LA CONSOMMATION D'ENERGIE

DES TRANSPORTS COMBINES

☆
☆ ☆

Analyse de la synthèse du rapport final

préparé par BATTELLE à la demande de l'I.R.U.

U I C
Union internationale des chemins de fer
Secrétariat général
14 rue Jean Rey
75015 PARIS
Tél. : (1) 273.01.20

- S O M M A I R E -

★
★ ★

AVANT-PROPOS

Le livre blanc de l'Union internationale des chemins de fer (UIC), intitulé « **Economie d'énergie : la place du rail** » (Paris, avril 1982) rappelait deux évidences :

– le rail est économe en énergie : à prestations équivalentes, il consomme 2 à 4 fois moins d'énergie que la route (1) ;

– le rail, par l'électrification, est d'ores et déjà largement dégagé de l'emprise du pétrole.

S'agissant d'économiser l'énergie et en particulier le pétrole, il faut donc donner la préférence au chemin de fer, mode de transport sobre en énergie, devant le transport routier, mode de transport relativement plus dispendieux en énergie.

Le **transport combiné** fait appel à la fois à la technique routière et à la technique ferroviaire. Il comprend notamment le transport de conteneurs et de caisses mobiles sur des wagons plats, de semi-remorques routières sur des wagons-poches (technique appelée parfois « **Kangourou** ») et d'ensembles routiers (**camions** et **remorques**) et de véhicules articulés (**tracteurs** et **semi-remorques**) sur des wagons spéciaux à plancher bas (« **chaussée roulante** » ou « **ferroutage** »).

Le transport combiné entraîne par conception le déplacement de tares plus élevées du fait de l'addition, aux tares des véhicules ferroviaires, des tares des conteneurs ou des véhicules routiers.

Partant de ce constat, en automne 1981, l'Union internationale des transports routiers (**IRU**) a choisi ce cas particulier pour mettre en doute la sobriété en énergie du chemin de fer, et a chargé le centre de recherches **BATTELLE** de Genève de comparer les consommations spécifiques d'énergie primaire du transport routier, d'une part, et du transport combiné, d'autre part.

Ce terrain de comparaison est l'une des techniques utilisées par le rail – mais ce n'est pas la seule – pour réaliser le porte à porte. Remarquons d'emblée qu'il s'agit d'un créneau bien particulier du transport ferroviaire ; les transports combinés représentent, par exemple, 10,5 % du trafic de la SNCF (en 1981). Par ailleurs, ces trafics qui sont en plein développement utilisent une pluralité de techniques encore en phase d'évolution ; ils sont donc susceptibles de bénéficier de gains de productivité importants. Ces remarques préliminaires montrent que la zone d'intérêt du travail développé par BATTELLE est limitée.

Le centre de recherche BATTELLE ne disposait pas des méthodes et des données nécessaires dans le domaine ferroviaire. On ne saurait le lui reprocher. BATTELLE s'est donc mis en rapport avec quelques réseaux de chemin de fer. Les Chemins de fer ont offert leur assistance technique. BATTELLE n'a pas utilisé la possibilité qui lui était offerte et a exploré seul un domaine qu'il connaissait mal.

BATTELLE a remis son rapport à l'IRU en mai 1982.

Le but du présent document est de compléter le travail de BATTELLE à la lumière de la connaissance des consommations ferroviaires d'énergie qu'une longue pratique de l'exploitation des réseaux a apportée aux membres de l'UIC. Dans cette démarche, il est apparu que le travail effectué par BATTELLE contenait des erreurs et des distorsions qui renversent le sens des comparaisons.

---

(1). FRYBOURG, A. – Consommations unitaires d'énergie dans les transports – DF, Paris, 1979.
SCHWANHÄUSSER – Spezifischer Energieeinsatz im Verkehr – Technische Hochschule Aachen, 1981.
ROAD RESEARCH LABORATORY, Crowthorne.

1 – METHODOLOGIE

Pour faciliter la compréhension de ces critiques, nous avons choisi de suivre dans la présente note la démarche adoptée par BATTELLE consistant à relier par une relation linéaire le parcours routier **x** aux parcours terminaux routiers, **y** parcours initial et **z** parcours terminal, du transport combiné : $x = A(y + z) + B$. Ces droites d'équilibre séparent le plan en deux régions : du point de vue énergétique, la région supérieure est celle des situations favorables au rail, la région inférieure est celle des situations favorables à la route.

A et B sont fonction des consommations unitaires (route et fer) et des caractéristiques du parcours fer. Cette présentation paraît cependant quelque peu « déformante » ; elle accorde une place prépondérante aux parcours terminaux routiers nécessaires au transport combiné ; d'après les graphiques du rapport BATTELLE, ceux-ci pourraient dépasser plusieurs centaines de kilomètres alors qu'en règle générale ils n'excèdent pas, en pratique, 100 km.

Par ailleurs, nous nous limitons dans la présente note à l'analyse du cas du conteneur 40' (ou caisse mobile de 40' également (1)) et du cas du transport de semi-remorques en wagons-poche (technique « **kangourou** »).

Concernant le cas du « **Ferroutage** » (« **Huckepack** ») (2), plusieurs études de consommations d'énergie sont actuellement disponibles ; en dehors de celle de BATTELLE qui, en sus des imperfections générales soulignées par ailleurs, est rendue peu crédible du fait du choix d'un type de wagon périmé, on peut signaler l'étude du Professeur SCHWANHAUSSER qui aboutit à un résultat favorable au ferroutage dans des conditions usuelles d'utilisation (25 % d'économie d'énergie par rapport au transport routier équivalent). Les calculs effectués par l'UIC dans le cadre des hypothèses générales de cette étude font ressortir un léger désavantage au détriment du ferroutage, de l'ordre de 15 %.

Ce résultat doit être apprécié dans le cadre de ces hypothèses et compte tenu des avantages qu'offre, par ailleurs, le ferroutage au plan de la sécurité et de la réduction des consommations de pétrole.

Le but de la démarche entreprise par BATTELLE est de fournir une méthodologie de choix (en particulier aux Entreprises) entre la technique routière et les techniques ferroviaires sur la base du critère énergie. Il faut garder, toutefois, présent à l'esprit que, pour la quasi-totalité des chargeurs, ce critère à une importance secondaire, le critère déterminant étant, en fait, celui du coût. Indépendamment de cette dernière considération, du point de vue énergétique, il s'agit donc de savoir si, pour **une quantité donnée de marchandises à transporter**, il vaut mieux utiliser, la route ou une technique mixte. Ainsi, dès lors que l'on s'intéresse à un lot de marchandises, les conditions de chargement des techniques concurrentes – en particulier le rapport charge utile/charge totale – sont déterminées (le choix du matériel découle du type et de la quantité de marchandises à transporter).

Il n'y a donc pas lieu, comme le fait BATTELLE, de considérer pour chaque technique la valeur moyenne statistique de la charge utile effectivement observée ; les différences entre ces valeurs reflètent l'état du marché. Introduire une différence à ce niveau constitue **un biais dans le raisonnement.**

Les calculs développés ci-après porteront, à l'inverse de ceux développés par BATTELLE, sur **le seul parcours en charge** ; BATTELLE prend en compte dans son étude des parcours à vide apparemment pour le seul transport combiné, bien que les statistiques routières fassent explicitement ressortir des taux de parcours à vide pour le transport routier longue distance qui ne sont pas négligeables (de l'ordre de 25 %). C'est à nouveau un biais de raisonnement commis par BATTELLE.

---

(1) Nous avons volontairement assimilé le cas de la caisse mobile à celui du conteneur, bien que la caisse mobile, non gerbable, soit de ce fait plus légère.

(2) Technique de Transport combiné consistant à transporter le camion, le véhicule articulé ou l'ensemble routier sur des wagons spécialisés.

La prise en compte des parcours montagneux souffre également dans le document BATTELLE d'imperfections ; BATTELLE a assimilé le parcours en descente à un parcours moyen de plaine, approximation qu'il justifie par la faible longueur de ces parcours. Si cette approximation est licite pour la technique routière, elle est en revanche inacceptable pour la technique ferroviaire qui, grâce à la traction électrique, peut pratiquer le freinage par récupération d'énergie. Cette possibilité de récupérer l'énergie dans les pentes motrices diminue considérablement le surcoût énergétique de la montée ; par ailleurs, le coefficient 1,8 – sur lequel on reviendra par la suite – utilisé par BATTELLE prend en compte l'effet sur la consommation d'énergie du profil moyen du réseau français.

A titre d'hypothèse simplificatrice prudente, on n'a donc pas compté de consommation d'énergie pour les portions en descente des parcours ferroviaires.

1.1 La détermination des consommations d'énergie d'un train

Cette détermination s'appuie sur un modèle interne développé par la SNCF à la demande de l'Administration Française et utilisé par BATTELLE ; le principe de ce modèle est le suivant :

- la consommation d'énergie d'un véhicule en mouvement est liée d'une part à la résistance à l'avancement R de ce véhicule (interaction véhicule-environnement) et aux effets sur la masse de ce véhicule de la pesanteur et de la force d'inertie,

- la part de la consommation d'énergie due à la résistance à l'avancement est l'intégrale de la valeur instantanée de cette résistance le long du parcours : $\int_A^B R dx$,

- pour calculer cette intégrale, il peut être commode de faire le produit du parcours p par la résistance moyenne à l'avancement : $\bar{R} \times p$,

- par convention, on assimile cette résistance moyenne à la résistance à l'avancement calculée pour la vitesse moyenne du train (notée Vm), soit R (Vm),

- l'écart ainsi introduit, plus la somme de tous les autres effets non pris en compte : accélérations, portions de parcours en pentes, aléas divers (conditions atmosphériques, conditions de circulation, conditions de conduite, hétérogénéité du matériel) se retrouvent dans un coefficient majorateur unique pris égal à 1,8,

- ce coefficient majorateur a été déterminé en comparant pour chaque catégorie de train le travail de la résistance R (Vm) avec la consommation d'énergie donnée par les formules statistiques de consommations correspondantes, dont on rappelle un avantage important : elles permettent de retrouver les consommations globales d'énergie de la SNCF,

- ce coefficient subit une dispersion non négligeable autour de 1,8 : les valeurs extrêmes se situent à 1,1, d'une part, et 2,5 d'autre part.

Ce modèle, au prix d'un certain nombre d'approximations licites, permet d'estimer rapidement la consommation d'énergie d'un train dont on fixe : la vitesse, la charge, la nature du matériel ; ce qui représente un progrès par rapport aux formules statistiques habituelles dont les seuls paramètres sont le tonnage et le type de traction à l'intérieur d'une catégorie de trains donnée (1).

...

---

(1) Il convient toutefois de rappeler ici que les chemins de fer disposent, de longue date, de modèles plus précis mais aussi plus lourds à mettre en oeuvre qui peuvent être classés en deux familles : analogique et numérique.

A ce stade, il est important de faire deux remarques :

- la première est fondamentale ; dans ce schéma de calcul, c'est **la vitesse moyenne** des convois qui entre en jeu et non la vitesse maximale. Comme la vitesse intervient dans les formules par son carré, l'impact de cette remarque est considérable. En effet, dans les calculs développés par BATTELLE, pour les parcours de plaine notamment, c'est la vitesse plafond la plus fréquente pour cette catégorie de trains – soit 100 km/h – qui a été utilisée, bien qu'apparemment, BATTELLE ait aperçu la nuance (précisée d'ailleurs explicitement dans les notes internes à l'Administration Française utilisées par BATTELLE) puisque pour les parcours montagneux il fait référence **à une vitesse moyenne de 70 km/h,**

- la seconde est de forme : BATTELLE affirme « qu'il ne lui a pas été possible de recueillir d'une façon satisfaisante, ni dans la littérature spécialisée, ni au cours des interviews auprès des organisations des chemins de fer, des informations sur les valeurs pratiques exactes ... concernant les consommations du transport combiné », **alors que , a contrario, il a pu** « sur la base des résultats des enquêtes auprès des constructeurs de matériel routier et des transporteurs routiers, établir une fourchette de consommations moyennes pour un ensemble routier sur un parcours moyenne/ longue distance ».

De telles affirmations pourraient accréditer **l'idée fausse** que les consommations routières seraient mieux connues que les consommations ferroviaires ; par ailleurs, le modèle de consommation adopté par BATTELLE pour la route ne dépend que du tonnage de l'ensemble articulé, et, il serait intéressant à ce stade de savoir comment la vitesse ou le type de parcours, route/ autoroute, sont pris en compte.

1.2 Le modèle de consommation d'énergie d'un ensemble routier

Bien qu'il existe des études très documentées sur ce sujet émanant d'organismes universitaires, professionnels ou gouvernementaux, on a repris à titre d'hypothèse simplificatrice les formules utilisées par BATTELLE, qui sont apparemment des minorants quasi absolus des consommations routières.

2 – LE CHOIX DES PARAMETRES

On trouvera ci-après les valeurs des paramètres qui entrent dans les calculs ; ainsi qu'il l'a été dit ci-avant, on a considéré une même charge à transporter soit par route, soit en transport combiné. De facon à rendre plus faciles les comparaisons entre les résultats figurant ci-après et les résultats obtenus par BATTELLE, on a repris certaines valeurs utilisées par BATTELLE, même si dans certains cas elles paraissaient assez mal adaptées pour cette étude, comme c'est le cas du chargement du conteneur de 40' ; celui-ci est en effet chargé à 62 % environ de sa capacité, soit 16,2 tonnes.

...

TABLEAU 1

Transport combiné (Tonnes)	Conteneur de 40' ou caisse mobile		Kangourou	
	U I C	BATTELLE	U I C	BATTELLE
Charge utile	16,2	13,2	16,2	13,8
Tare du contenant	4,0	3,8	6,2	6,2
Tare du wagon	12,0	18,0	16,5	16,5
Poids total d'un wagon chargé	32,2	35,0	38,9	36,5
Caractéristiques des transports routiers terminaux				
Poids à vide de la semi-remorque	4,8	4,8	6,2	6,2
Poids du tracteur	7,1	7,1	7,1	7,1
Poids total en charge de l'ensemble articulé	32,1	28,9	29,5	27,1

Pour transporter 1 conteneur de 40', BATTELLE a fait choix d'un wagon, probablement apparenté au wagon Sgs (tare 19,3 tonnes ; longueur 19,7 m) pesant 18 tonnes et mesurant 18 m ; en fait, pour transporter un tel conteneur, dans les conditions de chargement adoptées, le wagon Ks pesant 12 tonnes et mesurant 14 m hors tout suffit (la longueur utile de ce wagon est de 12,5 m).

Les statistiques d'Intercontainer montrent que le ratio d'utilisation de la capacité, mesurée en pieds, de ce type de wagon est de 96 %. Ce qui en justifie amplement l'adoption dans ce cas de figure.

On a établi un tableau analogue pour le transport routier :

...

TABLEAU 2

Transport routier (tonnes)	Conteneur de 40' ou caisse mobile		Semi-remorque « Savoyarde » 38 T (maxicode français)	
	U I C	BATTELLE	U I C	BATTELLE
Charge utile transportée (CU)	16,2	16,2	16,2	19
Tare du conteneur	4	3,8	–	–
Tare de la semi-remorque	4,8	4,8	6,2	6,2
Tare du tracteur	7,1	7,1	7,1	7,1
Poids total roulant (PTR)	32,1	31,9	29,5	32,3
CU/PTR (%)	50,5	50,8	54,9	58,8

Comme il a été dit ci-avant, nous plaçons la comparaison sur le parcours en charge seulement puisque, apparemment, aucun parcours à vide n'a été pris en compte pour le transport routier.

De même que dans l'étude BATTELLE, trois compositions de trains ont été considérées : 800 t, 1 000 t, 1 200 t ; la traction est assurée par des locomotives de type BB de 85 tonnes et de 4 000kW environ (il n'existe pas de locomotives BB de 95 tonnes ; l'hypothèse BATTELLE est dans ce cas également défavorable au chemin de fer).

Le tableau 3 résume la composition des convois ferroviaires.

Concernant la vitesse moyenne des convois ferroviaires, les hypothèses suivantes ont été faites :

– l'acheminement des conteneurs se fait en pratique dans les trains habituels du régime accéléré. La vitesse maximale de ce type de train est de 100 km/h et la vitesse moyenne à prendre en compte de 65 km/h,

– a contrario, l'acheminement des semi-remorques en wagon-poche est réalisé par des trains sensiblement plus rapides, un échantillon de onze relations fait ressortir une vitesse moyenne de 80,9 km/h avec, toutefois, une dispersion importante de 65 à 90 km/h. En définitive, la valeur de 80 km/h a été retenue dans les calculs.

– pour les parcours montagneux, les valeurs sont respectivement de 60 et 70 km/h.

...

TABLEAU 3

COMPOSITION DES CONVOIS FERROVIAIRES

	Tare wagon (tonnes)	Masse totale wagon chargé (tonnes)	Nombre de wagons chargés	Masse des wagons chargés (tonnes)	Masse des wagons vides (tonnes)	Masse totale du convoi (tonnes) (PTR)	Masse de la charge utile transportée (tonnes) (CU)	Rapport CU/PTR %		
								UIC	BATTELLE	VALEUR MAXI-MALE(1)
Conteneur, caisse mobile										
- 800 t	12	32,2	24	773	0	858	389	45,3	32,7	50,2
- 1 000 t	12	32,2	31	998	0	1 083	502	46,4	33,3	50,9
- 1 200 t	12	32,2	37	1 191	0	1 276	599	47	33,9	51,8
«Kangourou» (800 t)	16,5	38,9	20	778	0	863	324	37,5	32,6	46,9

(1) Lorsque le conteneur ou la caisse mobile a une charge maximale compatible avec les réglementations routières et les normes ferroviaires compte tenu du type de wagon adopté. A cet égard la comparaison de cette valeur avec la valeur retenue dans l'étude BATTELLE est très révélatrice des biais de ladite étude.

3 – DETERMINATION DES CONSOMMATIONS SPECIFIQUES PAR TYPE DE TRANSPORT

3.1 Le choix de l'unité

Ces consommations sont exprimées en grammes équivalent-pétrole (gep) ; il faut remarquer toutefois que cette unité est mal adaptée dans la mesure où l'un des modes, la route, est totalement tributaire du pétrole et où l'autre, le rail, peut, à travers l'électricité, utiliser n'importe quelle source d'énergie primaire. Ce point important ne devra pas être perdu de vue dans ce qui suit ; il serait également utile de compléter cette étude par le bilan en produits pétroliers des deux modes de transport sur la base de la structure actuelle (et future) de la production d'électricité.

Par ailleurs, pour être véritablement comparables deux chaînes énergétiques de transport doivent partir de la même source d'énergie et aboutir au même résultat (le transport d'une charge donnée sur un itinéraire déterminé). De ce point de vue, la seule comparaison licite est donc celle des deux chaînes ayant pour origine le fuel lourd et aboutissant au transport soit par la production d'électricité et la traction électrique, soit par la production de gazole et la traction diesel.

Dans ce cas, les coefficients d'équivalence à prendre en compte sont les suivants (entre énergie primaire et l'engin moteur) :

– Traction électrique (fuel-oil)	– Consommation spécifique des centrales au fuel	244	gep
	– Pertes HT (2,5 %)	6,1	gep
	– Pertes sous-stations d'alimentation des caténaires (ρ = 0,97)	7,5	gep
	– Pertes caténaires (ρ = 0,96)	10,3	gep
		267,9	gep, arrondi à 268 gep/kWh
– Traction diesel camion	– Densité du gazole	835	gr/litre
	– Conversion du fuel lourd en gazole ; rendement 0,9	83,5	gep
	– Transport et distribution 3 %	25,1	gep
		943,6	gep/litre arrondi à 944 gep/litre

...

Ce dernier résultat doit être comparé à l'équivalence habituelle supposant une production du gazole à partir d'une distillation traditionnelle du pétrole. La perte d'ensemble (production + distribution) avancée par BATTELLE, de 5,5 % est habituelle. L'équivalence est dans ce cas :

$$835 \times 1{,}055 = 881 \text{ gep/litre}$$

Pour éviter toute contestation, c'est cette dernière valeur que nous avons utilisée.

La référence à d'autres sources de production de l'électricité est à rejeter sans appel ; en premier lieu, la traction routière camion ne pourra pas, d'ici l'horizon 2000, faire appel, de façon significative, à des chaînes charbon (liquéfaction du charbon) ou à des chaînes nucléaires (vecteur hydrogène) ; en second lieu, le rendement des centrales modernes au charbon est très proche de celui des centrales au fuel ; de plus, l'équivalence énergétique de la production électro-nucléaire exprimée en équivalent-pétrole est purement conventionnelle.

Enfin, pour prolonger la présente étude par un bilan pétrolier – ce qui est l'aspect le plus intéressant au niveau européen –, la connaissance des résultats de la chaîne électrique-fuel oil est suffisante. En effet, il suffit d'affecter les résultats précédents du coefficient d'intervention – en moyenne ou à la marge – du fuel oil dans la production d'électricité.

Exemple :

Si un transport routier consomme 25 gep par tkt, et le même transport ferroviaire 15 gep/tkt, le bilan différentiel en énergie primaire est de 10 gep par tkt ;

Si on suppose, qu'à la marge, il y a 50 % de pétrole dans la production électrique, le bilan pétrolier est : 25 – 15 x 0,5 = 17,5 gep par tkt.

3.2 Les consommations spécifiques du transport routier

Elles résultent de l'application des formules proposées par BATTELLE.

Puisqu'on a adopté la même charge en transport routier et en transport ferroviaire, les résultats obtenus ci-après sont applicables aux parcours routiers terminaux du transport combiné.

– Parcours de plaine : $C = 0{,}5\,P + 18{,}5$)
) $P = PTR$ C en litres/100 km
– Parcours de montagne : $C = 3{,}1\,P + 19$)

TABLEAU 4

Type de transport	Poids total de l'ensemble articulé PTR (tonnes)	Charge utile (tonnes)	Consommation spécifique (litres/100 km)	Consommation unitaire : gep/tkt
Conteneur 40' Caisse mobile 40'	32,1	16,2	Plaine : 34,55 Montagne : 118,51	Plaine : 18,79 Montagne : 64,45
Semi-remorque « Savoyarde »	29,5	16,2	Plaine : 33,25 Montagne : 110,45	Plaine : 18,08 Montagne : 60,07

...

3.3 Les consommations spécifiques du transport ferroviaire

Leur calcul résulte du modèle dont le schéma de principe a été exposé ci-avant. La résistance à l'avancement est la somme :

- de la résistance à l'avancement de la locomotive :

$$0{,}65\ P + 13\ n + 0{,}01\ PV + 0{,}03\ V^2 \quad \text{en daN}$$

(P Masse de la locomotive
(n Nombre d'essieux
(V Vitesse

- de la résistance à l'avancement du convoi ; la résistance à l'avancement d'un wagon étant :

. wagon conteneur (assimilé à un wagon couvert)

$$P + (0{,}5\ P + 2L)\ \frac{V}{100} + (101 + 1{,}3L)\ \frac{V^2}{100^2} \quad \text{daN (1)}$$

. wagon kangourou $66 + 0{,}0275\ V^2$ (formule approximative provisoire)

L représente la longueur utile du wagon.

Le tableau 6, ci-après, résume le calcul des consommations unitaires.

3.4 Les dépenses énergétiques relatives aux manutentions dans les terminaux ferroviaires

A défaut de données plus précises, on a utilisé la valeur proposée par BATTELLE à savoir 1 kWh par manoeuvre.

Le tableau 5 indique les consommations unitaires correspondantes ; le coefficient d'équivalence relatif à l'électricité est ici 1 kWh = 250 gep (les pertes dans les sous-stations d'alimentation du réseau et les pertes dans les caténaires ne sont plus à prendre en compte).

TABLEAU 5

Type de transport	Charge utile	Consommation unitaire gep/tonne utile
Conteneur 40' Caisse mobile	16,2	15,43
Kangourou	16,2	15,43

...

(1). BATTELLE a omis le terme constant P dans la formule qu'il a utilisée ; erreur de lecture ou modification volontaire de la formule SNCF ?

TABLEAU 6

CONSOMMATIONS UNITAIRES

	Technique de transport	Résistance à l'avancement de la locomotive daN	Résistance à l'avancement du convoi daN	Résistance totale daN	Energie nécessaire à la jante kWh/train-km	Energie appelée au pantographe kWh/trains x km $\rho = 0,86$ UIC	BATTELLE	Consommation unitaire d'énergie gep/tkt UIC	BATTELLE
PLAINE	Conteneur								
	800 T	289x1,8 = 521	2603x1,8 = 4685	5 206	14,46	16,82	26	11,59	23,63
	1000 T	289x1,8 = 521	3362x1,8 = 6052	6 573	18,26	21,23	31,28	11,33	23,15
	1200 T	289x1,8 = 521	4013x1,8 = 7223	7 744	21,51	25,01	36,58	11,19	22,15
	Kangourou	289x1,8 = 521	4840x1,8 = 8712	9 233	25,65	29,83	35,44	24,67	33,79
MONTAGNE (1)	Conteneur								
	800 T	((425 x 1,8 + ((3385 = 4 099	2378x1,8 + 15163 = 19443	23 542	65,39	76,04	77,96	52,39	70,75
	1000T		3071x1,8 + 19577 = 25105	29 204	81,12	94,33	92,4	50,36	68,38
	1200 T		3666x1,8 + 23363 = 29961	34 060	94,61	110,01	109,53	49,22	66,26
	Kangourou	4 099	4015x1,8 + 15261 = 22488	26587	73,85	85,88	84,84	71,03	74,71

(1) Pour le parcours en montagne on suppose la traction en UM (2 machines identiques) ; on a donc appliqué la formule de résistance à l'avancement pour une machine fictive de 170 tonnes et de 8 essieux , ce calcul a été abondé, pour la locomotive comme pour les convois, d'une force égale à mg sin α où α est la pente moyenne et g l'accélération de la pesanteur (égale à 9,81 et non 10 comme dans le calcul BATTELLE).

3.5 Récapitulation

Le tableau ci-après fournit les consommations spécifiques par type de transport :

TABLEAU 7

Type de transport	Gazole		Centrales Thermiques (Fuel)	
	Parcours plat C1, C2	Parcours montagneux C3	Parcours plat T1	Parcours montagneux T2
Routier (longue distance et dessertes terminales) *gep/t x km*				
. conteneur 40', caisse mobile 40'	18,79	64,45		
. semi-remorque « Savoyarde »	18,08	60,07		
Chemin de Fer *gep/t x km*				
. conteneur 40', caisse mobile 40'				
– 800 T			11,59	52,39
– 1 000 T			11,33	50,36
– 1 200 T			11,19	49,22
. kangourou			24,67	71,03
Manutention dans les chantiers de dessertes terminales *gep/t*			M	
. conteneur 40', caisse mobile 40'			15,43	
. kangourou			15,43	

La comparaison des consommations spécifiques corrigées des transports par chemin de fer, avec les consommations proposées par BATTELLE, fait ressortir les écarts suivants :

. . .

TABLEAU 8

Elément	Symbole	Valeur corrigée A	Valeur indiquée par BATTELLE B	Différence relative $\frac{A - B}{B}$
Parcours plat :	T 1			
Conteneur 40'				
Caisse mobile 40'				
– 800 T		11,59	23,63	– 51 %
– 1 000 T		11,33	23,15	– 51 %
– 1 200 T		11,19	22,15	– 49 %
Kangourou		**24,67**	**33,79**	**– 27 %**
Parcours montagneux :	T 2			
Conteneur 40'				
Caisse mobile 40'				
– 800 T		52,39	70,75	– 26 %
– 1 000 T		50,36	68,38	– 26 %
– 1 200 T		49,22	66,26	– 26 %
Kangourou		**70,51**	**74,71**	**– 6 %**

Dans le cas banal du transport de conteneurs ou de caisses mobiles sur les parcours à profil relativement facile, les choix opérés par BATTELLE ont en fait doublé les consommations spécifiques réelles.

A titre d'illustration, cet écart, pour le cas du train de 1000 tonnes acheminant des conteneurs de 40', en parcours plat, peut s'analyser de la manière suivante, en supposant que le calcul exact est à l'indice 100 (*toutes choses étant égales par ailleurs à chaque stade du calcul par rapport au stade précédent).*

...

	Gep/tk	Indice	% de majoration par rapport au stade précédent
• **CALCUL EXACT**	**11,33**	**100,0**	
. Choix de la locomotive fictive de 95 tonnes et d'un type de wagon mal adapté		117,1	+ 17,1 %
. Incidence du biais introduit dans la quantité de marchandise à transporter		138,7	+ 18,4 %
. Prise en compte d'un taux de parcours à vide de 6 % (pour le transport combiné seul)		144,9	+ 4,5 %
. Mauvaise utilisation du « Modèle SNCF » (modification d'une formule et prise en compte de la vitesse maximale au lieu de la vitesse moyenne)		216,0	+ 49,0 %
. Différentiel entre les coefficients d'équivalence gep/kWh.			- 3,2 %
• **RESULTAT BATTELLE**	**23,15**	**209,0**	

On notera que ces résultats sont amplement confirmés par les mesures qui ont pu être faites ainsi que par les résultats des modèles analogiques et numériques appliqués aux cas considérés ci-avant.

Ainsi, la SNCF cite que sur le trajet PARIS – BORDEAUX, les modèles analogique et numérique évoqués ci-avant indiquent une consommation théorique de 14,5 kWh environ par train x kilomètre à l'entrée HT des sous-stations d'alimentation, pour le train de conteneurs considéré ci-avant (1000 tonnes brutes, 502 tonnes de charge utile), soit 7,2 gep/tkm. Cette dernière valeur de consommation unitaire correspond à de bonnes conditions de circulation. Elle n'est pas en contradiction avec les résultats précédents (au demeurant nettement supérieurs : 11,3 gep/tkm contre 7,2 gep/tkm), qui représentent une valeur statistique moyenne.

Pour illustrer cette valeur moyenne, la SNCF à procédé, sur de grandes relations (PARIS – BORDEAUX, PARIS - TOULOUSE, PARIS – MARSEILLE) à un échantillon de mesures en service normal, c'est-à-dire s'efforçant de refléter la diversité des situations : type de locomotive, charge du train, conditions de circulation, conditions de conduite, etc.

Le tableau ci-dessous indique les moyennes observées et la dispersion autour de celles-ci ; les résultats sont tout à fait conformes à ceux qui résultent des calculs précédents.

...

	Tonnage moyen des trains (tonnes)	Moyenne observée gep/tkm	Valeurs extrêmes de l'échantillon gep/tkm	
			mini	maxi
CONTENEURS	469	11,4	11,3	11,5
KANGOUROU	606	13,9	12,0	17,5

De son côté, la Deutche Bundesbahn a relevé les consommations suivantes, pour des trains de wagons plats chargés de conteneurs, circulant à la vitesse maximum de 80 km/h avec des arrêts espacés de 100 km environ, le parcours étant accompli en temps minimum :

Tonnage brut du train (tonnes)	Consommation d'énergie kWh/Train x km	Consommation unitaire gep/t x km
800	16,4	11,1
1 000	19,5	10,6
1 200	23,1	10,5

Ces résultats sont très proches de ceux de la SNCF ; le faible écart peut s'expliquer notamment par les différences de vitesse plafond et de tonnage.

4 – COMPARAISON ET INTERPRETATION DES RESULTATS

On a repris ci-après les exemples développés par BATTELLE ; pour certains d'entre eux, on a tracé les droites $x = A(y + z) + B$ où x représente le parcours routier et $(y + z)$ les parcours terminaux ; A et B sont fonction du parcours ferroviaire :

– pour les parcours plats $A = \frac{C_2}{C_1} = 1$

$B = (2M + Tf)/C_1$ où les symboles désignent les grandeurs du tableau 7, f étant la distance ferroviaire.

– pour les parcours montagneux $A = \frac{C_2}{C_1} = 1$

$$B = \frac{[2M + T_1 (f - 110) + T_2 \times 55 - C_3 \times 27,5]}{C_1} + 27,5$$

...

Exemple 1

Il s'agit d'un transport de conteneurs sur une distance ferroviaire de 700 km en parcours plat, par des trains de 1 000 tonnes.

Si l'on considère une distance routière de 630 km (qui paraît vraisemblable – le transport fer moins 10 % –), l'équilibre est atteint pour une valeur des parcours terminaux de 208 km.

Si l'on considère des parcours terminaux de 120 km, le taux d'économie s'établit à 14 %.

Si l'on considère des parcours terminaux de 20 km, ce taux est alors de 30 %. Si la distance routière du cas retenu par BATTELLE est effectivement de 920 km, au point d'équilibre déterminé par BATTELLE (soit une distance de 37 km pour les parcours terminaux) correspond en fait une économie de 50 % environ.

Ces diverses remarques sont illustrées sur la figure 1.

Exemple 2

Il s'agit du transport de marchandises diverses soit par semi-remorque soit par technique « Kangourou » en parcours plat.

Le trajet ferroviaire est de 900 km; les parcours terminaux représentent 230 km.

Sur la base des calculs développés précédemment, la distance routière d'équilibre est de 1 460 km.

Ce qui veut dire que, dans ce cas, le calcul ferait ressortir un avantage à la route, si on considère la distance routière vraisemblable de : 900 x 0,9 + 230 = 1 040 km.

(Il faut toutefois rappeler nos réserves : le coefficient 1,8 tient compte de l'hétérogénéité moyenne des convois alors que l'on est ici en présence de convois homogènes ; il tient compte également du profil moyen des parcours par chemin de fer (différent du profil plat) ; enfin, les consommations routières présentées par BATTELLE sont des minorants. Si l'on considère des valeurs plus réalistes publiées, par exemple, dans des études effectuées en France (soit 27 gep/tk), on aboutit à une distance routière d'équilibre de 823 km mettant en évidence une économie de la technique Kangourou par rapport à la technique routière de l'ordre de 20 %. En tout état de cause, le bilan pétrolier, compte tenu de la part du pétrole dans la production d'électricité, est, dans tous les cas, très nettement positif.)

Si on considère, comme le suggère BATTELLE une distance routière de 1 600 km, le bilan est alors favorable au rail qui apporte, par rapport à la route, une économie de 9 %.

La figure 2 illustre ces diverses remarques.

Exemple 3

Il s'agit d'un transport de conteneurs, par trains de 1000 tonnes, sur une distance ferroviaire de 1200 km, avec des parcours terminaux de 120 km.

Le parcours de base est un parcours plat et non un parcours montagneux, comme il est dit dans le document BATTELLE.

Cet exemple apporte peu par rapport à l'exemple 1 ; il fait ressortir des taux d'économie de 45 % si l'on considère la distance routière utilisée par BATTELLE, et de 22 % si l'on considère une distance routière plus réaliste de 1080 km (1).

...

Exemple 1 Transport de conteneurs. Parcours en Plaine
Trains de 800, 1000, 1200 tonnes
Longueur du parcours ferroviaire : 700 km

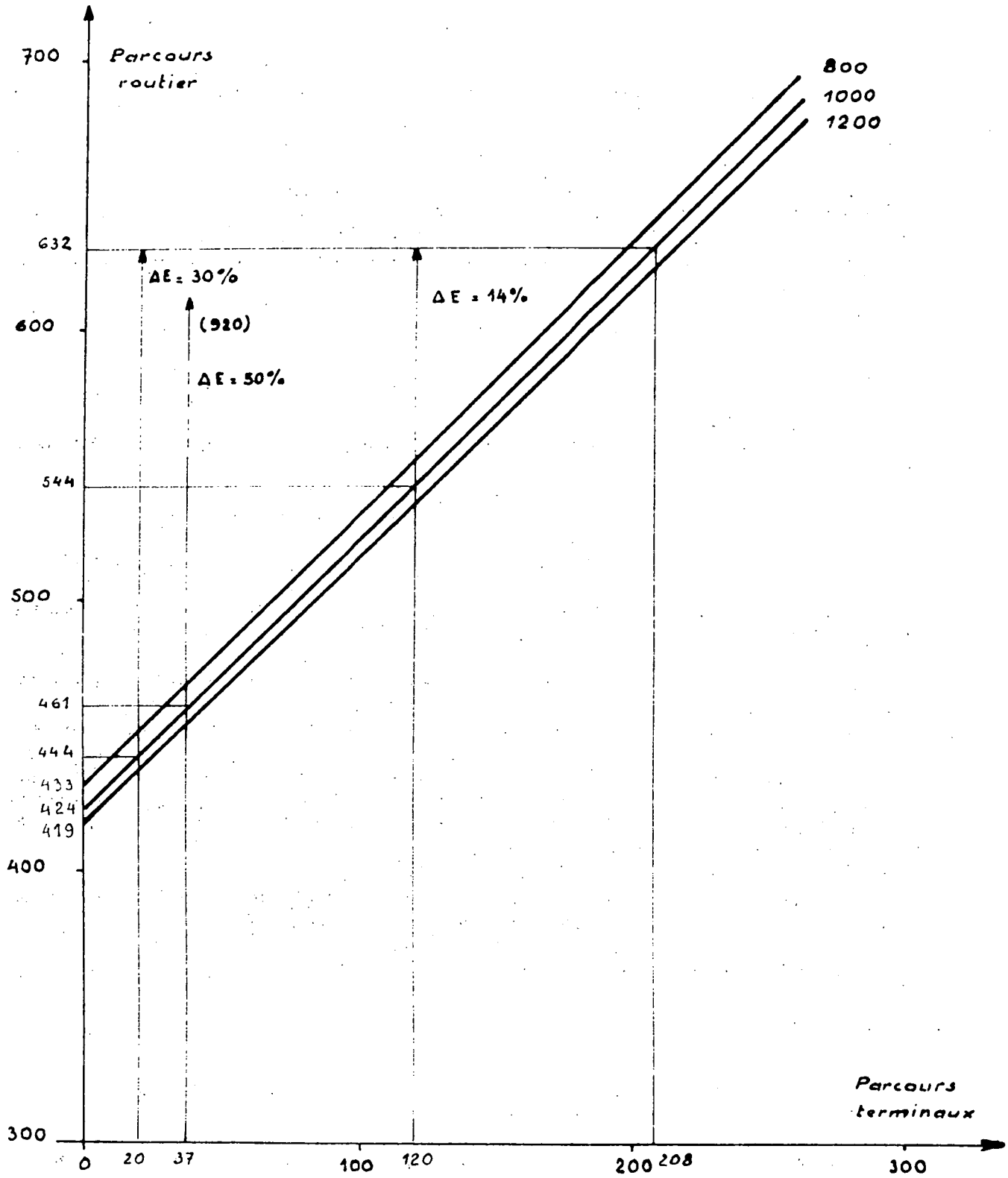

FIGURE 1

Exemple 2 Transport de marchandises diverses par semi-remorques ou technique Kangourou.
Parcours de Plaine et parcours montagneux.
Train de 800 tonnes.
Longueur du trajet ferroviaire : 900 km.

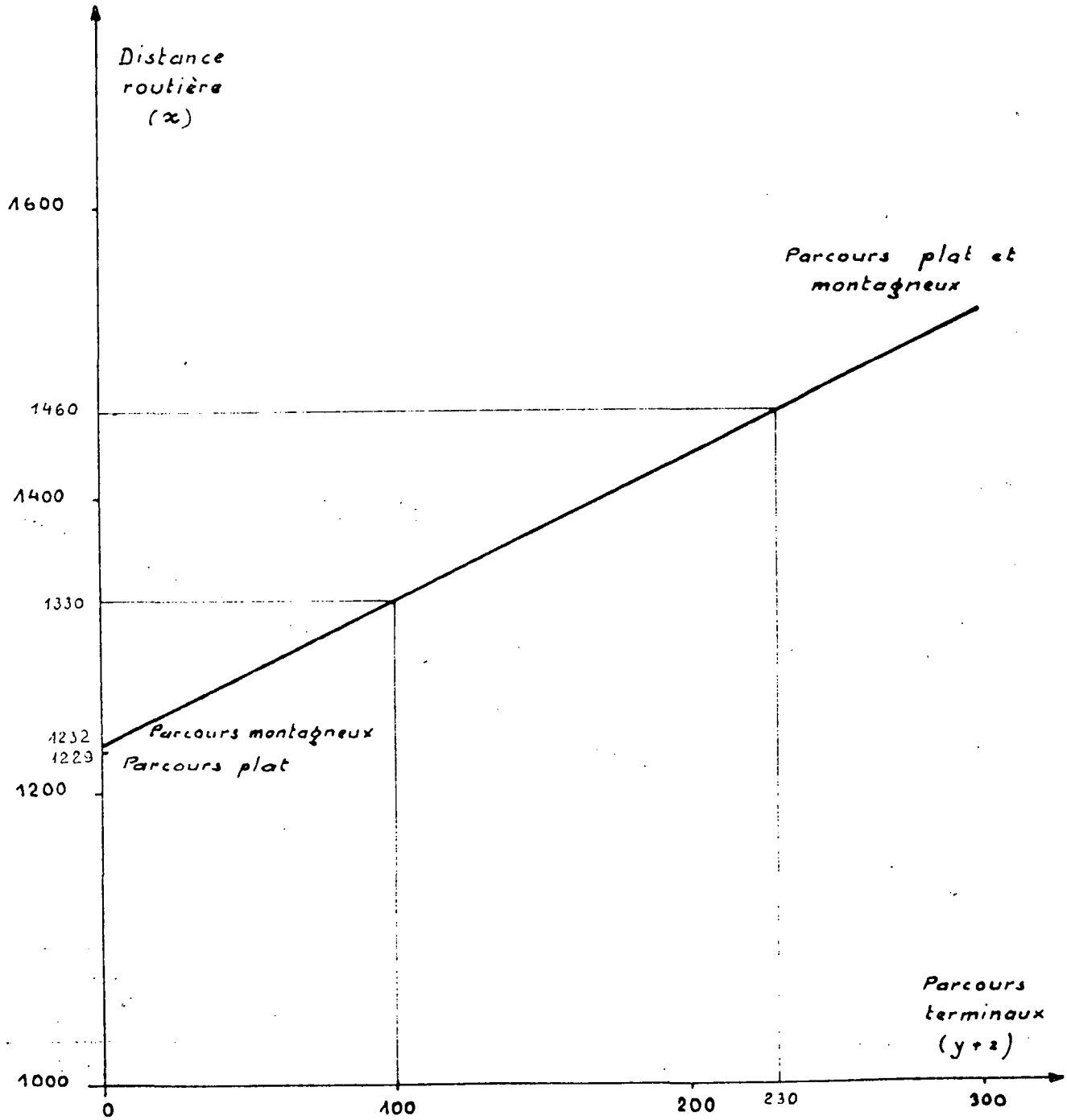

FIGURE 2

Exemple 3 Transport de conteneurs
Parcours plat.
Train de 1000 tonnes.
Longueur du trajet ferroviaire : 1200 km.

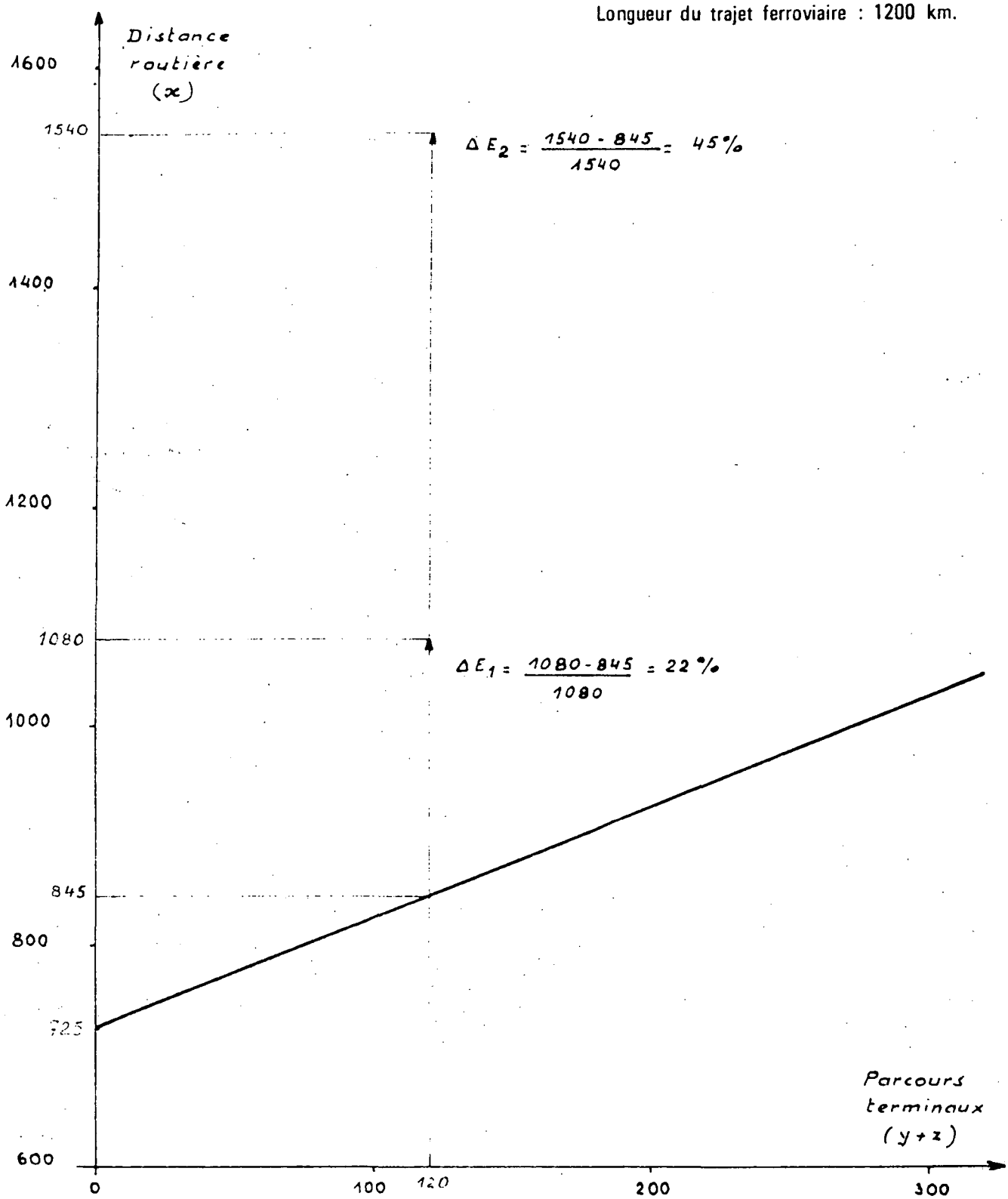

FIGURE 3

Contrairement aux conclusions de BATTELLE, cet exemple est dans ce cas aussi, très favorable au transport combiné.

Les résultats sont illustrés par la figure 3.

Exemple 4

Il s'agit du transport d'un conteneur, en plaine, sur une distance routière de 960 km (1). Le transporteur a trois possibilités pour l'acheminement du conteneur :

– par transport routier *(a)*

– par transport combiné avec :

. soit un parcours ferroviaire de 780 km et une distance totale d'approche de 40 km *(b)*,
. soit un parcours ferroviaire de 680 km et une distance totale d'approche de 150 km *(c)*.

(dans les deux cas, il s'agit d'un train de 1200 tonnes).

Les distances routières d'équilibre s'établissent à :

(b) 506 km
(c) 557 km

Les économies apportées par les solutions *(b)* et *(c)* par rapport à la solution *(a)*, sont de :

(b) $$\frac{960 - 506}{860} = 47\ \%$$

(c) $$\frac{960 - 557}{960} = 42\ \%$$

Les économies résultant des calculs BATTELLE s'établissaient respectivement à 7,9 % et 5,6 %.

Exemple 5

Il s'agit du cas d'une « **grosse société reliée directement avec le réseau ferroviaire** » qui doit transporter des marchandises par conteneurs vers une autre unité de production également embranchée au réseau ferroviaire (**Pourquoi BATTELLE ne choisit-il pas dans ce cas le transport par wagons couverts ordinaires ?**).

La distance routière est de 1 150 km ; la distance ferroviaire de 1 100 km.

La distance routière d'équilibre est de 665 km (*BATTELLE a trouvé 1 380 km*) ; le bilan est favorable au rail avec une économie de :

$$\frac{1\,150 - 665}{1150} = 42\ \%$$

...

(1) *On peut s'étonner, en effet, que sur une relation donnée la distance routière retenue par BATTELLE dans ses divers exemples soit dans la quasi-totalité des cas largement supérieure à la distance ferroviaire.*

CONCLUSIONS

☆ ☆ ☆

Parfois mise en doute, la supériorité énergétique du rail, au plan général, n'a jamais pu être véritablement contestée tant il est vrai qu'elle résulte de la conception même de la technique ferroviaire.

Dans le créneau bien particulier, mais important par son potentiel de développement, des techniques combinées, le fait d'ajouter à la tare du wagon la tare d'un conteneur ou celle d'un véhicule routier est-il de nature à modifier le sens de la conclusion générale précédente ?

Oui, affirme l'Institut BATTELLE sur la base d'une étude commanditée par l'IRU et non concertée avec les chemins de fer.

Ce résultat n'a pas manqué de surprendre les réseaux ferroviaires qui ont acquis une large expérience de leurs consommations d'énergie au triple plan de la connaissance technique, de la modélisation et des statistiques. Forte de cette expérience, l'UIC a décidé d'apporter sa contribution à l'approfondissement de ce problème ; sur la base de la méthodologie développée par BATTELLE, suivie pas à pas, l'UIC a développé sa propre étude en normalisant le choix des paramètres essentiels et en corrigeant les erreurs que comportait, dans l'étude BATTELLE, le calcul des consommations ferroviaires.

Les résultats obtenus sont alors parfaitement conformes aux données expérimentales, aux résultats des simulations et aux thèses qu'a toujours défendues l'UIC au nom de la vérité scientifique.

Ainsi, hormis le cas du ferroutage, il s'avère que la conclusion essentielle de BATTELLE, à savoir : « **Il nous paraît erroné d'affirmer que tel ou tel type de transport a une dépense énergétique inférieure ou supérieure à un autre** » est bel et bien sans fondement. Le transport combiné est, dans l'écrasante majorité des cas, **nettement plus économe en énergie que le transport routier.**

Devant des conclusions aussi divergentes, n'est-il pas souhaitable que BATTELLE et l'UIC procèdent enfin, en commun, à l'examen de ce problème ? Pour sa part, aujourd'hui comme hier, l'UIC y est prête.

☆

☆ ☆