le 26 février 1981 à 380 km/h.

Au total, les gains obtenus sur la résistance à l'avancement des TGV par rapport aux rames classiques apparaissent sur les formules en tableau I.

La résistance à l'avancement déterminant la puissance à installer, la figure 2 illustre par exemple que:

Fig. 2  
Puissance nécessaire aux jantes en palier et en alignement

Comparaison d'une rame comprenant 2 locomotives BB 22 200 et 6 voitures Corail (masse de 456 t, longueur 188 m, 424 places offertes) d'une rame TGV PSE - M+8R+M (masse de 418 t, longueur 200 m, 386 places offertes) et d'une rame TGV A - M+10R+M (masse 483 t, longueur 238 m, 504 places offertes)



- pour rouler à la même vitesse une rame classique exige une puissance supérieure de 50% à celle de la rame TGV-PSE (même longueur)
- à consommation d'énergie égale, la rame de voiture Corail ne roulerait qu'à 200 km/h sur la Ligne Nouvelle Paris-Lyon (au lieu de 260 km/h pour le TGV-PSE) et mettrait 30 minutes de plus que le TGV-PSE
- les consommations spécifiques (65% d'occupation) se classent ainsi:
  - pour le TGV-PSE à 260 km/h: 1,9 l de super pour 100 km et par voyageur
  - pour le TGV-A à 270 km/h: 1,5 l de super pour 100 km et par voyageur
  - pour la rame Corail à 200 km/h: 1,4 l de super pour 100 km et par voyageur

A noter que les valeurs plus faibles pour le TGV-A que pour le TGV-PSE résultent d'un profil de ligne moins accidenté, d'une plus grande capacité des rames, et d'améliorations aérodynamiques (l'arrondi frontal de toiture sera un peu différent).

### 3. Raccourcissement des distances

De plus, les distances de parcours entre villes sont sensiblement raccourcies. Les lignes nouvelles acceptant des rampes de 35‰<sup>7)</sup> peuvent s'écarter des vallées et se prêtent à des tracés plus directs, du même ordre que les distances aériennes tenant compte des couloirs aériens.

Le parcours Paris-Lyon par la Ligne Nouvelle n° 1 mesure 426 km (au lieu de 512 par la ligne ancienne, et 460 par autoroute).

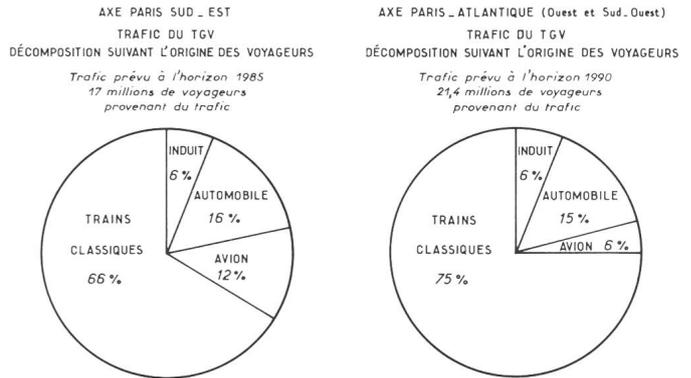
### 4. Evolution du trafic voyageurs sur les axes des lignes nouvelles

Le TGV est un système économe et performant et la qualité du service offert (Paris-Lyon en 2 h 00 au lieu de 3 h 45 antérieurement) amène au fer un trafic nouveau très important:

- trafic reporté des modes classiques (fer, route, avion)
- trafic induit par le TGV lui-même

<sup>7)</sup> 53‰ avec une rame de 10 remorques qui comporterait 6 bogies moteurs (comme le TGV-PSE) avec des moteurs synchrones autopilotés (comme le TGV-A)

**Fig. 3**  
**Trafic du TGV, décomposition suivant l'origine des voyageurs**



Sur lignes Paris Sud-Est (horizon 85), et Atlantique (horizon 1990) les prévisions apparaissent sur les graphiques en figure 3.

Les premières années du service TGV-PSE permettent de penser que ces prévisions se réaliseront effectivement.

### 5. Bilan énergétique des TGV

Les bilans énergétiques ont été calculés par rapport à une situation de référence où les lignes nouvelles n'auraient pas été construites.

L'incidence de reports de trafic du fer classique, de l'avion, de l'automobile, de l'induction de trafic a été analysée par relation, par classe, par matériel...; il a été également tenu compte du progrès susceptible<sup>8)</sup> d'être réalisé par chaque mode concurrent. Les consommations d'énergie ont été évaluées en tep<sup>9)</sup>. Il a été supposé, en pre-

mière approximation, qu'en l'absence de TGV, les dépenses des nouveaux voyageurs constituant le trafic induit auraient été consacrées à l'acquisition de biens et services marchands, autres que ceux ressortissant au secteur «transports», sur la base d'une estimation du contenu énergétique moyen de 1 F de consommation finale des ménages.

Les bilans d'économie en énergie primaire se traduisent en bilans d'économie de produits pétroliers encore plus importants. En effet, le TGV a l'avantage, comme toutes les locomotives électriques<sup>10)</sup> de consommer de l'électricité dont la production peut être réalisée à partir de n'importe quelle source d'énergie primaire.

La part des kWh fournie par le pétrole ne cesse de décroître: en particulier, à l'horizon 85, cette part ne sera que de 37% et, en 1990, de 13%<sup>11)</sup>.

Les bilans d'exploitation, ainsi calculés, des économies d'énergie primaire et des économies de produits pétroliers correspondants sont illustrés dans le tableau II.

<sup>8)</sup> Par rapport aux consommations indiquées dans le rapport de décembre 1979 du Ministère des Transports sur les consommations unitaires dans les transports.

<sup>9)</sup> tep: tonne équivalent pétrole, 1 kWh = 250 gep (grammes équivalent pétrole), coefficient actuel d'équivalence pour l'énergie électrique comptée à l'entrée haute tension des sous-stations et produites dans des centrales thermiques

<sup>10)</sup> Actuellement plus de 80% de l'ensemble du trafic de la SNCF est assuré en traction électrique.

<sup>11)</sup> En tenant compte du contenu moyen en pétrole du kWh de chaque tranche tarifaire, et de l'électricité entièrement d'origine hydraulique produite par la SNCF elle-même.

*Economies d'énergie réalisables grâce au TGV*

Tableau II

	Axe Paris Sud-Est Horizon 85	Axe Paris Atlantique Horizon 90	Total
Economie d'énergie primaire	63 300 tep	~ 20 000 tep	83 000 tep
Economie de produits pétroliers	100 000 t	~ 40 000 t	140 000 t

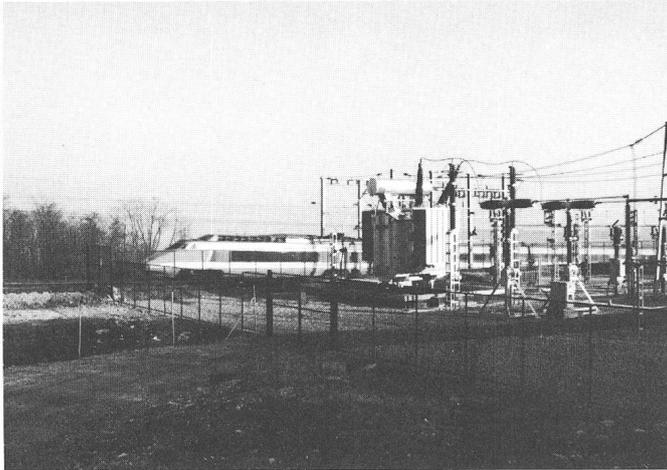


Fig. 4  
Sous-station de Curtil  
sur la nouvelle ligne de  
Paris à Lyon

## 6. Alimentation électrique des lignes nouvelles

Pour les lignes nouvelles, la fourniture de l'énergie correspondant aux trafics et aux consommations unitaires moyennes des rames:

- 18 kWh/rame kilomètre pour les TGV-PSE
- 17 kWh/rame kilomètre pour les TGV-A

mérite d'être évoquée.

Pour alimenter en 25 kV 50 Hz les lignes nouvelles, huit sous-stations ont été installées sur Paris-Lyon (LN n° 1) (fig. 4). Quatre sont prévues sur la Ligne Nouvelle n° 2.

Afin de minimiser les investissements, les sous-stations sont implantées le plus près possible du réseau existant à très haute tension. Par exemple, pour la LN n° 1, la longueur des lignes d'alimentation à construire a pu être limitée à 27 km. Deux intervalles entre sous-stations atteignant 90 km, ce qui est excessif avec le système d'électrification classique, ont été équipés suivant le système dénommé 2x25 kV.

Ce système équipera en totalité la LN n° 2. Rappelons que, si dans une alimentation classique l'enroulement secondaire du transformateur haute tension/25 kV a une extrémité reliée à la caténaire et l'autre au rail utilisé comme conducteur de retour, l'alimentation 2x25 kV comporte un transformateur haute tension/50 kV dont l'enroulement secondaire est relié, d'une part à la caténaire, d'autre part à un feeder implanté sur le support des caténaires, le point milieu étant raccordé au rail. Tous les 15 km environ sont installés des autotransformateurs 50/25 kV dont l'enroulement est connecté entre caténaire et feeder, le point mi-

lieu étant également relié au rail, conformément au schéma de principe en figure 5.

L'intérêt principal est la réduction des chutes de tension en ligne (2 à 3 fois plus faibles que dans le schéma classique), ainsi que de la densité de courant dans les caténaires. En effet, l'énergie est transportée de la sous-station aux autotransformateurs sous 50 kV, ce qui permet de réaliser l'alimentation bilatérale sous 25 kV de chaque circulation, grâce aux deux autotransformateurs encadrants.

Ce schéma a donc permis de réduire le nombre des sous-stations, la longueur des lignes d'alimentation en 225 kV auxquelles les sous-stations sont raccordées. Il faut noter aussi qu'il permet d'atténuer sensiblement les perturbations induites par les courants de traction sur les installations de télécommunications.

Afin que l'alimentation de la charge monophasée à partir du réseau général triphasé ne dépasse pas la limite de déséquilibre fixée par EDF, sur la LN n° 1 par exemple les sous-stations sont raccordées au réseau 225 kV pour obtenir la puissance de court circuit né-

cessaire, permutées circulairement entre les trois paires de phases du réseau; 3 des sous-stations sont, en situation exceptionnelle, sur demande de dispatching EDF, capables d'être commutées pour adopter la marche dite en V (par exemple le secteur Nord de la sous-station est alimenté par un transformateur branché entre phases 1 et 3, l'autre transformateur alimentant le secteur Sud entre phases 2 et 3).

En dehors de ce dernier cas, les transformateurs 225/50 kV, au nombre de 2 par sous-stations pour présenter le maximum de garantie, sont utilisés seuls pour l'alimentation de traction.

D'une façon générale, les solutions, les matériels et les techniques ont été choisis pour, également, réduire au minimum les opérations de maintenance.

## 7. Retombées favorables pour l'économie nationale

Bien que la réalisation d'infrastructures à grande vitesse constitue au départ un investissement consommateur d'énergie, les TGV, grâce aux qualités du chemin de fer, économe en énergie, et aux progrès dont il bénéficie: faible résistance au roulement et à l'avancement, permettent d'établir des bilans énergétiques favorables<sup>12)</sup>, et des réductions de consommations d'énergie primaire, correspondant à des économies annuelles de produits pétroliers de 100 000 t (TGV-PSE) et 40 000 t (TGV-A). L'importance de ces gains est due au fait que les TGV consom-

<sup>12)</sup> Le bilan différentiel a également été établi entre l'énergie dépensée du fait de l'investissement initial (construction de l'infrastructure, du matériel) et celle qu'aurait exigée la réalisation des investissements de capacité en référence.

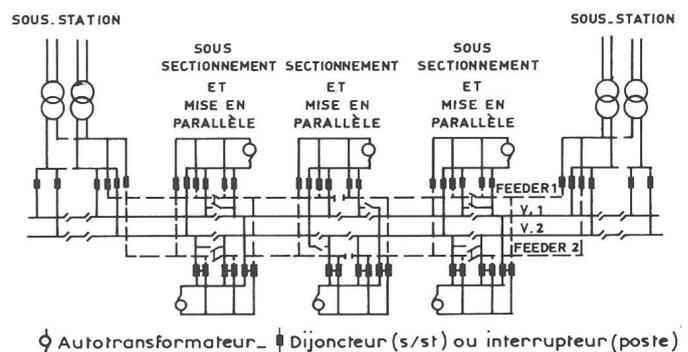


Fig. 5  
Principe de l'alimenta-  
tion 2x25 kV

ment de l'énergie électrique, laquelle nécessite de moins en moins de pétrole.

Si l'on ramène ces chiffres à la consommation globale d'énergie des transports interurbains de personnes entre la région parisienne et le sud-est de la France d'une part, et l'ouest et le sud-ouest d'autre part, cette consommation globale sera réduite respectivement de 18% et 13% en produits pétroliers.

Malgré le contexte économique général, les premiers résultats du TGV-PSE (accroissement de 5 850 000 voyageurs par rapport au trafic sans TGV en 1982) permettent d'être confiant quant à la réalisation des objectifs.

On mesure là, parmi ses multiples

**Fig. 6**  
**Photo TGV-PSE. Rame**  
**tricourant allant en**  
**Suisse**



avantages mis au service du plus grand nombre (vitesse, sécurité...) l'apport du TGV à la politique d'économie d'éner-

gie, et particulièrement de produits pétroliers, dans le secteur des transports (fig. 6).